



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

Herstel Grijze duinen door reactiveren kleinschalige dynamiek

Aggenbach, C.; Arens, S.; Fujita, Y.; Kooijman, A.; Neijmeijer, T.; Nijssen, M.; Stuyfzand, P.; van Til, M.; van Boxel, J.; Cammeraat, L.

Publication date

2018

Document Version

Final published version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Aggenbach, C., Arens, S., Fujita, Y., Kooijman, A., Neijmeijer, T., Nijssen, M., Stuyfzand, P., van Til, M., van Boxel, J., & Cammeraat, L. (2018). *Herstel Grijze duinen door reactiveren kleinschalige dynamiek*. VBNE.

General rights

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations

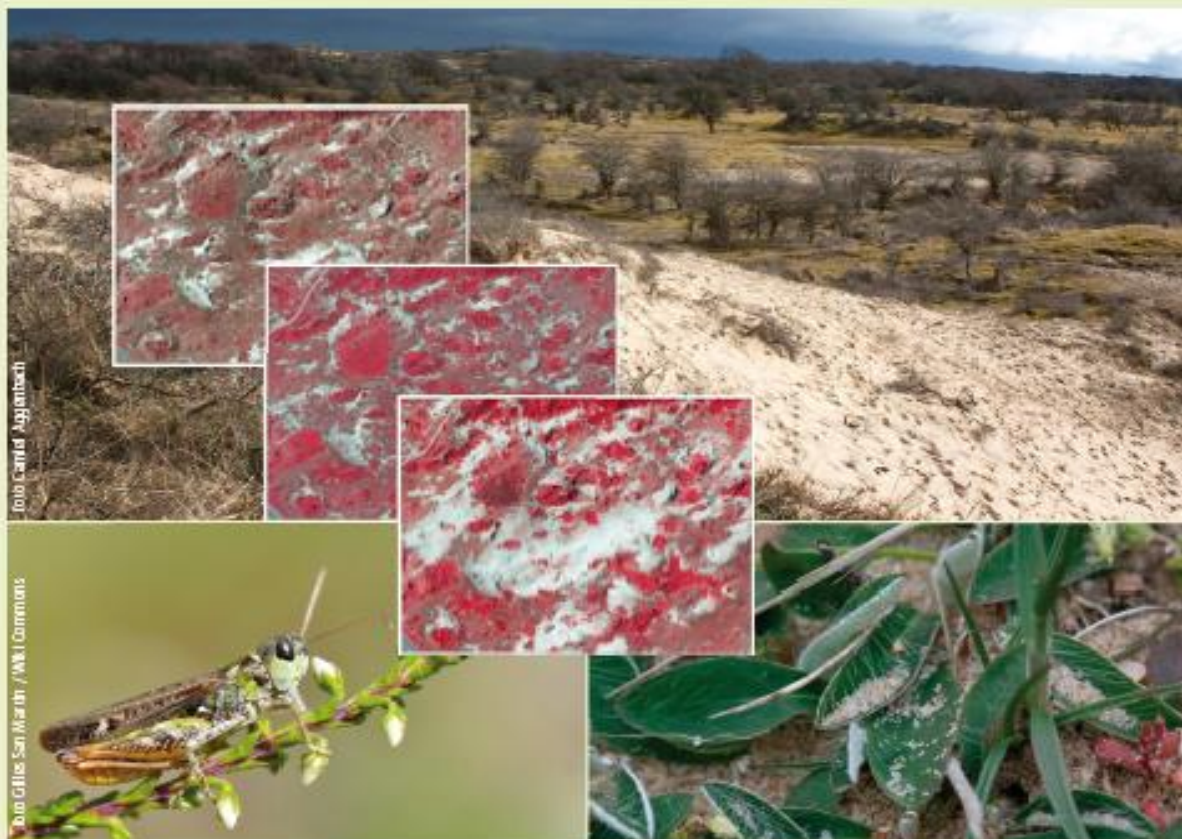
If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn

Kennisnetwerk OBN

Herstel Grijze duinen
door reactiveren
kleinschalige dynamiek



Tobias Carril / Aggenbach

Don Gilles San Martin / WWF Commons

Herstel Grijs duinen door reactiveren kleinschalige dynamiek



KWR



UNIVERSITEIT VAN AMSTERDAM

ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn



provinsje fryslân
provincie fryslân



© 2018 VBNE, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren

Rapport nr. 2018/OBN223-DK
Driebergen, 2018

Deze publicatie is tot stand gekomen met een financiële bijdrage van Bij12, het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, de provincies Zeeland, Zuid-Holland, Noord-holland en Fryslân en het onderzoeksprogramma van de duinwaterbedrijven (DPWE: Evides Waterbedrijf, Dunea Duin & Water, Waternet en PWN Water & Natuur)

Wijze van citeren Aggenbach, C., S. Arens, Y. Fujita, A. Kooijman, T. Neijmeijer, M. Nijssen, P. Stuyfzand, M. van Til, J. van Boxel & L. Cammeraat (2018). Herstel grijze duinen door reactiveren kleinschalige dynamiek. OBN223-DK. VBNE, Driebergen.

Teksten mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Oplage	30 exemplaren
Samenstelling	Drs. C.J.S. Aggenbach (KWR Watercycle Research Institute) Dr S.M. Arens (Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek) Dr. Y. Fujita (KWR Watercycle Research Institute) Dr. A. M. Kooijman (IBED Universiteit van Amsterdam) T. Neijmeijer, MSc (Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek) Drs. M. Nijssen (Stichting Bargerveen) Prof. Dr. P.J. Stuyfzand (KWR en TUD) Ir. M. van Til (Waternet) Dr. ir. J.H. van Boxel (IBED Universiteit van Amsterdam) Dr. L.H. Cammeraat (IBED Universiteit van Amsterdam)
Foto's voorkant	Serie luchtfoto's, foto landschap en gras (Camiel Aggenbach), foto Knopsrietje (Gilles San Martin – Wiki Commons)
Druk	KNNV Uitgeverij/KNNV Publishing
Productie	Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE) Adres : Princenhof Park 7, 3972 NG Driebergen Telefoon : 0343-745250 E-mail : info@vbne.nl

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave

1	Inleiding	18
1.1	Aanleiding	18
1.1.1	Eolische dynamiek in relatie tot behoud en herstel van habitattypen H2130 Grijze duinen	18
1.1.2	Kleinschalige eolische dynamiek in kustduinen	18
1.1.3	Bodemprocessen in Grijze duinen en invloed van kleinschalige eolische dynamiek daarop	19
1.1.4	Interacties van kleinschalige dynamiek met fauna	20
1.2	Doel van het onderzoek	20
1.3	Onderzoeksvragen	21
1.4	Afbakening onderzoek	21
1.5	Combinatie onderzoek van de duinwaterbedrijven	22
2	Aanpak op hoofdlijn	23
3	Kennisbehoefte bij beheerders en provincies	26
3.1	Samenvatting	26
3.2	Aanpak	26
3.3	Resultaten	27
3.4	Conclusies	30
4	Patronen van kleinschalige dynamiek langs de Nederlandse kust	31
4.1	Samenvatting	31
4.2	Inleiding	36
4.3	Methoden	36
4.3.1	Mate van activiteit	36
4.3.2	Aantal stuifkuilen	36
4.3.3	Ontwikkeling in activiteit	36
4.4	Waddeneilanden	38
4.4.1	Texel	38
4.4.2	Vlieland	45
4.4.3	Terschelling	49
4.4.4	Ameland	55
4.4.5	Schiermonnikoog	61
4.5	Hollandse duinen	66
4.5.1	Noordkop en Pettemerduinen	66
4.5.2	Schoorlse Duinen – Egmond	73
4.5.3	Egmond - Wijk aan Zee	79
4.5.4	Zuid-Kennemerland	85
4.5.5	Amsterdamse Waterleiding Duinen – Katwijk	88
4.5.6	Berkheide – Solleveld	94
4.6	Delta	100
4.6.1	Voorne	100
4.6.2	Goeree	105
4.6.3	Schouwen	105
4.6.4	Walcheren	107

4.6.5	Zeeuws-Vlaanderen	107
4.7	Variatie in omvang en dichtheid van stuifkuilen	107
4.8	Discussie en conclusies	110
5	Patronen van omgevingsfactoren in relatie tot kleinschalige dynamiek langs de Nederlandse kust	111
5.1	Samenvatting	111
5.2	Inleiding	113
5.3	Methoden	115
5.3.1	GIS-bewerkingen Lokale factoren	115
5.3.2	Stikstof, ammoniak en zwaveldioxide	116
5.3.3	Meteorologie	117
5.3.4	Konijnen	125
5.3.5	Bodem(eigenschappen)	126
5.3.6	Vegetatie	126
5.3.7	Begrazing	126
5.3.8	Recreatie/betreding	126
5.3.9	Militaire activiteiten	126
5.4	Effect van lokale factoren	127
5.4.1	Kustligging en afstand t.o.v. de kustlijn	127
5.4.2	Invloed expositie	129
5.4.3	Invloed hoogteligging	132
5.4.4	Conclusies lokale factoren	133
5.4.5	Conclusies m.b.t. proces en nader onderzoek	134
5.5	Effect van stikstof en zwaveldepositie	135
5.5.1	Conclusies stikstofdepositie	138
5.6	Effect van meteorologie	139
5.6.1	Neerslag	139
5.6.2	Wind	149
5.6.3	Conclusies meteorologie	152
5.6.4	<i>Conclusies m.b.v. winderosie</i>	153
5.6.5	Conclusies m.b.t. waterosie	154
5.6.6	Overige conclusies	154
5.6.7	Aanbevelingen voor nader onderzoek	154
5.7	Effect van konijnen	155
5.7.1	Conclusies m.b.t. konijnen	160
6	Nadere verklaringen voor de ontwikkeling van kleinschalige dynamiek in de periode 2000-2014: multivariate analyses	162
6.1	Samenvatting	162
6.2	Inleiding	162
6.3	Methoden	163
6.4	Resultaten: correlaties en multivariate analyse	165
6.5	Resultaten: stuifkuilclassen in Wadden en Renodunaal district	169
6.6	Discussie en conclusies	172
7	Temporele dynamiek in Wadden en Renodunaal district	173
7.1	Samenvatting	173
7.2	Inleiding	173
7.3	Methoden	174

7.4	Temporele dynamiek langs Hollandse kust	175
7.5	Renodunaal en Waddendistrict	177
7.6	Discussie en conclusies	179
8	Patronen van bodem en vegetatie van actieve en gestabiliseerde stuifkuilen in Luchterduinen en Meijendel	181
8.1	Samenvatting	181
8.2	Inleiding	182
8.2.1	Specieke vragen	182
8.2.2	Selectie stuifkuilen	183
8.3	Methoden	186
8.3.1	Opzet meetnet	186
8.3.2	Reconstructie verstuivingshistorie	187
8.3.3	Classificatie morfologie stuifkuilen	187
8.3.4	Opstellen zandbalansen	188
8.3.5	Beschrijving bodemprofielen	189
8.3.6	Zonering vanr beïnvloeding bodem-pH door verstuiving	190
8.3.7	Bodembemonstering	192
8.3.8	Bodemchemische analyses	192
8.3.9	Opname vegetatie en vegetatiestructuur	194
8.4	Resultaten	195
8.4.1	Verstuivingshistorie	195
8.4.2	Morfologie en landschappelijke positie stuifkuilen	197
8.4.3	Zandbalansen	199
8.4.4	Patroon van kalkgehalte in deflatiezones	206
8.4.5	Ruimtelijke patronen humusprofiel, kalkprofiel en zuurgraad bodem in stuifkuilen en omgeving	208
8.4.6	Zonering van pH-beïnvloeding door verstuiving in relatie tot de accumulatiezone	212
8.4.7	Kalkprofielen in de NO/O-transecten	216
8.4.8	Relaties van bodem-pH met basenrijkdom	219
8.4.9	Vegetatiestructuur en de verspreiding van gekarteerde plantensoorten in en rond stuifkuilen	223
8.4.10	Gradiënten van de vegetatie in het NO/O-transect	228
8.4.11	Ruimtelijke effecten van verstuiving in relatie tot oppervlakte en kalkgehalte van deflatiezone	235
8.4.12	Modellering van stuifkuil geometrie en kalkuitstrooiing in de tijd	239
8.4.13	Ontkalking na stabilisatie van stuifkuil en accumulatiegebied	242
8.5	Discussie en conclusies	244
8.5.1	Factoren die de geometrie en zandbalans van stuifkuilen bepalen	244
8.5.2	Invloed van achtergrondkalkgehalte en ontkalkingsdiepte van het duinlandschap op het kalkgehalte van deflatiezones	245
8.5.3	Effecten van instuiving op humusprofiel en basenrijkdom	246
8.5.4	Effect van verstuiving op de vegetatie	247
9	Patronen van bodem en vegetatie van vijf eolisch actieve en stabiele gebieden in kalkrijke en kalkarme duinen	251
9.1	Samenvatting	251
9.2	Inleiding en vraagstelling	251
9.3	Methoden	252
9.3.1	Studiegebieden	252
9.3.2	Transectstudies en gridpuntkaartjes	253
9.3.3	Luchtofoanalyse ge(re)activeerde gebieden	254
9.3.4	Statistische analyse	254
9.4	Verschillen tussen actieve en stabiele gebieden	255

9.4.1	Kaal zand en pH van de bodem	255
9.4.2	Koolstof en stikstof	260
9.4.3	Soortensamenstelling van de vegetatie	264
9.4.4	Relaties tussen soortensamenstelling en abiotische factoren	269
9.5	Effecten van (re)activatie na 25 jaar	273
9.5.1	Luchtfotointerpretatie ge(re)activeerde gebieden	273
9.5.2	Effecten (re)activatie op bodem en vegetatie	276
9.6	Discussie en conclusies	278
10	Voedselkwaliteit en kleine fauna	279
10.1	Samenvatting	279
10.2	Inleiding	279
10.3	Methoden	280
10.3.1	Onderzoeksgebieden	280
10.3.2	Sprinkhanen	282
10.3.3	Bodem- en vegetatiebewonende ongewervelden	284
10.3.4	Plantchemie	286
10.3.5	Statistische analyse	286
10.4	Resultaten diergemeenschappen	287
10.4.1	Effecten van verstuiwing op voedselkwaliteit planten	287
10.4.2	Effecten van verstuiwing op diergemeenschappen	298
10.4.3	Effecten op sprinkhanengemeenschap	304
10.4.4	Conclusies effecten op fauna	305
11	Synthese	306
11.1	Patronen en trends van kleinschalige verstuiwing in relatie tot abiotische en biotische factoren	306
11.1.1	Actuele patronen en trends van kleinschalige verstuiwing	306
11.1.2	Samenspel van factoren is belangrijk voor aanwezigheid kleinschalige verstuiwing	309
11.1.3	Overige factoren in relatie tot kleinschalige verstuiwing	317
11.2	Effecten van kleinschalige verstuiwing op de bodem, vegetatie en fauna	317
11.2.1	Ruimtelijke effecten op bodem en vegetatie	317
11.2.2	Temporele effecten op bodem en vegetatie	318
11.2.3	Effecten op voedselkwaliteit	319
11.2.4	Effecten op kleine fauna	320
11.3	De relatie tussen dichtheid van stuifkuilen en gunstige ruimtelijke effecten op de vegetatie van duingrasland en doorvertaling naar de praktijk	320
12	Adviezen voor beheer- en herstelpraktijk	325
12.1	Lange termijn strategieën op landschapsschaal	325
12.2	Strategieën gedifferentieerd voor regio's	329
12.3	Maatregelen voor reactivatie kleinschalige verstuiwing	331
13	Kennislacunes en aanbevelingen voor verder onderzoek	333
13.1	Kennislacunes	333
13.2	Aanbevelingen voor onderzoek	334
14	Literatuur	336

Bijlagen (zie www.natuurkennis.nl)

Bijlage 1: Berekening zandtransport door de wind

Bijlage 2: Toelichting op analyse zandbalansen van 6 stuifkuilen in de Luchterduinen en 2 stuifkuilen in Meijendel

Bijlage 3: Verspreidingspatroon van enkele mossoorten in 6 stuifkuilen in de Luchterduinen en 2 stuifkuilen in Meijendel.

Bijlage 4: Foto's van locaties waar de fauna is bemonsterd inclusief verschillen in mate van kleinschalige dynamiek.

Voorwoord

Het doel van het Kennisnetwerk Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit (OBN) is het ontwikkelen, verspreiden en benutten van kennis voor terreinbeheerders over natuurherstel, Natura 2000, PAS, leefgebiedenbenadering en ontwikkeling van nieuwe natuur.

In het kader van Natura 2000 worden in Europees perspectief zeldzame soorten en vegetatietypen in Nederland beschermd. In dit rapport staat het Habitatype H2130 Grijze duinen centraal, waarvoor Nederland binnen de EU een grote verantwoordelijkheid heeft.

Eolische dynamiek was en is een zeer belangrijke randvoorwaarde voor biodiversiteit van de kustduinen. Eolische dynamiek zorgt zowel voor verjonging van de bodem, als voor pioniersituaties en successie naar nieuwe duingraslanden. Aangenomen wordt dat milde dynamiek in de vorm van kleinschalige verstuiving sterk kan bijdragen aan de kwaliteit van duingraslanden. Door veranderingen in het gebruik en beheer van kustduinen is de verstuivingsdynamiek de afgelopen eeuw in veel duingebieden afgenomen. Dit heeft grote gevolgen voor de biodiversiteit en daarmee ook de kwaliteit van Grijze duinen.

In de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS) wordt groot belang gehecht aan de rol van eolische dynamiek binnen het kustduinlandschap. In de PAS-herstelstrategie wordt het reactiveren van verstuiving als een bewezen maatregel beschouwd voor ontwikkeling en/of behoud van habitatype H2130A Grijze duinen (kalkrijk) + H2130B Grijze duinen (kalkarm), waarmee negatieve effecten van stikstofdepositie kunnen worden gemitigeerd. Binnen de PAS staan er omvangrijke ingrepen op stapel om eolische dynamiek op vooral kleine schaal binnen het duinlandschap terug te brengen met als doel het verbeteren van de randvoorwaarden voor Grijze duinen. Er is dus een enorme, urgente behoefte aan praktisch toepasbare kennis over dit onderwerp.

Het doel van dit onderzoek is te achterhalen wat de belangrijkste factoren zijn die het ontstaan en de eolische levensduur van kleinschalige verstuivingen in kustduinen sturen. Daarnaast is de invloed bepaald van kleinschalige verstuiving in tijd en ruimte op de instandhouding ('ecologische levensduur') van diversiteit van systeemkarakteristieke planten en dieren, in zowel kalkrijke als kalkarme duinen. Tot slot is deze kennis vertaald naar praktische beheerhandvatten ten behoeve van instandhouding, herstel en nieuwe ontwikkeling van Grijze duinen door het reactiveren van kleine stuifkuilen.

Over het toepassen van kleinschalige dynamiek zijn ook een aantal concrete beheeradviezen verschenen die u kunt vinden bij de beheeradviezen op www.natuurkennis.nl

Ik wens u veel leesplezier.

Teo Wams

Voorzitter van de OBN Adviescommissie

Woord van dank

De bundeling van diverse bijdragen maakt het mogelijk dit omvangrijke onderzoek aan kleinschalige verstuiving uit te voeren. Het onderzoek werd gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, de kustprovincies (Zeeland, Zuid-Holland, Noord-holland, en Fryslân) en door het onderzoeksprogramma van de duinwaterbedrijven (DPWE: Evides Waterbedrijf, Dunea Duin & Water, Waternet en PWN Water & Natuur). Voor workshops naar aanleiding van dit onderzoek fungeerde Dunea Duin & Water, Waternet en PWN Water & Natuur als gastheer. Dank gaat ook uit naar de DPWE-stuurgroep die het vertrouwen gaf om meerjarig onderzoek aan kleinschalige verstuiving uit te voeren.

Het onderzoeksteam wil graag alle beheerders bedanken die toestemming gaven om in hun gebieden onderzoek uit te voeren en die hun ervaringen met herstellen van dynamiek deelden in de workshops die tijdens dit project zijn georganiseerd. Bijzonder in dit onderzoekstraject was ook de grote belangstelling van de duinbeheerders voor de resultaten dit onderzoek. Dit bleek ook uit het grote aantal deelnemers van de workshops. De feedback van beheerders heeft ons ook veel verder geholpen. Het OBN-deskundigenteam Duin en Kust begeleidde het project en het OBN Expertteam Fauna adviseerde over aanpassingen aan de faunabemonsteringen. Een begeleidingsgroep van het DPWE-onderzoeksprogramma heeft ook het deelonderzoek aan de stuifkuilen in Luchterduinen en Meijndel begeleid.

Dit project had niet op deze manier uitgevoerd kunnen worden zonder de hulp van de onderstaande personen:

- Fauna en vegetatiekwaliteit: Julian Brouwer, Marten Geerstma, Jan Kuper, Eva Remke en Remco Versluijs (allen Stichting Bargerveen) en Piet Admiraal (student Larenstein-Velp).
- Lokale studies stuifkuilen Luchterduinen en Meijndel: Arnaut van Loon (KWR), Ko Melis, Karen Wilschut (student VU Amsterdam), Oriol Cervera Subirats (student University of Barcelona).
- Lokale studies stuifkuilen Vlaggenduin, Huttenvlak, Texel, Terschelling en Ameland: Dana van Bentum, Mara van der Berg, Marleen de Boer, Bas van Dalen, Ellen van Galen, Eline Kolb, Greet Kooijman, Pauline Martens, Aurisel Mata en Liza Witz (VU Amsterdam).

Samenvatting

Aanleiding

Eolische dynamiek was en is een zeer belangrijke randvoorwaarde voor biodiversiteit van de kustduinen. Dit geldt in belangrijke mate voor duingraslanden die behoren tot het habitatype H2130 Grijze duinen, waarvoor Nederland binnen de EU een grote verantwoordelijkheid heeft. Eolische dynamiek zorgt zowel voor verjonging van de bodem, als voor pioniersituaties en successie naar nieuwe duingraslanden. Aangenomen wordt dat milde dynamiek in de vorm van kleinschalige verstuiving sterk kan bijdragen aan de kwaliteit van duingraslanden. Door veranderingen in het gebruik en beheer van kustduinen is de verstuivingsdynamiek de afgelopen eeuw in veel duingebieden afgenomen. Dit heeft grote gevolgen voor de biodiversiteit en daarmee ook de kwaliteit van Grijze duinen. In de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS) wordt groot belang gehecht aan de rol van eolische dynamiek binnen het kustduinlandschap. In de PAS-herstelstrategie wordt het reactiveren van verstuiving als een bewezen maatregel beschouwd voor ontwikkeling en/of behoud van habitatype H2130A Grijze duinen (kalkrijk) + H2130B Grijze duinen (kalkarm), waarmee negatieve effecten van stikstofdepositie kunnen worden gemitigeerd. Binnen de PAS staan er omvangrijke ingrepen op stapel om eolische dynamiek op vooral kleine schaal binnen het duinlandschap terug te brengen met als doel het verbeteren van de randvoorwaarden voor Grijze duinen. Er is dus een enorme, urgente behoefte aan praktisch toepasbare kennis over dit onderwerp.

Doel

Het doel van dit onderzoek is te achterhalen wat de belangrijkste factoren zijn die het ontstaan en de eolische levensduur van kleinschalige verstuivingen in kustduinen sturen. Daarnaast is de invloed bepaald van kleinschalige verstuiving in tijd en ruimte op de instandhouding ('ecologische levensduur') van diversiteit van systeemkarakteristieke planten en dieren, in zowel kalkrijke als kalkarme duinen. Tot slot hebben we deze kennis vertaald naar praktische beheerhandvatten ten behoeve van instandhouding, herstel en nieuwe ontwikkeling van Grijze duinen door het reactiveren van kleine stuifkuilen.

Hoofdvraag is: Op welke manier (beste locaties, manier van uitvoeren en tijdstip of frequentie van ingrijpen) kan reactiveren van kleinschalige dynamiek optimaal bijdragen aan een duurzaam behoud van het habitatype Grijze duinen (H2130) en de karakteristieke plant- en diersoorten die van dit type afhankelijk zijn?

Aanpak/ structuur rapport

Het onderzoek bestaat uit de volgende onderdelen

1. Inventarisatie kennisbehoefte bij beheerders en provincies (H3).
2. Analyse van ruimtelijke verschillen in kleinschalige dynamiek langs de Nederlandse kust (2000-2014) in samenhang met omgevingsfactoren (H4 t/m H6)
3. Analyse van de temporele dynamiek in kleinschalige verstuiving (1975-2015) in enkele duingebieden in samenhang met omgevingsfactoren (H7).
4. Analyse van effecten van kleinschalige eolische dynamiek op bodem en vegetatie (H8 en H9).
5. Analyse van effecten van kleinschalige eolische dynamiek op voedselkwaliteit en de samenstelling van kleine fauna (H10).
6. Synthese (H11)
7. Adviezen voor de beheer- en herstelpraktijk (H12).
8. Kennislacunes en aanbevelingen voor verder onderzoek (H13)

Kennisbehoefte bij beheerders en provincies (H3)

Tijdens een goedbezochte OBN workshop in 2015 over kleinschalige verstuiving voor duinbeheerders is recente kennis gedeeld en zijn vragen bij de beheerders geïnventariseerd. De workshop voorzag in een duidelijke en actuele behoefte om kennis en ervaring over kleinschalige verstuiving uit te wisselen. De beheerders brachten vragen in op het terrein van het functioneren van verstuiving (geomorfologie, ecologische effecten), plannen van maatregelen, technieken voor (re)activatie, nabehoor, monitoring en neveneffecten. Verder werden veel opmerkingen gemaakt op basis van praktijkervaring met (re)activatie. Geconstateerd werd dat bestaande (oudere) kennis over geomorfologie van kleinschalige verstuiving weinig wordt toegepast. Er is grote behoefte aan

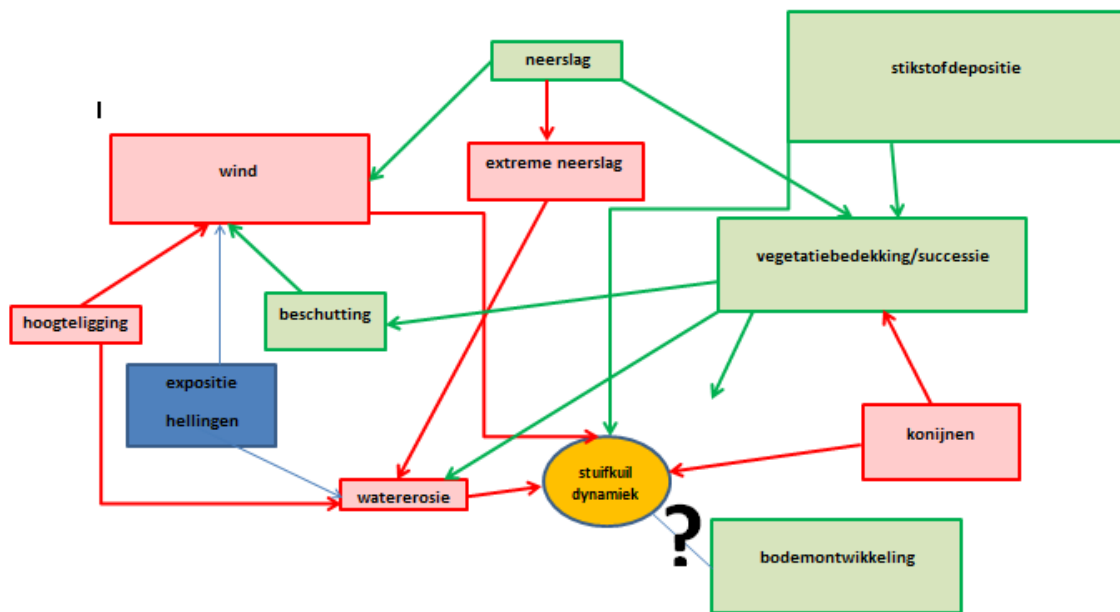
meer handvatten voor waar reactivatiemaatregelen kunnen worden gepland, hoe ze worden uitgevoerd en welk nabehoor zinvol is. Regelmatige uitwisseling en ervaring wordt op prijs gesteld.

Actuele patronen en trends van kleinschalige verstuiving in relatie tot omgevingsfactoren (H4-H6)

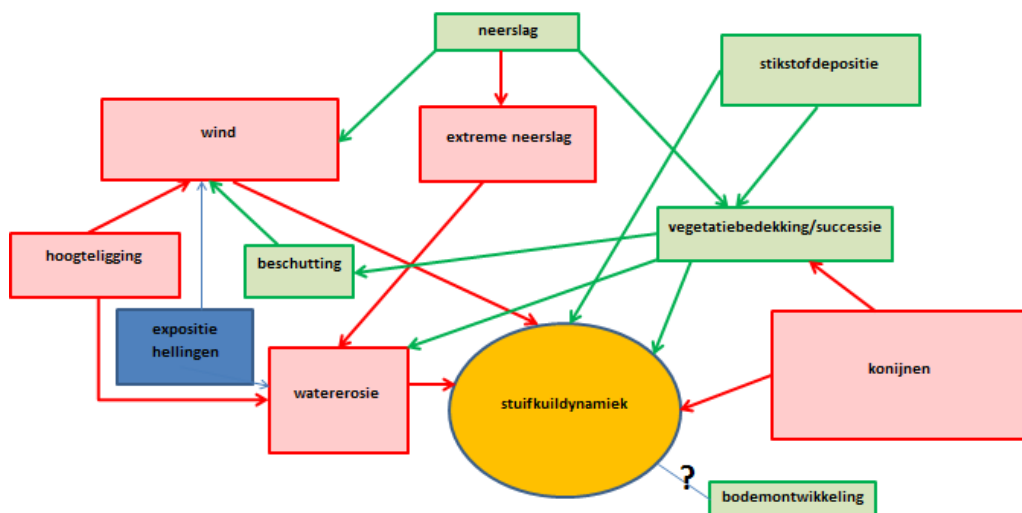
Om inzicht te krijgen in de verdeling van stuifkuilen over de Nederlandse kust, en de recente ontwikkeling hiervan, is een kartering uitgevoerd van de eolisch actieve gebieden, met het aantal stuifkuilen en de mate van activiteit in 2000 en 2014. Uit de inventarisatie blijkt dat er grote verschillen bestaan in de mate van kleinschalige verstuiving in 2014 en recente trends tussen regio's. Op de Wadden is het aantal actieve stuifkuilen gering, de gemiddelde dichtheid is laag, met 30 stuifkuilen per km². Langs de Hollandse kust is er veel variatie en de dichtheid is hier gemiddeld hoger dan op de Wadden, met een gemiddelde dichtheid van 50 kuilen per km², en uitschieters naar 100-600. In de Delta is het aantal actieve stuifkuilen met 16 per km² bijzonder laag. De grootste tweedeling in verstuivingsactiviteit ligt tussen het kalkarme Waddendistrict en het kalkrijke Renodunaal district. Opvallend is dat met name in het kalkarme Waddendistrict het aantal kuilen overwegend is afgenomen, met als gunstige uitzondering Texel. Langs de kalkrijke Hollandse kust is het aantal kuilen juist sterk toegenomen, vooral in de hoge duinmassieven in duinzones dichtbij de kust. In brede duingebieden zijn de middenduin- en binnenduinzones van echter weer minder actief. De grote regionale verschillen in verstuivingspatroon zijn een indicatie dat factoren op een regionale schaal belangrijk zijn voor het ruimtelijke en temporele patroon van verstuiving.

De verschillen in eolische activiteit tussen kustregio's en duingebieden lijken vooral veroorzaakt door elkaar versterkende factoren, die los staan van de huidige dynamiek van de zeeoever, en samen 70% en 79% van de variantie in respectievelijk het aantal kuilen en het actieve oppervlak verklaren. In de **kalkarme duinen van het Waddendistrict** (figuur 1 boven) is de situatie relatief ongunstig door een optelsom van (1) lagere maximum hoogte van duinmassieven, (2) ongunstiger ligging van de Noordzeekust op de overheersende WZW windrichting, (3) minder neerslag en natte dagen wat minder watererosie kan betekenen, (4) lagere kalkrijkdom en lage pH van de bodem, (5) ver voortgeschreden bodem- en vegetatiesuccessie (sterke mate van verruiging met vooral helm), (6) relatief weinig konijnen en (7) een N-depositie die hoger is dan de kritische depositiewaarde met een overmaat aan NH₄. In de **kalkrijke duinen van het Renodunaal district aan de Hollandse vastelandskust** (figuur 1 onder) is de situatie veel gunstiger dan in het Waddendistrict, dankzij de optelsom van (1) hogere maximum hoogte van duinmassieven, (2) gunstiger ligging van de kust op de overheersende wind, (3) meer natte dagen, (4) hogere kalkrijkdom en pH van de bodem, (5) een minder ver voortgeschreden bodem- en vegetatiesuccessie (jong duingrasland met een geringe mate van verruiging), (6) meer konijnen en (7) een N-depositie die deels lager is dan de kritische depositiewaarde en gedomineerd wordt door NO₃. In het **Delta-gebied** werkt in de jonge duingebieden veelal de toestand van de actuele vegetatie in het nadeel. Deze bestaat daar voor een belangrijk deel uit duindoornstruweel en hoog struweel/bos. Daarnaast zijn er oude vroongronden met veel duingraslanden met een korte vegetatiestructuur, maar daar is verstuivinggevoeligheid gering wegens de hoge ouderdom van de bodem (eeuwen) en daardoor relatief diepe humusprofielen. Tevens zijn de duinen hier vaak laag.

Op basis van de gevonden patronen wordt verondersteld dat de volgende factoren elkaar versterken bij het bevorderen van verstuiving: (1) een hoge ligging van duinmassieven, (2) relatief veel natte dagen (dagen met een zware bui) die watererosie kunnen bevorderen, (3) een open en korte begroeiing, (4) een hoog kalkgehalte en een hoge pH, mede omdat dit de P-beschikbaarheid vermindert, (5) een laag organische stofgehalte en ondiep humusprofiel van de bodem, (6) een hoge konijnendichtheid en (7) een lage N-depositie. Op lokale schaal is de expositie van duinhellingen van belang wegens de invloed van het microklimaat: de zuidoost-, zuid- en zuidwesthellingen zijn door relatief veel droogtestress het meest verstuivingsgevoelig. Betreding door recreanten en ingezette grazers kan lokaal van belang zijn voor het initiëren of actief houden van verstuiving, maar de dichtheid van paden had geen relatie met de eolische activiteit.



Wadden district



Renodunaal district

Figuur 1: Het samenspel van factoren die van invloed zijn op de gevoeligheid voor verstuiving en die verstuiving kunnen initiëren. Betekenis kleuren: rood = bevordert verstuiving, groen = remt verstuiving, blauw = effect afhankelijk van toestand. De grootte van de vakken geeft een globale indicatie van het relatieve belang. Hoe groter het vak hoe belangrijker de factor is.

Temporele dynamiek in kalkrijke en kalkarme duinen (H7)

Langjarige reeksen waren alleen voor de Hollandse vastelandskust aanwezig, en lieten zien dat de mate van secundaire verstuiving fluctueerde in cycli van enkele decennia. Windkracht was voor de verschillen in temporele dynamiek minder belangrijk dan de N-depositie en het aantal konijnen. In de periode 1980-1990 nam de verstuiving in de kalkrijke duinen toe, waarschijnlijk als gevolg van het stoppen met het vastleggingsbeheer, maar geholpen door de relatief hoge konijnenstand. De N-depositie was toen wel hoog, maar werd gecompenseerd door het aantal konijnen. Tussen 1990 en 2003 trad grootschalige stabilisatie op en nam het aandeel kaal zand sterk af, hoewel de windkracht vergelijkbaar was met de periode daarvoor. De stabilisatie was het gevolg van de afname van het aantal konijnen door VHS, in combinatie met de nog steeds veel te hoge N-depositie. Na 2003 trad in de kalkrijke duinen spontaan herstel op van verstuiving, hoewel de gemiddelde windkracht lager was dan in de jaren tachtig en negentig. Dit was het gevolg van een kleine toename van het aantal konijnen, in combinatie met een significante daling van de N-depositie tot waarden rond de KDW voor kalkrijke Grijze duinen. Herstel van verstuiving trad vooral op in gebieden met veel konijnen. Uit de landelijke analyse van verstuivingsactiviteit blijkt dat de kalkrijke duingebieden met veel korte vegetatie onder de huidige klimaat- en bodemcondities nog steeds in staat is spontaan te reactiveren.

In het kalkarme Waddendistrict trad echter na de stabilisatiefase van 1990-2003 geen herstel van verstuiving op, ook niet in gebieden met veel konijnen. In het Waddendistrict zijn de voorwaarden voor secundaire verstuiving veel ongunstiger, gezien de ongunstige expositie van de kust op de overheersende windrichting, de kalkarme bodem met hoge P-beschikbaarheid, de N-depositie die nog steeds veel hoger is dan de KDW, en de dominantie van soorten als Helm, Zandzegge en Kraaiheide, die het zand vastleggen met veel wortels en een dik humusprofiel. In het Waddendistrict nam de eolische activiteit alleen toe in gebieden met een gunstige ligging op de wind (Texel) of met drukbegrazing door geiten en schapen (Terschelling).

Effecten van kleinschalige eolische dynamiek op bodem en vegetatie (H8 en H9)

Met behulp van beschrijvende veldstudies is in beeld gebracht hoe verstuiving in het recente verleden en heden doorwerkt op de bodemcondities en vegetatie van duingraslanden. Daarbij zijn locaties onderzocht langs de vastelandskust van het Renodunaal district en op de Waddeneilanden.

Een hoge eolische activiteit leidt in zowel kalkrijke als kalkarme gebieden tot een hogere pH, minder koolstof, en een lagere C:N ratio van de bodem. Een hogere eolische activiteit leidt ook tot meer kaal zand, minder bovengrondse biomassa van de vegetatie en een lagere bedekking van hoge grasachtigen. Het aantal pionierssoorten, korstmossen en duingraslandsoorten is hoger bij overstuiving, vooral als gevolg van de hogere pH. De hoogste diversiteit van deze soorten treedt op als de eolische dynamiek niet al te groot is of in het geval dat deflatiezones en sterke accumulatiezones weer enige tijd zijn gestabiliseerd. Zeer sterke secundaire verstuiving is ongunstig voor duingraslanden omdat bestaande duingraslanden eroderen of bedolven worden onder een dik zandpakket.

Ruimtelijke effecten op bodem en vegetatie zijn groter naarmate de omvang van de deflatiezone groter is, stuifkuilen beter op de wind zijn geëxposeerd en het kalkgehalte in de deflatiezone hoger is. Bij een goede expositie op de wind wordt in verhouding tot de oppervlakte van de deflatiezone veel zand uitgestoven. De detailpatronen van basenrijke en basenarme soorten van gesloten duingraslanden in de beïnvloedingszone worden sterk bepaald door het kalkgehalte in de toplaag van de stuifkuil: hoe kalkrijker hoe breder de gradiënt van basenminnende soorten. Bij kalkarme stuifkuilen in de binnenduinen van het Renodunaal district is het effect op de vegetatie van de omgeving veel beperkter dan in geval van stuifkuilen die kalkhoudend tot kalkrijk zand verstuiven. In diep ontkalkte duingebieden reikt de positieve invloed daardoor niet veel verder dan de deflatiezone en is ook een hogere periodiciteit nodig van kleinschalige verstuiving zodat continu gestabiliseerde deflatiezones met duingrasland aanwezig zijn.

De effecten van verstuiving op bodem en vegetatie werken door op een tijdschaal van decennia. Verschillen in kalkgehalte van het stuwende zand zijn daarbij sterk bepalend voor de duur en de zones waarin soortenrijke duingraslanden aanwezig zijn. Effecten op het organische stofgehalte van de bodem werken in de deflatiezone en zones met sterke accumulatie gedurende meerdere decennia door, omdat hier na stabilisatie een nieuwe bodem moet ontstaan. Uit het lokale onderzoek aan stuifkuilen blijkt dat na 10-25 jaar na verstuiving bodems met een laag organisch stofgehalte in en rond de stuifkuilen voorkomen, de zuurgraad van de bodem in deflatie- en accumulatiezone duidelijk nog hoger is dan de omgeving, en er nog effecten op de structuur en soortensamenstelling van de vegetatie aanwezig zijn. Modelleren van ontkalking laat zien dat

ontkalking en daarmee verzuring van de toplaag bij verstuiving met kalkrijk zand ca. 50-100 jaar duurt. In de kalkarme duinen van het Waddengebied, waarbij het zand in de deflatiezone kalkarm is, maar wel een relatief hoge pH heeft, zijn ook tot minstens 25 jaar nog positieve effecten op pH en vegetatie in zowel deflatie- als accumulatiezones waarneembaar. Alleen in accumulatiezones met Kraaiheide is de pH na 25 jaar net zo laag als in de stabiele omgeving.

Effecten van kleinschalige eolische dynamiek op voedselkwaliteit en de samenstelling van kleine fauna (H10)

Met lokale veldstudies is gekeken naar de kwaliteit van de bovengrondse biomassa van enkele plantensoorten die in instuifzones algemeen zijn. Het doel hiervan was een indruk te krijgen van de effecten van verstuiving op de voedselkwaliteit voor herbivore fauna. De plantkwaliteit verschilt tussen soorten én tussen gebieden, en wordt beïnvloed door actieve overstuiving. De gehalten aan Si in grassen nemen onder verstuiving af, waardoor de verteerbaarheid van planten wordt verbeterd. De macronutriënten N, C en P, gemeten aan het einde van het groeiseizoen, worden echter nauwelijks beïnvloed door overstuiving. De elementen Ca en Fe nemen wel weer sterk toe bij overstuiving, terwijl Mg en Mn juist afnemen, zij het in mindere mate. Alleen in Camperduin, waar de bodems zeer arm zijn aan kalk en ijzer, was er geen effect van verstuiving op deze elementen. Over het algemeen neemt de voedselkwaliteit van Buntgras, Fakkeldras en Geel walstro toe met actieve overstuiving. Dit komt doordat de hoeveelheid Ca en Fe toeneemt in verhouding tot N en P, terwijl al deze elementen toenemen in verhouding tot het vraatwerende silicium. Deze effecten zijn groot in Meijndel, kleiner op Texel en vrijwel afwezig in Camperduin, waarschijnlijk als gevolg van verschillen in bodemchemie. Hoe rijker het duinzand is aan gemakkelijk verweerbare mineralen als kalk en ijzerhydroxiden, des te groter het positieve effect op de voedselkwaliteit van diverse plantensoorten. De aangetroffen verschillen bij actieve stuifkuilen zijn nagenoeg verdwenen in situaties 10-15 jaar na stabilisatie. Hierdoor zijn de effecten van overstuiving op voedselkwaliteit van specifieke plantensoorten vooral kortdurend en eerder uitgedoofd dan de effecten op samenstelling van vegetatie.

Algemene effecten van overstuiving op de ongewervelde fauna die in de bodem en vegetatie leeft zijn lastig te duiden. Actieve overstuiving heeft een negatief effect op detritivoren en omnivoren, waarschijnlijk omdat op deze locaties minder strooiselophoping plaatsvindt. Effecten op andere soortgroepen zijn vrijwel afwezig wanneer alle terreinen samen worden geanalyseerd. Dit wordt deels veroorzaakt doordat de effecten van verstuiving in kalk- en ijzerrijke duinen afwijken van die in kalk- en ijzerarme duinen. Er is in de actieve stuifkuilen een sterke samenhang tussen voedselkwaliteit van plantensoorten en de biomassa aan ongewervelden. In de kalkrijke duinen, met een hoge voedselkwaliteit, is de dichtheid en biomassa aan ongewervelden veel hoger dan in de kalkarme duinen en daarmee leiden tot een potentiële toename van het voedselaanbod voor insectivore vogels zoals tapuit, boompieper en grauwe klauwier. Bovendien is het positieve effect van overstuiving op de soortensamenstelling groter in kalkrijke duinen en vrijwel afwezig in kalkarme duinen.

Bovengenoemd effect van de geochemie van het duinzand op de voedselkwaliteit lijkt daarmee door te werken op de ongewervelde fauna. Overeenkomstig met de lokale effecten op de vegetatiechemie dooft ook het effect van verstuiving op kleine fauna snel uit na stabilisatie (10-15 jaar). Daarmee lijkt verstuiving vooral een momentaan effect op de ongewervelde fauna te hebben en is het dus voor de fauna van belang dat er altijd actieve stuifplekken in een terrein aanwezig zijn. Op landschapsschaal is het effect van verstuiving onderzocht op sprinkhanen. Hieruit blijkt dat kleinschalige dynamiek invloed uitoefent op de ruimtelijke schaal van soortenrijkdom: vooral de afwisselende aanwezigheid van stabiele én dynamische plekken in een landschap zorgt voor een hogere soortenrijkdom op kleinere schaal.

De relatie tussen dichtheid van stuifkuilen en gunstige ruimtelijke effecten op de vegetatie van duingrasland (H11)

Voor ecologisch herstel van droge duingraslanden is kleinschalige verstuiving geen doel op zich, maar het gaat juist om de mate waarin stuifkuilen een gunstig effect uitoefenen in ruimte en tijd op droge duingraslanden. Bij het beoordelen van de verstuivingstoestand en het plannen van maatregelen die kleinschalige verstuiving bevorderen is daarom van belang om een indicatie te hebben van het aantal stuifkuilen dat wenselijk zou kunnen zijn om Grijze duinen met een hoge kwaliteit in stand te houden of te herstellen. Daarom is de relatie tussen de dichtheid van stuifkuilen en het ruimtelijke effect op duingraslanden kwantitatief uitgewerkt op basis van resultaten uit het deelonderzoeken.

In deze rekenexercitie wordt gestreefd naar een oppervlakte aandeel dat wordt beïnvloed door actieve stuifkuilen van 10 tot 15 % van de oppervlakte van een duingebied. Hiervoor is gekozen met het idee dan op één specifiek moment niet een groot deel van het duingebied hoeft te worden beïnvloed door actieve stuifkuilen. Door variatie in ruimte en tijd van actieve stuifkuilen kan door niet overlappende beïnvloedingszones van actieve en reeds gestabiliseerde stuifkuilen het beïnvloedde oppervlakte veel hoger zijn. De berekening houdt echter alleen rekening met de dichtheid actieve stuifkuilen op één moment. Bij kalkhoudend stuifzand (0.5-1.0 %) zijn daarvoor in principe ca. 100 tot 200 stuifkuilen per km² nodig. Bij kalkrijk zand (> 1.0 % DG) wordt ook bij lagere stuifkuildichtheden als 25 tot 60 stuifkuilen per km² voldoende oppervlakte beïnvloed. Dat is vergelijkbaar met de gemiddelde waarde van actueel actieve gebieden in Zuid-Holland. In kalkarme duingebieden, zou voor eenzelfde pH-stijging echter een veel groter aantal stuifkuilen nodig zijn, namelijk ca. 300 stuifkuilen per km². Dit is echter hoger dan de huidige gemiddelde dichtheid van actieve gebieden in de kalkrijke duinen van het Renodunaal district, en vele malen hoger dan het huidige maximum in het Waddendistrict zelf. Deze dichtheden zijn dus onrealistisch hoog en de plannen zullen daarom veelal uitkomen op lagere dichtheden dan bovenstaande berekeningen.

Uit deze rekenexercitie volgt dat in kalkrijke duinen gemakkelijk een substantieel van de oppervlakte positief kan worden beïnvloed, terwijl dit in diep ontkalkte duingebieden slechts beperkt mogelijk is. Bij het bepalen van de dichtheid van de stuifkuilen dient ook nadrukkelijk gekeken te worden naar wat past bij het betreffende duinlandschap en de reële mogelijkheden voor eolische activiteit in duinterreinen, in relatie tot bijvoorbeeld begroeiing en infrastructuur.

Adviezen voor de beheer- en herstelpraktijk (H12)

Voordat op een korte termijn (<10 j) maatregelen voor kleinschalige verstuiving worden gepland, is het zinvol om eerst een **strategie voor de lange termijn** uit te werken. Zo'n strategie moet worden gebaseerd op de ecologische noodzaak voor kleinschalige verstuiving voor duingraslanden (H2130 Grijs duinen), de ecologische potenties en de haalbaarheid om deze eolische activiteit te realiseren. De strategie wordt voor een lange termijn uitgewerkt omdat effecten van verstuiving op bodem en vegetatie tot 50 tot 100 jaar kunnen doorwerken nadat stuifkuilen weer zijn gestabiliseerd. In deze strategie worden niet alleen de effecten tijdens de verstuiving meegenomen, maar ook de effecten die na stabilisatie nog een tijdlang aanhouden. In de planontwikkeling moet de ontwikkeling van jonge naar oude bodems en de vegetatiesuccessie naar soortenrijke duingraslanden, die vaak meer dan 20-40 jaar duurt, worden meegenomen. Een eerste spoor is vaststellen in hoeverre er een ecologische 'noodzaak' is voor verstuiving op basis van de huidige toestand van duingraslanden en natuurdoelen. Een tweede spoor is het in kaart brengen van de mogelijkheden om kleinschalige verstuiving te bevorderen en wat het toekomstige perspectief kan zijn voor spontane activatie van verstuiving. De uitkomsten van beide sporen worden met elkaar vergeleken (figuur). Die uitkomst hiervan geeft richting voor de strategie. Belangrijk daarbij is dat de strategie past bij de eolische potenties van het betreffende duinlandschap en dat niet alleen wordt afgegaan op eerder vastgestelde natuurdoelen. De volgende strategieën zijn mogelijk:

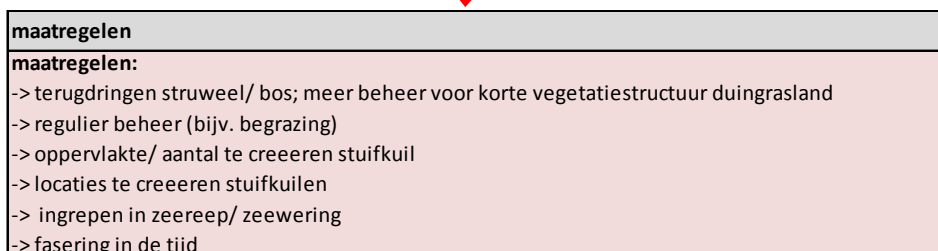
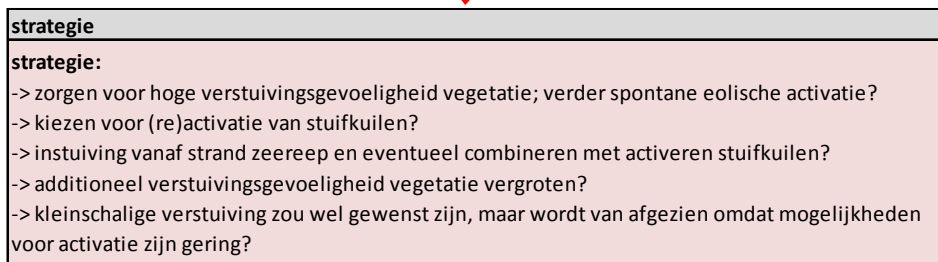
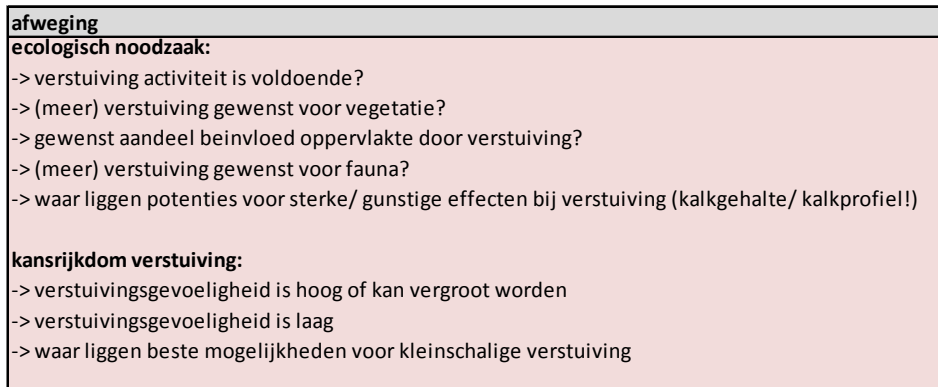
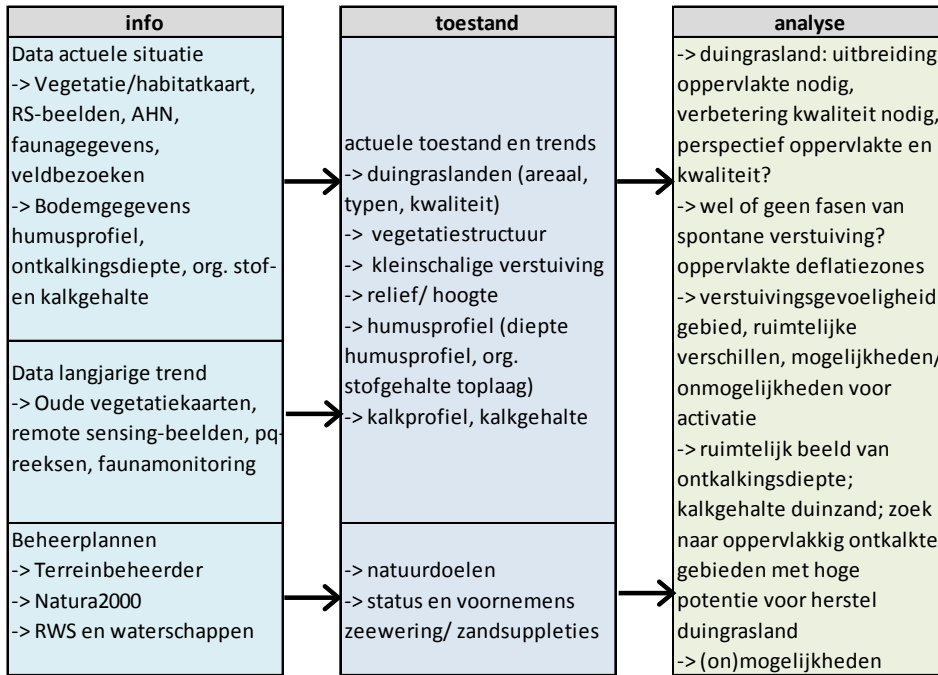
- Verhogen van de verstuivingsgevoeligheid door vegetatiebeheer door de inzet van bijvoorbeeld grazers, die successie naar opgaande begroeiing tegenhouden en vergrassing onderdrukken. Verder kan de ontwikkeling overgelaten worden aan spontane eolische activatie in gunstige perioden. Deze strategie is belangrijk in het Renodunaal district, met name in het buitenduin.
- Kiezen voor (re)activatie van stuifkuilen met maatregelen op een korte termijn (<10 j), omdat de huidige verstuivingsactiviteit te gering is en er weinig zicht is op spontane activatie. Deze strategie is belangrijk in de midden- en binnenduinzones van het Renodunaal district en in het Waddendistrict.
- Verhoging van de instuiving van kalkhoudend zand vanaf strand/zeereep, eventueel in combinatie met het activeren van stuifkuilen. Deze optie is aantrekkelijk voor diep ontkalkte buitenduinen in het Waddendistrict waar met alleen actieve stuifkuilen geen kalkhoudend zand kan worden opgewerkt.
- Afzien van maatregelen voor activatie, hoewel kleinschalige verstuiving op basis van ecologische overwegingen wel gewenst zou zijn, omdat de mogelijkheden voor (re)activatie gering zijn, of aan de uitvoering van maatregelen grote nadelen zitten, zoals te lange werkpaden voor machines.

Bij het plannen van activatiemaatregelen voor kleinschalige verstuiving kunnen de volgende praktische handvaten worden toegepast.

- Verwijder de vegetatie en humeuze toplaag op locaties met een hoge verstuivingsgevoeligheid, zoals aan de bovenzijde van hoge duinen op de zuidoost-, zuid-

en zuidwest hellingen. De beste locaties zijn hoge duinen met korte begroeiing in de omgeving.

- Hoewel voor de grootte van te reactiveren plekken nog geen algemene richtlijnen te geven zijn, zou rekening kunnen worden gehouden met de duinzonering, met in het buitenduyn relatief grote en in het midden- en binnenduyn relatief kleine oppervlakten. Verder hangt de grootte af van de ruimte die er is voor reactivering, in verband met bijvoorbeeld aanwezige infrastructuur, het type reliëf en het patroon van duinen en valleien.
- De afplagdiepte hangt mede af van het type vegetatie. De humuslaag en het overgrote deel van het wortelprofiel dienen te worden verwijderd.
- Zorg voor een sterke blootstelling aan de wind van te reactiveren locaties door eventueel aanwezige opgaande begroeiing in de omgeving te verwijderen.
- Geef in het geval van ruimtelijke verschillen in de kwaliteit van gesloten duingrasland voor de uitvoering van de activatiemaatregelen voorkeur aan plekken met een slechte of matige kwaliteit, met name aan vergraste vegetatie.
- Zorg dat instuifzones een overwegend korte vegetatie hebben. Eenmalig of enkele malen vegetatiebeheer als maaien of chopperen van de toekomstige accumulatiezone kan daarom zinvol zijn.
- Plan de activatie van de stuifkuilen op een tijdschaal van decennia en/of varieer in grootte bij de aanleg van stuifkuilen. Het is veel zinvoller om in een duingebied verschillende stadia van stuifkuilen te hebben (actief, uitdovend, gestabiliseerd) dan veel actieve stuifkuilen in een korte periode; spreidt activatiemaatregelen daarom in de tijd en ruimte.
- Weeg de positieve effecten van activatiemaatregelen af tegen negatieve invloeden van werkzaamheden.
- Vermijd de aanleg van permanente depots. Idealiter wordt plaggemateriaal afgevoerd. Wanneer dit niet mogelijk is moet zeer kritisch gekeken worden waar het materiaal wordt weggewerkt.
- Kijk in het geval van buitenduingebieden ook naar de mogelijkheden voor aanvoer van zand vanaf het strand en de zeereep/zeewering.
- Zorg met vegetatiebeheer voor een korte vegetatie zodat de verstuivingsgevoeligheid van het duinlandschap hoog blijft.



Figuur: Stroomschema voor het afwegen van een lange termijnstrategie voor kleinschalige verstuiving.

Figure: Flowchart for choosing long-term strategies for small-scale aeolian activity.

Summary

Introduction

Aeolian dynamics was and still is a very important factor for the biodiversity in coastal dunes, and also for habitat H2130 Grey dunes. This process causes renewal of soils, creates pioneer vegetation, and succession to new dune grasslands. Moderate dynamics is assumed to contribute to the quality of dune grasslands. Generally aeolian dynamics has decreased during the past 100 years due to changes in human use and management of coastal dunes. This strongly affects biodiversity, and therefore quality of Grey dunes. In the Dutch Program Nitrogen (PAS) the role of aeolian activity in the coastal dune landscape is highly valued. In the restoration strategy of the PAS, reactivating of aeolian activity is considered as an evidence-based measure for development and/or conservation of habitat H2130A Grey dunes (calcareous) + H2130B Grey dunes (acidic) in order to mitigate negative effects of high atmospheric N-deposition. In the PAS, mostly small-scale measures for activation of aeolian dynamics are planned in many dune areas to improve habitat conditions for Grey dunes. Therefore, there is a strong need for practical knowledge on this subject.

Objective and research question

The objective of this research is to identify the most important factors for initiating and prolonging the 'aeolian lifespan' of small-scale aeolian activity. Also temporal and spatial effects of small-scale aeolian activity ('ecological lifespan') on the conservation of Grey dune plants and animals have been evaluated. Moreover we translated our findings to practical guidelines for conservation, restoration and new development of Grey dunes by (re)activating small blowouts. The main research question is: How (in terms of best sites, method, timing or frequency of measures) can reactivating of small-scale dynamics contribute optimally to sustainable conservation of the habitat H2130 Grey dunes, and its characteristic plant and animal species?

Approach and structure of this study

- Inventory of requirement for knowledge among nature managers and provinces (Ch.3)
- Analysis of the recent spatial pattern (2000-2014) of small-scale dynamics along the Dutch coast in relation to environmental factors (Ch.4 to Ch.6),
- Analysis of temporal dynamics in aeolian activity (1975-2015) in some dune areas in relation to environmental factors (Ch.7)
- Analysis of effects of small-scale aeolian dynamics on soil and vegetation (Ch.8 to Ch.9)
- Analysis of effects of small-scale aeolian dynamics on plant quality and composition of small fauna (Ch.10)
- Synthesis (Ch.11)
- Guidelines for management and restoration (Ch.12)
- Knowledge gaps and recommendations for future research (Ch.13)

Requirement for knowledge among nature managers and provinces (Ch.3)

During a well-attended OBN workshop on small-scale aeolian activity for nature managers, recent knowledge was presented, and need for knowledge was inventoried. The workshop fulfilled a clear and actual requirement for sharing knowledge and experience on the subject. Questions were raised about the functioning of aeolian dynamics (geomorphology, ecological effects), planning of measures, technics for (re)activation, post-management, monitoring, and side effects. Practical experience with (re)activation was shared extensively. It appeared that (older) knowledge about geomorphology of small-scale dynamics was scarcely applied. There is a strong need for more guidelines where to plan reactivation measures, how to conduct them, and which post-management is useful. Regular exchange of ideas is appreciated.

Recent spatial pattern and trends of small-scale dynamics along the Dutch coast in relation to environmental factors (Ch.4 to Ch.6)

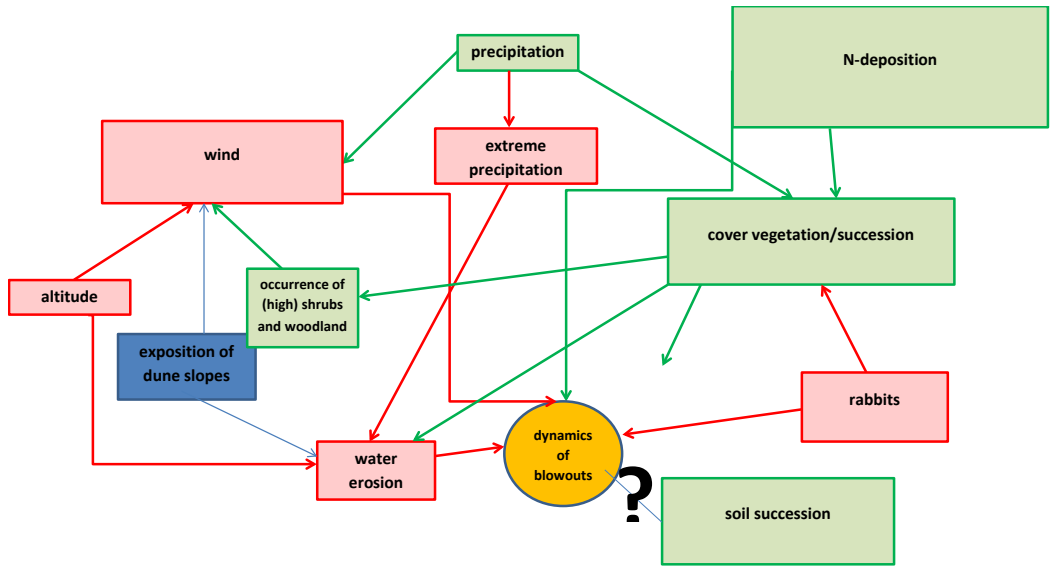
To increase understanding of the spatial distribution and trends of blowouts, an inventory of all dune areas with aeolian activity along the Dutch coast was carried out for the years of 2000 and 2014. Large differences in blowout density and differences between years were present between the two major coastal regions. In the Wadden region, in the north of the country, blowout density is small with 30 blowouts per km². Along the Holland coast, in the middle of the country, average density is much higher than in the Wadden area, with averages of 50 blowouts per km², and elevated values of 100-600 blowouts per km². In the Delta area, in the south of the country, blowout density is very low with on average 16 blowouts per km². The largest contrast is present between the lime poor Wadden flora district and the lime rich Renodunaal flora district. In most of the Wadden area, blowouts declined between 2000 and 2014. In contrast, along the Holland coast,

the number of blowouts strongly increased, especially in high dune complexes in the fore-dune zone. In the mid-dune and inland-dune zones, aeolian activity was lower. The patterns observed indicate that factors operating at a regional scale are important for the spatial and temporal pattern of aeolian activity.

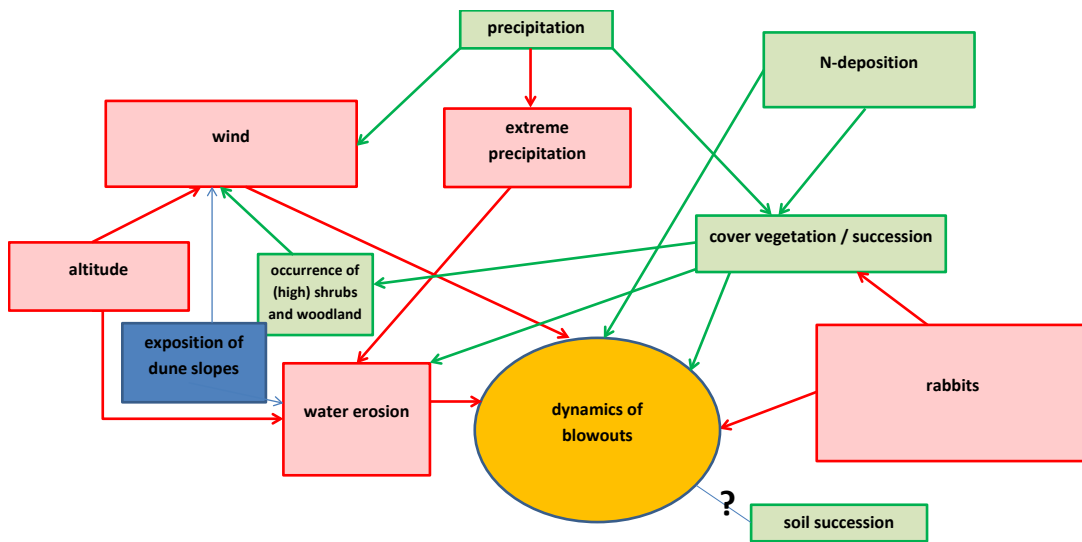
Differences in aeolian activity between coastal regions and dune areas seem to be caused mainly by mutually reinforcing factors, which are independent of the current dynamics in the front dune. These factors explain 70 to 79% of the variance in the number of blowouts and the aeolian active area. In the **lime poor dunes of the Wadden district** (figure 1 upper side) the situation is highly unfavourable, due to the combination of low maximum altitude of dune complexes, unfavourable orientation of the North Sea coast on the prevailing wind direction, less precipitation, less wet days, low CaCO₃ content and pH, far advanced soil and vegetation succession (strong encroachment of Marram grass), low rabbit densities and a N-deposition which is higher than the critical load of acidic Grey dunes with an excess of NH₄.

In the **lime rich dunes of the Renodunaal district of the Holland mainland** (figure 1 lower side) the situation is much more favourable than in the Wadden district due to the combination of high altitude of dune complexes, favourable orientation of the coast in the prevailing wind direction, more wet days, higher CaCO₃ content and pH of the soil, a less exceeded soil and vegetation succession (more young dune grasslands, less grass encroachment), higher rabbit density and a N-deposition which is close to the critical load of calcareous Grey dunes and dominated by NO₃. In the young dune areas of the **Delta region** the current vegetation is limiting aeolian activity, because this mainly consists of Buckthorn shrub, high shrubs and woodland. Moreover, in areas with dune grasslands, aeolian activity is limited by the high age of the soil with deep humus profiles, and by the low altitude of the dunes.

Based on our findings we concluded that the following factors re-enforce each other in initiating aeolian activity: a high altitude of the dunes, relatively many wet days (heavy showers) which can cause water erosion, soils with a high calcium carbonate content and pH, soils low in organic matter and shallow humus profile, and a high density of rabbits. On a local scale, exposition of dune slopes is important due to its effect on microclimate. SE, S and SW slopes have longer drought stress, and are therefore more sensitive to aeolian erosion. Walking by recreation and grazers is sometimes locally important for initiating and maintaining aeolian activity.



Wadden district



Renodunaal district

Figure 2: The interaction of factors affecting the sensitivity for aeolian activity, and triggering aeolian activity. Colours: red = promoting aeolian activity, green = inhibiting aeolian activity, blue = effect depending on the condition. The size of the boxes indicate the relative importance.

Temporal dynamics in lime-rich and lime-poor dunes (Ch. 7)

Longer-term records were only available for the lime-rich dunes in Holland, and showed that blowout activity fluctuated from time to time. Surprisingly, wind force was less important for temporal dynamics than atmospheric N-deposition and rabbit density. Blowout activity increased between 1980-1990, because blowouts were no longer manually stabilized, but high rabbit densities helped as well. N-deposition was very high at the time, but was compensated for by the rabbits. Large scale stabilization of the dune landscape occurred between 1990 and 2003, even though average wind force was the same as before. The stabilization was due to the decrease of rabbits with VHS, along with high N-deposition, which was still too high. After 2003, blowouts recovered spontaneously in the lime-rich dunes of the Holland coast, even though average wind force was lower than before. Blowouts increased due to increasing rabbit numbers, as well as the decrease in N-deposition to levels close to the critical load for calcareous Grey dunes. In the lime-poor Wadden district, however, blowouts did not recover after 2003, not even in areas with high rabbit densities. The lack of recovery is due to overall unfavourable conditions with respect to location, wind direction, lime-poor soils with high P-availability, N-deposition higher than the critical load for lime-poor Grey dunes, and dominance of fast growing plant species such as *Ammophila arenaria*, *Carex arenaria* and *Empetrum nigrum*, which fixated the soil with large roots and thick humus profiles.

Effects of small-scale aeolian dynamics on soil and vegetation (Ch.8 to Ch.9)

In field studies the effects of small aeolian activity in the recent past and actually occurring is accessed for its effect on soil conditions and vegetation of dune grasslands. Research locations were situated in the mainland coast of the Renodunaal district and on the Wadden islands. A high aeolian activity promotes as well in CaCO₃ rich as CaCO₃ poor areas a higher pH, lower carbon content and a lower C:N ratio of the soil. It also promotes more bare sand, less above-ground biomass of the vegetation, and a lower cover of grasses. The number of pioneer plant species, lichens and typical dune grassland species is higher with sand deposition, mainly due to an increased soil pH. The highest species diversity occurs when aeolian dynamics is moderate, or in the case deflation and strong accumulation zones are stabilized for some time. Extreme aeolian activity is unfavourable because existing dune grasslands erode or are covered under a thick sand layer. Spatial effects on soil and vegetation are larger when the area of the deflation zone is larger, the deflation zones are exposed more to the wind, and the calcium carbonate content (CaCO₃) is higher. In the case of a strong exposition for the wind much sand is eroded in comparison to the deflation area. The detail patterns of basiphilious and acidic species of fixed dune grasslands in the influence zone are strongly related to the CaCO₃ content of the topsoil in the deflation zone: with a higher CaCO₃ content the gradient with basiphilious species is broader. In the case of CaCO₃ poor blowouts in the inner-dune zone of the Renodunaal district the spatial effects on the surroundings are more limited in compare to blowouts with deposit moderate CaCO₃ rich to CaCO₃ rich sand. In deeply decalcified dune areas the positive effect of small-scale aeolian activity is mainly limited to the deflation zone. In the later situation a higher periodicity of aeolian activity is needed for the continuous presence of dune grassland in stabilized deflation zones. In the deeply decalcified dunes of the Wadden district positive effects on soil pH and vegetation last at least for 25 year after (re)activation of the blowouts in as well the deflation zone as the accumulation zone, unless Crowberry was the dominant species.

The effects of aeolian activity on soil and vegetation operate on a timescale of decennia.

Differences in CaCO₃ content of the eroded sand strongly depict the timespan and the aeolian zones where species rich dune grassland are present. Effects on soil organic matter are present for decennia, because on bare sand new soils will to develop. The local studies reveal that 10-25 year after stabilisation soils with low organic matter content are present, the soil pH of the deflation and accumulation zone is still higher than the surrounding part, effects on species composition and structure of the vegetation are visible. Modelling of decalcification reveals that in the case deposition of CaCO₃ rich sand decalcification, and therefore acidification takes a long time (50-100 y). Even in deeply decalcified dune areas, effects on soil pH in the deflation zone are still detectible after 25 year. However in the accumulation zones with existing Crowberry heathlands effects have disappeared after 25 year.

Effects of small-scale aeolian dynamics on plant quality and composition of small fauna (Ch.10)

In local field studies the quality of aboveground biomass of several common plant species was evaluated in order to have an impression of the food quality for the herbivore fauna. The plant quality differs between species and study areas, and actual sand deposition mostly affects the chemical composition. The Si content in grasses decreases with sand deposition, which increases the digestibility. When measured at the end of the growing season N, C and P content are nearly affected. However, the elements Ca and Fe increase with aeolian activity, while Mg and Mn decrease

to a lesser extent. Generally food quality of Grey hair-grass, Crested hair-grass and Yellow bedstraw increases with active sand deposition, because of elevated Ca and Fe content in comparison to the N and P and to the grazing-inhibiting Si. These effects are probably depended on the soil geochemistry. The richer the dune sand is in easily weatherable minerals like CaCO₃ and iron hydroxides, the larger the effect is. Effects in food quality appear to be short, and have disappear for most 10-15 year after stabilisation.

General effects of sand sedimentation on invertebrate fauna living in soil and vegetation are difficult to define. Active sand sedimentation has a negative effect on detritivores and omnivores, probably due to less litter accumulation. Effects on other species groups differ for dunes poor in CaCO₃ and Fe, and dunes rich in these minerals, and there is a strong relation between food quality and the biomass of invertebrates. In CaCO₃ rich dunes blowouts induce a high density and biomass of large invertebrates, and therefore may increase food availability for insectivore bird species as Wheatear, Tree pipit and Red-backed shrike. Moreover, the positive effects of sand sedimentation on species composition are stronger in CaCO₃ rich dunes, and nearly absent in CaCO₃ poor dunes. Therefore, the effects of geochemistry on food quality seems to affect the invertebrate fauna. The effects of sand sedimentation seems fades away quickly 10-15 year after stabilisation, and thus has mainly an instantaneous effect. Consequently, it is in important to have contentiously active blowouts for a high for small fauna diversity. The species numbers of grasshoppers is increased at a local scale when aeolian activity is present, because of a small-scale pattern of dynamic and stable sites.

Relation between blowout density and favourable spatial effects on dune grassland vegetation (Ch.11)

For ecological restoration of dry dune grasslands small scale aeolian activity is not an objective for its own, but it should enhance to some extend favourable effects in space and time on this habitat. For the planning of measures promoting aeolian dynamics it is useful to have an indication for the number of blowouts which are desired in order to maintain dune grasslands in suitable status. Therefore the relation of blowout density with spatial effects on dune grasslands has been quantified based on the research results. This relationship is based on the size of the deflation zone and the CaCO₃ content of the top layer in the deflation zone. In this theoretical exertion is aimed for ecological effects in 10 to 15 % of the area. In the case of dune areas with moderate CaCO₃ content (0.5-1.0% DW) app. 100-200 blowouts/km² are needed. In the case of CaCO₃ rich (> 1.0 % DW) sand 25 to 50 blowout/km² are sufficient, which is comparable with currently active dune areas in South-Holland. In deeply decalcified dune areas like in the Wadden region and North-Holland a large number (300 blowouts/km²) is needed. This density is much higher than the actual values of these areas and unrealistic high. Here planning will have to aim for lower densities. The calculation shows that in calcareous dunes substantial spatial effects can be achieved, but that in deeply decalcified dunes the effects are limited. Planning of (re)activation of blowouts should fit to the realistic possibilities for small scale aeolian activity of dune areas (e.g landscape type, current vegetation, infrastructure).

Guidelines for management and restoration (Ch.12)

For planning of short-time measures it is useful to develop a long-term strategy. Such a strategy should preferably balance the ecological 'need' of small-scale aeolian activity for dune grasslands (habitat H2130 Grey dunes), the ecological potentials, and the feasibility to archive small scale aeolian activity. The strategy is developed for a long term because the effects of aeolian activity on soil and vegetation can lost for a long time (50-100 y) after stabilization of blowouts. Not only the effects during the aeolian activity are important, but also the beneficial effects after stabilization. In the plans the soil and vegetation succession towards species rich dune grasslands which takes 20-40 years, should be included. A first track is to assess the ecological 'need' for aeolian activity based on the actual condition of dune grasslands and nature targets. A second track is to look at the possibilities for promoting aeolian activity with measures, and also the potential for spontaneous activation. The outcome of both tracks are confronted with each other. Important is that a strategy fits to the aeolian potentials of the dune landscape type/ dune zone, and is not only focused on nature targets. Generally next strategies are possible:

- Aim for on spontaneous activation by increasing the sensibility for aeolian activity with management of the vegetation (e.g. grazing), which suppresses the development to shrub and woodland. This strategy is to be considered for foredune zones of the Renodunal district.
- Plan measures for artificial activation on a short time when prospects for spontaneous activation are low. This strategy is relevant for the mid-dune and inland dune zones of the Renodunal district and the Wadden district.

- Increase input of sand by aeolian transport from the beach and beach ridge to the fore dune zones when dune areas are deeply decalcified. This strategy is important for many dune areas in the CaCO₃ poor Wadden district.
- Chose not for artificial activation, when potentials for aeolian activation are low or measures have major negative side effects (e.g. to long work trails for machinery).

In the case of measures for activation the following practical guidelines apply:

- Remove vegetation and the humic top soil at sites with a high potential for aeolian (higher part of (high) dunes) preferably at the SE, S and SW slopes. The best sites are high dunes with low vegetation in the surroundings.
- Although general guidelines for the size of sites to be activated are hard to give, one can adjust this to the dune zone (foredune relatively large, mid-dune and inland dune zone relatively small).
- Depth for sod cutting depends on the vegetation type. The humic rich layer and a major part of the root profile should be removed.
- Improve exposure to wind by removing high vegetation in the surrounding part.
- In the case of spatial variation in quality of dune grasslands, plan measures in dune grasslands low in quality.
- Zones with sand accumulation should have a short vegetation. Additional measures (mowing, chopping) may be needed.
- Plan measures on a time scale of decennia. Spatial variation of different aeolian stages of blowouts (active, ceasing, stabilized) adds more to ecological targets than only many young blowouts.
- Counterbalance the benefits and adverse effects of measures.
- Try to avoid permanent depots of excavated soil, and - if possible - aim for removing the material.
- Also look for possibilities for input of calcareous sand from the beach and sea ridge toward the dune area.
- Apply vegetation management as mowing and chopping in order to maintain a short vegetation has a high potential for spontaneous activation of blowouts.

current state
actual condition and trends -> dune grasslands -> vegetation structure -> small-scale aeolian activity -> topography/ altitude -> humus profile, soil organic matter of top layer -> lime profile, lime content
management/ policy -> nature targets -> status and upcoming measurement coastal defense/ suppletion of sediment

analyse
-> dune grassland: perspective of size and quality? -> pattern of aeolian activity in space and time -> potential for aeolian activity -> pattern of decalcification, calcium carbonate content

assessment
ecological need: -> sufficient aeolian activity? -> (more) aeolian activity needed for vegetation? -> (more) aeolian activity needed for fauna? -> aim for proportion aeolian active surface? -> zones with strong potential for beneficial effects (calcium carbonate content/ profile)?
potentions for aeolian activity: -> sensivity for aeolian activity is high or can be increased? -> sensivity for aeolian activity is low? -> zones with high potential for smallscale aeolian activity? -> possibilities for dynamic outerdunes and notches?

strategy
-> general increase aeolian sensitivity vegetation; spontaneous activation blowouts? -> choose for artificial (re)activation of blowouts? -> increase aeolian sand deposition from beach and outerdunes; possibly to combine with activation of blowouts in foredunes? -> additional measures for increasing aeolian sensitivity vegetation? -> aeolian activity would be beneficial for ecological targets, but measures for aeolian activation are omitted because of low potential for activation? -> no artificial aeolian activation because of enough spontaneous activation?

measures
-> decrease shrub and forest; grazing, mowing for short structure fixed dune grasslands -> regular vegetation mangement (e.g. grazing) -> artificial activation of blowouts :number/ area, specific sites -> artificial activation/ notches in outer dunes -> spread activation measures in time (several decades)

1

Inleiding

1.1 Aanleiding

1.1.1 Eolische dynamiek in relatie tot behoud en herstel van habitattype H2130 Grijze duinen

Eolische dynamiek was en is een zeer belangrijke randvoorwaarde voor biodiversiteit van de kustduinen. Dit geldt in belangrijke mate voor het habitattype Grijze duinen waarvoor Nederland binnen de EU een grote verantwoordelijkheid heeft. Eolische dynamiek zorgt zowel voor verjonging van de bodem, voor pioniersituaties, als voor het optreden van successie naar soortenrijke duingraslanden. Daarom dient de invloed van eolische activiteit in samenhang met bodemvorming en ontwikkeling van de vegetatie op een tijdschaal van meerdere decennia te worden beschouwd. Het verloop van de eolische activiteit binnen een gebied zorgt voor een grote variatie in ruimte en tijd van de bodemtoestand (humusprofiel, vochthuishouding, bodemchemie) en successiestadium (open zand, pionierbegroeiing, gesloten gras-mosvegetatie). Ook flora en fauna van Grijze duinen hangen sterk samen met de invloed van verstuiving in het heden en verleden. Door veranderingen in het gebruik en beheer van kustduinen en door factoren als de hoge stikstofdepositie en de lage konijnenstand is de verstuivingsdynamiek de afgelopen eeuw afgenomen. Dit heeft grote gevolgen voor de biodiversiteit en daarmee ook de kwaliteit van Grijze Duinen. Daarom is voor herstel van Grijze duinen is het bevorderen van kleinschalige verstuiving een perspectiefvolle optie. Afgelopen decennia zijn projecten uitgevoerd voor (re)activatie van verstuivingen op grote en kleine schaal. Daarbij is in diverse projecten inzicht verworven in de geomorfodynamiek. De ecologische effecten op Grijze duinen van kleinschalige verstuiving zijn echter minder intensief onderzocht. Voor herstel, instandhouding en uitbreiding van Grijze duinen met een goede kwaliteit is het cruciaal om te achterhalen op welke wijze kleinschalige verstuiving effectief kan worden ingezet. Hiervoor is meer inzicht nodig in zowel de geomorfodynamische als ecologische effecten.

Reactivering van verstuiving is ook in veel duingebieden gepland als maatregel in het kader van de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS). In veel duingebieden moeten op korte termijn (12 jaar) grote aantallen stuifkuilen worden aangelegd. Zorgwekkend is daarbij dat de lokale uitwerking van zulke maatregelen nauwelijks gefundeerd is op kennis over de eolische processen en de ecologische effecten. De hoge intensiteit van deze maatregelen in PAS-gebiedsplannen kan zelfs een averechts effect hebben op de Grijze duinen. Met dit onderzoek wil OBN meer inzicht krijgen in de rol van kleinschalige dynamiek bij het behoud van Grijze Duinen en welke factoren het ontstaan en de eolische levensduur van kleinschalige verstuivingen in kustduinen sturen. Dit OBN-onderzoek heeft daarom een hoge urgentie voor de uitvoeringspraktijk. Ook pleit dit voor een afstemming van de uitwerking van zulke maatregelen op de uitkomsten van het onderzoek.

1.1.2 Kleinschalige eolische dynamiek in kustduinen

Eolische dynamiek is een essentieel kenmerk binnen duinlandschappen. Het landschap is in het verleden ontstaan door grootschalige processen zoals de ontwikkeling van paraboolduinen. Binnen de grootschalige vormen is het landschap verder gevormd door de ontwikkeling van stuifkuilen en andere kleinschalige verschijnselen. Sterke dynamiek leidt in eerste instantie tot de ontwikkeling van Witte duinen, waar Helm domineert en de omstandigheden te dynamisch zijn voor de vestiging van soorten die kenmerkend zijn voor duingraslanden. Grijze duinen ontstaan hetzij op grotere afstand van deze dynamiek, dus in een ruimtelijke gradiënt waar de dynamiek langzaam afneemt, hetzij op stabiliserende locaties, dus in een temporele gradiënt. Vooral de milde dynamiek, met periodiek lichte overstuiving van hooguit enkele cm of nog minder is een belangrijke randvoorwaarde voor het goed functioneren van Grijze duinen.

Rond 2000 was in de meeste duingebieden achter de zeereep nog slechts hier en daar sprake van dynamiek. Er zijn vele factoren aan te wijzen die van invloed zijn of zijn geweest op de afname van dynamiek in het kustduinlandschap (Arens et al. 2013). Belangrijk zijn in ieder geval vastlegging van verstuivingen, stabilisatie van de kustlijn, aanplant van bossen, stikstofdepositie, het

fluctueren van de konijnenstand, bodemvorming, natuurlijke successie en mogelijk ook klimaatverandering (toename temperatuur en neerslag). In het afgelopen decennium is de kleinschalige verstuwingsdynamiek in verschillende duingebieden weer toegenomen, maar in de huidige situatie is de mate van dynamiek binnen het duinlandschap nog beduidend lager dan in het recente verleden van 50-100 jaar geleden. Naast afname van eolische dynamiek in duinen achter de zeereep/zeewering is ook de dynamiek in de zeereep sterk teruggelopen. De natuurlijke dynamiek van kustaangroei en -afslag zorgde in het verleden voor een actieve zeereep vanuit waar zand vanaf het strand via de zeereep het binnenland in kon verplaatsen. Omdat de Nederlandse kustduinen een belangrijke taak vervullen in het beschermen van het achterliggende laagland tegen de zee werd de zeereep ingericht als een vaste, hoge barrière (zeewering) die niet mocht verplaatsen. Dit heeft ertoe geleid dat een groot deel van de zeereep nu vrijwel geen dynamiek meer vertoont en zandtransport naar het achterliggende duin weinig optreedt. De aanwezige dynamiek is veelal beperkt tot de voorzijde van de zeereep.

In de PAS-herstelstrategie voor Grijze duinen wordt groot belang gehecht aan de rol van eolische dynamiek binnen het kustduinlandschap. Herstel van dynamiek wordt als een bewezen maatregel beschouwd voor ontwikkeling en/of behoud van Grijze duinen. Het is helaas niet zo simpel dat herstel van dynamiek altijd tot een verbetering van Grijze duinen leidt. Zo kan grootschalige dynamiek vooral tot de ontwikkeling van Witte duinen leiden. Ook zijn begin jaren '90 in het kader van EGM, gereactiveerde stuifkuilen in het Huttenvlak in Duin- en Kruidberg en Eldorado op Terschelling vrij snel dichtgegroeid (Kooijman et al. 2005). De effecten op een langere termijn, zoals de herstart van de successie in en rond de kuilen is hier mogelijk wel gunstig geweest voor herstel van duingraslanden. Zo'n ecologisch effect is tot nu toe niet onderzocht. Inmiddels moet echter vrijwel iedere natuurbeheerder aan de slag met dynamiek. Binnen de PAS staan er omvangrijke ingrepen op stapel om dynamiek op met name kleine schaal binnen het duinlandschap terug te brengen met als doel het verbeteren van de randvoorwaarden voor Grijze duinen. Er is dus een enorme, urgente behoefte aan praktisch toepasbare kennis over dit onderwerp.

Inmiddels is duidelijk dat herstel van grootschalige dynamiek door eenmalig ingrijpen een illusie is, tenzij dit wordt gecombineerd met dynamische zeereepontwikkeling (Arens & Geelen, 2006; Arens & Neijmeijer, 2014). Zulke grootschalige dynamiek kan wel, bijdragen aan ontwikkeling van duingraslanden in delen die stabiliseren. Ook uit het suppletieonderzoek (Arens et al., 2012) blijkt dat grootschalige dynamiek binnen de zeereep op relatief korte termijn (10 jaar) op gang kan komen, waarbij de zone met Witte duinen zich landwaarts uitbreidt. Voor de Grijze duinen zijn de effecten op deze termijn echter niet gunstig, omdat ze deels worden omgezet in Witte duinen, zonder dat er Grijze duinen bijkomen. Met betrekking tot kleinschalige dynamiek hebben we ook enkele handvatten. Herstel van dynamiek door het opengraven van gestabiliseerde stuifkuilen blijkt voor wat betreft het herstel van dynamiek zelf beperkt succesvol (bijv. Arens et al. 2006, Van Boxel et al. 1997). Ruwweg een derde van de open gegraven kuilen blijft voor langere termijn (>10 jaar) dynamisch, de rest groeit dicht. Dit laatste wil echter niet zeggen dat er geen ecologische winst is gerealiseerd.

1.1.3 Bodemprocessen in Grijze duinen en invloed van kleinschalige eolische dynamiek daarop

Het habitatype Grijze duinen komt voor op lutumarme, basenarme tot basenrijke zandbodems. De productiviteit van de vegetatie wordt beperkt door droogtestress in de zomer en vaak ook een geringe beschikbaarheid van nutriënten. Op gestabiliseerde bodems ontwikkelen soortenrijke duingraslanden zich pas na 2 tot 4 decennia (Aggenbach et al. 2013; Fujita & Aggenbach 2015b). Jongere bodems worden gekenmerkt door pionierstadia met mossen en korstmossen. In de loop van de successie treedt accumulatie van humus op, waardoor de vochtvoorziening verbetert (Fujita & Aggenbach 2015b; Aggenbach et al. in press.; Voortman et al. in voorbereiding) en de N-beschikbaarheid toeneemt (Kooijman et al. 2005, Kooijman & Besse 2002; Fujita et al. 2014). De basenrijkdom van de bodemtoplaag kan afhankelijk van het kalkgehalte hoog of laag zijn. Veel droge duingraslanden zijn oppervlakkig ontkalkt waardoor ze in de bovenste decimeters een sterke stratificatie van de pH hebben (Fujita & Aggenbach 2015a+b+c). De soortenrijkdom van duingraslanden wordt sterk bepaald door de zuurgraad van de toplaag: hoe lager de pH van de toplaag is, hoe lager de soortenrijkdom (Aggenbach et al. 2013). Zolang de toplaag door bijvoorbeeld lichte overstuiving relatief basenrijk blijft, kunnen soortenrijke duingraslanden op oude bodems (meerdere eeuwen) voorkomen. In oude graslanden met een humusrijke bodem hebben ook grondmieren door graaactiviteit een belangrijke rol in het op het peil houden van een hoge basenrijkdom in de toplaag. Op oude, diep ontkalkte bodems komen soortenarmere en vergraste vormen voor.

Kleinschalige verstuiving heeft via twee processen invloed op bodem en vegetatie. Allereerst zorgt uitstuiving voor het ontstaan van een humusarme zandbodem. Dit geldt ook in zones waar veel zand wordt afgezet. De toplaag is veelal kalkrijker dan de voormalige oude bodems, zeker als die ontkalkt is. Dit biedt dan de mogelijkheid voor nieuwvorming van baserijk duingrasland. In jonge pionierstadia is er nog veel kale bodem aanwezig. Soortenrijke duingraslanden ontwikkelen zich als de instuiving gering wordt en als uitstuifzones langere tijd zijn gestabiliseerd. Bij stabilisatie van de bodem gaat zich op den duur een nieuw humusprofiel met duingrasland ontwikkelen. Duingraslanden zijn daarom niet alleen gebaat bij een langdurige eolische levensduur van verstuivingen, maar juist ook bij de periodiciteit daarvan. Voor de ontwikkelingstermijn van nieuw, soortenrijk duingrasland moet dan gerekend worden op 2-4 decennia (Kooijman et al. 2005; Aggenbach et al. 2013).

Rond uitstuifzones en zones met sterke instuiving zijn ook strooizones in oud duingrasland van belang. Deze instuiving is dan zo gering dat geen duidelijke nieuwe zandlaag op het oude humusprofiel ontstaat. Het gesedimenteerde zand wordt dan door regenwater ingespoeld in de moslaag en door bodemleven vermengd met de Ah-laag. Als het aangevoerde zand kalkhoudend is, treedt aanvoer van basen op. In een bodem die ontkalkt is en waar basische kationen van het adsorptiecomplex (deels) zijn uitgeloozd, kunnen daardoor de basenverzadiging en pH van de toplaag toch hoog zijn (Fujita & Aggenbach 2015a). Langdurige, zwakke instuiving van kalkrijk zand kan dus de levensduur van baserijk duingrasland verlengen. (Re)activatie van stuifkuilen kan dan ook een snelle manier zijn om de kwaliteit van oud duingrasland in de zwakke strooizones te verbeteren. Verstuiving kan ook leiden tot regeneratie van baserijk duingrasland uit verzuurde duingraslanden, zoals in het Vlaggenduin (Van Haperen et al. 2014).

1.1.4 Interacties van kleinschalige dynamiek met fauna

De verwachting is dat bij een kleinschalige dynamiek veel diersoorten voorkomen, als gevolg van de gradiënten in verstuiving. Binnen duingraslanden kunnen hierdoor verschillende ontwikkelingsstadia van de vegetatie dicht bij elkaar voorkomen, waarin verschillende diersoorten leven (Wouters & Remke 2012). De variatie in fauna wordt waarschijnlijk gestuurd door zowel de vorming van jonge bodems (temperatuur, vochtgehalte, fysieke weerstand) als door de aanwezigheid van voedselbronnen (plantenwortels, detritus, prooien). Daarnaast heeft het voorkomen van verschillende successiestadia (zoals open zand en bloemrijke vegetatie als nest- en foerageerplek) een meerwaarde voor mobiele fauna.

Naast een hogere diversiteit aan soorten worden er ook lokaal hogere dichtheden aan diersoorten verwacht. Door instuivende zand verbetert zowel de kwantiteit als de kwaliteit van goed verteerbaar plantaardig materiaal door versnelde plantengroei of verbeterde bodemcondities (Van Duinen et al 2004 & 2005). Uit eerder onderzoek is gebleken dat er een sterke correlatie bestaat tussen verstuiving, het voorkomen van verse helmwortels (Van der Putten et al 1988) en hoge dichtheden van wortel-etende keverlarven (Van Duinen et al 2004 & 2005). De volwassen kevers – vooral Kleine junikevers en Rozenkevers – vormen weer bulkvoedsel voor soorten als Grauwe klauwier en Tapuit (Kuper et al. 2000, Van Oosten 2015). Dat de beschikbaarheid van prooien rondom stuifkuilen groot is, wordt onderstreept door onderzoek naar terreingebruik van de Tapuit (Van Oosten 2015).

1.2 Doel van het onderzoek

Dit onderzoek heeft de volgende doelstellingen:

1. Achterhalen van de belangrijkste factoren die ontstaan en eolische levensduur van kleinschalige verstuivingen in kustduinen sturen.
2. Bepalen van de invloed in tijd en ruimte van kleinschalige verstuiving op de instandhouding ('ecologische levensduur') van Grijze duinen op bodemchemie en diversiteit van systeemkarakteristieke planten en dieren, in zowel kalkrijke als kalkarme duinen.
3. Vertaling van deze kennis naar praktische beheerhandvatten voor instandhouding en nieuwe ontwikkeling van Grijze duinen door het reactiveren van kleine stuifkuilen.

1.3 Onderzoeksvragen

De opdrachtbeschrijving geeft aan dat het onderzoek de volgende onderzoeksvragen moet beantwoorden:

Hoofdvraag:

H: Op welke manier (beste locaties, manier van uitvoeren en tijdstip of frequentie van ingrijpen) kan reactiveren van kleinschalige dynamiek optimaal bijdragen aan een duurzaam behoud van het habitatype Grijze duinen (H2130) en de karakteristieke diersoorten die van dit type afhankelijk zijn?

Deelvragen:

- D1:** Wat zijn verschillen in (a)biotische factoren (klimaat/ meteorologie, N-depositie, ligging, bodem, omliggende vegetatie, kalkrijkdom van de bodem, begrazing, betreding, konijnen etc.) van locaties die lang eolisch actief zijn en van locaties die snel spontaan stabiliseren?
- D2:** Hoe groot is het ruimtelijke effect van kleinschalige verstuiving op bodemchemie, vegetatie en fauna?
- D3:** Hoe lang treden nog bodemchemische en ecologische effecten van kleinschalige verstuiving op, nadat de eolische activiteit is gestopt?
- D4:** Van welke factoren (kwaliteit bronmateriaal, dikte overstuivingslaag, duur van eolische activiteit, etc.) zijn ruimtelijke effecten en de 'ecologische levensduur' van kleinschalige dynamiek afhankelijk?
- D5:** Hoe kunnen eolische en ecologische effecten – en de variatie daarin – ruimtelijk en temporeel vertaald worden in herstelstrategieën voor Grijze duinen op landschapsschaal?

Beantwoording van deze vragen vergt een analyse op verschillende schaalniveaus en voor de vertaling naar de beheer- en herstelpraktijk een integratie van deze niveaus. De aanpak (hoofdstuk 2) is daarop afgestemd. De hoofdvraag en deelvraag D5 wordt beantwoord in de synthese (H 11), aan de hand van de resultaten uit de deelonderzoeken (H 4 t/m 10) waarin de overige deelvragen worden beantwoord.

1.4 Afbakening onderzoek

Type dynamiek dat onderzocht wordt

Het onderzoek richt zich vooral op de kleinschalige dynamiek, die zich vooral manifesteert in de vorm van secundaire stuifkuilen. Zowel de grootte van stuifkuilen, de omvang van de strooizone als het aantal jaar dat een stuifkuil actief is, varieert sterk, evenals het aantal actieve stuifkuilen binnen een gebied. Doordat zowel in de ruimte (aantal, omvang, beïnvloedingsgebied) als in de tijd (leeftijd, snelheid van (re)generatie, mate van ontwikkeling) variatie optreedt, ontstaat een ecosysteem met veel afwisseling. Het onderzoek richt zich op mozaïekpatronen van kleine tot middelgrote stuifkuilen met een doorsnede van de deflatiezone van grofweg 10-20 m en op de duur (schaal van decennia) van effecten van verstuiving op de toestand van Grijze duinen.

Ook de grondwaterstand heeft invloed op verstuiving. Omdat in deze studie gekeken wordt naar kleinschalige verstuiving en deze vooral in de hoge delen van het duinlandschap optreden, wordt de interactie van verstuiving en grondwaterstand echter van ondergeschikt belang geacht. Wel wordt de aanwezigheid van grondwater meegenomen in onderdeel 2 (luchtfotoanalyse van de Nederlandse kust).

Geografische begrenzing

Het onderzoeksgebied bestaat uit de hele Nederlandse kustduinzone. Het onderzoek aan het patroon van kleinschalige verstuiving plaats in de gehele kustduinzone. Het onderzoek aan de effecten van kleinschalige verstuiving op bodem, vegetatie en kleine fauna heeft plaatsgevonden op lokale schaal op diverse locaties langs de Hollandse vastelandskust en enkele Waddeneilanden. Deze onderzoekslocaties bestrijken kalkrijke tot diep ontkalkte duingebieden.

Te onderzoeken faunagroepen

Onderzoek aan fauna is kostbaar en tijdrovend. Het habitatype H2130* Grijze duinen is voor een aantal N2000 vogelsoorten van direct belang, zoals Boomleeuwerik, Roodborsttapuit en Tapuit

(Smits & Kooijman 2012a+b). Voor deze soorten vormt de verzuivering van de Grijze duinen het grootste knelpunt, door de afname van zowel de aanwezigheid als de bereikbaarheid van prooidieren. Andere karakteristieke diersoorten zijn Bruin blauwtje, Duinparelmoervlinder, Heivlinder, Kleine parelmoervlinder, Kommavlinder, Blauwvleugelsprinkhaan, Duinsabelsprinkhaan, Knopsrietje en Konijn. Hoewel deze soorten een duidelijke ecologische binding met duingraslanden hebben, werkt ook hier de relatie met de ontwikkeling van kleine stuifkuilen veelal indirect. Tellingen van de genoemde diersoorten zijn bovendien vrijwel allemaal opgenomen in de SNL- en PAS-monitoring. Een uitzondering zijn sprinkhanen – die als eenvoudig te bemonsteren planteneters een interessante link vormen tussen verstuiving, voedselkwaliteit en prooibeschikbaarheid. Deze groep wordt daarom ook onderzocht in dit project.

Voor de rest wordt in dit project ervoor gekozen om het budget vooral in te zetten op onderzoek naar de 'resources' in plaats van op tellingen van de doelsoorten voor beheer en beleid. Door verstuiving verbetert zowel de kwantiteit als de kwaliteit van goed verteerbaar plantaardig materiaal, waardoor ook bepaalde keversoorten toenemen (Van Duinen et al. 2004 & 2005). Dat de beschikbaarheid van prooien rondom stuifkuilen groot is, wordt onderstreept door onderzoek naar terreingebruik van de Tapuit (Van Oosten 2015). Voor onderzoek naar de aanwezigheid van voedsel (waardplanten, nectarplanten en prooien), de kwaliteit van het plantaardige voedsel en de benodigde nestgelegenheid (open zand en schrale vegetatie) is een groot aantal monsterpunten nodig om de invloed van verschillende factoren van dynamiek in kalkrijke en kalkarme Grijze duinen te ontrafelen.

De bemonstering van diersoorten wordt gericht op de hoeveelheid en functionaliteit van organismen met een sterke lokale binding aan de bodem en de vegetatie. Een groot deel van de onderzochte organismen heeft een lage positie in de voedselketen en een deel van deze organismen fungeert als prooi voor doelsoorten. Door naast de abundantie ook de grootte hiervan te bepalen en de soorten op basis van ecologische eigenschappen (generatietijd, voedselgilde) in te delen in functionele groepen, wordt er kennis ontwikkeld over de manier waarop kleinschalige dynamiek de fauna en het voedselweb in Grijze duinen aanstuurt. De te onderzoeken diergroepen zijn overigens niet alleen van belang als voedsel voor doelsoorten. Ook op zich dragen ze bij aan de biodiversiteit in de Grijze duinen.

1.5 Combinatie onderzoek van de duinwaterbedrijven

De ambities van het gevraagde onderzoek zijn hoog en tegelijkertijd vergt geomorfologisch en ecologisch onderzoek aan verstuiving een grote inspanning. Om de armslag van dit OBN-onderzoek te vergroten is dit OBN-onderzoek afgestemd op het DPWE-programma van de vier duinwaterbedrijven in Nederland. In het OBN-onderzoek worden resultaten gebruikt van onderzoek naar de invloed van kleine stuifkuilen op de zandbalans, bodem en vegetatie dat in 2014 t/m 2016 is uitgevoerd (Aggenbach & Fujita, 2015a+c). Hiermee was het mogelijk om een grote dataset te gebruiken van 8 stuifkuilen die variëren in kalkrijdom en verstuivingshistorie.

2 Aanpak op hoofdlijn

Het onderzoek opgesplitst in de volgende onderdelen:

1. Inventarisatie kennisbehoefte bij beheerders en provincies (H 3).
2. Analyse van het recente ruimtelijke patroon (2000-2014) van kleine kleinschalige dynamiek langs de Nederlandse kust in samenhang met omgevingsfactoren (H 4 t/m 6).
3. Analyse van verandering van kleine kleinschalige dynamiek (1975-2015) in enkele duingebieden in samenhang met omgevingsfactoren (H 7).
4. Analyse van effecten van kleinschalige eolische dynamiek op bodem en vegetatie (H 8 en 9).
5. Analyse van effecten van kleinschalige eolische dynamiek op kleine fauna (H 10).
6. Synthese (H 11)
7. Adviezen voor de beheer- en herstelpraktijk (H 12).

Tot slot worden ook kennislacunes besproken en aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan (H 13)

In Tabel 2-1 wordt de relatie gelegd tussen de onderdelen en onderzoeksvragen.

Een nadere toelichting op de aanpak van afzonderlijke onderdelen is opgenomen in de hoofdstukken waarin de deelonderzoeken worden besproken. Hieronder worden de onderdelen op hoofdlijn geduid.

Onderdeel 1: Inventarisatie kennisbehoefte bij beheerders en provincies

Aan het begin van het onderzoeksproject zijn beheerders en provincies tijdens een workshop (september 2015) geïnformeerd over de bestaande kennis over kleinschalige verstuiving en is aansluitend ook de specifieke behoefte aan kennis bij de provincies en natuurbeheerders gepeild. Reden om deze workshop in een vroeg stadium te organiseren is dat de kustprovincies en natuurbeheerders al snel aan de slag moeten met maatregelen voor het bevorderen van kleinschalige verstuiving in het kader van Natura 2000 beheerplannen en de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS), en er grote aantallen stuifkuilen moeten worden ontwikkeld. Op betreffende workshop zijn ook eerste resultaten uit onderdeel 2 (patroon kleinschalige eolische dynamiek langs Nederlandse kust) gepresenteerd. In hoofdstuk 3 is het resultaat van de inventarisatie van kennisbehoefte beschreven.

Onderdeel 2: Analyse van het recente ruimtelijke patroon (2000-2014) van kleine kleinschalige dynamiek langs de Nederlandse kust in samenhang met omgevingsfactoren

Allereerst zijn alle duingebieden langs de Nederlandse kust geanalyseerd op het patroon van kleinschalige dynamiek in het jaar 2000 en 2014 met behulp van luchtfoto's. Dit leverde inzicht op in het recente ruimtelijke patroon van de kleinschalige verstuiving en de recente veranderingen die daarin zijn opgetreden (H 4). Vervolgens is het patroon van relevante omgevingsfactoren geanalyseerd in samenhang met de aangetroffen patronen van de recente kleinschalige dynamiek. Deze analyse is puur correlatief (H 5). Om de relatieve invloed van omgevingsfactoren nader te duiden is een multivariate analyse uitgevoerd op basis van de dataset van ca. 40 deelgebieden die resulteerde uit H 6. Deze analyse is uitgevoerd voor het ruimtelijke patroon in 2000 en 2014 en voor de trends in kleinschalige dynamiek tussen 2000 en 2014. Resultaten daarvan staan in H 6.

Tabel 2-1: De link tussen onderzoeksvragen en de onderdelen.

Onderdeel	Vraag					
	H	D1	D2	D3	D4	D5
1. Inventarisatie kennisbehoefte bij beheerders en provincies (H 3)	verkennende fase					
2. Analyse van het recente ruimtelijke patroon (2000-2014) van kleine kleinschalige dynamiek langs de Nederlandse kust in samenhang met omgevingsfactoren (H 4 t/m 6)		●				
3. Analyse van verandering van kleine kleinschalige dynamiek (1975-2015) in enkele duingebieden in samenhang met omgevingsfactoren (H 7)		●				
4. Analyse van effecten van kleinschalige eolische dynamiek op bodem en vegetatie (H 8 en 9)			●	●	●	
5. Analyse van effecten van kleinschalige eolische dynamiek op kleine fauna (H 10)			●	●		
6. Synthese en adviezen voor de beheer- en herstelpraktijk (H 11 en 12)	●					●

Code	Onderzoeksvraag
Hoofdvraag	
H	Op welke manier (beste locaties, manier van uitvoeren en tijdstip of frequentie van ingrijpen) kan reactiveren van kleinschalige dynamiek optimaal bijdragen aan een duurzaam behoud van het habitatype Grijze duinen (H2130) en de karakteristieke diersoorten die van dit type afhankelijk zijn?
Deelvragen	
D1	Wat zijn verschillen in (a)biotische factoren (klimaat/ meteorologie, N-depositie, ligging, bodem, omliggende vegetatie, kalkrijkdom van de bodem, begrazing, betreding, konijnen etc.) van locaties die lang eolisch actief zijn en van locaties die snel spontaan stabiliseren?
D2	Hoe groot is het ruimtelijke effect van kleinschalige verstuiving op bodemchemie, vegetatie en fauna?
D3	Hoe lang treden nog bodemchemische en ecologische effecten van kleinschalige verstuiving op, nadat de eolische activiteit is gestopt?
D4	Van welke factoren (kwaliteit bronmateriaal, dikte overstuivingslaag, duur van eolische activiteit, etc.) zijn ruimtelijke effecten en de 'ecologische levensduur' van kleinschalige dynamiek afhankelijk?
D5	Hoe kunnen eolische en ecologische effecten – en de variatie daarin – ruimtelijk en temporeel vertaald worden in herstelstrategieën voor Grijze duinen op landschapsschaal?

Onderdeel 3: Analyse van verandering van kleine kleinschalige dynamiek (1975-2015) in enkele duingebieden in samenhang met omgevingsfactoren

In dit onderdeel (H 7) wordt voor de afgelopen ca. 40 jaar nader geanalyseerd welke trends zijn opgetreden in de mate van eolische dynamiek en hoe dat samenhangt met belangrijke omgevingsfactoren. Daarbij is ingezoomd op een aantal duingebieden waarvan veel informatie over de ontwikkeling van de eolische dynamiek toegankelijk was. Om de invloed van omgevingsfactoren nader te duiden zijn ook statistische analyse uitgevoerd.

Onderdeel 4: Analyse van effecten van kleinschalige eolische dynamiek op bodem en vegetatie

Dit onderdeel is uitgewerkt in twee veldstudies. Een veldstudie (H 8) heeft ingezoomd om de ruimtelijke effecten van stuifkuilen te kwantificeren. Daarvoor zijn gedurende 2014 tot 2016 4 actieve en 4 gestabiliseerde stuifkuilen onderzocht in oppervlakkig tot dieper ontkalkte duinzones in de Luchterduinen en Meijndel. Dit betroffen alle stuifkuilen die spontaan zijn ontstaan. Tevens

is in dit deelonderzoek gekeken naar de tijdschaal van ontkalking. In de andere veldstudie (H 9) is een vergelijking gemaakt tussen het patroon van de bodem en vegetatie in eolisch actieve en gestabiliseerde locaties. Daarvoor is in 2015 tot 2017 onderzoek uit vijf duingebieden langs de Hollandse vastelandskust (Vlaggenduin en Huttenvlak) en Waddeneilanden (Nederlanden op Texel, Eldorado op Terschelling en Rietpad op Ameland). Deze gebieden bestrijken niet ontcalcite tot diep ontcalcite duinzones en betroffen deels natuurlijke stuifkuilen en deels gereactiveerde stuifkuilen en een kerf. Beide veldonderzoek kijken naar patronen van bodemprofiel (humus, kalk), bodemchemie (organische stof, kalk, pH), vegetatiestructuur en de soortensamenstelling van de vegetatie en de samenhang daartussen. In de tweede veldstudie is ook gekeken naar patronen van het stikstofgehalte in de bodem. Beide studies leveren veel inzicht in de ruimtelijke en temporele effecten van lokale verstuiving op de toestand van de bodem en vegetatie van duingraslanden.

Onderdeel 5: Analyse van effecten van kleinschalige eolische dynamiek op kleine fauna

In dit onderdeel is een veldstudie uitgevoerd naar het voorkomen van sprinkhanen in en rond actieve stuifkuilen en gestabiliseerde stuifkuilen in Meijendel en De Nederlanden op Texel. Daarnaast is gekeken naar het voorkomen van bovengrondse kleine fauna in sterke instuifzones, zwakke instuifzones en de zone zonder instuiving van zowel actieve als gestabiliseerde stuifkuilen. Deze aanpak geeft inzicht in de invloed van de mate van overstuiving op de kleine fauna diversiteit op het moment dat verstuiving nog plaats vindt en in hoeverre die nog doorwerk na stabilisatie die ca. 10-20 jaar geleden op getreden. De variatie van kleine fauna is kwantitatief geanalyseerd op het niveau van taxonomische hoofdgroepen die gelinkt zijn functionele kenmerken. De resultaten staan in H 10.

Onderdeel 6: Synthese en adviezen voor de beheer- en herstelpraktijk

In een synthese (H 11) worden de resultaten van de deelonderzoek met elkaar in verband gebracht en worden de onderzoeksvragen beantwoord. Op basis hiervan worden adviezen gegeven voor de beheer- en herstelpraktijk (H 12). Deze adviezen worden allereerst gegeven op niveau van strategieën op landschapsniveau en een langere tijdschaal. Daarna volgen op adviezen uitvoeringsniveau met tips voor waar en hoe aan de slag te gaan met activatie van kleinschalige verstuiving. Dit biedt de mogelijkheid voor beheerders en beleidsmakers op lokale maatregelen in te bedden in een lange termijn strategie en te bepalen of en wanneer actief ingrijpen noodzakelijk is.

3 Kennisbehoefte bij beheerders en provincies

3.1 Samenvatting

Tijdens een goedbezochte OBN workshop over kleinschalige verstuiving voor natuurbeheerders is recente kennis gedeeld en zijn vragen bij de beheerders geïnventariseerd. De workshop voorzag in een duidelijke en actuele behoefte om kennis en ervaring over kleinschalige verstuiving uit te wisselen. De beheerders brachten vragen op het terrein van het functioneren van verstuiving (geomorfologie, ecologische effecten), plannen van maatregelen, technieken voor (re)activatie, nabehoor, monitoring en neveneffecten. Verder werden veel opmerkingen gemaakt op basis van praktijkervaring met (re)activatie. Geconstateerd werd dat bestaande (oudere) kennis over geomorfologie van kleinschalige verstuiving weinig wordt toegepast. Er is grote behoefte aan meer handvatten voor waar reactivatie maatregelen kunnen worden gepland, hoe ze worden uitgevoerd en welk nabehoor zinvol is. De doelgroep hecht veel belang aan gerichte monitoring van de effecten van reactivatie op de geomorfodynamiek, bodem en vegetatie met een uniforme methode. Regelmatige uitwisseling en ervaring wordt op prijs gesteld.

3.2 Aanpak

Dit OBN-onderzoek vond plaats op de 'vooravond' van veel ingrepen in duingebieden. In de PAS-gebiedsanalysen van duingebieden zijn voor een korte periode veel en op een ruime schaal maatregelen voor activering van verstuiving voorzien. Daarbij moeten in veel gebieden in een korte periode veel stuifkuilen worden geactiveerd. Het is positief dat aan herstel van Grijze duinen gaat worden gewerkt, maar een gebrek aan onderbouwing van de dimensionering en meer gespreide planning in de tijd van de lokale uitwerkingen is zorgwekkend. Het is daarom zaak om de bestaande kennis snel over te brengen bij beheerders en provincies. Tevens is het zinvol te inventariseren welke vragen de uitvoeringspraktijk heeft bij het plannen van verstuivingsmaatregelen. Om deze reden is in een vroeg stadium van het project een workshop voor medewerkers van terreinbeheerders en provincies georganiseerd. De doelgroep bij de provincie bestond uit medewerkers die zich bezighouden met de planning van maatregelen in duingebieden (PAS, N2000). De doelgroep bij de natuurbeheerders zijn regionale stafmedewerkers en lokale medewerkers die maatregelen en beheer lokaal uitwerken. De workshop vond plaats op 7 september 2015 in Leiduin bij Waternet en werd bezocht door ca. 40 personen.

Het programma van de workshop bestond uit voordrachten over:

- praktijk van reactiveren kleinschalige verstuiving – Mark van Til (Waternet);
- bestaande kennis over reactiveren van kleinschalige verstuiving en effecten op Grijze duinen – Annemieke Kooijman/ Bas Arens/ Marijn Nijssen/ Camiel Aggenbach;
- overzicht van bekende kennisvragen uit de praktijk en gebieden/locaties waar in de PAS al concrete plannen voor zijn gemaakt – Camiel Aggenbach.

Aansluitend op de voordrachten vond een discussie plaats over welke vragen belangrijk zijn om op te pakken, welke vragen zitten in het OBN onderzoek, hoe vragen kunnen worden beantwoord die niet opgenomen zijn in lopend onderzoek. Tevens is bediscussieerd welke gebieden die in kader van PAS worden aangepakt zich lenen voor een monitoring/effectmeting. De workshop werd afgesloten met een excursie naar natuurlijke en gereactiveerde stuifkuilen in de Luchterduinen (zuidelijk deel Amsterdamse Waterleidingduinen).

De resultaten van de workshop bestaan uit een overzicht van kennisbehoefte en ervaringen.

3.3 Resultaten

In Tabel 3-1 staat een overzicht van kennisvragen en in Tabel 3-2 een overzicht van de opmerkingen die zijn ingebracht tijdens de OBN-workshop van september 2016.

Tabel 3-1: Overzicht van kennisvragen naar aanleiding van de OBN-workshop van september 2015.

Definitie
- Wat zijn dimensies van kleinschalige verstuiwing?
Geomorlogie
- Wat initieert verstuiwing?
- Waardoor sommige stuifkuilen langdurig actief?
- Welke omvang geschikt voor stuifkuilen?
- Minimale oppervlakte voor (re)activeren?
- Welke positie in het landschap/ reliëf?
- Hoe rekening houden met windrichting?
- Levensduur van stuifkuilen?
- Hoe stuifkuilen zonder nabeheer langdurig actief?
- Aanleggen stuifkuil in omgeving met verruigde vegetatie niet zinvol?
- Op nieuwe plekken stuifkuilen aanleggen, of juist op oude locaties?
- Wat is invloed van korrelgrootte en -vorm?
- Invloed van beheerintensiteit op reactivatie?
- Waar is reactivatie niet nodig?
Ecologie landschapsschaal
- Welke dichtheid aan verstuiwingen in nodig?
- Dichtheid afhankelijk van duinlandschapstype?
- Stuifkuilen ruimtelijk clusteren of juist spreiden?
- Beter vele kleine dan enkele grote verstuiwingen?
- Welke positie stuifkuil t.o.v. bestaande habitattypen?
- Welke spreiding in de tijd van reactivatie?
- Wat is referentie voor verstuiwing in duingebieden met geringe N-depositie?
Ecologische effecten op Grijze Duinen
- Welke effecten van kleinschalige verstuiwing?
- Omvang van effecten?
- Tijdsduur van effecten?
- Invloed van omvang stuifkuil op ecologische effecten?
- Stabiliseren van een stuifkuil ook goed?
- wat voegt verstuiwing toe aan andere maatregelen?
Planvorming maatregelen kleinschalige verstuiwing
- Wanneer kies je voor grootschalig en wanneer voor kleinschalig?
- Handvaten voor uitwerken lokale plannen?
- Waarop zijn normen voor stuifkuildichtheden gebaseerd?
- Wat is de wisselwerking met begrazing?
- waar begrazen en waar verstuiwen?

Aanleg techniek (leren in de praktijk!)
- Diepte afgraven, alleen zode of dieper?
- Ook diepe wortels weggraven (m's)?
- Diepte afgraven verschillend voor kalkrijk/arm i.v.m. met bewortelingsdiepte?
- Hoe (re)activeren voor lange duur?
- Hoe zoden/ zand lokaal verwerken?
- Omgang met werkpaden voor machines en afvoer?
- Alternatieve maatregelen voor plaggen/ afgraven zonder afvoer van materiaal?
- Lokale drukbegrazing inzetten als trigger?
- Bij reactivatie oude kuilen refugia sparen?
- Bij kopjesduin hele kopje vrijmaken?
Nabeheer (leren in de praktijk!)
- In hoeverre, hoe lang nabeheer nodig?
- Tot alle wortels weg zijn?
- Efficiëntie langdurig handmatig of enkele malen grootschalig, machinaal nabeheer?
- Begrazing, maaien gunstig voor actief houden stuifkuilen?
- Voor- en nadelen van diverse nabeheer methodes (grizzle, (spit)frezen, handmatig)?
Monitoring/ evaluatie
- Hoe bepaal je of een ingreep succesvol is (geweest)?
Neveneffecten op landschappelijke en ecologische waarden
- Hoe stuifkuilen aanleggen in lastig toegankelijk en kwetsbaar gebied?
- Hoe omgaan met oorspronkelijke niet aantasten landschapsvormen?
- Liever enkele grote kuilen dan vele kleinen i.v.m. met beperken werkpaden?
- Welk effect op Nauwe korfslak?
Neveneffecten op andere functies
- Balans dichtheid verstuingen en kustverdediging?
- Omgang met overstuiving van paden, leidingen, waterlopen ect?
Beleid
- In hoeverre bewezen PAS maatregel?
- Afvoer topklaag in zeevering?

Tabel 3-2: Overzicht van opmerkingen gemaakt tijdens de OBN-workshop van september 2015.

Regio	Onderwerp
	Verstuivingsgevoeligheid
Delta	De aanwezigheid humuslaag zou een belangrijke factor zijn in het autonoom ontstaan van verstuivingen. Maar dit is met een luchtfoto-analyse niet te achterhalen, vergt veldonderzoek. De aanwezigheid van een humuslaag is sowieso van belang, hetzij met betrekking tot het succesvol reactiveren, hetzij met betrekking tot de ecologische respons.
	PAS
generiek	Men is tevreden over de PAS, in die zin van dat het een hoop mogelijkheden geeft. Alleen de bureaucratische rompslomp er omheen is een probleem. De stadia waarin men verkeert zijn divers. Sommigen zijn al aan de slag, anderen moeten nog beginnen. PAS hectiek: veel in korte tijd! Grote tijdsdruk
	Vooruitzichten
Wadden	Effecten op basenrijkdom kunnen tegen vallen door lage kalkgehalten of diepe ontkalking
Wadden	In smalle duingebieden zijn mogelijkheden voor verstuiving gering i.v.m. met veiligheid en natuurwaarden in het achterliggende duin
	Ervaringen met (re)activeren van verstuiving
Delta	Met name Natuurmonumenten heeft in de Delta al de nodige ervaring met initiëren/reactiveren van dynamiek. Zoek vooral naar plekken waar het in het (recente) verleden kaal was, hier is de kans op succes het grootst.
Renodunaal	Bij PWN heeft men dezelfde mening. Hier wordt veel met vrijwilligers gedaan aan het open maken van kleine stuifkuilen. Men richt zich dan ook op locaties met een dunne bodem, omdat het anders met vrijwilligers te veel energie kost (vrijwilligers haken af) en te weinig oplevert.
Delta	Bij Zeeuwse Landschap is de keuze voor plekken vooral gebaseerd op de aanwezigheid van Vogelkers. Hier moet ook wat mee, en omdat hier al intensief wordt ingegrepen wordt hier m.b.t. verstuiving gelijk op aangehaakt. Na verwijderen van Vogelkers wordt de bodem losgehaald met een cultivator. Wortels worden naar boven gehaald, maar niet weg gehaald. Cultivator voor losmaken van de bodem werkt alleen goed als er geen organische stof aanwezig is. Zodra dat wel het geval is krijg je door de hele bodem menging met organische stof met als gevolg opslag.
Wadden	Beweiding kan stuifkuilen door tred open houden
Wadden	Grootschalige verstuiving is maatschappelijk bezien moeilijk
Wadden	Verstuiving in verschillende duinzones kan ook interessant zijn
Wadden	Drukbe grazing kan voor activatie zorgen. Wel daarna begrazingsdruk aanpassen.
Wadden	Soms leidt Prunus-bestrijding tot verstuiving
Wadden	Afwegen inspanning ingrepen en nabehoer
generiek	Enkele suggesties die uit deze ervaringen naar voren komen: <ul style="list-style-type: none"> • Kijk naar het verleden, weinig begroeid, weinig bodem, geeft meer garanties voor succes. • Gebruik oude luchtfoto's voor punt hierboven. • Leren door te proberen; een hoop zal toch uit de praktijk moeten blijken. Goed volgen wat er gedaan is en wat dat oplevert. • Doe rustig aan met plannen van activatie • Tussendoor plannen bijstellen, ook bijvoorbeeld als nieuwe kennis daartoe aanleiding geeft. • Kennisdelen hoe eerder hoe beter. • Durf keuzes te maken. • Goed naar systeem kijken.
	Kennisuitwissing/ netwerk
generiek	- Kennisuitwisseling wordt als zeer waardevol gezien en ervaren. - Deze workshop zou ieder jaar herhaald moeten worden. - Het is belangrijk om nieuwe inzichten zo snel mogelijk te delen en voorlopige antwoorden op vragen te geven. - Ook kennisuitwisseling naar publiek is belangrijk om uit te leggen waar je mee bezig bent, publiek te informeren en daarmee draagvlak te creëren.

3.4 Conclusies

Algemene bevindingen zijn:

- Bij de beheerders en provincies is grote behoefte aan zowel geomorfologische en ecologische kennis, als pragmatische kennis en ervaring met reactivatie maatregelen.
- Bestaande (oudere) kennis over geomorfologie van kleinschalige verstuiving wordt weinig toegepast. Om deze reden is een beknopt kennisoverzicht hierover van Rienk Slings (Slings 2015) rondgestuurd in een mailing aan de doelgroep.
- Er is grote behoefte aan meer handvatten voor waar reactivatie maatregelen kunnen worden gepland, hoe ze worden uitgevoerd en welk nabehoor zinvol is.
- De doelgroep hecht veel belang aan gerichte monitoring van de effecten van reactivatie op de geomorfodynamiek, bodem en vegetatie. Men onderschrijft een initiatief om te proberen een selectie van te reactiveren stuifkuilen uit het PAS-programma met een uniforme methode te monitoren.
- Er is bij de beheerders veel behoefte aan uitwisseling van kennis en ervaring.

4 Patronen van kleinschalige dynamiek langs de Nederlandse kust

Bas Arens & Tessa Neijmeijer

4.1 Samenvatting

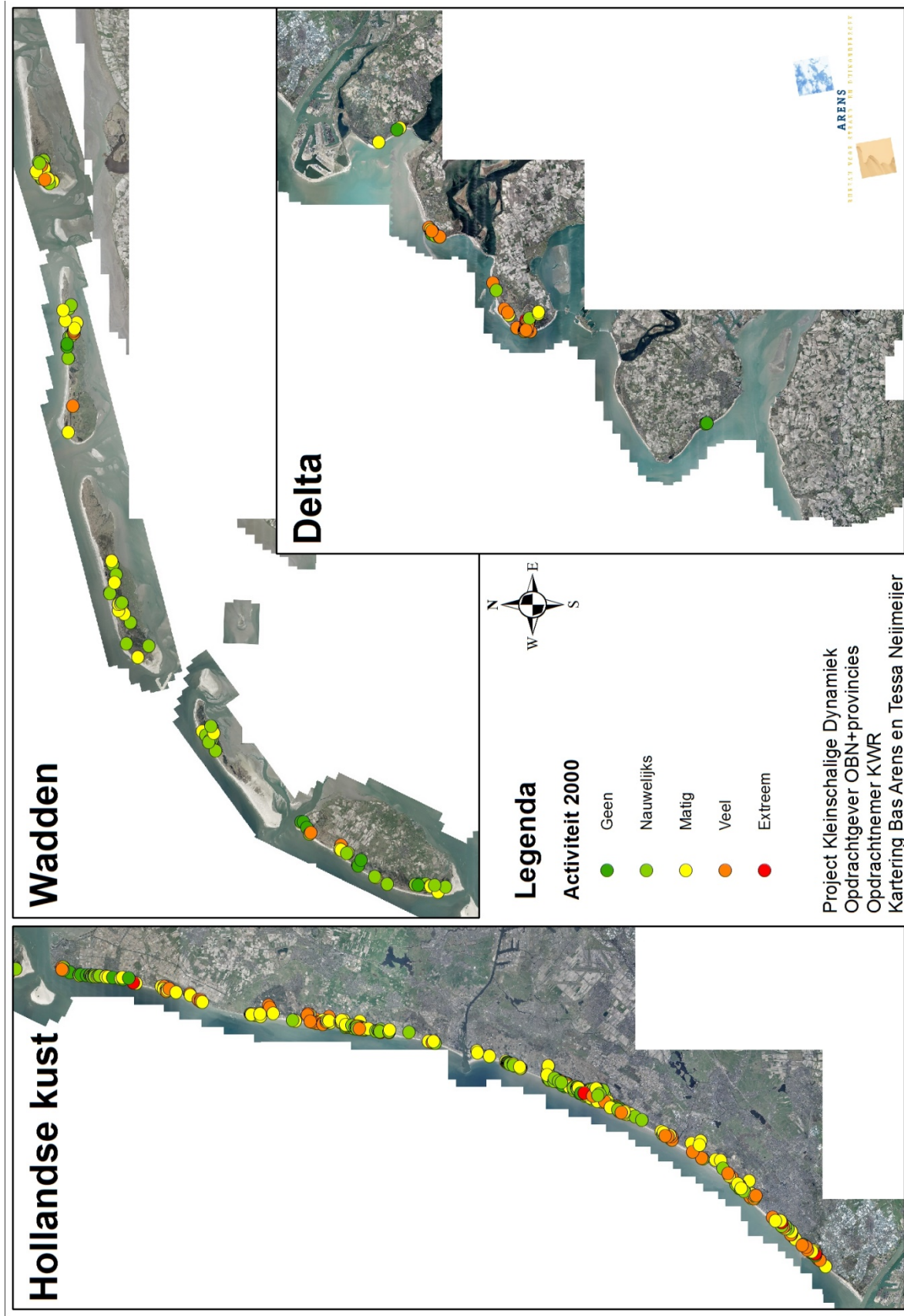
Er was nog maar weinig bekend over de precieze toestand van de kust met betrekking tot kleinschalige dynamiek. Men had wel een globaal beeld van stuifkuilactiviteit in verschillende gebieden, maar exacte data ontbraken. Voor de PAS worden richtlijnen gebruikt die gebaseerd zijn op de toestand in één gebied. Deze richtlijnen worden algemeen toegepast, terwijl niet bekend is van welke verschillende factoren bijvoorbeeld de dichtheid van stuifkuilen in een bepaald gebied afhankelijk is. Om inzicht te krijgen in de verdeling van stuifkuilen over de Nederlandse kust, en de recente ontwikkeling hiervan, is een kartering gemaakt van de (in zekere zin) actieve gebieden, met het aantal stuifkuilen en de mate van activiteit in het gebied in 2000 en 2014. Uit de inventarisatie blijkt dat er een groot verschil is in ontwikkeling van aantallen stuifkuilen per regio. De resultaten zijn samengevat in Figuur 4-1 t/m Figuur 4-4, met de aantallen stuifkuilen per gebied (Figuur 4-1), de mate van activiteit per gebied in 2000 (Figuur 4-2) en 2014 (Figuur 4-3) en de verandering van activiteit tussen 2000 en 2014 (Figuur 4-4).

Op de Wadden is het aantal stuifkuilen gering, met vooral op delen van Texel en Terschelling-Landerumerheide een toename, in de overige gebieden vooral een afname van het aantal kuilen tussen 2000 en 2014. De gemiddelde dichtheid is laag, met 0.3 kuil per hectare voor de gebieden waar dynamiek voor wordt gevonden. Voor het totale duinareaal is de dichtheid slechts 0.019 kuil/ha. Op Vlieland is de situatie het laagst met grote delen waar geen stuifkuilen meer voorkomen.

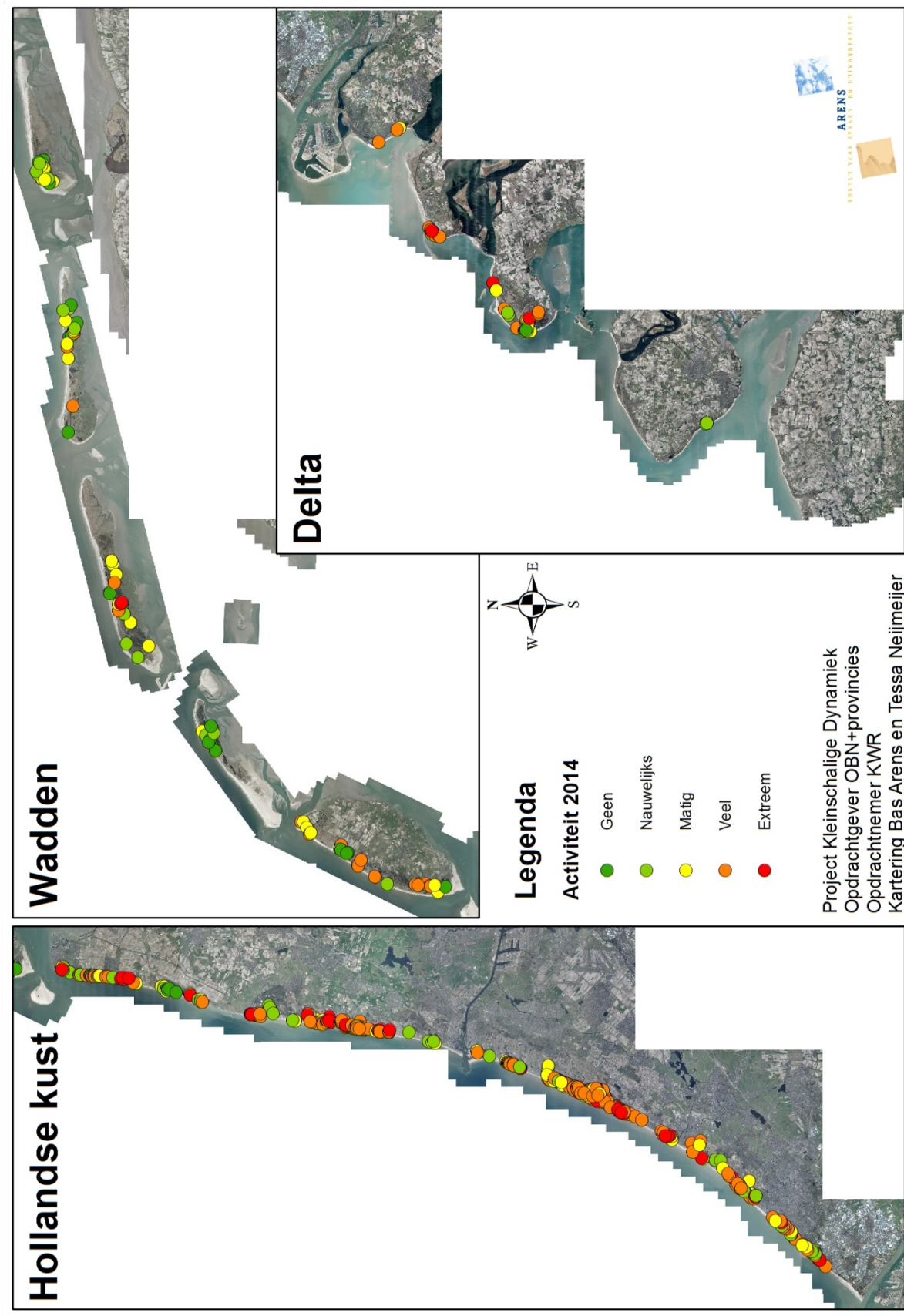
Langs de Hollandse kust is er variatie met gebieden met een afname aan stuifkuilen tussen 2000 en 2014, vooral rond Bergen aan zee zuid, maar verder overwegend toenames. De dichtheid hier is gemiddeld hoger dan op de Wadden, met 0.5 kuil per hectare in Noord-Holland, 0.81 kuil/ha in Zuid-Holland voor de gebieden waar dynamiek voor komt. Rondom Bergen aan Zee zuid zijn de dichtheden aanmerkelijk hoger, met soms meer dan 6 kuilen per hectare, wat extreem hoog is. Dergelijk hoge dichtheden worden nergens anders gevonden. In de Amsterdamse Waterleidingduinen, Hollands Duin, Berkheide en Meijendel zijn er veel delen waar het aantal stuifkuilen aanzienlijk is toegenomen, soms met grote aantallen. De gemiddelde dichtheid in laatstgenoemde gebieden is zelfs gestegen tot boven de 1 kuil/ha. Naar het totale duinareaal gerekend is de dichtheid in Noord-Holland 0.074 kuil/ha, in Zuid-Holland 0.26 kuil/ha.

In de Delta is het aantal actieve stuifkuilen bijzonder laag. Op Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen is zelfs hoegenaamd niets te vinden, op Voorne is het ook bijzonder mager. Alleen op Goeree en Schouwen komen nog actieve kuilen voor, op Goeree in aantal toenemend van 2000-2014. De gemiddelde dichtheid is 0.16 kuil per hectare, bijzonder laag en dit geldt alleen voor de gebieden waar dynamiek aanwezig is. Gerekend naar het totale duinareaal is de dichtheid minder dan 0.02 kuil/ha

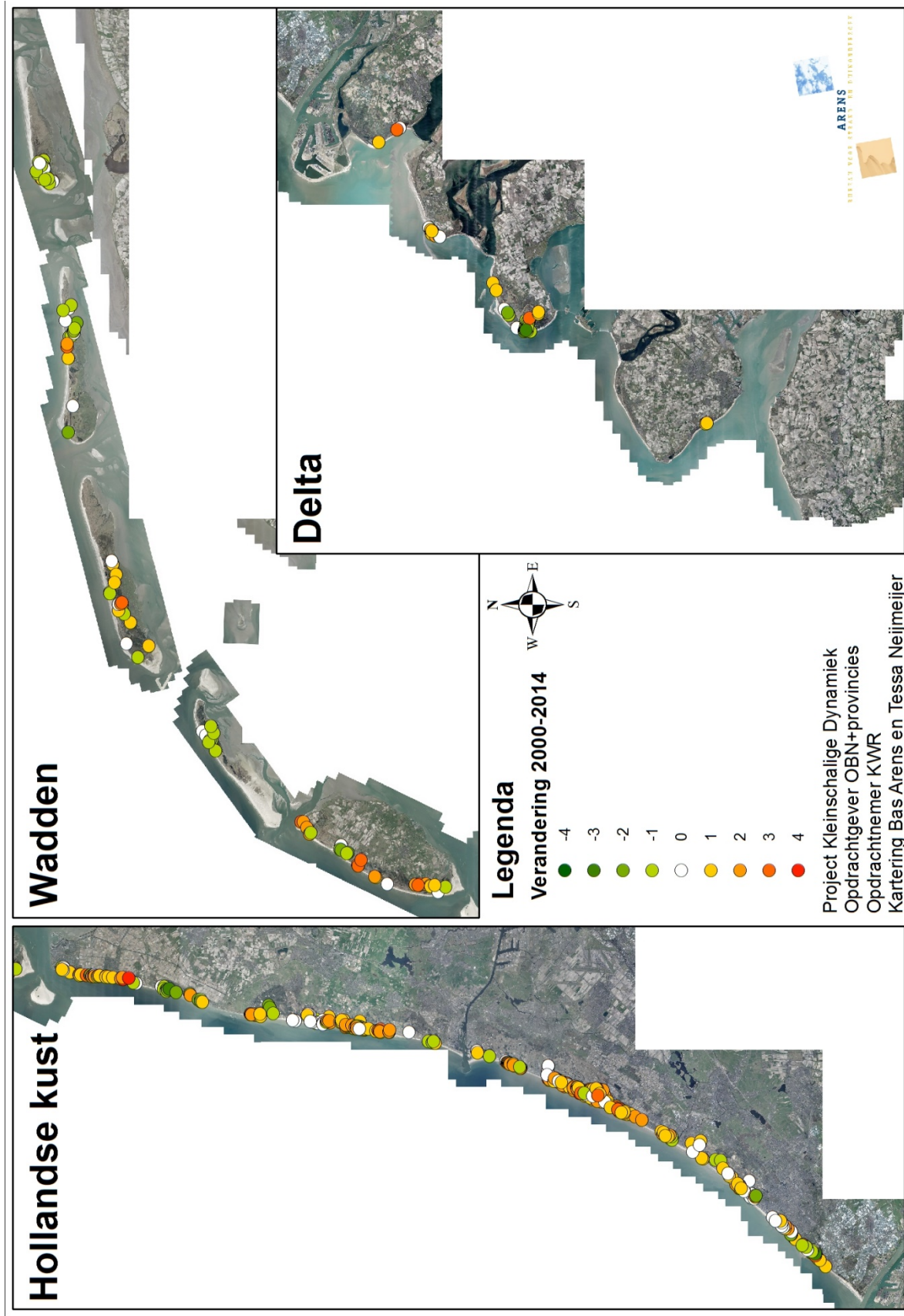
Opvallend is dat met name in het kalkarme Waddendistrict (Waddeneilanden en rondom de kalkarme Schoorlse duinen) het aantal kuilen overwegend is afgenomen. Langs de kalkrijke Hollandse kust zijn vooral in de hoge duinmassieven de aantallen veelal toegenomen, soms extreem.



Figuur 4-2. Mate van activiteit in de geïnventariseerde gebieden in 2000.



Figuur 4-3. Mate van activiteit in de geïnventariseerde gebieden in 2014.



Figuur 4-4. Verandering in mate van activiteit tussen 2000 en 2014. -4 = extreme stabilisatie, +4 = extreme dynamisering.

4.2 Inleiding

Er is nog maar weinig bekend over de precieze toestand van de kust met betrekking tot kleinschalige dynamiek. Slings (2015) geeft een beknopt overzicht van de bestaande kennis. Men heeft wel een globaal beeld van stuifkuilactiviteit in verschillende gebieden, door diverse locatie-studies (bijvoorbeeld Jungerius et al., 1981; Rutin, 1983; Geertsma et al., 1986; Noest, 1987; Jungerius en van der Meulen, 1997; Arens en Neijmeijer, 2014; Oldenburg, 2015), maar een integraal beeld van de gehele kust ontbrak tot nu toe. Voor de PAS worden richtlijnen voor de dichtheid van stuifkuilen gebruikt die gebaseerd zijn op de toestand in één gebied. Deze richtlijnen worden algemeen toegepast, terwijl niet bekend is van welke verschillende factoren bijvoorbeeld de dichtheid van stuifkuilen in een bepaald gebied afhankelijk is. Om inzicht te krijgen in de verdeling van stuifkuilen over de Nederlandse kust, en de recente ontwikkeling hiervan, is een kartering gemaakt van de (in zekere zin) actieve gebieden, met het aantal stuifkuilen en de mate van activiteit in het gebied in 2000 en 2014. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de inventarisatie besproken.

4.3 Methoden

Om een beeld te krijgen van de rol van kleinschalige dynamiek is een kartering gemaakt van alle dynamische gebieden langs de Nederlandse kust (landwaarts van de zeereep, zeereepdynamiek maakt geen deel uit van dit onderzoek). Hierbij is gebruik gemaakt van luchtfoto's uit 2000 en 2014, beschikbaar gesteld door Rijkswaterstaat. Voor deze jaren is een vergelijking gemaakt in de mate van activiteit, het aantal actieve stuifkuilen en de verandering.

De gebieden zijn ingedeeld in hoofdgebieden, deelgebieden en subgebieden. De subgebieden zijn de actieve zones waar in 2000, 2014 of in beide jaren een bepaalde mate van activiteit is waargenomen. De deelgebieden vormen een aggregatie van de subgebieden op basis van de landschappelijke eigenschappen en dan voornamelijk de hoogte. De subgebieden beslaan over het algemeen slechts een klein percentage van de deelgebieden. Een groot deel van de deelgebieden bestaat dus uit stabiel oppervlak. De hoofdgebieden vormen een aggregatie van de deelgebieden en ook hier vormen de deelgebieden slechts een beperkt percentage van de hoofdgebieden. Alle subgebieden zijn beoordeeld op de mate van activiteit en het aantal actieve stuifkuilen (of waarvan een deel nog actief is). Al het duinoppervlak buiten de subgebieden kan als stabiel en niet dynamisch worden beschouwd.

Hoewel de intentie was om het gehele Nederlandse duingebied te onderzoeken zijn er ongetwijfeld hier en daar gebieden gemist. Naar schatting is rond de 90% van het duingebied in kaart gebracht. Daarnaast zijn er ook zeker stuifkuilen als autonoom meegeteld waar de ontwikkeling door de mens is gestuurd, dit zal echter een klein percentage betreffen (1-5%). Verder zijn er hier een paar gebieden waar een gedetailleerdere onderverdeling wenselijk was geweest, wat gezien de beschikbare tijd echter niet haalbaar was.

4.3.1 Mate van activiteit

De mate van activiteit is voor de twee tijdstippen, 2000 en 2014, onderverdeeld in 5 categorieën (Tabel 4-1). Er is daarbij gelet op het percentage kaal oppervlak/sterke overstuiving t.o.v. vegetatie. De waarden in de laatste kolom worden gebruikt om de ontwikkeling (verandering) in activiteit te berekenen. De activiteit vindt vaak plaats in en om stuifkuilen, maar dat hoeft niet. Er zijn ook actieve gebieden waarbinnen geen duidelijke stuifkuilvormen zijn te onderscheiden.

4.3.2 Aantal stuifkuilen

Per gebied is het aantal (deels) actieve stuifkuilen bepaald of geschat. In grafieken zijn de hoeveelheden stuifkuilen per hoofdgebied samengevoegd.

4.3.3 Ontwikkeling in activiteit

De ontwikkeling in de activiteit is berekend aan de hand van de mate van activiteit en de waarde die de gebieden daarmee hebben gekregen. Gebieden kregen een hoge waarde bij hoge activiteit en een lage waarde bij lage activiteit. Door de activiteit van 2000 van de activiteit 2014 af te trekken ontstaat een waarde voor de ontwikkeling in het gebied. Deze waarde varieert van -4

(activiteit 1 in 2014, 5 in 2000, verschil is -4, extreme stabilisering) tot +4 (activiteit 5 in 2014, 1 in 2000, verschil is +4, extreme activering) en is omgezet in een legenda die in Figuur 4-5 is weergegeven.

Tabel 4-1. Categorieën voor mate van activiteit.

Categorie	Beschrijving	Waarde
Geen	Geen verse overstuiving of uitstuiving	1
Nauwelijks	Nauwelijks verse overstuiving (vegetatie domineert) of uitstuiving (minder dan de helft van kuil erosief), stabiel oppervlak domineert, ratio stuivend en kaal zand t.o.v. vegetatie 10-20%	2
Matig	Stabiel en dynamisch oppervlak even groot, 20-40%	3
Veel	Overstuiving en uitstuiving overheersen over vegetatie, 40-70%	4
Extreem	Ratio stuivend en kaal zand t.o.v. vegetatie >70%	5



Figuur 4-5 Legenda voor de ontwikkeling in activiteit.

In onderstaande beschrijving worden per gebied kaarten weergegeven, met daarin omljnd de hoofdgebieden, de deelgebieden en met gekleurde vlakken de subgebieden. De subgebieden zijn dus die delen waarbinnen de dynamiek zich afspeelt. Dit omvat over het algemeen slechts een beperkt oppervlak van het totale hoofdgebied. Na de kartering is een staafdiagram opgenomen met de hoeveelheid actieve stuifkuilen per hoofdgebied in 2000 en 2014. Tot slot is een staafdiagram opgenomen met de verandering in activiteit per deelgebied tussen 2000 en 2014. In de titel van dit staafdiagram staat de totale oppervlakte van het hoofdgebied min de oppervlakte waarbinnen geheel geen dynamiek is waargenomen. Bijvoorbeeld in Figuur 4-10 staat voor Texel 892-742 ha, wat betekent dat het totaal bestudeerde oppervlak op Texel 892 hectare bedraagt. Binnen 742 ha van dat oppervlak is geheel geen dynamiek waargenomen. De deelgebieden en subgebieden hebben dus betrekking op slechts (892-742=) 150 ha.

4.4 Waddeneilanden

4.4.1 Texel



Figuur 4-6. Texel.



Figuur 4-7. Ontwikkeling activiteit Eierlandsche Duinen (links) en de Slufter (rechts).

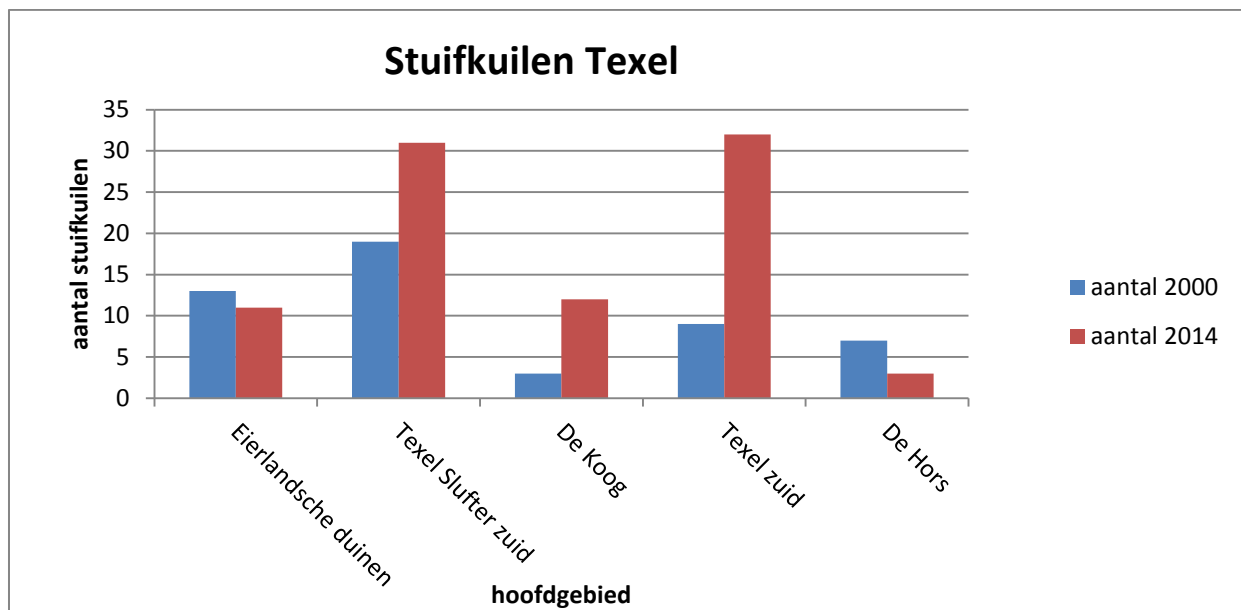


Figuur 4-8. Ontwikkeling activiteit De Koog (links) en Texel Zuid (rechts).

De duinen van Texel bevinden zich allemaal aan de Noordzeezijde van het eiland. De gemiddelde duinhoogte ligt rond de 10-12 m en is daarmee redelijk laag. Enkele uitschieters richting de 20m zijn te vinden bij De Koog, Eierlandsche Duinen en in het zuiden van Texel Zuid. De breedte van de zeereep varieert op de meeste plaatsen tussen de 40 en 60m.

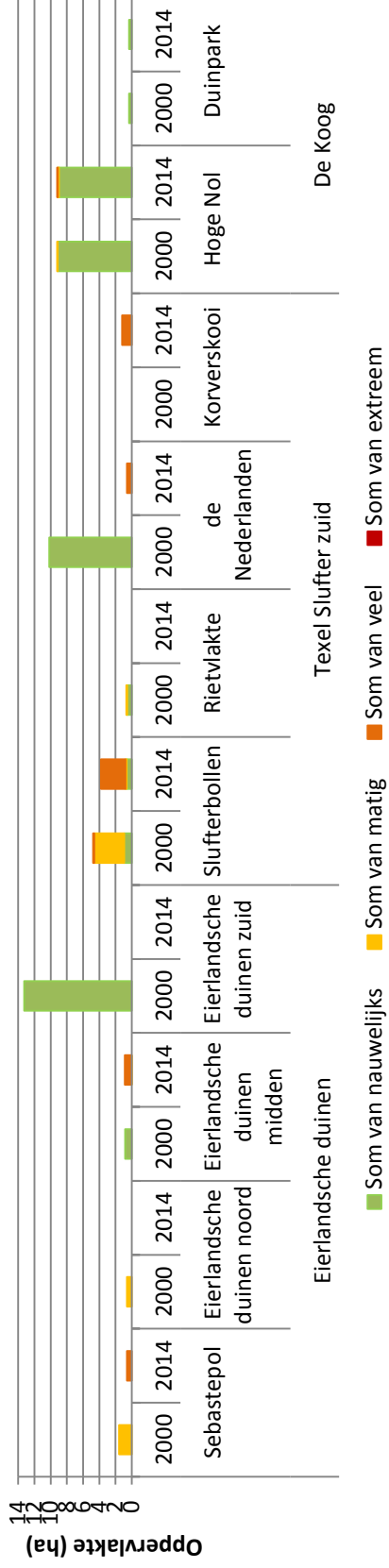
Activiteit in de zeereep van Texel is voor een groot deel beperkt, hoewel het zuiden van het eiland ter hoogte van de Hors te maken heeft forse doorstuiving. De activiteit en het aantal actieve stuifkuilen in het binnenland is beperkt tot een aantal gebieden. De meeste stuifkuilen worden aangetroffen bij deelgebieden Slufter Zuid en Texel Zuid.

Tussen 2000 en 2014 neemt het gestabiliseerde oppervlak toe. Het gaat hier voornamelijk om gebieden waar al weinig activiteit was. Opvallend is wel dat in de krimpende actieve gebieden de intensiteit in veel gevallen wel toeneemt. Dit is ook terug te zien in het groeiende aantal stuifkuilen in drie van de vijf hoofdgebieden.



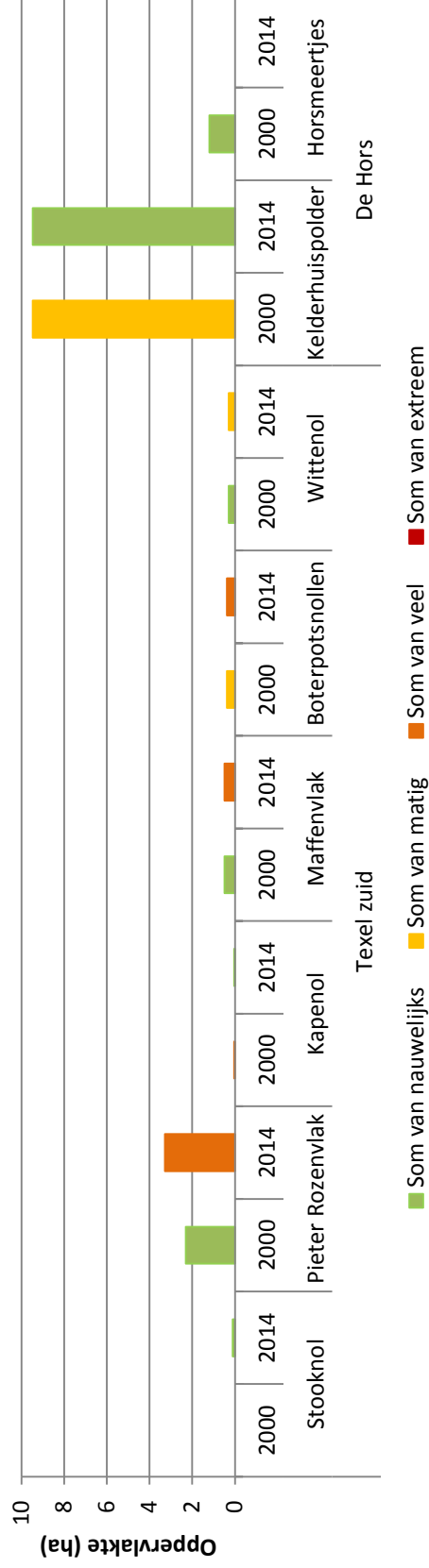
Figuur 4-9. Aantal stuifkuilen per hoofdgebied

Texel noord-midden Activiteit 892-742 ha



Figuur 4-10. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

Texel midden-zuid Activiteit 892-742 ha



Figuur 4-11. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

.1 Eierlandsche duinen

De Eierlandsche duinen zijn gelegen in het noorden van Texel. Dit gebied bestaat uit een middelhoge oude duinenrij (10-18m NAP) vlak achter de huidige zeereep met duinvalleien in de tussenliggende gebieden. Aan de oostkant liggen weilanden en in het zuiden grenst het gebied aan de Slufter. De aangroeiende zeereep is voornamelijk dynamisch aan de voorzijde. Het aantal stuifkuilen is afgenomen van 13 in 2000 naar 11 in 2014. De dynamiek is zeer beperkt en geconcentreerd in een paar kleine gebiedjes rond deze stuifkuilen. De rest van de Eierlandsche duinen is stabiel.

.1.1 Sebastepol

Bij deelgebied Sebastepol is een tweedeling te zien. In de zuidelijke lagere (max 8m NAP) helft is de dynamiek compleet verdwenen. Een groep actieve stuifkuilen is tussen 2000 en 2014 gestabiliseerd. In het noorden waar een iets hoger duin (max 10 m NAP) ligt, is juist een nieuwe stuifkuil ontstaan. Hier omheen is een patroon van kale plekken en schrale vegetatie te zien.

.1.2 Eierlandsche duinen noord

De Eierlandsche duinen noord zijn volledig gestabiliseerd. In 2000 was hier nog een viertal matig actieve stuifkuilen te zien. In 2014 zijn deze helemaal verdwenen.

.1.3 Eierlandsche duinen midden

Bij deelgebied Eierlandsche duinen midden, een matig hoog duin (± 14 m NAP) direct langs het pad, is een sterke toename in activiteit zichtbaar. Er zijn nieuwe stuifkuilen ontstaan. De omvang is gegroeid en de overstuiving is toegenomen. Er zijn veel sporen van betreding in dit gebied zichtbaar, wat waarschijnlijk heeft bijgedragen aan deze activering.

.1.4 Eierlandsche duinen zuid

Net als de Eierlandsche duinen noord is ook dit gebied geheel gestabiliseerd. Het kopjesachtige landschap toont veel kleine kale plekken en schrale vegetatie. In 2000 was dit echter veel duidelijker dan in 2014.

.2 Texel Slufter zuid

Net ten zuiden van de Slufter is een redelijk vlak gebied met een lage duinenrij (enkele hogere duinen tot ± 15 m NAP), ingesloten tussen een smalle zeereep en een dijk aan de landwaartse zijde. De meeste activiteit vindt plaats op de hoger gelegen delen waar lage grasachtige vegetatie zichtbaar is. Het aantal stuifkuilen is met 12 nieuwe kuilen flink toegenomen.

.2.1 Slufterbollen

Bij de Slufterbollen op de rand van de Slufter is de activiteit iets toegenomen. Een deel van de kuilen is hier gestabiliseerd, maar er zijn veel nieuwe kuilen en paden ontstaan door de hoge mate van betreding. Verder van de slufter vandaan heeft stabilisatie plaatsgevonden. Schrale vegetatie en de paar stuifkuilen die hier in 2000 zichtbaar waren zijn verdwenen.

.2.2 Rietvlakte

De nauwelijks actieve delen van de Rietvlakte zijn in 2014 volledig gestabiliseerd. In dit deelgebied wordt geen activiteit meer waargenomen.

.2.3 De Nederlanden

In 2000 was het deelgebied van De Nederlanden volledig bedekt met kleine kale vlakjes en schrale vegetatie. Er was op dat moment één kleine stuifkuil zichtbaar. In 2014 is vrijwel het hele gebied gestabiliseerd, maar heeft de dynamiek zich geconcentreerd bij twee hoge duinen. Hier zijn 3 actieve stuifkuilen met overstuivingszones zichtbaar. Er zijn nog steeds vlakjes met schrale vegetatie te zien, maar dit is veel minder dan in 2000.

.2.4 Korverskooi

Bij de Korverskooi is in een volledig stabiel gebied een autonoom actieve zone van 1.2 ha ontstaan. Gezien de grote hoeveelheid kleine kale vlekjes in het omliggende landschap is hier waarschijnlijk sprake van intensieve konijnenactiviteit.

.3 De Koog

Direct achter de zeereep net ten Zuiden van De Koog ligt een brede zone met lage duinen, kopjes en enkele restanten van hogere duinen van 15-20m NAP ter hoogte van Hoge Nol. Er is vrijwel geen tot nauwelijks activiteit in dit gebied. De activiteit in de zeereep blijft beperkt tot de voorzijde. De dynamiek in hoofdgebied De Koog is zeer beperkt en vrijwel allemaal geconcentreerd in deelgebied Hoge Nol.

.3.1 Hoge Nol

De zichtbare activiteit bij Hoge Nol bestond in 2000 uit veel kleine vrijwel kale oppervlakken. In 2014 is het aantal vlakken enigszins afgenomen, maar de activiteit is meer geconcentreerd rondom enkele tot stuifkuil ontwikkelde vlakken. Het aantal stuifkuilen is in de laatste 14 jaar dan ook toegenomen van 3 in 2000 tot 12 in 2014. Met uitzondering van een kleine kuil vlakbij een wandelpad waar veel betreding plaatsvindt, lijken de stuifkuilen autonoom te zijn ontstaan.

.3.2 Duinpark

Deelgebied Duinpark is onveranderd ten opzichte van 2000. Hier zijn kale oppervlakken zichtbaar, maar door gedeeltelijke stabilisatie is de activiteit hier zeer beperkt.

.4 Texel zuid

Net ten noorden van de Hors ligt een gebied wat bestaat uit een laag reliëf (6-12m NAP) afgewisseld met valleien, waar zo nu en dan water in staat. In het zuiden ter hoogte van Wittenol en Boterpotsnollen zijn de duinen met ongeveer 20m NAP een stuk hoger. Er is vrijwel geen activiteit in hoofdgebied Texel Zuid. Bijna alle dynamiek is beperkt tot het Pieter Rozenvlak.

.4.1 Stooknol

In 2000 was deelgebied Stooknol volledig stabiel. In 2014 is een kale of schrale plek ontstaan in een voormalige stuifkuil. Extreem veel kleine paadjes (niet kaal) tonen aan dat er betreding in dit gebied plaatsvindt.

.4.2 Pieter Rozenvlak

Ondanks de lage activiteit is het aantal stuifkuilen in hoofdgebied Texel Zuid toegenomen van 9 tot 32. Dit heeft voornamelijk te maken met een aantal delen bij het Pieter Rozenvlak waar de activiteit sterk is toegenomen. In deze strook met middelhoge duinen aan de landwaartse rand van de duinen zijn op meerder plaatsen stuifkuilen met flinke overstuivingszones ontstaan. De meest actieve zone bevindt zich in het noorden van het Pieter Rozenvlak. Opvallend is de grote hoeveelheid aan paden in het gebied, wat duidt op een hoge mate van betreding.

.4.3 Kapenol

Deelgebied de Kapenol ligt op een rijtje lage duinen met een enkele piek (± 18 m NAP) op flinke afstand van de actieve zeereep. Dit volledig stabiele gebied heeft in het noorden één kleine stuifkuil. Hoewel deze in 2000 nog flink actief was, is deze in 2014 vrijwel geheel gestabiliseerd.

.4.4 Maffenvlak

In het verlengde van Pieter Rozenvlak verder naar het zuiden ligt het Maffenvlak. Dit gebied is stabiel, maar heeft een paar stuifkuilen die in 2014 actiever zijn geworden. In de rest van het gebied zijn kleine oppervlakken met schrale vegetatie zichtbaar.

.4.5 Boterpotsnollen

Aan de rand van de Hors op een paar hogere duinen (± 20 m NAP) ligt deelgebied Boterpotsnollen. De dynamiek in dit deelgebied is zeer beperkt en geconcentreerd bij een paar stuifkuilen. De dynamiek in deze stuifkuilen is tussen 2000 en 2014 flink toegenomen.

.4.6 Wittenol

Het meest zuidelijke gebied van Texel zuid ligt in het verlengde van de Boterpotsnollen. Dit gebied is volledig stabiel met uitzondering van een klein waar schrale vegetatie zich heeft ontwikkeld tot een stuifkuil.

.5 De Hors

De Hors is ontstaan door aangroei aan de zuidpunt van Texel, waardoor opeenvolging van lage duinenrijen en valleien is ontstaan.

.5.1 Kelderhuispolder

De enige activiteit in dit deelgebied is zichtbaar rond een aantal kopjes aan de rand van de vallei waar uitstuiving tot op het grondwater heeft plaatsgevonden. Ten opzichte van 2000 zijn de kale oppervlakken nu vrijwel helemaal gestabiliseerd.

.5.2 Horsmeertjes

Bij de Horsmeertjes waren in het lage landschap met kopjes in 2000 nog 3 niet actieve kale oppervlakken te zien. In 2014 heeft hier volledige stabilisatie plaatsgevonden.

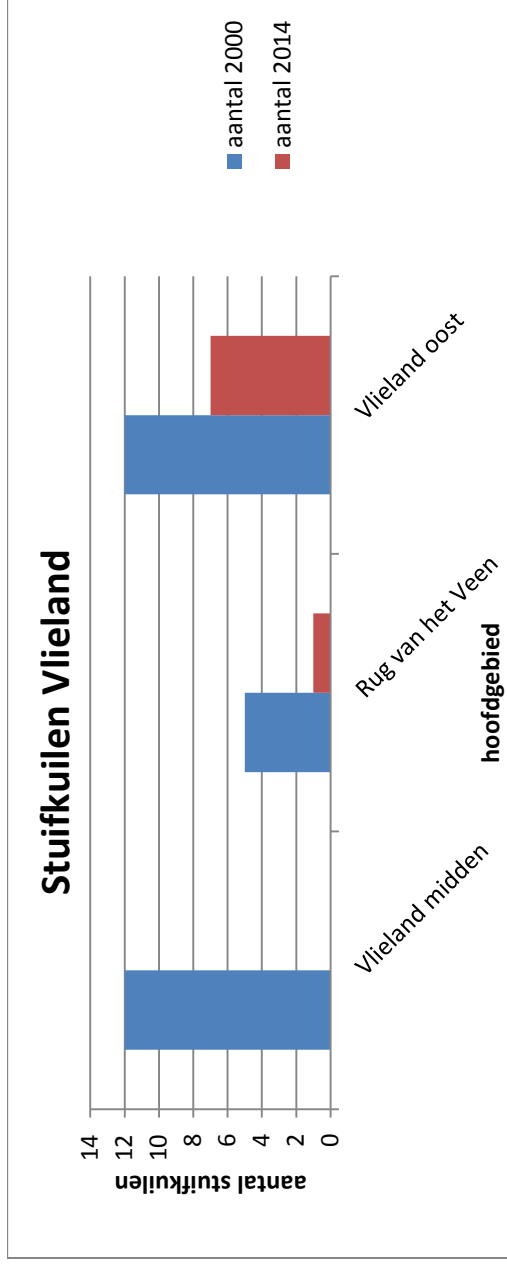
4.4.2 Vlieland



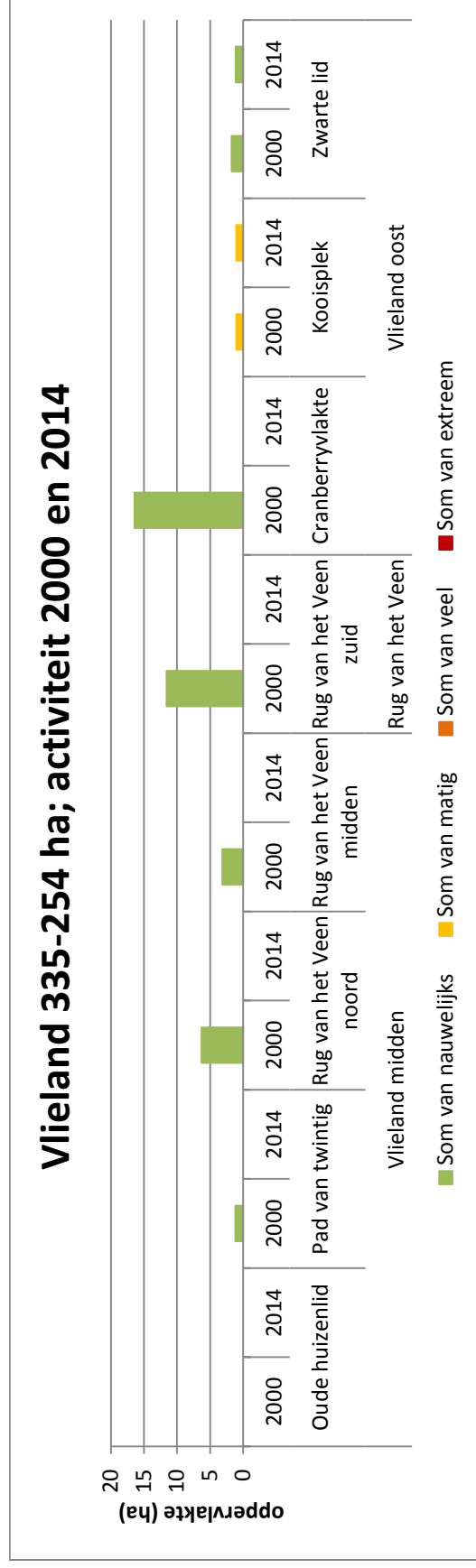
Figuur 4-12. Vlieland.



Figuur 4-13. Ontwikkeling activiteit Vlieland.



Figuur 4-14. Aantal stuifkuilen per hoofdgebiet.



Figuur 4-15. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

Net als de andere Waddeneilanden wordt ook Vlieland alleen aan de Noordzezijde begrensd door een zeereep. Voornamelijk aan de oostzijde van het eiland liggen een aantal zeer hoge duinen (25 tot ruim 40m NAP).

De dynamiek op Vlieland is tussen 2000 en 2014 flink teruggelopen. Een groot deel van de stuifkuilen is gestabiliseerd en het kleine beetje activiteit wat aanwezig was is verdwenen. Alleen bij de Kooisplek is nog een actieve kuil die door zichtbare betreding wordt opengehouden.

.1 Vlieland west

De westkant van Vlieland toont geen dynamiek. Er zijn geen actieve stuifkuilen zichtbaar.

.2 Vlieland midden

Vlieland midden bestaat uit kopjes en lage duinen achter een smalle dynamische zeereep (50m breed) met beperkte doorstuiving. Tussen 2000 en 2014 is dit hele gebied gestabiliseerd, de 12 actieve stuifkuilen in 2000 zijn in 2014 verdwenen.

.2.1 Oude huizenlid

Bij het hoger gelegen deelgebied Oude huizenlid zijn vormen van oude stuifkuilen zichtbaar. Deze waren in 2000 al geheel gestabiliseerd.

.2.2 Pad van twintig

In een vlak gebied met lage kopjes zijn in een iets hoger duin drie grote stuifkuilen zichtbaar. In 2000 toonden deze kuilen al nauwelijks activiteit. In 2014 zijn de stuifkuilen volledig gestabiliseerd.

.2.3 Rug van het Veen noord

Direct achter de actieve gekerfde zeereep bij Rug van het veen noord is een groepje lage duinen met gestabiliseerde stuifkuilen zichtbaar. In 2000 waren deze stuifkuilen nog deels open, maar in 2014 is hier niks meer van te zien.

.2.4 Rug van het Veen midden

Ook bij Rug van het Veen midden heeft volledige stabilisatie plaatsgevonden. Een aantal stuifkuilen is hier volledig uitgestoven tot op het grondwater. In 2000 waren langs de randen nog actieve plekken te zien, maar in 2014 is ook dit gebied volledig gestabiliseerd.

.3 Rug van het Veen

Aan de oostzijde van hoofdgebied Vlieland midden bevindt zich een cluster van stuifkuilen die grotendeels tot aan het grondwater zijn uitgestoven.

.3.1 Rug van het Veen zuid

In 2000 is er in deelgebied Rug van het Veen zuid een groot oppervlak met schrale vegetatie zichtbaar. Langs de rand van de stabiliserende stuifkuilen zijn nog actieve zones zichtbaar. In 2014 is alle activiteit uit dit gebied verdwenen. Het overgrote deel van dit gebied is nu stabiel en alleen in één van de kuilen is nog een kale plek te zien.

.4 Vlieland oost

De deelgebieden in Vlieland oost liggen veelal op wat hogere duinen (15-20m) ten zuiden van een hoge zeereep (>15m NAP). Het gebied wordt omgrensd door lage vlaktes met uitzondering van een zeer hoog bebost duin aan de oostkant. Opvallend is het soort kraterachtige patroon van gestabiliseerde stuifkuilen in de lagere gebieden. Van de 12 stuifkuilen in 2000 zijn er in 2014 nog 7 actief.

.4.1 Cranberryvlakte

Bij het Cranberryvlak zijn alle actieve stuifkuilen uit 2000 deels of geheel gestabiliseerd. De stuifkuilen die in 2014 zichtbaar zijn, tonen geen activiteit met uitzondering van een kleine overstuivingszone bij de kuil die zichtbaar veel betreden wordt.

.4.2 Kooisplek

Bij Kooisplek is een grote actieve stuifkuil op een top van een duin. Hier is extreem veel betreding zichtbaar.

.4.3 Zwarte Lid

Op de hoge duinen (15-20m NAP) is vrijwel geen activiteit zichtbaar. In 2000 waren hier nog een paar kleine stuifkuilen en schrale plekken zichtbaar. In 2014 is er slechts 1 stuifkuil nog licht actief.

4.4.3 Terschelling



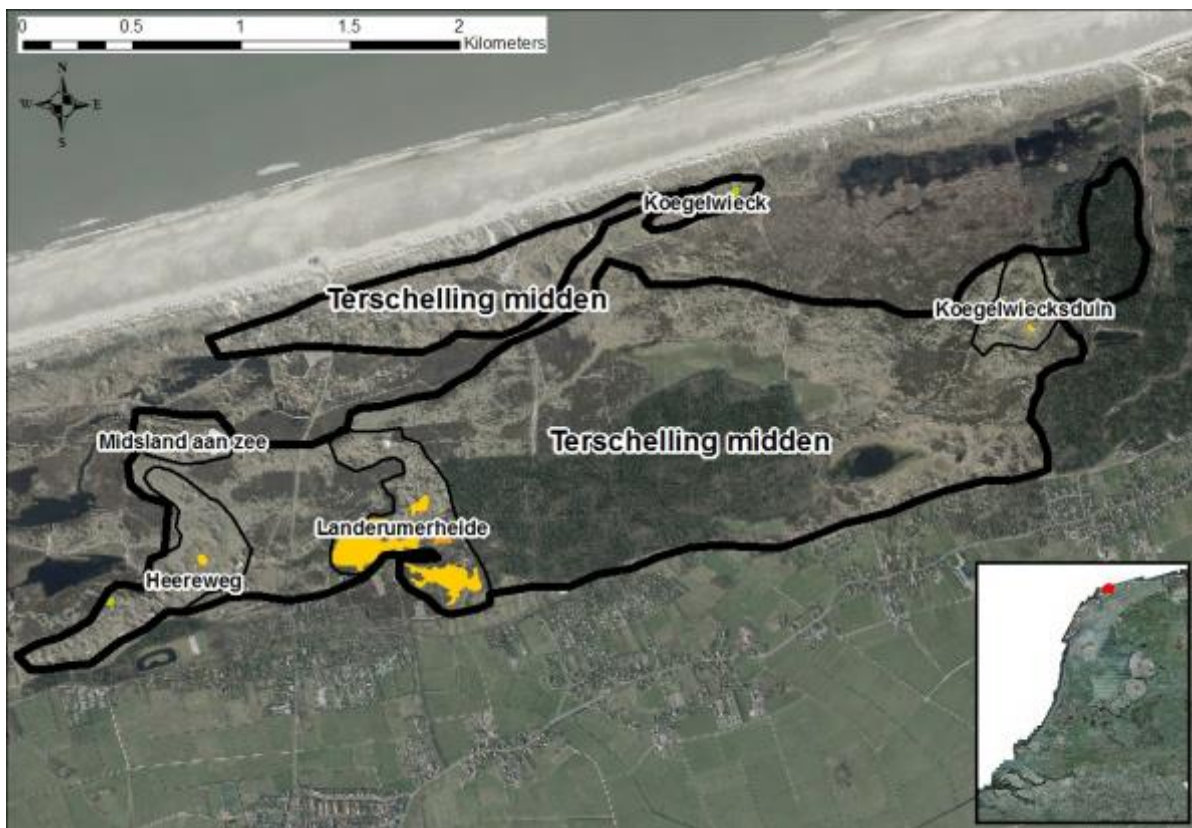
Figuur 4-16. Terschelling.

Terschelling heeft langs de Noordzezijde een dynamische zeereep met veel kerven en doorstuiving. De zeereep is op zijn hoogst op de westpunt en ter hoogte van Terschelling midden. Op andere plekken is de zeereep redelijk laag en soms zelfs open naar het binnenland.

De deelgebieden liggen veelal in de wat hogere delen omringd door vlaktes met kopjes en valleien met water. Op Terschelling heeft zowel stabilisatie als activatie plaatsgevonden.



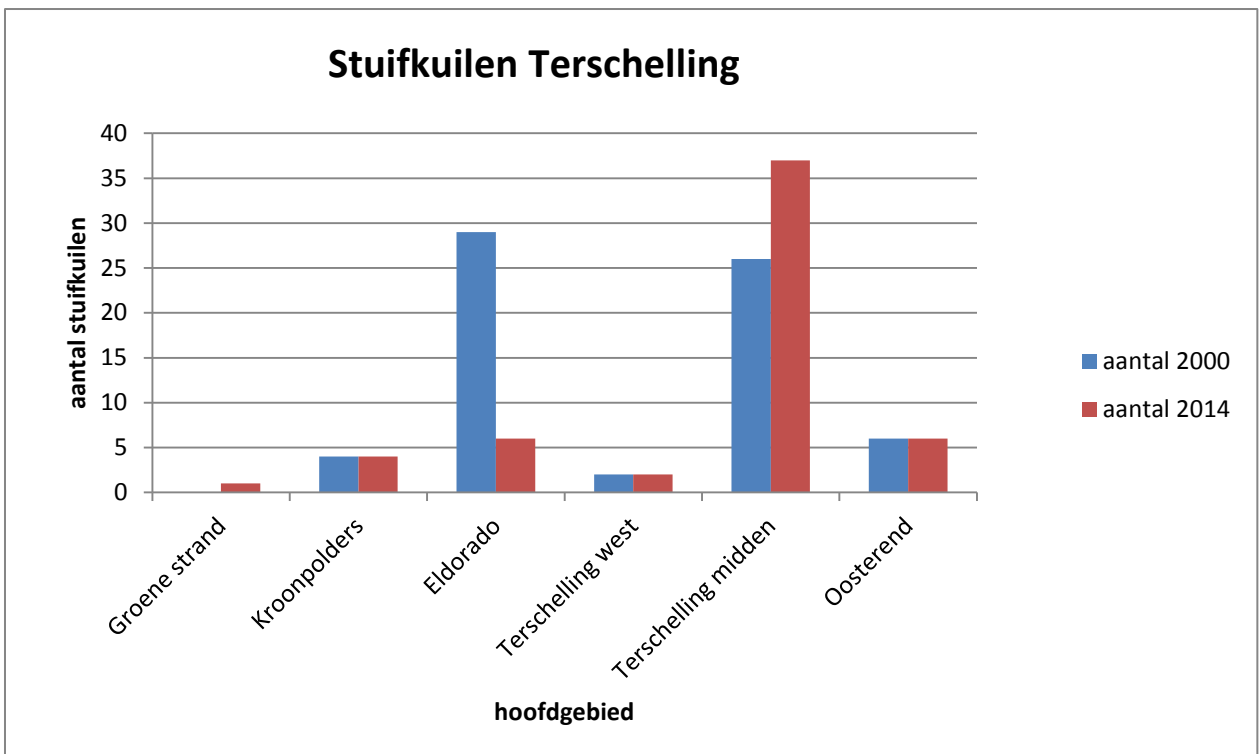
Figuur 4-17. Ontwikkeling activiteit Terschelling west.



Figuur 4-18. Ontwikkeling activiteit Terschelling midden.

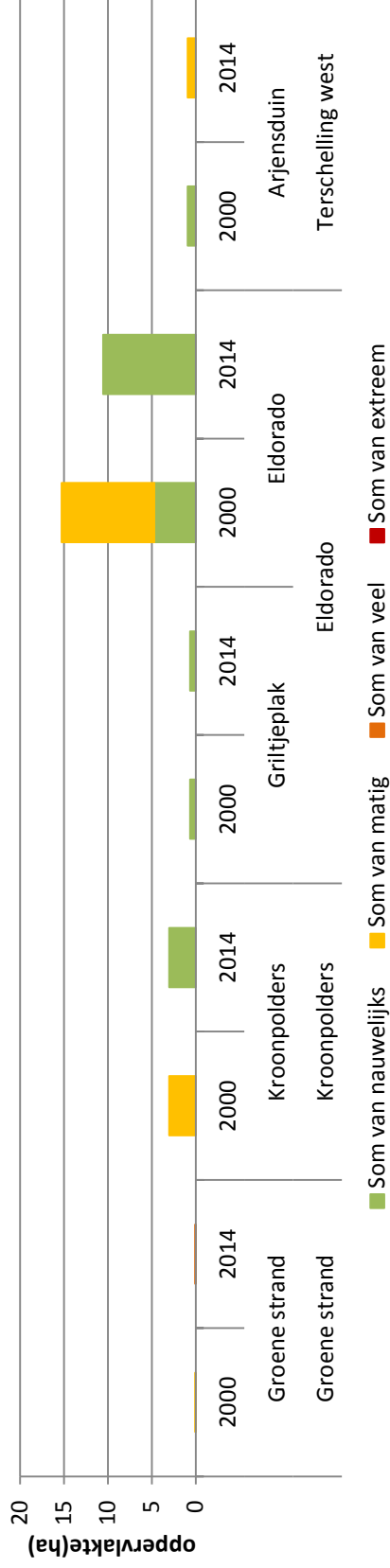


Figuur 4-19. Ontwikkeling activiteit Terschelling oost.



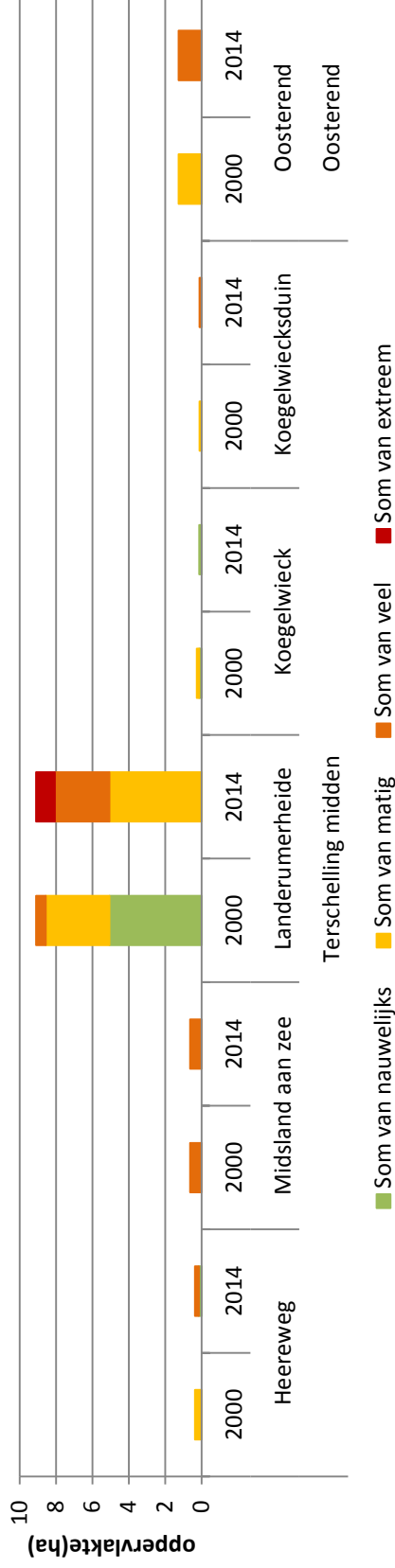
Figuur 4-20. Aantal stuifkuilen per hoofdgebied.

Terschelling west-midden 953-611 ha; activiteit 2000 en 2014



Figuur 4-21. Oppervlak (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

Terschelling midden-oost 953-611 ha; activiteit 2000 en 2014



Figuur 4-22. Oppervlak (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

.1 Groene strand

Ingesloten tussen West-Terschelling en het Groene Strand ligt het gelijknamige hoofgebied. Het hoofdgebied wordt gekenmerkt door een hoog duin van ongeveer 30m NAP. Er is geen activiteit in dit hoofdgebied.

.1.1 Groene strand

Op een noordelijke uitloper van het hoge stabiele duin is één stuifkuil zichtbaar. Deze stuifkuil ligt in een sterk betreden gebied en is tussen 2000 en 2014 van kaal vlak uitgegroeid tot een stuifkuil.

.2 Kroonpolders

De kroonpolders liggen aan de westzijde van Terschelling waar afwisselend ruggen en valleien te vinden zijn. Het actieve gedeelte bevindt zich direct achter een zeer dynamische zeereep op het hoogst gelegen gedeelte van een van de ruggen.

.2.1 Kroonpolders

Dit gebied wordt gezien de grote hoeveelheid sporen veel betreden. Ondanks de betreding zijn de 4 stuifkuilen verder gestabiliseerd van matig naar nauwelijks activiteit.

.3 Eldorado

Hoofdgebied Eldorado ligt op een halve kilometer van een sterk aangroeiende actieve zeereep. In het gebied met duinen variërend tussen 12 en 18m NAP zijn veel gestabiliseerd stuifkuilvormen te zien.

.3.1 Griltjeplak

In het oostelijke puntje van Eldorado ligt een stuifkuil die vrijwel geheel gestabiliseerd is. De rest van het gebied toont geen activiteit.

.3.2 Eldorado

In deelgebied Eldorado is in het kader van EGM-1? een ingreep uitgevoerd. De in 19.. opengemaakte stuifkuilen waren in 2000 nog goed zichtbaar maar zijn in 2014 afgenomen van 29 naar 6. Er is nauwelijks activiteit en de westzijde van deelgebied Eldorado is zelfs helemaal gestabiliseerd.

.4 Terschelling tussen west en Eldorado

Dit gebied tussen Terschelling west en Eldorado is volledig stabiel.

.5 Terschelling west

Terschelling west bestaat uit een serie van redelijk hoge duinen (20-25 m NAP). Het zuidelijk deel van dit hoofdgebied is bebost.

.5.1 Arjensduin

In het noordoosten ligt Arjensduin, een grasachtig gebied wat deels is ontbost. Terwijl het gebied in 2000 nog nauwelijks activiteit toonde, zijn de 2 stuifkuilen hier nu matig actief.

.6 Terschelling midden

Terschelling midden bestaat uit een redelijk vlak gebied met enkele hogere duinen (max. 15m NAP). De 'actieve' deelgebieden liggen allemaal in deze hogere zones. Ter hoogte van Terschelling midden is de zeereep 15-18m NAP en toont flinke dynamiek met beperkte doorstuiving. Terschelling midden is een stabiel gebied, waar de activiteit beperkt is tot een aantal losse

stuifkuilen en een gebied bij de Landerumerheide. Ondanks de beperkte actieve zones is de dynamiek hier wel toegenomen en is het aantal stuifkuilen gestegen van 26 in 2000 tot 37 in 2014.

.6.1 Heereweg

Deelgebied Heereweg is vrijwel geheel gestabiliseerd op een aantal kale en schrale plekken na. De dynamiek is beperkt tot 2 stuifkuilen waarvan er één in 2014 nog actief is. De andere kuil is in 2014 voor de helft gestabiliseerd. Het gebied wordt zichtbaar veel betreden, wat mogelijk ook bijdraagt aan het (deels) openhouden van de kuilen. In het gestabiliseerde gebied is wel een duidelijk patroon van oude gestabiliseerde stuifkuilen zichtbaar.

.6.2 Midsland aan zee

In het kleine gebied van Midsland aan zee is een uitgebreid patroon van oude stuifkuilen zichtbaar. Deze zijn allemaal gestabiliseerd, met uitzondering van 2 stuifkuilen op de ooststrand van een oude gestabiliseerde kuil. Er zijn veel sporen van betreding zichtbaar.

.6.3 Landerumerheide

In hoofdgebied Terschelling midden is verreweg de meeste dynamiek zichtbaar in deelgebied Landerumerheide. In vergelijking met 2000 zijn veel kale plekken uitgegroeid tot nieuwe stuifkuilen en tonen de bestaande stuifkuilen extreme activiteit met uitgebreide overstuivingszones. In de tussenliggende gebieden zijn veel kale en schrale plekken te zien. Ook wordt het gebied zichtbaar veel betreden (Begrazing). De dynamiek is hier veroorzaakt door drukkbe grazing met geiten.

.6.4 Koegelwieck

Direct achter de hoge zeereep van Terschelling midden ligt deelgebied Koegelwieck. Dit gebied is zeer stabiel en van de twee stuifkuilen die in 2000 zichtbaar waren is er nu nog maar één open. Activiteit is hier vrijwel afwezig.

.6.5 Koegelwiecksduin

Aan de oostzijde van Terschelling midden ligt Koegelwiecksduin. Dit stabiele gebied toont slechts een beetje activiteit op het hoogste duin van het gebied. Hier heeft intensieve betreding waarschijnlijk bijgedragen aan het uitgroeien van een kale plek tot twee kleine stuifkuilen.

.7 Oosterend

Op 1-1.5 km ten zuiden van de zeer actieve zeereep bij Oosterend ligt een gebied met middelhoge duinen (8-12m NAP) en een paar hogere duinen tot 15m NAP.

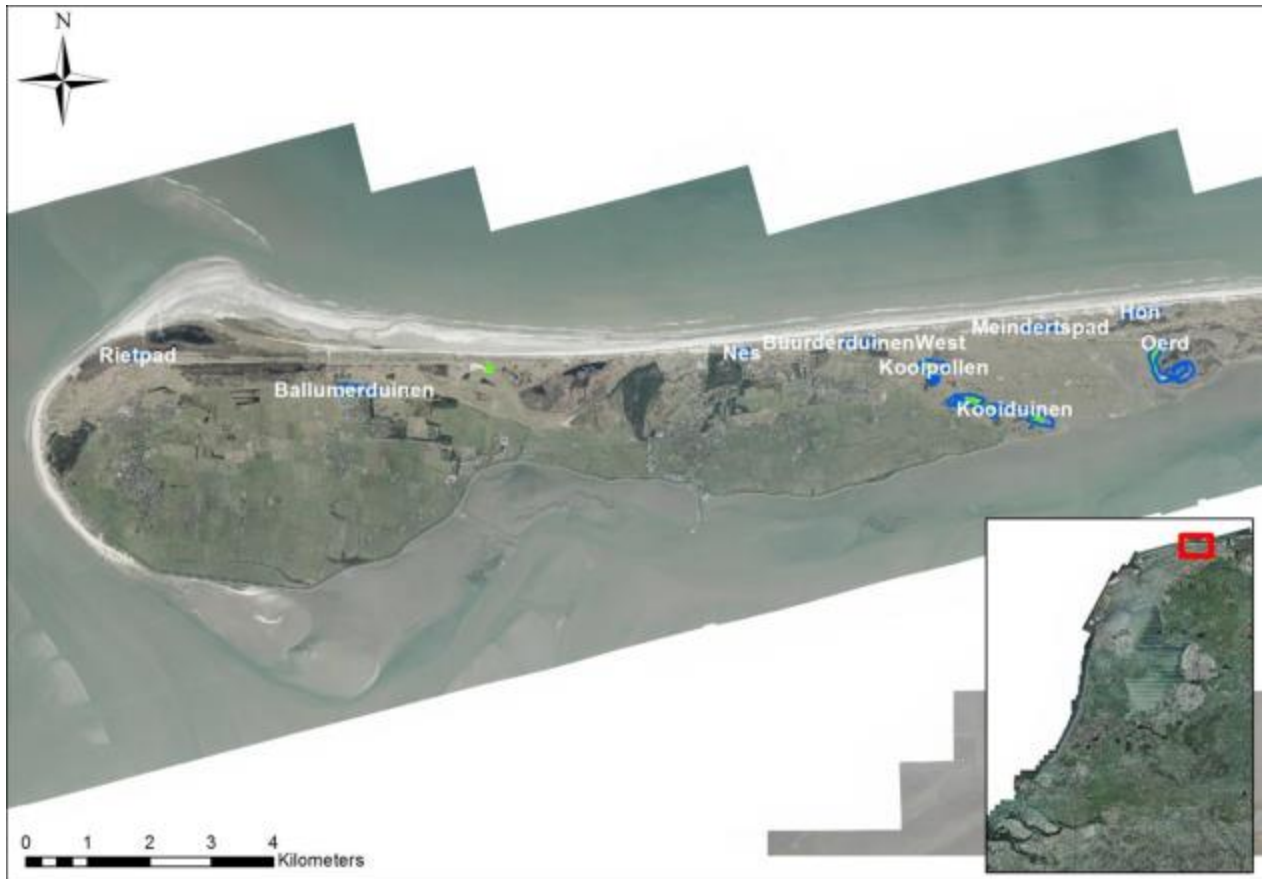
.7.1 Oosterend

De dynamiek in Oosterend is beperkt tot drie kleine gebieden met een aantal stuifkuilen die zijn gegroeid ten opzichte van 2000. Hierbij is ook de mate van dynamiek toegenomen van matig tot actief. De rest van Oosterend toont geen activiteit.

.8 Terschelling oost

Aan de rand van de Boschplaat aan de oostzijde van Terschelling ligt een groepje hoge duinen omringd door dichte vegetatie. In het noorden is een grote krater van een voormalig actieve stuifkuil te zien. In 2000 zijn er nog kleine kale plekken bij deze kuil zichtbaar, maar er zijn geen actieve stuifkuilen in dit gebied.

4.4.4 Ameland



Figuur 4-23. Ameland.

Het gebied met duinen op Ameland is beperkt tot een smalle strook langs de Noordzezijde (150m), een bredere zone met wat hogere duinen bij Ameland west, en wat uitlopers richting het zuiden aan de oostzijde van het eiland bij Nes, de Buurderduinen en het Oerd.

De dynamiek is beperkt tot een aantal kleine gebieden/stuifkuilen. De grootste dynamische gebieden bevinden zich aan de oostzijde van het eiland en voornamelijk de kooi duinen. Tussen 2000 en 2014 is een groot deel van de stuifkuilen gestabiliseerd.



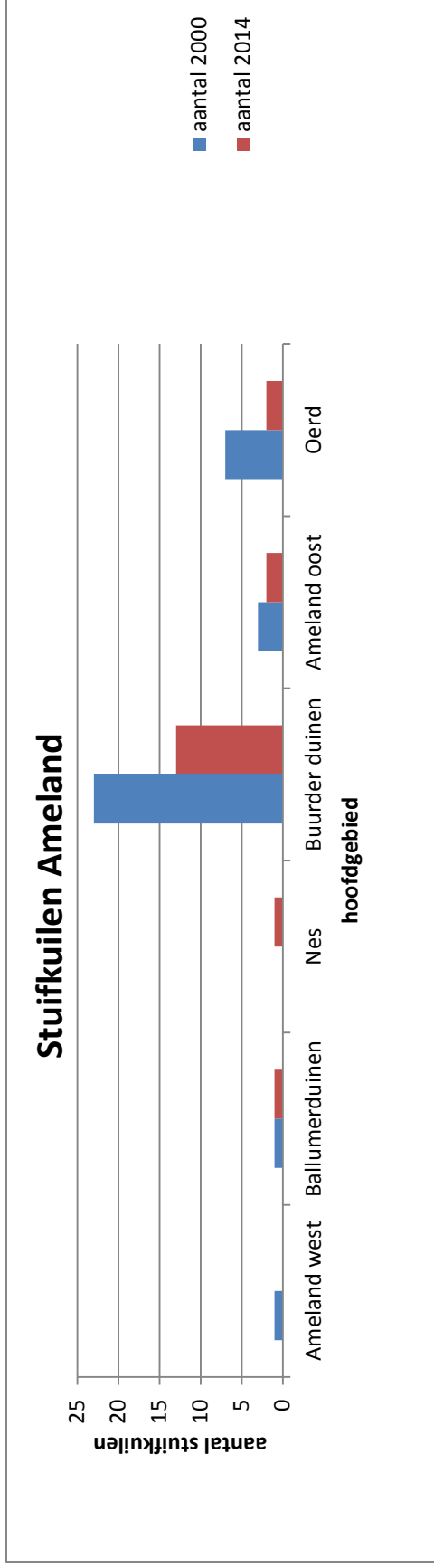
Figuur 4-24. Ontwikkeling activiteit Ameland west.



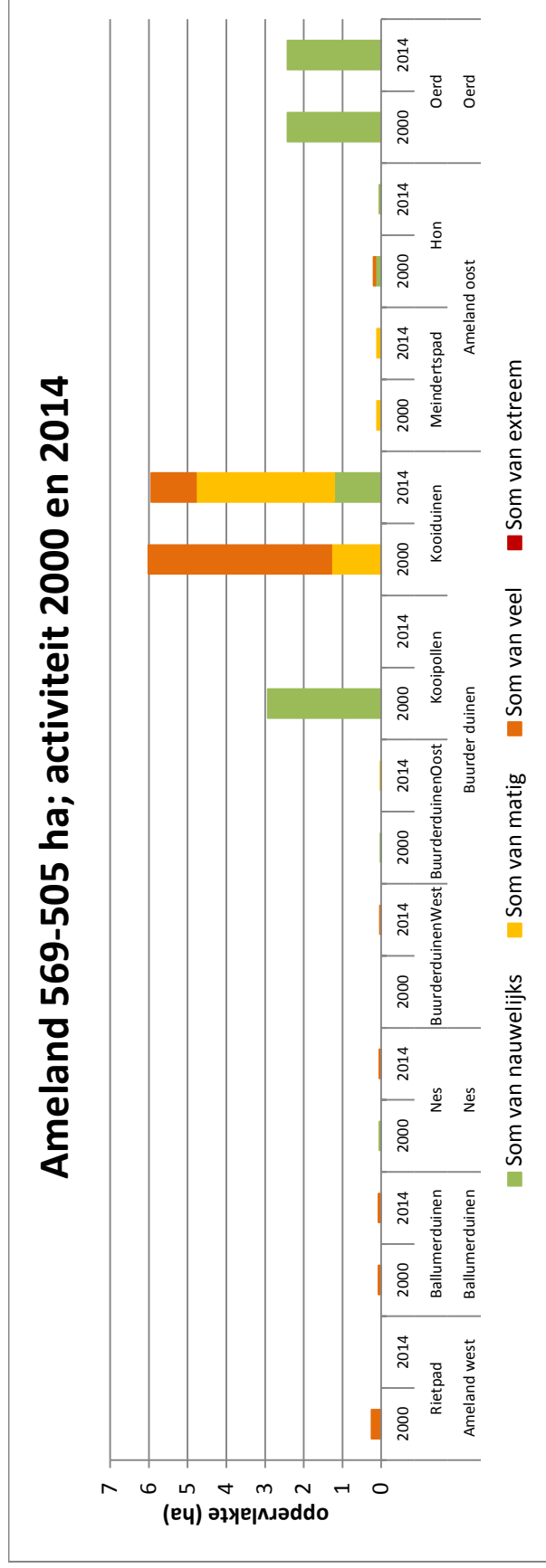
Figuur 4-25. Ontwikkeling activiteit Buurderduinen.



Figuur 4-26. Ontwikkeling activiteit Ameland oost.



Figuur 4-27. Aantal stuifkuilen per hoofdgebied.



Figuur 4-28. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

.1 Ameland west

Ameland west ligt direct achter de zeereep in een gebied met middelhoge duinen tussen de 10 en 18m NAP. Ondanks de dynamische zeereep met beperkte doorstuiving is er in dit hele hoofdgebied geen dynamiek te vinden.

.1.1 Rietpad

De enige actieve stuifkuil bevindt zich in het noorden van Ameland west in deelgebied Rietpad. Echter is deze kuil die in 2000 nog flink actief was in 2014 geheel gestabiliseerd. De kuil is gegraven bij wijze van paraboliseringsexperiment (Van Boxel & Jungerius, 1997).

.2 Ballumerduinen

Net als Ameland west heeft ook de Ballumerduinen geen dynamiek. Dit vlakke gebied met lage kopjes en een soort dijk ligt direct achter de lage zeereep (max 10m NAP).

.2.1 Ballumerduinen

Direct aan de rand van een bungalowpark bij Ballum ligt deelgebied Ballumerduinen. In dit gebied bevindt zich één stuifkuil op een top van een laag duin. Deze stuifkuil wordt veel betreden en is hierdoor waarschijnlijk ook ontstaan. De activiteit in de stuifkuil is tussen 2000 en 2014 gelijk gebleven.

.3 Nes

Hoofdgebied Nes ligt direct achter een beperkt dynamische lage zeereep (max 12m NAP) op een duinenrij van vergelijkbare hoogte. Het hele gebied is stabiel met uitzondering van één kleine stuifkuil in het westen.

.3.1 Nes

De enige stuifkuil bij Nes bevindt zich op een iets hoger punt en is een kruispunt van verschillende paden. Tussen 2000 en 2014 is dit punt uitgegroeid tot een kleine stuifkuil.

.4 Buurderduinen

De buurderduinen zijn net als alle andere deelgebieden op Ameland vrijwel geheel stabiel. Het gebied van de buurderduinen loopt vanaf Nes richting het zuidoosten als westelijke begrenzing van een getijdegebied. De dynamiek vindt plaats op lage duinen (5-10m NAP) en blijft beperkt tot enkele stuifkuilen. Het aantal actieve stuifkuilen in de Buurderduinen is tussen 2000 en 2014 teruggelopen van 23 naar 13.

.4.1 Buurderduinen West

Buurderduinen west ligt direct achter een matig actieve lage (10m NAP) zeereep. Het gebied is volledig stabiel. Tussen 2008 en 2009 is er aan de westkant een stuifkuil aangelegd. Deze is in 2014 nog steeds open en toont een kleine overstuivingszone langs de rand. Er zijn een aantal vormen van gestabiliseerde stuifkuilen zichtbaar.

.4.2 Buurderduinen Oost

Dit volledig stabiele gebied ligt op een paar lage kopjes langs een strandweg. Op één punt langs een pad, wat tijdelijk een soort werkweg is geweest, is een matig actieve stuifkuil ontstaan.

.4.3 Kooipollen

Kooipollen ligt op een kleine verhoging in een vlak landschap. In 2000 was er lichte activiteit zichtbaar in dit gebied, waarbij de activiteit beperkt was tot enkele stuifkuilen en wat schrale plekken. In 2014 is het hele gebied stabiel. De schrale plekken en de kuilen zijn verdwenen.

.4.4 Kooiduinen

De mate van activiteit in de Kooiduinen is ook verder afgenomen. De dynamiek is beperkt tot een aantal stuifkuilen. Vrijwel alle kuilen zijn nu deels of volledig gestabiliseerd.

.5 Ameland oost

Ameland oost ligt in een smalle strook direct achter de actieve zeereep met soms flinke doorstuiving. Aan de zuidkant wordt het gebied ingesloten door een getijdengebied.

.5.1 Meindertspad

Aan de oostzijde van Meindertspad is een matig actieve stuifkuil zichtbaar. De rest van het gebied is in 2014 volledig stabiel. In 2000 waren er nog veel schrale plekken zichtbaar. Deze zijn nu volledig verdwenen.

.5.2 Hon

Ook deelgebied Hon is vrijwel volledig gestabiliseerd. In 2000 waren er nog twee gebieden met actieve stuifkuilen. In 2014 is hier nog maar één kuil licht actief. Net als de rest van het hoofgebied waren hier in 2000 veel schrale en kale plekken zichtbaar. In 2014 is dit beperkt tot zeer kleine kale plekjes (konijnenholen?).

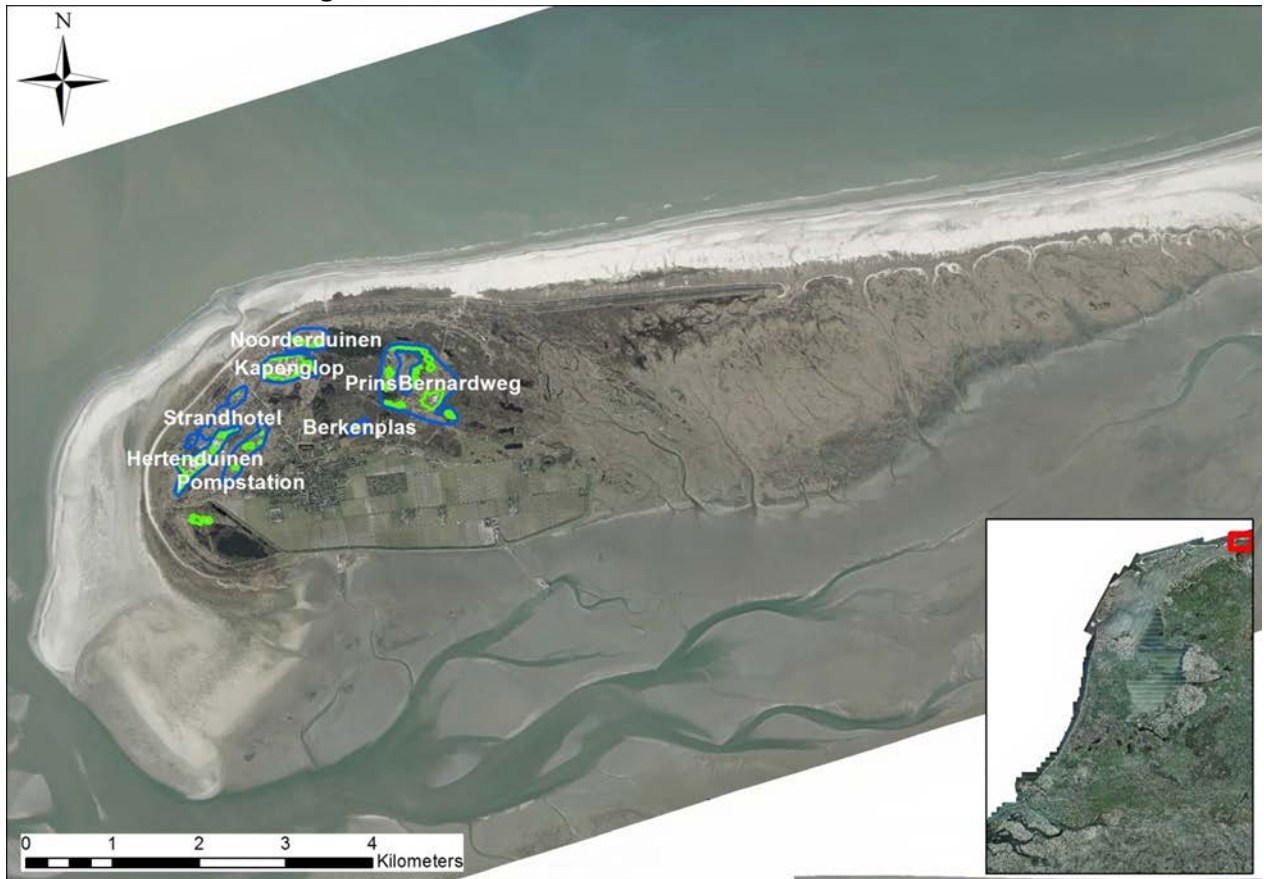
.6 Oerd

Het Oerd ligt op het meest oostelijke deel van Ameland. Het hoofgebied wat vooral aan de zuidkant van het eiland ligt, heeft een spiraalvormig duinenrij waarvan de enige activiteit aan de westkant zichtbaar is.

.6.1 Oerd

Op de spiraalvormige duinenrij bevinden zich nog 2 stuifkuilen, terwijl dat er in 2000 nog 7 waren. De activiteit was toen echter ook al beperkt. Het gebied wordt duidelijk veel betreden, er zijn veel paden zichtbaar.

4.4.5 Schiermonnikoog

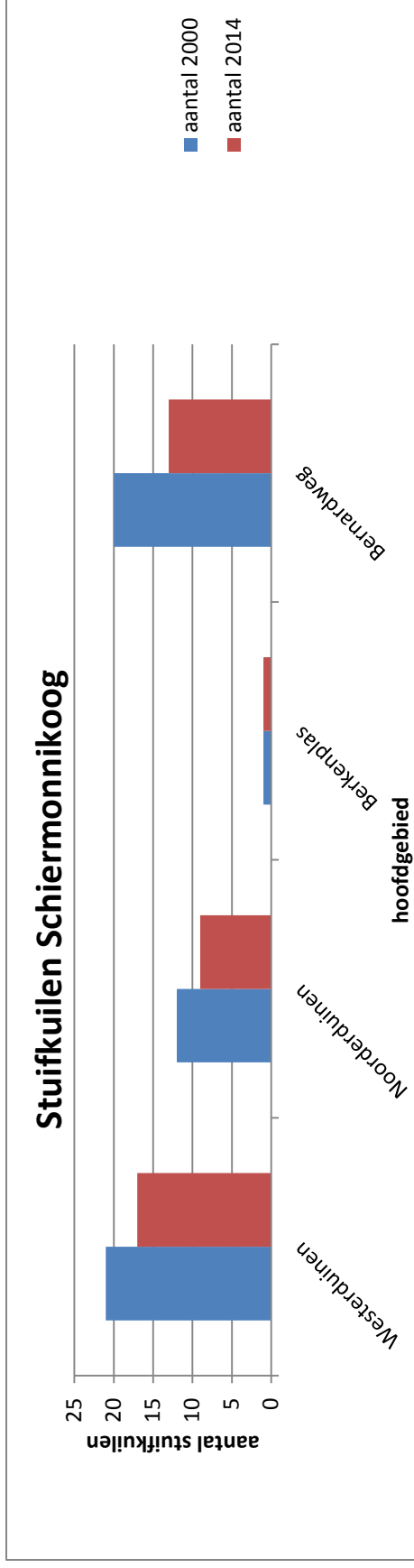


Figuur 4-29. Schiermonnikoog.

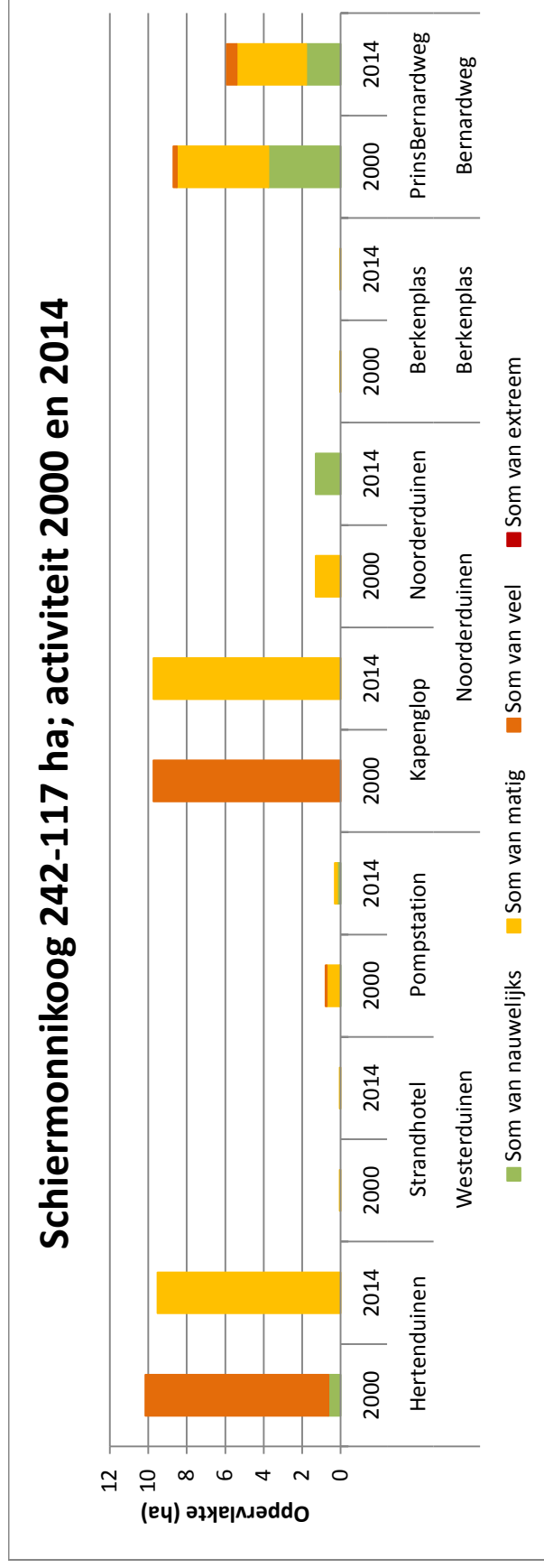
De duinen van Schiermonnikoog zijn gelegen aan de Noordzezijde van het eiland. De hoogte van de zeereep is op de meeste plekken maximaal 10m NAP. De activiteit in de zeereep is zeer beperkt en aan de westzijde zelfs helemaal afwezig. De zeereep aan de oostzijde van Schiermonnikoog is actiever, hier vindt beperkte doorstuiving plaats. Hier is echter geen dynamiek in de achterliggende grijze duinen.



Figuur 4-30. Ontwikkeling activiteit Schiermonnikoog.



Figuur 4-31. Aantal stuifkuilen per hoofdgebied.



Figuur 4-32. Oppervlak (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

.1 Westerdünen

Op twee wat hogere duinruggen direct achter de zeereep van de westelijke punt van Schiermonnikoog ligt hoofdgebied Westerdünen. Vrijwel alle activiteit in dit gebied is geconcentreerd in deelgebied Hertendünen, waar het grootste deel van de stuifkuilen ook zichtbaar is. Westerdünen heeft een licht stabiliserend karakter. Het aantal stuifkuilen is teruggelopen van 21 naar 17.

.1.1 Hertendünen

In de sterk betreden Hertendünen zijn veel stuifkuilen zichtbaar. De meeste kuilen zijn in 2014 enigszins gestabiliseerd ten opzichte van 2000. Aan de oostkant is één kuil verder gegroeid. In het omliggende gebied waren in 2000 veel schrale en kale oppervlakken zichtbaar. Dit is in 2014 allemaal verdwenen.

.1.2 Strandhotel

Deelgebied Strandhotel ligt net ten noorden van de Hertendünen. Hier is geen activiteit zichtbaar. Aan de noordoostzijde is één matig actieve stuifkuil zichtbaar die wordt opgehouden en waarschijnlijk ook is ontstaan door betreding.

.1.3 Pompstation

Ook ten oosten van de Hertendünen in deelgebied Pompstation is alles gestabiliseerd. Een deel van de stuifkuilen is volledig gestabiliseerd. Twee matig actieve stuifkuilen worden open gehouden door betreding.

.2 Noorderdünen

Noorderdünen ligt aan de noordwestzijde van Schiermonnikoog direct achter de matige actieve zeereep. In dit gebied worden uitstuiwingszones omringd door een laag reliëf (5-12m). Rondom sommige uitstuiwingen zijn kleine parabolische vormen te zien. Het gebied is ten opzichte van 2000 verder gestabiliseerd. Het aantal stuifkuilen is teruggelopen van 12 naar 9.

.2.1 Noorderdünen

Wat betreft activiteit is het hoofdgebied op te delen in 2 stukken. In het noordelijke deelgebied Noorderdünen is de dynamiek beperkt tot één stuifkuil. In 2011 waren er nog 2 zones met matige activiteit, kale oppervlakken en schrale vegetatie. Het actieve gebied is in 2014 verder gestabiliseerd en er is nauwelijks activiteit zichtbaar.

.2.2 Kapenglop

De meeste activiteit is zichtbaar in het zuidelijke deelgebied Kapenglop. De vele paden duiden op een hoge betreding. Ondanks de hoge betreding is de activiteit in dit deelgebied teruggelopen van veel naar matig. Dit heeft vooral te maken met stabilisatie van een kuil waar uitstuiwing tot het grondwater heeft plaatsgevonden.

.3 Berkenplas

Ten westen van de Berkenplas ligt een open grasvlakte omringd door bos. De open grasvlakte ligt op een kleine verhoging (5-8m NAP) en heeft slechts één actieve stuifkuil. De stuifkuil is iets gegroeid in oppervlakte, maar heeft nog steeds een matige activiteit ten opzichte van 2000.

.4 Bernardweg

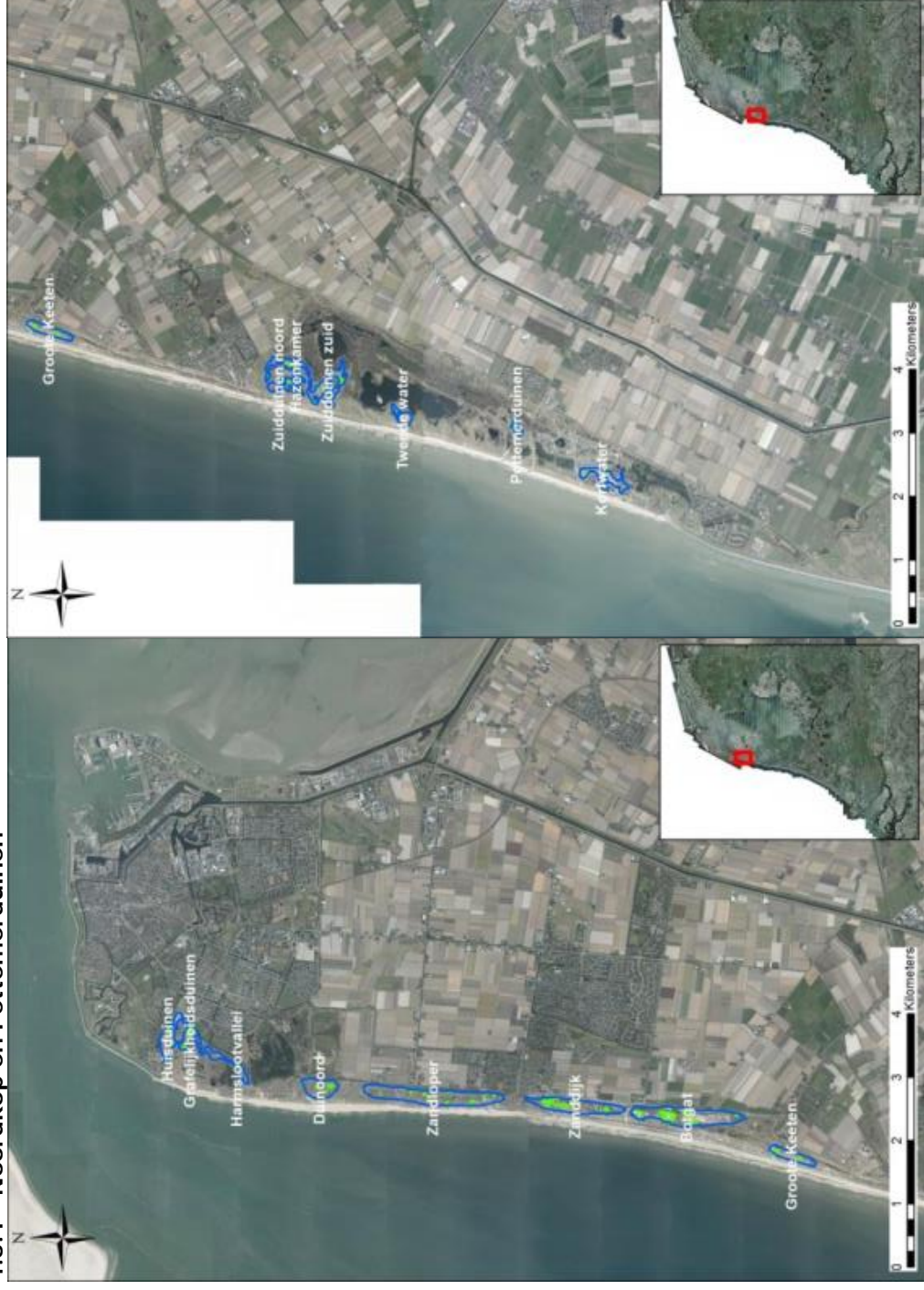
Hoofdgebied Bernardweg ligt op het meest oostelijke deel van de wat hogere duinen van Schiermonnikoog op flinke afstand van de zeereep (500-1500m). Het gebied wordt omringd door bossen en wordt zichtbaar sterk betreden.

.4.1 Bernardweg

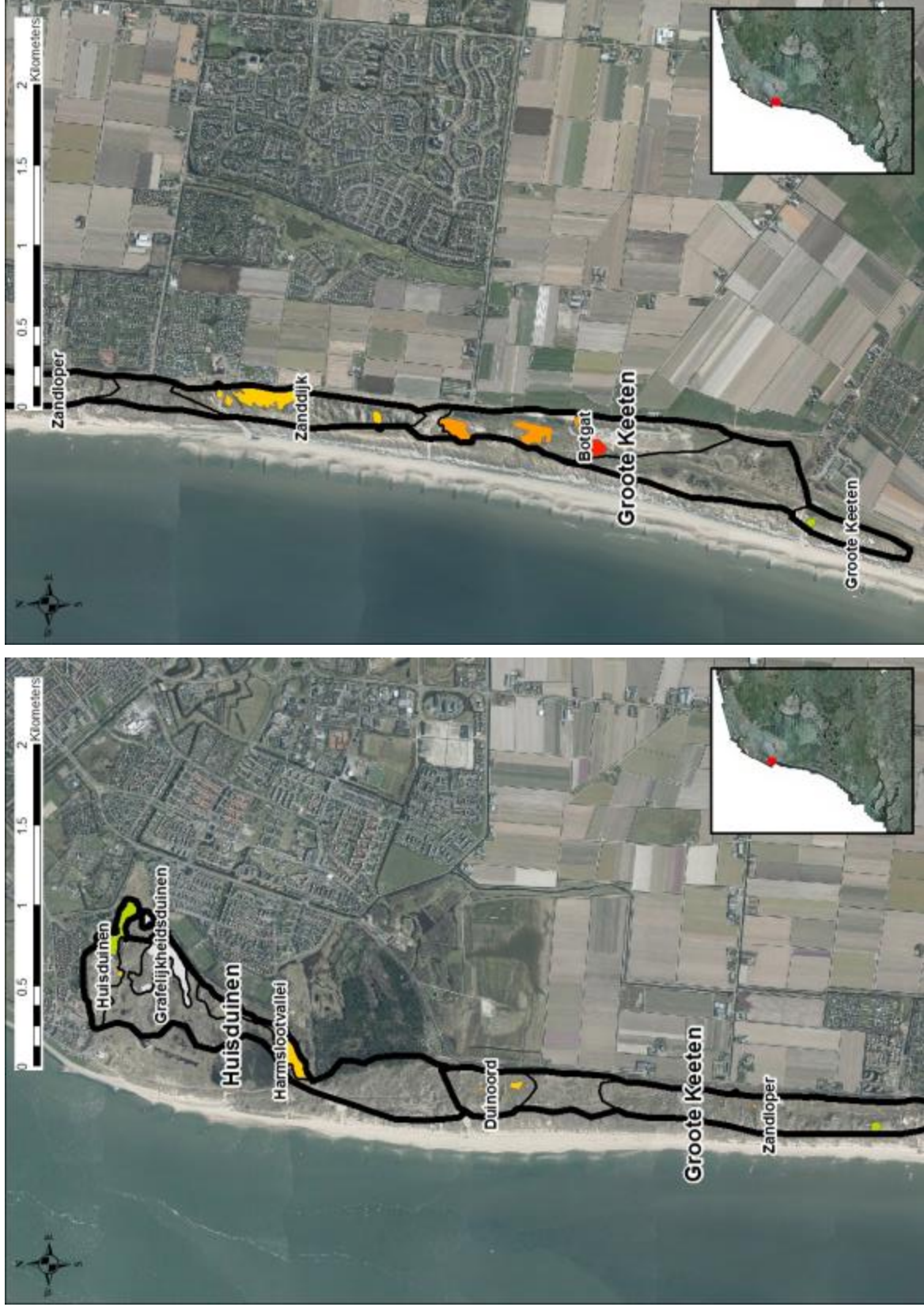
De actieve gebieden zijn verspreid en liggen hoofzakelijk op de toppen van duinen en kopjes. In het westen is een klein gebied actiever geworden, maar over het algemeen is de activiteit gelijk gebleven, afgenomen of geheel verdwenen. Het aantal actieve stuifkuilen is teruggelopen van 20 in 2000 naar 13 in 2014.

4.5 Hollandse duinen

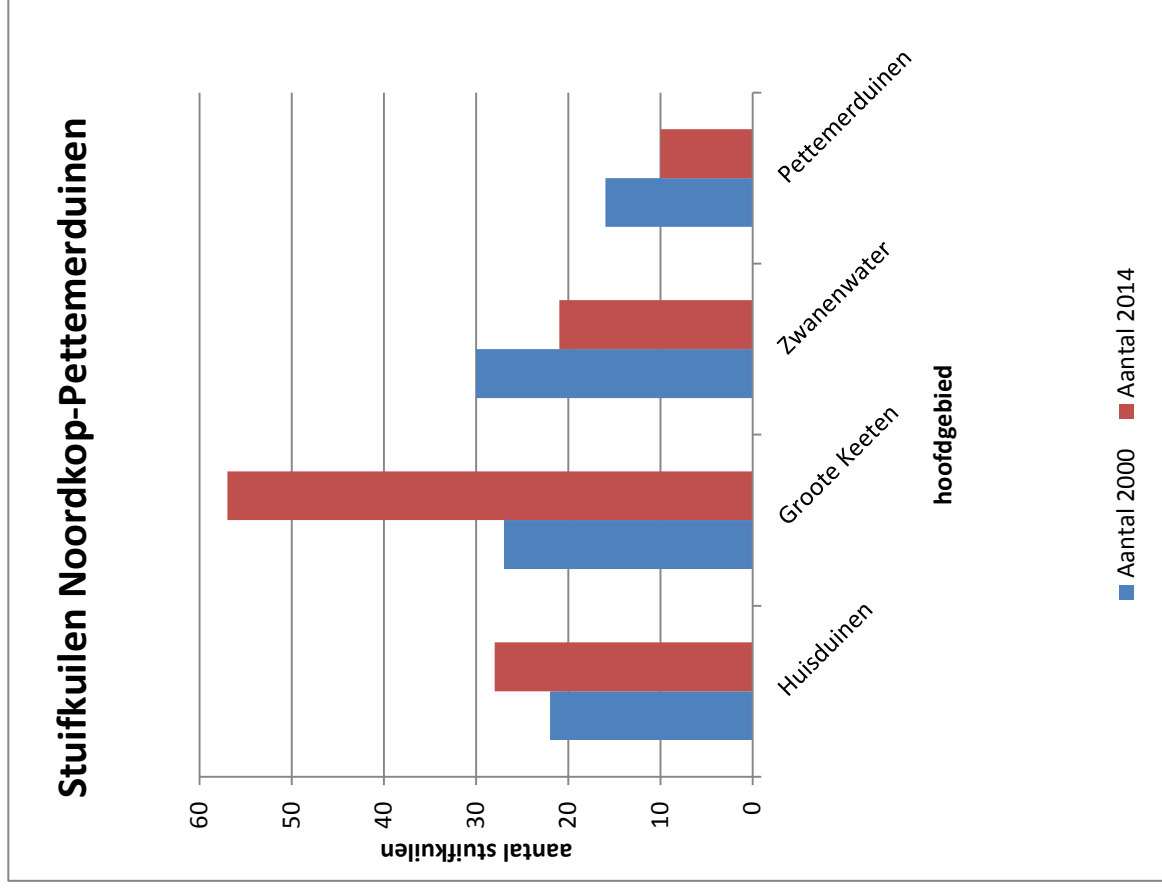
4.5.1 Noordkop en Pettemerduinen



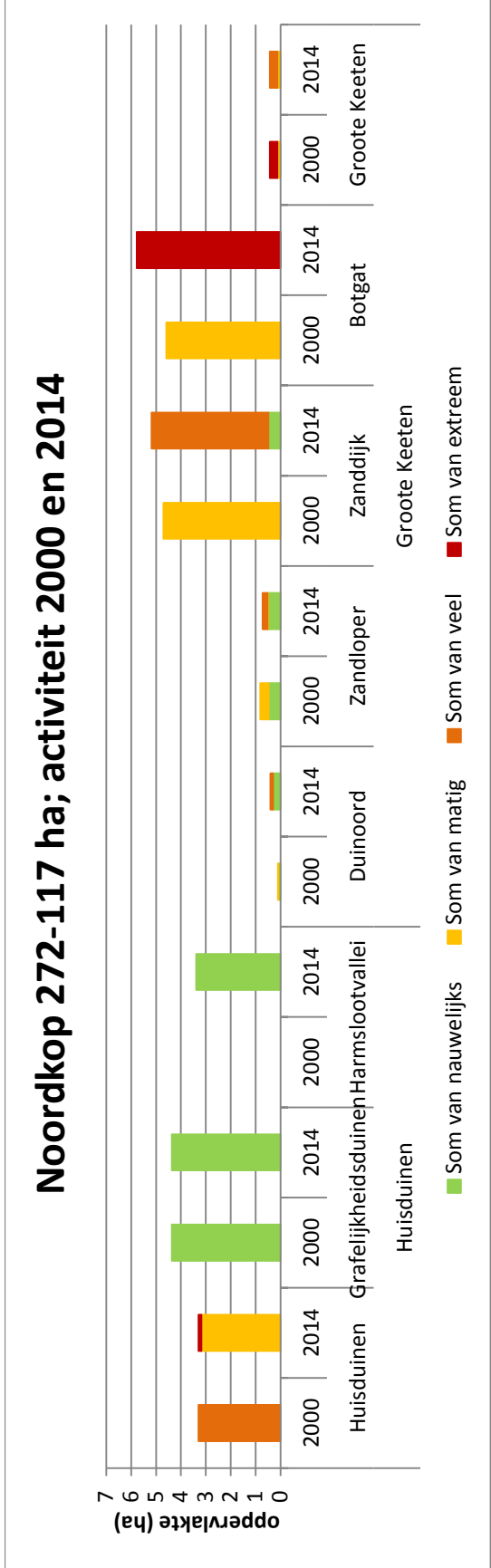
Figuur 4-33. Noord-Holland noord.



Figuur 4-34. Ontwikkeling activiteit Huisduinen (links) en Groot Keeten (rechts).

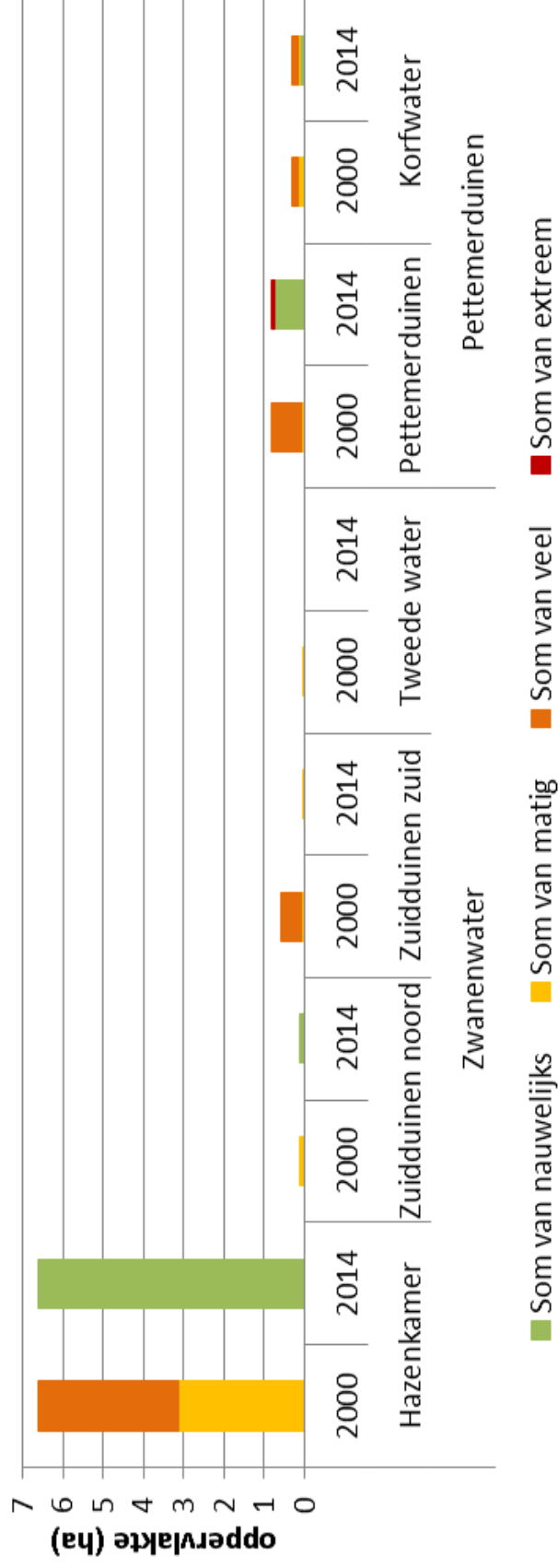


Figuur 4-35. Ontwikkeling activiteit Zwanenwater en Pettemerduinen (links). Aantal stuifkuilen per hoofdgebied (rechts).



Figuur 4-36. Oppervlak (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

Pettemerduinen 229-179 ha; activiteit 2000 en 2014



Figuur 4-37. Oppervlak (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

.1 Huisduinen

Hoofdgebied Huisduinen ligt in het noordelijkste puntje van de Nederlandse westkust, direct naast Den Helder. In het noorden bestaat de zeereep uit een dijk, maar verder naar het zuiden krijgt de zeereep een dynamisch karakter. De duinen met hoogte variërend tussen 8 en 20m NAP bevinden zich achter een hoge zeereep (>15m NAP). In het noorden omsluiten de duinen een gestabiliseerde vallei waarin het grondwater deels aan het oppervlak komt. De kleinschalige dynamiek in dit gebied is vooral beperkt tot de hogere delen van de duinen.

.1.1 Huisduinen

In het noordelijkste deelgebied Huisduinen, een sterk betreden gebied, is de dynamiek tussen 2000 en 2014 teruggelopen van veel naar matig. Veel kuilen en stuifvlakken zijn nu grotendeels gestabiliseerd. In een klein gebiedje is de dynamiek juist verder toegenomen.

.1.2 Grafelijkheidsduinen

Bij de Grafelijkheidsduinen is nog steeds nauwelijks dynamiek. Er zijn wel veel vormen van (deels) gestabiliseerde stuifkuilen te zien. In de tussenliggende zones zijn veel schrale en kale plekken zichtbaar. Het gebied wordt veel betreden.

.1.3 Harmslootvallei

Langs de zuidoostelijke rand van de Harmplas ligt deelgebied Harmslootvallei. Dit stabiele gebied toont in 2014 een opvallende serie kale plekken/stuifvlakken. De plekken zijn tussen 2006 en 2007 ontstaan en lijken onderdeel van een ingreep. In 2014 is een groot deel van de vlakken alweer gestabiliseerd. Het ontstaan van de vlakken heeft invloed op de toename van het aantal stuifkuilen van 22 naar 28.

.2 Groote Keeten

In een smalle strook ingesloten tussen de akkers van de Kop van Noord Holland en de zeereep ligt hoofdgebied Groote Keeten. Groote Keeten wordt gekenmerkt door een rij duinen die vrijwel direct op de zeereep aansluit, soms gescheiden door een smalle langgerekte vallei. De duinen zijn van vergelijkbare hoogte met de zeereep (15-20m NAP) met in het zuiden iets hogere duinen (tot 25 m NAP). De zeereep is hier zeer dynamisch, met forse doorstuiving die ook de stuifkuilen van de Grijs Duinen beïnvloed. Bij de Groote Keeten is de dynamiek flink toegenomen wat zichtbaar is in de mate van activiteit en de sterke toename in het aantal actieve stuifkuilen (van 27 in 2000 naar 57 kuilen in 2014).

.2.1 Duinoord

In het noordelijke deelgebied Duinoord is de dynamiek beperkt tot enkel stuifkuilen die tussen 2000 en 2014 actiever zijn geworden. De rest van het deelgebied wordt gekenmerkt door een patroon van kleine schrale plekken die in 2000 ook al zichtbaar waren.

.2.2 Zandloper

Ook bij de Zandloper is de dynamiek beperkt tot een paar stuifkuilen. In enkele hiervan is de dynamiek toegenomen, terwijl anderen juist verder zijn gestabiliseerd. Aan de hoge kant tegen de zeereep aan vindt overstuiving plaats. Hier is op sommige plekken ook schrale vegetatie zichtbaar.

.2.3 Zanddijk

Verder naar het zuiden bij Zanddijk is een cluster aan gestabiliseerd stuifkuilen zichtbaar. Een deel hiervan is tussen 2000 en 2014 geactiveerd.

.2.4 Botgat

Bij Botgat net ten zuiden van Julianadorp is de activering nog sterker dan bij Zanddijk. De matig en niet actieve stuifkuilen uit 2000 tonen nu sterke overstuivingszones. In de tussenliggende gebieden zijn veel kleine kale en schrale plekken te zien.

.2.5 Groote Keeten

Rondom de strandopgang van Groote Keeten zijn een paar kleine stuifkuilen zichtbaar. De mate van activiteit is bij deze kuilen iets minder geworden. In het gebied vindt overstuiving vanaf het strand plaats.

.3 Zwanenwater

Direct achter de zeereep ten zuiden van Callantsoog ligt hoofdgebied Zwanenwater. De duinen in het landschap hebben parabolachtige vormen afwisselend met kleine valleien. De gemiddelde duinhoogte ligt tussen de 10 en 15m NAP. Daarmee liggen deze duinen iets lager dan de duinen van de zeereep. De zeereep heeft een dynamisch karakter met beperkte doorstuiving naar het binnenland. Dit lijkt echter geen invloed te hebben op de activiteit in de achterliggende grijze duinen die in 2014 vrijwel geheel is verdwenen. Dit is ook terug te zien in het aantal stuifkuilen wat is teruggelopen van 30 naar 21 kuilen in 2014.

.3.1 Zuidduinen noord

In Zuidduinen noord was de dynamiek geconcentreerd in één stuifkuil. Deze kuil was matig actief, maar is nu bijna geheel gestabiliseerd. De rest van het gebied is volledig stabiel.

.3.2 Hazenkamer

Voornamelijk in de Hazenkamer is een groot deel van de dynamiek verloren gegaan. De actieve stuifkuilen zijn nu allemaal deels gestabiliseerd. De grote hoeveelheid kale plekken die in 2000 vooral in het zuidelijke deel zichtbaar waren zijn allemaal verdwenen.

.3.3 Zuidduinen zuid

Bij Zuidduinen zuid is een grote actieve stuifkuil compleet verdwenen waardoor nu ook dit gebied bijna geheel stabiel is.

.3.4 Tweede water

Het kleine deelgebied Tweede water, ingesloten tussen het Zwanenwater en de zeereep, is in 2014 volledig stabiel. In 2000 was hier nog één zeer kleine stuifkuil zichtbaar.

.4 Pettemerduinen

Hoofdgebied Pettemerduinen bestaat uit een groep middelhoge duinen (10-15m NAP) direct achter de zeereep bij Petten en omringd door lage vlaktes en valleien. De dynamiek is beperkt tot een paar individuele stuifkuilen bij Korfwater en een cluster van stuifkuilen in het noorden bij deelgebied Pettemerduinen. Het gebied is vrijwel geheel gestabiliseerd en het aantal stuifkuilen is van 16 in 2000 afgenomen tot 10 in 2014.

.4.1 Pettemerduinen

Vlak tegen hoofdgebied zwanenwater ligt een cluster van stuifkuilen. Het gebied wat in 2000 nog flink actief was, is in 2014 uitgestoven tot op het grondwater en daarna vrijwel geheel gestabiliseerd. Hier vlakbij ligt een groeiende actieve stuifkuil die door betreding wordt opengehouden.

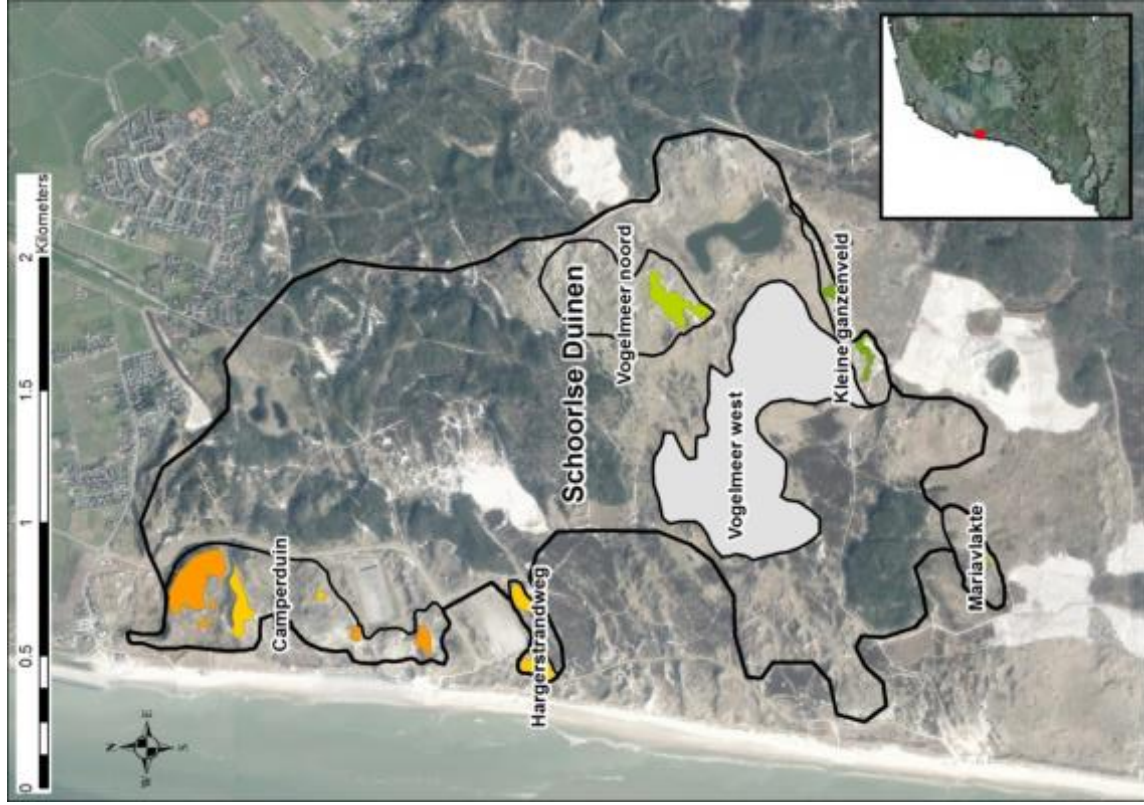
.4.2 Korfwater

In het schrale graslandschap bij Korfwater zijn een aantal stuifkuilen aan het stabiliseren terwijl één kuil in het zuiden juist actiever is geworden. In het deelgebied zijn extreem veel schrale en kale plekken zichtbaar. Ook zijn er veel kleine paden zichtbaar (betreding/begrazing?)

4.5.2 Schoorlse Duinen – Egmond

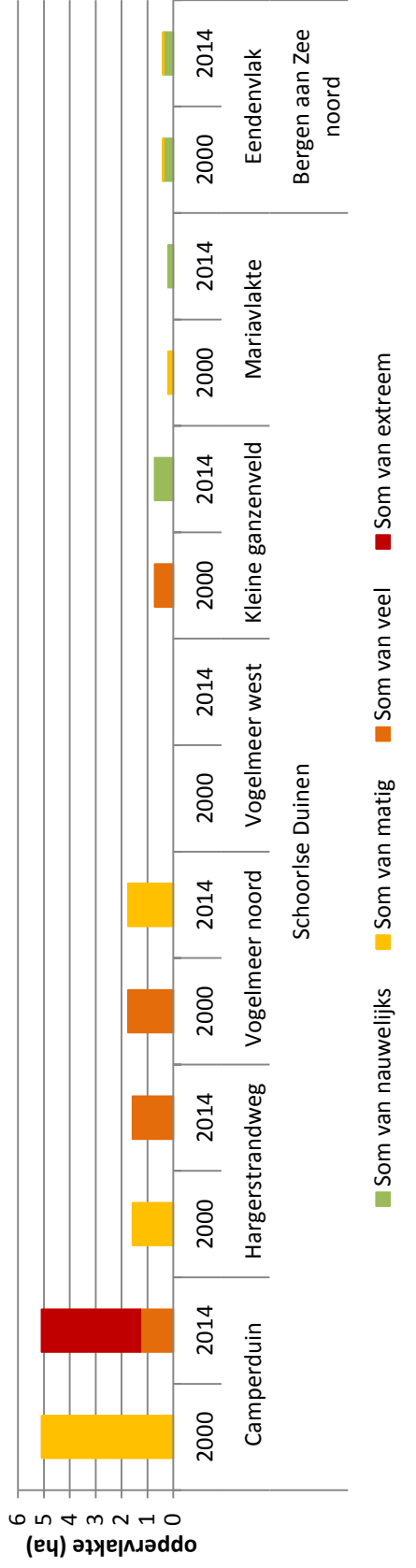


Figuur 4-38. Noord-Holland midden.



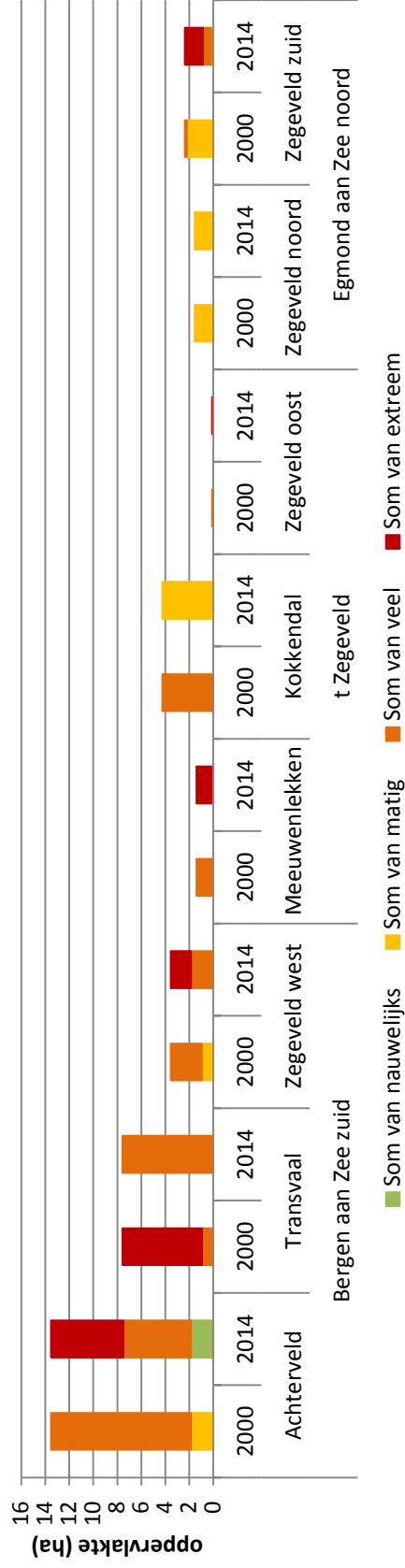
Figuur 4-39. Ontwikkeling activiteit Schoorlse Duinen (links) en Bergen aan Zee (rechts)

Schoorlse duinen 407-338 ha; activiteit 2000 en 2014

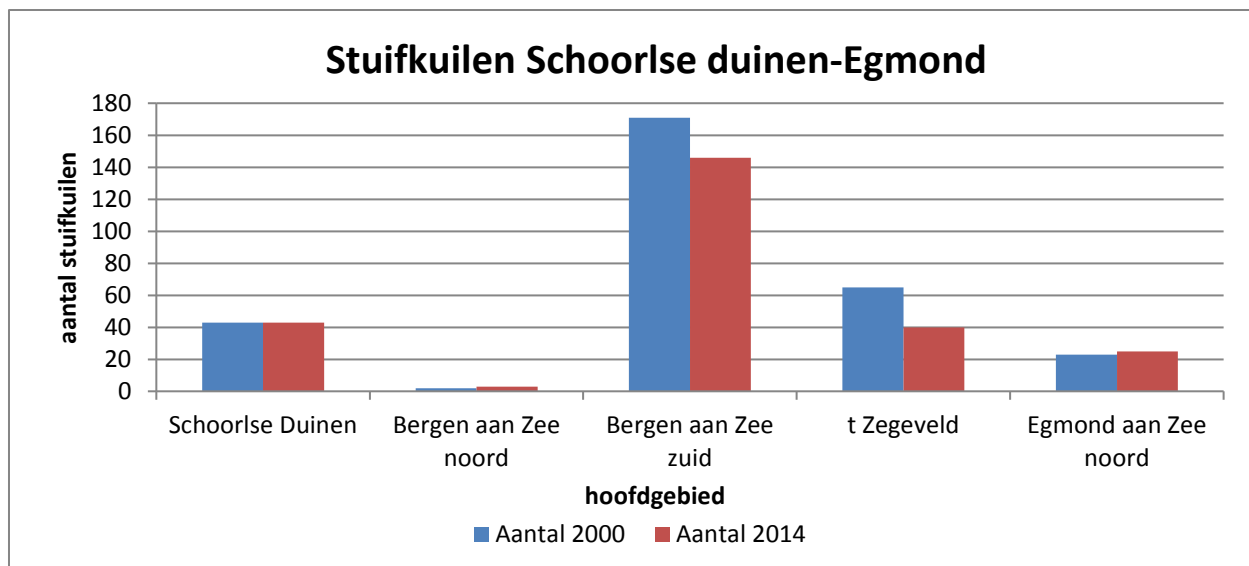


Figuur 4-40. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

Bergen-Egmond 365-17 ha; activiteit 2000 en 2014



Figuur 4-41. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.



Figuur 4-42. Aantal stuifkuilen per hoofdgebied.

.1 Schoorlse Duinen

De Schoorlse Duinen behoren tot de hoogste duinen van Nederland. In dit hoofdgebied, wat iets meer zeewaarts dan de werkelijke hoogste duinen ligt, zijn de toppen gemiddeld hoger dan 25m NAP (met uitlopers richting de 40m NAP). In het noorden grens het gebied aan weilanden en in het zuiden aan valleien. Over het algemeen liggen de duinen hoger dan de smalle zeereep (soms maar 20m NAP). Direct achter de zeereep zijn de meeste deelgebieden actiever geworden, terwijl verder landinwaarts stabilisatie plaatsvindt. De vorming van nieuwe stuifkuilen staat gelijk aan het aantal gestabiliseerde kuilen.

.1.1 Camperduin

Camperduin ligt in het noorden direct achter de zeereep van de Schoorlse duinen. De dynamiek in een aantal losse stuifkuilen en een stuifkuilencluster is tussen 2000 en 2014 flink toegenomen. Ook het aantal schrale plekken is flink gestegen. Aan de kant van de zeereep vindt enige overstuiving plaats. Het gebied wordt veel betreden.

.1.2 Hargerstrandweg

Verder naar het zuiden, net onder de parkeerplaats van de strandopgang is ook een sterke toename zichtbaar in de mate van activiteit. Ook dit deelgebied wordt sterk betreden en de omtrek van de stuifkuilen lijkt mede hierdoor toe te nemen.

.1.3 Vogelmeer noord

Verder landinwaarts op een hoog duin bij Vogelmeer noord is een patroon aan gestabiliseerde stuifkuilen te zien. In het zuiden van het deelgebied zijn in het verleden een aantal stuifkuilen opengemaakt. Deze kuilen zijn nu grotendeels gestabiliseerd. Aan de noordkant van het gebied is een enigszins schrale vegetatie te zien.

.1.4 Vogelmeer west

Een ander hoog duin aan de westkant van het Vogelmeer toont een uitgebreid patroon van gestabiliseerde stuifkuilen. Deze tonen zowel in 2000 als in 2014 geen activiteit.

.1.5 Klein ganzenveld

Het in 2000 nog dynamische Klein ganzenveld is in 2014 vrijwel geheel gestabiliseerd. Met uitzondering van een paar deels gestabiliseerde stuifkuilen en een schrale vegetatie aan de westzijde waar veel betreding plaatsvindt, is er geen activiteit in dit gebied.

.1.6 Mariavlake

Ook Mariavlake is gestabiliseerd. De enige actieve stuifkuil in dit gebied toont in 2014 nog maar nauwelijks activiteit. De paar kale plekken die in 2000 in het gebied aanwezig waren zijn nu verdwenen.

.2 Bergen Noord

Bergen Noord ligt direct achter de zeereep op lage duinen en kopjes in de vallei bij Buizerdvlak. De duinhoogte varieert hier tussen de 8 en 12m NAP (met een uitloper naar 15m NAP). De duinen liggen achter een dynamische, deels gekerfde zeereep (15-18m NAP) met beperkte doorstuiving naar de achterliggende duinen.

.2.1 Eendenvlak

De dynamiek in dit deelgebied is beperkt tot 2 stuifkuilen en ook daar is het vrijwel afwezig. De meest noordelijke kuil is gestabiliseerd, maar langs de rand ontstaan 2 nieuwe stuifkuilen. Aan de westkant van het gebied zijn in zowel 2000 als in 2014 veel schrale plekken te zien.

.3 Bergen aan Zee zuid

Bergen aan Zee ligt ingeklemd tussen een hoge zeereep (20-25m NAP) en de hoge duinen van 't Zegeveld. De zeereep is hier flink dynamisch en via een reeks kerven en stuifkuilen in de zeereep vindt doorstuiving naar de achterliggende duinen plaats. De deelgebieden liggen op een paar duinruggen (15-20m NAP) in een vallei. De deelgebieden zijn flink dynamisch, maar ondanks dat loopt het aantal stuifkuilen terug. Dit heeft te maken met lichte stabilisering en het deels aan elkaar groeien van stuifkuilen.

.3.1 Achterveld

In het noorden bij het Achterveld zijn veel stuifkuilen en stuifvlakken. De actieve zones bestaan uit clusters van stuifkuilen en tonen flinke overstuiving. De activiteit is op de meeste plekken toegenomen, maar het zuidelijkste punt is enigszins gestabiliseerd. De rest van het gebied wordt gekenmerkt door schrale en kale plekken.

.3.2 Transvaal

Transvaal is nog steeds flink actief. Er vindt veel overstuiving plaats, maar in vergelijking met 2000 is een deel van de stuifkuilen hier toch licht aan het stabiliseren. Er vindt hier veel betreding plaats.

.3.3 Zegeveld west

In het zuidelijkste deelgebied Zegeveld west neemt de activiteit verder toe. Ook hier was al veel activiteit in 2000, maar in 2014 zijn de kuilen verder uitgebreid en vindt er veel overstuiving plaats. In het noorden is een langgerekte stuifkuil ontstaan die deels is uitgestoven tot op het grondwater. In de tussenliggende gebieden is veel schrale vegetatie en een uitgebreid netwerk aan paden zichtbaar.

.4 't Zegeveld

De zeer hoge duinen van 't Zegeveld (25-35m NAP) liggen ten oosten van hoofdgebied Bergen aan Zee zuid en daarmee wat verder van de zeereep. Het grootste deel van 't Zegeveld is gestabiliseerd, maar er zijn veel kleine stuifvlakken zichtbaar. Het aantal actieve stuifkuilen is afgenomen van 65 in 2000 naar 50 in 2014.

.4.1 Meeuwenlekken

In het noordelijkste deelgebied Meeuwenlekken is een zeer actieve zone. Er zijn hier opvallende lijnen zichtbaar (betreding? begrazing?). In 2000 zijn op deze plek een paar kuilen/stuifvlakken te zien. In 2014 is de dynamiek sterk toegenomen en zijn alle vlakken met elkaar verbonden door een grote overstuivingszone. In het omliggende gebied zijn veel schrale vlakken en enkele stuifkuilen te zien. Deze zijn over het algemeen minder actief dan voorheen en een deel van de stuifkuilen is in vergelijking met 2000 gestabiliseerd.

.4.2 Kokkendal

Verder naar het zuiden in Kokkendal neemt het aantal kale stuifvlakken af. Het meest actieve deel ligt in het westen. De gebieden zijn sinds 2000 verder gestabiliseerd, maar er zijn nog steeds veel schrale en kale oppervlakken waarvan enkele met flinke activiteit.

.4.3 Zegeveld oost

Zegeveld oost is vrij stabiel, maar heeft verspreid een aantal kleine schrale plekken, stuifvlakken en stuifkuilen. Er is geen dynamiek in het gebied, maar op één plek is uit een kaal oppervlak een actieve stuifkuil met flinke overstuivingszone ontstaan.

.5 *Egmond aan Zee noord*

De hoge duinen van Egmond aan Zee noord (15-25 m NAP) liggen omringd door valleien op een halve kilometer afstand van de ongeveer even hoge zeereep. Aan de oostkant grenzen de zeer hoge duinen van 't Zegeveld. Er zijn veel kale en schrale oppervlakken te zien. De echt actieve delen zijn meer geconcentreerd in een paar kleinere gebieden waar voornamelijk de overstuivingszone flink is gegroeid. Het aantal stuifkuilen is iets toegenomen van 23 in 2000 tot 25 in 2014.

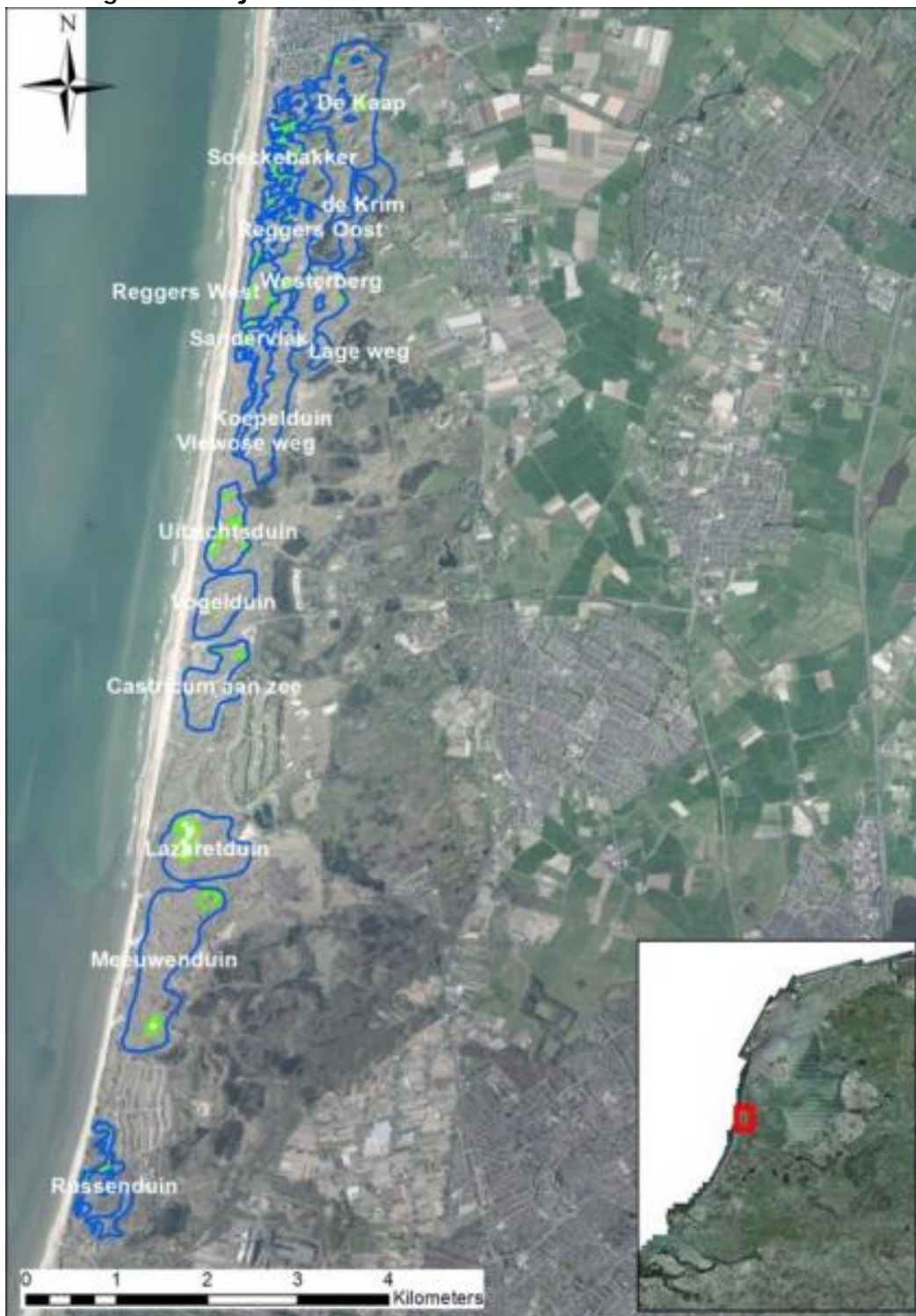
.5.1 Zegeveld noord

In het noordelijke hooggelegen deelgebied Zegeveld noord is de activiteit ten opzichte van 2000 vrijwel onveranderd. De overstuivingszones rondom de bestaande stuifkuilen zijn bijna allemaal in omvang gegroeid. Echter de tussenliggende kale zones zijn verder gestabiliseerd.

.5.2 Zegeveld zuid

Verder naar het zuiden in deelgebied Zegeveld zuid is de activiteit meer geconcentreerd op een aantal plekken. Ook hier is vooral de overstuivingsactiviteit toegenomen. De tussenliggende gebieden tonen veel kale en schrale oppervlakken.

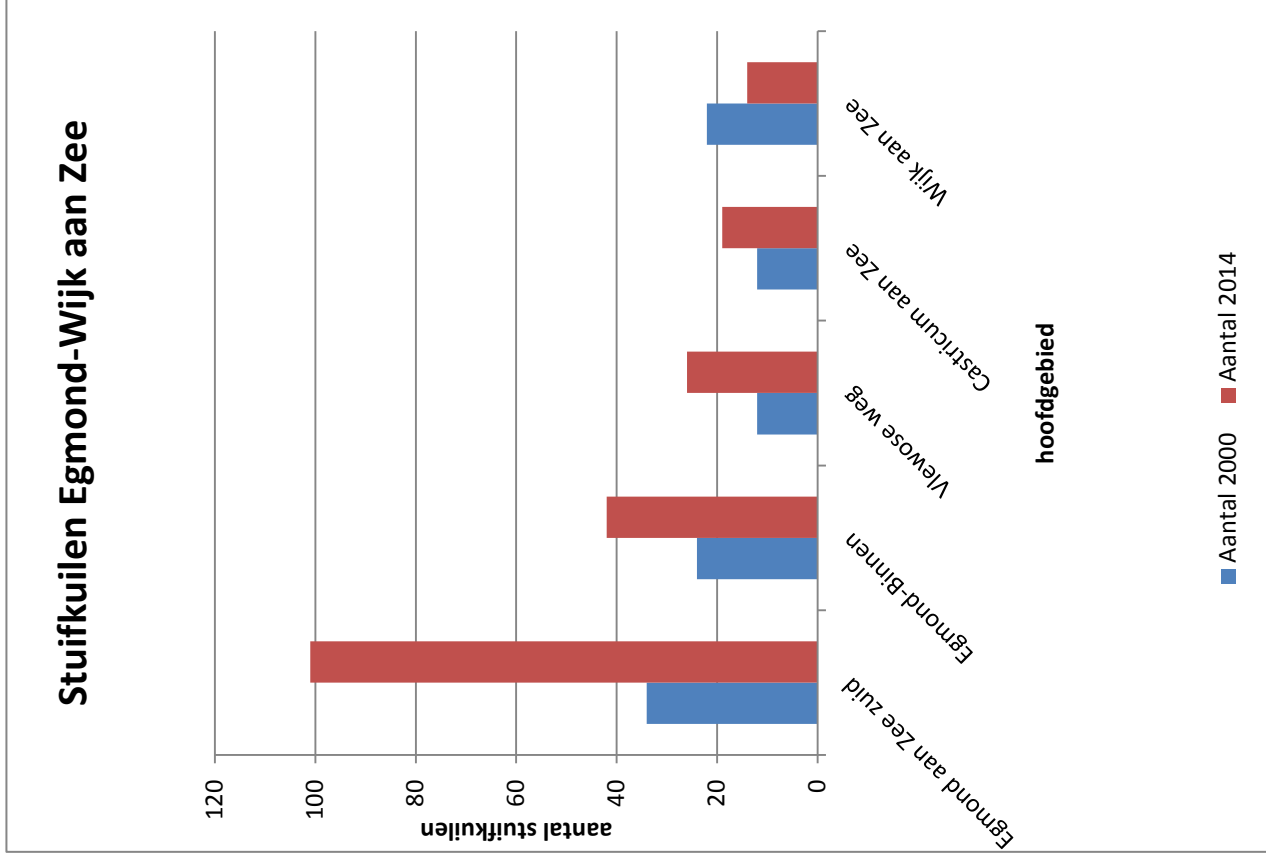
4.5.3 Egmond - Wijk aan Zee



Figuur 4-43. Noord-Holland zuid.

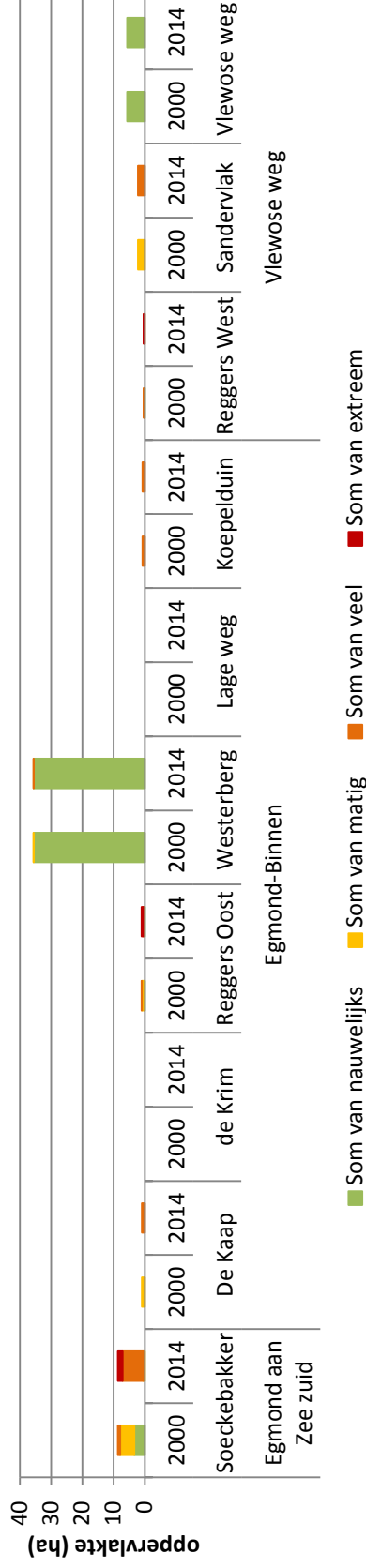


Figuur 4-44. Ontwikkeling activiteit Egmond aan zee Zuid (links) en Castricum (rechts).



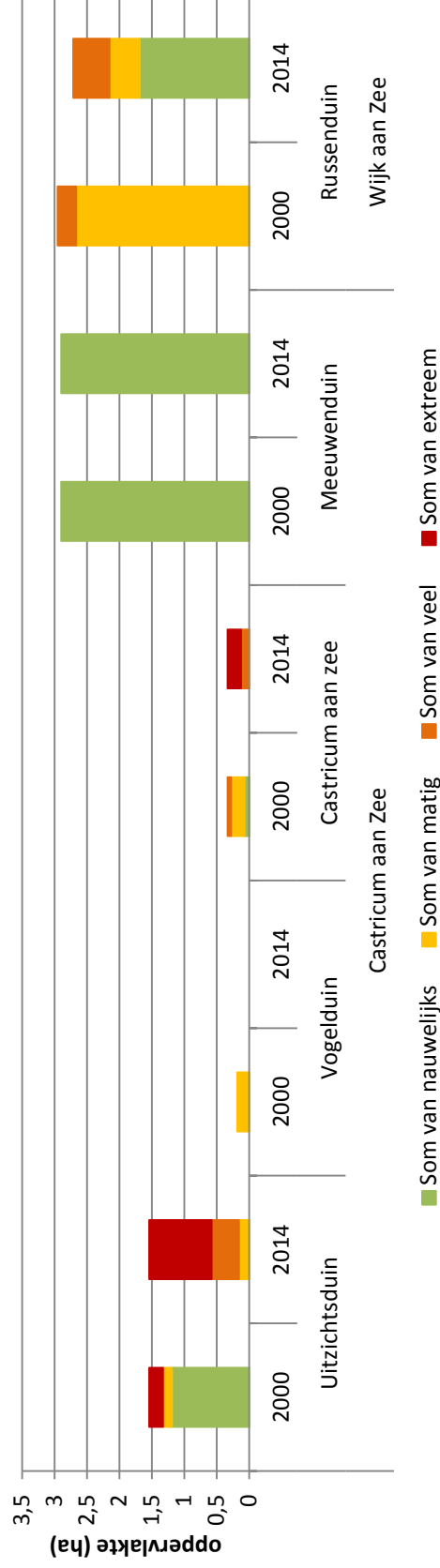
Figuur 4-45. Ontwikkeling activiteit Wijk aan Zee (links) en Aantal stuifkuilen per hoofdgebied (rechts).

Egmond-Castricum 446-142 ha; activiteit 2000 en 2014



Figuur 4-46. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

Castricum-Wijk aan Zee 369-94 ha; activiteit 2000 en 2014



Figuur 4-47. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

.1 Egmond aan Zee zuid

Onder Egmond aan Zee, ingesloten tussen een hoge en brede zeereep (20m NAP, ±80m breed) met beperkte activiteit en de zeer hoge duinen van hoofdgebied Egmond binnen, ligt hoofdgebied Egmond aan Zee zuid. Dit hoofdgebied omvat verschillende valleien met daarin een aaneengesloten netwerk van duinen (±20m NAP) van deelgebied Soeckebakker.

.1.1 Soeckebakker

De activiteit in Soeckebakker is extreem toegenomen. Het aantal stuifkuilen in verdrievoudigd van 34 naar 101 tussen 2000 en 2014. De echt actieve gebieden zijn min of meer geclusterd in een aantal kleine gebieden. In de tussenliggende zones zijn kale en schrale plekken zichtbaar. Veel kleine paden wijzen op een hoge mate van betreding.

.2 Egmond Binnen

Egmond Binnen omgrenst een rij zeer hoge duinen (25-35m NAP) gelegen achter de valleien van Egmond aan Zee zuid en de Vlewose weg. Het gebied ligt op flinke afstand van de zeereep (0.5-1.2 km). De dynamiek in dit gebied is beperkt tot een aantal stuifkuilen die tussen 2000 en 2014 zowel in omvang als in aantal toeneemt (24 in 2000 tot 42 in 2014). De rest van het gebied is zeer stabiel. Er zijn geen sporen van betreding zichtbaar, met uitzondering van de bestaande paden.

.2.1 De Kaap

In het noordelijkste deelgebied De Kaap vindt de meeste betreding plaats. Hier zijn een aantal stuifkuilen in omtrek gegroeid. In de rest van het deelgebied zijn veel kale vlakken te zien in het schrale graslandschap. De hoeveelheid kale vlakken is hier echter veel lager dan in het meer zeewaarts gelegen gebied van Egmond aan Zee zuid.

.2.2 De Krim

Deelgebied De Krim ligt op een hoge duinrug aan de landwaartse zijde van het duingebied. Er is geen dynamiek in dit gebied.

.2.3 Reggers oost

Gelegen op een hoge duinrug zeewaarts van de Krim ligt Reggers oost. Ook hier is de dynamiek zeer beperkt en geconcentreerd rond een paar stuifkuilen. Ten opzichte van 2000 zijn de stuifkuilen actiever geworden en tonen nu soms flinke overstuivingszones. In de tussenliggende gebieden zijn enkele kleine kale plekken te zien.

.2.4 Westerberg

Bij Westerberg zijn een aantal kleine stuifvlakken ontstaan die zich deels hebben doorontwikkeld tot kleine stuifkuilen. De rest van het gebied is met uitzondering van een paar kleine schrale plekken volledig stabiel.

.2.5 Lage weg

In het zuidoostelijke puntje van Egmond Binnen ligt een uitloper van een hoog duin. Hier is geen activiteit waargenomen.

.2.6 Koepelduinen

Deelgebied Koepelduinen aan de oostzijde van hoofdgebied Vlewose weg is volledig stabiel. In het noorden ligt een actieve stuifkuil die tussen 2000 en 2014 niet veranderd.

.3 Vlewose weg

Hoofdgebied de Vlewose weg ligt in een vallei direct achter een hoge steile zeereep. De activiteit is hier zeer beperkt en voornamelijk geconcentreerd rond een aantal stuifkuilen in het iets hoger gelegen deelgebied Sandervlak. Tussen 2000 en 2014 hebben een aantal kleine stuifvlakken zich verder uitgebreid tot stuifkuilen. Het aantal stuifkuilen is daardoor ruim verdubbeld van 12 in 2000 tot 26 in 2014.

.3.1 Reggers west

In de stabiele vallei van deelgebied Reggers west zijn een paar stuifkuilen zichtbaar. Deze zijn allemaal flink gegroeid in grootte en mate van overstuiving. In dit deelgebied zijn veel kleine paden zichtbaar, wat wijst op een flinke mate van betreding.

.3.2 Sandervlak

Hoofdgebied Vlewose weg wordt gescheiden in noord en zuid door het hoger gelegen Sandervlak. In dit kleine gebied is het aantal stuifkuilen en de mate van activiteit flink toegenomen. Ook hier zijn veel sporen van betreding te zien.

.3.3 Vlewose weg

In het meest zuidelijk gelegen gebied in het zuiden van Vlewose weg is nauwelijks activiteit. Een paar kale vlakken en kleine stuifkuilen ligt op een lage rug van duinen in de vallei, maar hier lijkt weinig te veranderen.

.4 Castricum aan Zee

Direct achter de matig tot niet actieve zeereep van Castricum ligt hoofdgebied Castricum aan Zee. De afwisselende valleien en duinenrijen zijn lager dan de zeereep. In het noorden zijn de duinen het hoogst met een gemiddelde hoogte van 15m NAP. In het zuiden bij Meeuwenduin is meer sprake van lage duinruggen met een gemiddelde hoogte van 10m NAP. De zeereep is hier niet gesloten en er zijn een paar grote kerven zichtbaar met plaatselijk flinke doorstuiving. Dit lijkt echter geen invloed te hebben op de mate van dynamiek in het achterliggende deelgebied. Ook al is de dynamiek in de deelgebieden beperkt tot een aantal stuifkuilen, deze nemen wel toe in aantal en mate van activiteit. Tussen 2000 en 2014 zijn 7 stuifvlakken uitgegroeid tot stuifkuilen waardoor en nu 19 actieve stuifkuilen zijn.

.4.1 Uitzichtsduin

In deelgebied Uitzichtsduin zijn veel klein kale en schrale vlakjes uitgegroeid tot stuifvlakken en kuilen. In dit deelgebied is de activiteit fors toegenomen, alle stuifkuilen zijn gegroeid en de overstuivingszone is flink uitgebreid.

.4.2 Vogelduin

Terwijl bij Vogelduin de enige actieve stuifkuil uit 2000 nu volledig verdwenen is, neemt het aantal potentiële nieuwe stuifkuilen flink toe. Er zijn veel nieuwe kale plekken ontstaan, maar geen van deze plekken is al uitgegroeid tot een stuifkuil.

.4.3 Castricum aan Zee

Net als bij Uitzichtsduin is de dynamiek ten zuiden van de strandopgang bij Castricum toegenomen. In het noorden zijn een paar stuifkuilen actiever geworden. In de rest van het gebied zijn veel nieuwe kale plekken ontstaan.

.4.4 Lazaretduin

Net ten zuiden van het waterwingebied bij Castricum ligt deelgebied Lazaretduin. Hier zijn tussen 2009 en 2010 twee aaneengesloten paraboolduinen kaal gemaakt ter bevordering van de dynamiek. In het omliggende stabiele gebied zijn veel kleine kale en schrale plekken ontstaan.

.4.5 Meeuwenduinen

In het zuidelijkste deel van hoofdgebied Castricum aan Zee ligt Meeuwenduin. Dit deelgebied is vrijwel geheel gestabiliseerd. Er zijn een aantal zeer kleine stuifvlakjes zichtbaar en bij de stuifkuilen wordt nauwelijks activiteit waargenomen.

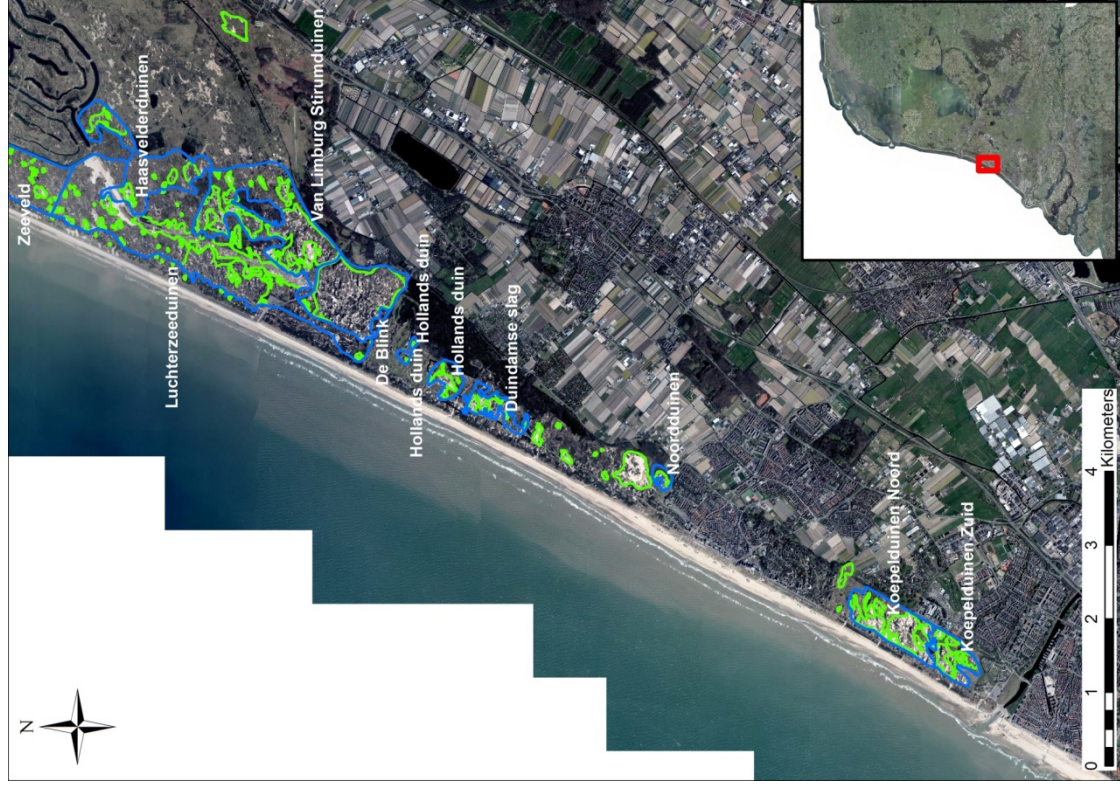
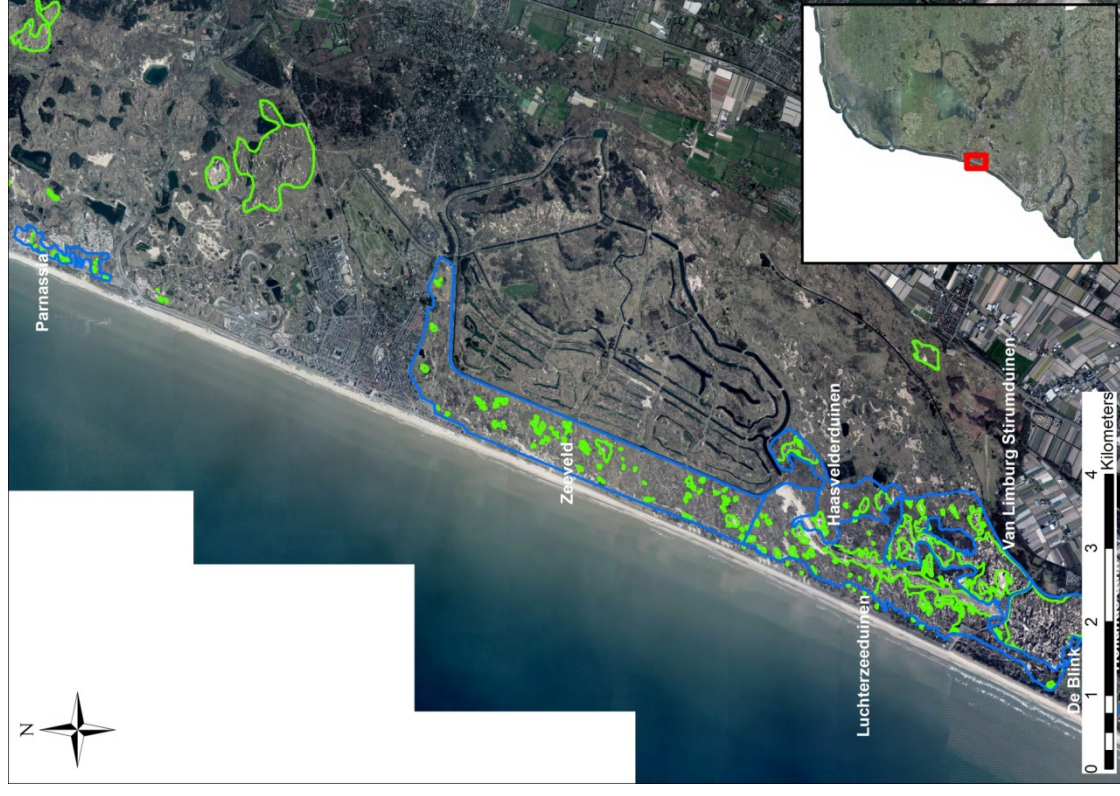
.5 Wijk aan Zee

Ingesloten tussen waterwingebied Ikief en Wijk aan Zee ligt gelijknamig hoofdgebied Wijk aan Zee. Achter een hoge dynamische zeereep (± 18 m NAP) met beperkte doorstuiving en omgrensd door valleien met lage kopjes liggen de middelhoge tot hoge duinen (10-20m NAP) van Russenduin.

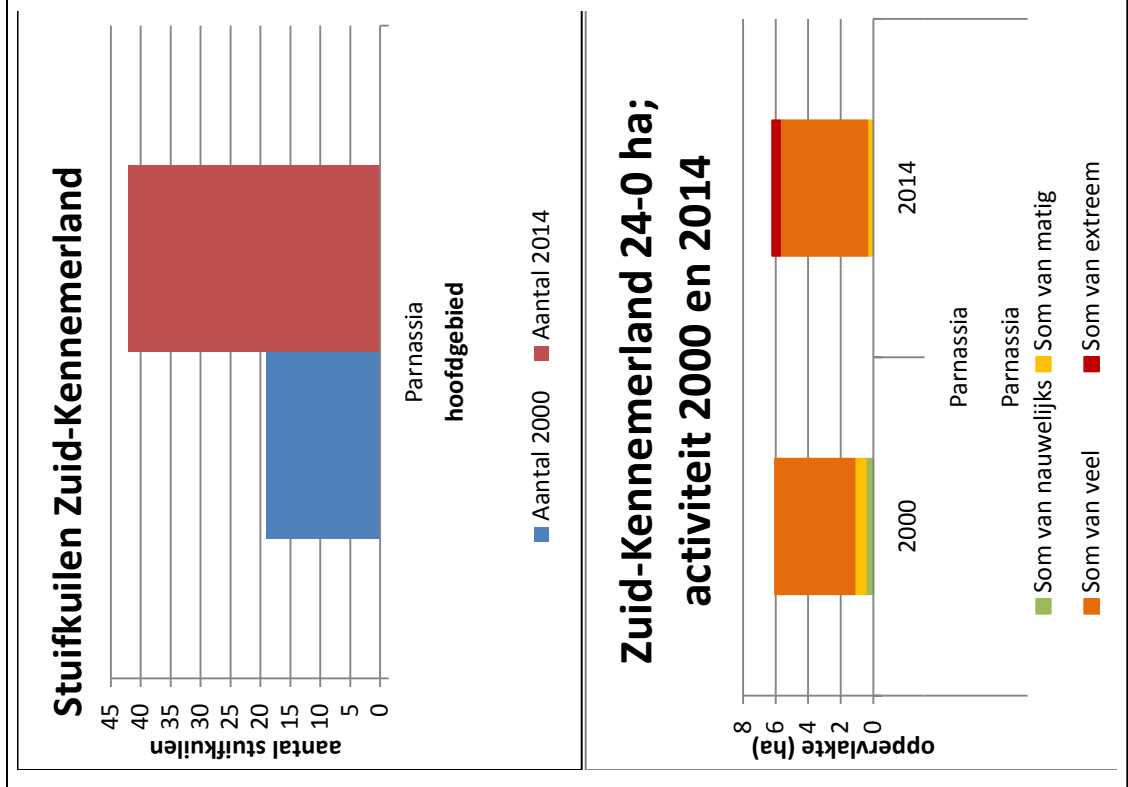
.5.1 Russenduin

De dynamiek is beperkt tot een aantal kleine gebieden, waarvan de meeste een stabiliserende trend volgen. Het aantal stuifkuilen is teruggelopen van 22 naar 14.

4.5.4 Zuid-Kennemerland



Figuur 4-48. Zuid-Holland noord.



Figuur 4-49. Ontwikkeling activiteit Parnassia (links), Aantal stuifkuilen per hoofdgebiet (rechtsboven) en Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

.1 Parnassia

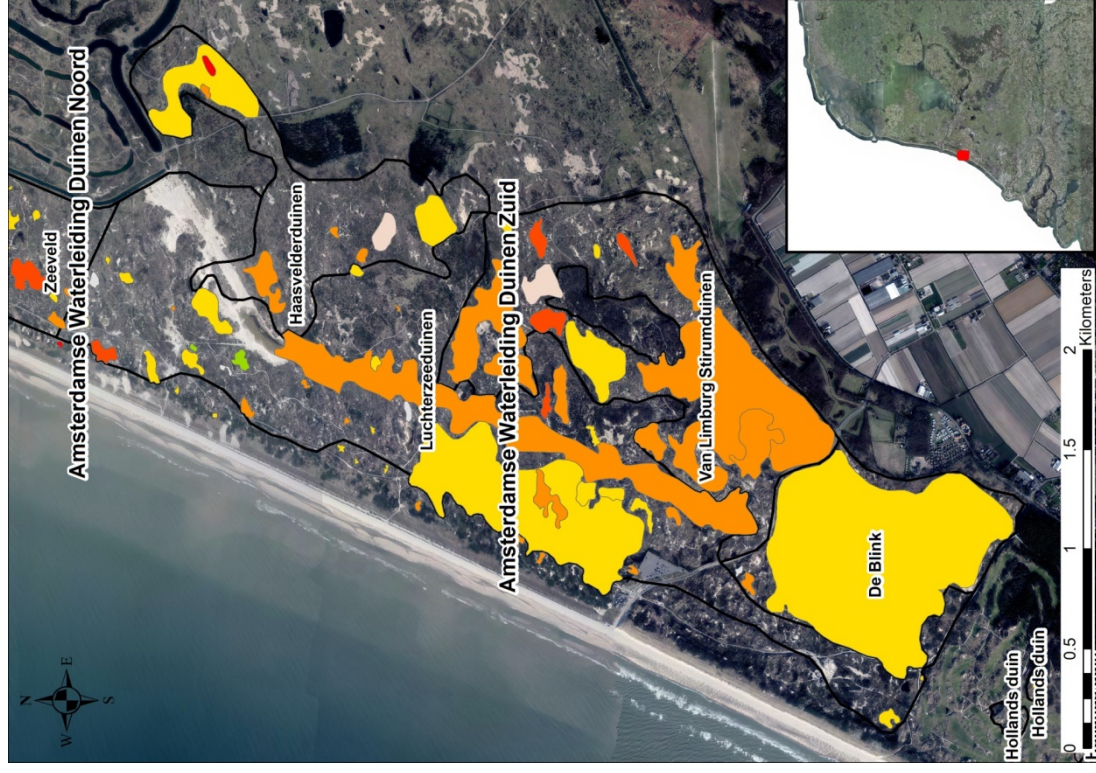
Tussen strandopgang Parnassia en Bloemendaal aan Zee ligt hoofdgebied Parnassia. Dit gebied ligt achter een hoge ($\pm 20\text{m}$ NAP) zeereep, waar de dynamiek voornamelijk beperkt is tot de voorzijde. Omgeven door redelijk vlakke valleien met o.a. een camping, liggen een aantal duinen met een maximale hoogte van 20m NAP. De dynamiek in dit gebied is beperkt tot een aantal stuifkuilen of stuifvlakken en een speelgebied in het noorden naast de parkeerplaat van Parnassia.

.1.1 Parnassia

De actieve delen van Parnassia tonen flinke dynamiek. Het aantal stuifkuilen in het gebied is ruim verdubbeld van 19 in 2000 tot 42 in 2014. In het uiterste noorden bij een speelplaats vindt extreme betreding plaats. De mate van activiteit was hier al groot en is tussen 2000 en 2014 vrijwel gelijk gebleven. Verder naar het zuiden toe neemt het aantal stuifkuilen af en is de activiteit steeds meer beperkt tot bepaalde locaties. Vrijwel alle actieve locaties tonen sporen van betreding. De activiteit is hier overal toegenomen.

Binnen dit gebied liggen verschillende projecten waar dynamiek op grotere of kleinere schaal is gestimuleerd of geïnitieerd. Het betreft een aantal parabolon in PWN gebied, zoals Verlaten Veld en Bruid van Haarlem (Arens et al., 2009), en meer recentelijk in de Noordwestkern (Arens & Neijmeijer, 2013), en verstuivingen in het gebied van Natuurmonumenten, bij Duin- en Kruidberg (Huttenvlak). Deze gestuurde ontwikkelingen zijn in deze inventarisatie buiten beschouwing gelaten. In Hoofdstuk 9 wordt wel ingegaan op de ecologische effecten van de gereactiveerde stuifkuilen bij het Huttenvlak.

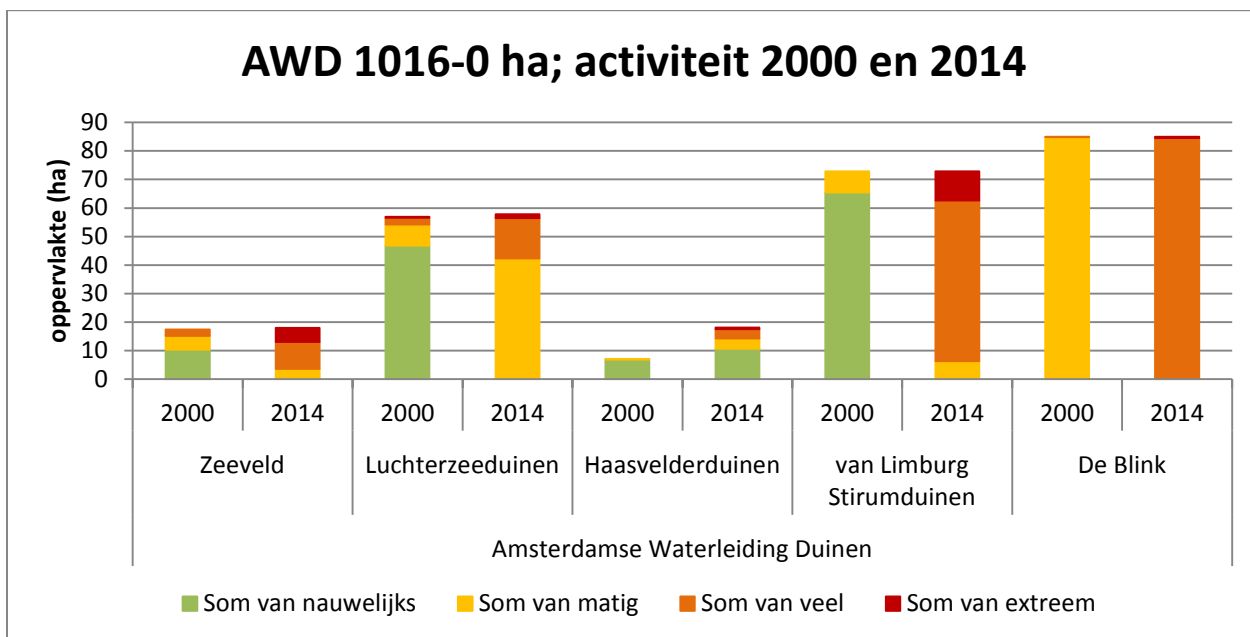
4.5.5 Amsterdams Waterleiding Duinen – Katwijk



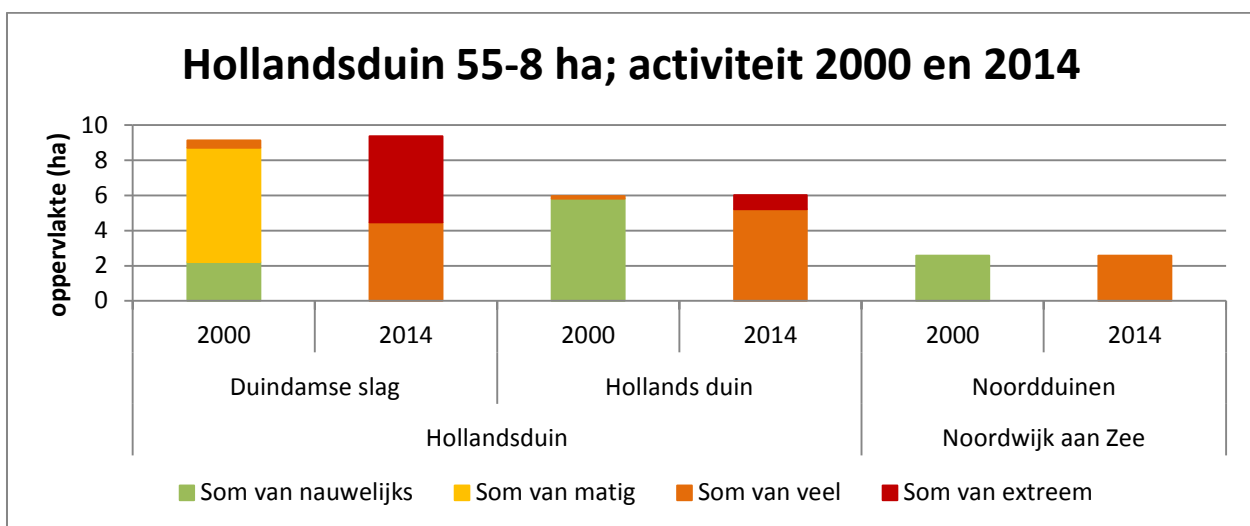
Figuur 4-50. Ontwikkeling activiteit Amsterdams Waterleidingduinen noord (links) en zuid (rechts).



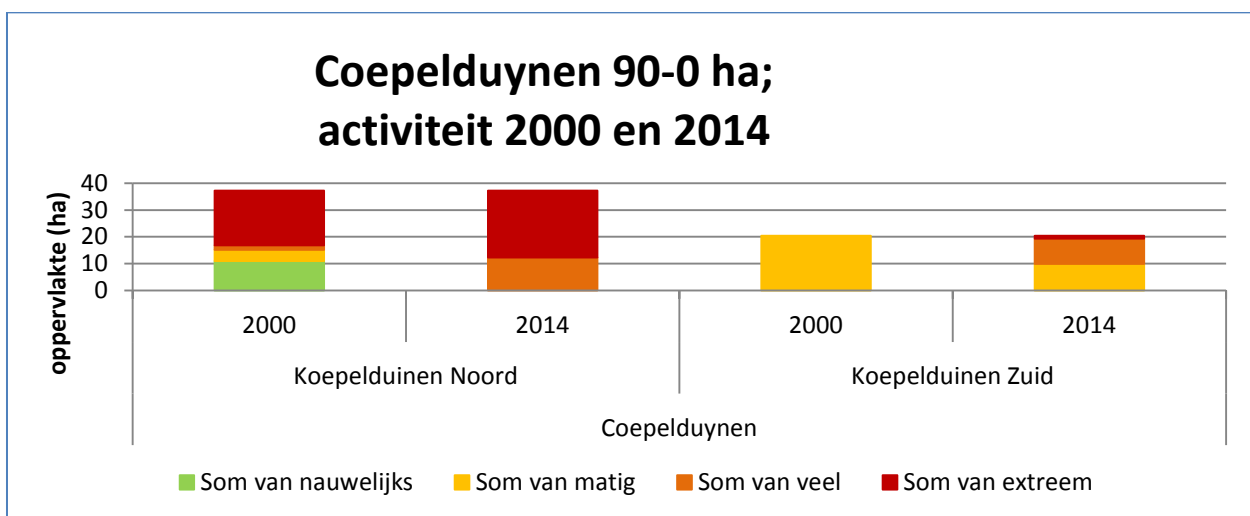
Figuur 4-51. Ontwikkeling activiteit Hollandsduin (links) en Coepelduynen (rechts).



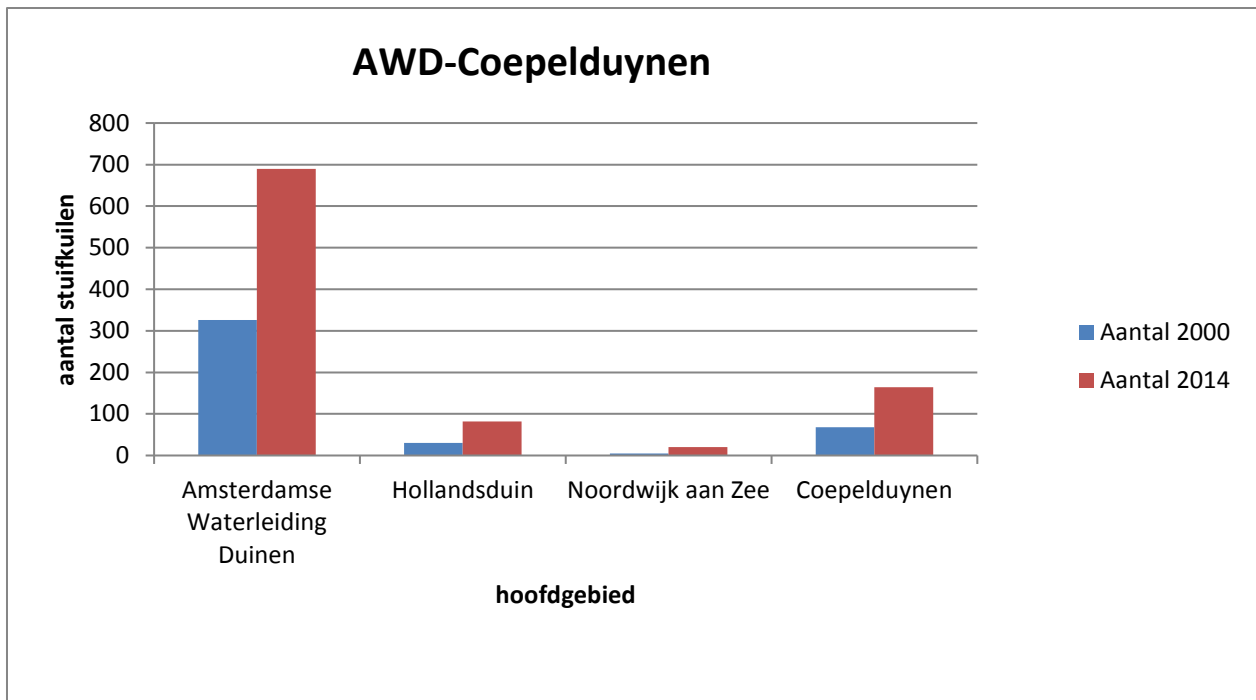
Figuur 4-52. Oppervlak (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.



Figuur 4-53. Oppervlak (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.



Figuur 4-54. Oppervlak (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.



Figuur 4-55. Aantal stuifkuilen per hoofdgebied.

.1 Amsterdamse Waterleiding Duinen

Dit hoofdgebied loopt langs het huidige en door het oude infiltratiegebied van de Amsterdamse Waterleiding Duinen. Het gebied is direct aangesloten op de hoge matige actieve zeereep (± 20 m NAP) en bestaat uit lage duinen (8-12m NAP) en valleien. Verder naar het zuiden, oostwaarts van het Van Limburg Stirumkanaal en bij de Blink zijn de duinen een stuk hoger (20-25m NAP). De Amsterdamse Waterleiding Duinen beslaan een groot gebied met ontzettend veel stuifkuilen, waarbij een toenemende gradiënt in hoeveelheid stuifkuilen zichtbaar is richting het zuiden. De hoeveelheid stuifkuilen is extreem toegenomen (van 326 kuilen in 2000 naar 690 in 2014). Veel stuifvlakken hebben zich ontwikkeld tot stuifkuilen, maar er zijn ook compleet nieuwe stuifkuilen ontstaan.

.1.1 Zeeveld

In het Noord-Hollandse gedeelte van de Amsterdamse Waterleiding Duinen, Zeeveld, is de activiteit beperkt tot een aantal zones. Ten opzichte van 2000 is de activiteit in vrijwel alle delen hier toegenomen. In de tussenliggende zones is sprake van schraal graslandschap, met kleine kale plekken en zeer dunne begroeiing. In het noorden tegen de grens met Zandvoort is een recreatiegebied, waar veel betreding plaatsvindt. Verder bevindt zich langs het fietspad achter de zeereep onder Zandvoort een brede zone waar extreme betreding plaatsvindt.

.1.2 Luchterzeeduinen

In een langgerekt gebied tussen de zeereep en het gedempte Van Limburg Stirumkanaal ligt deelgebied Luchterzeeduinen. In het gebied zijn veel stuifkuilen, stuifvlakken en schrale plekken zichtbaar. Tussen 2000 en 2014 is de dynamiek in het gebied op veel plekken toegenomen. In de tussenliggende gebieden is veelal sprake van schrale vegetatie en vele kleine paden door sterke betreding (damherten). De sterkste toename is dynamiek is zichtbaar net ten noorden van Langevelderslag waar stuifkuilen flinke overstuivingszones tonen.

.1.3 Haasvelderduinen

Aan de noordoostkant van het van het gedempte Van Limburg Stirumkanaal op een groepje hogere duinen (± 20 m NAP) ligt deelgebied Haasvelderduinen. In vergelijking met de andere deelgebieden van de Amsterdamse Waterleiding Duinen is dit verreweg het minst actieve deelgebied. De dynamiek is beperkt tot een aantal stuifkuilen die tussen 2000 en 2014 zijn toegenomen in activiteit. Ook zijn er veel nieuwe stuifkuilen ontstaan. In de tussenliggende gebieden zijn kale en schrale plekken zichtbaar, maar de dichtheid van deze plekken is hier veel lager dan in de omliggende gebieden.

.1.4 Van Limburg Stirumduinen

Bij de Van Limburg Stirumduinen is het landschap waar voorheen nauwelijks activiteit zichtbaar was, compleet veranderd in een mijnenveld bezaaid met stuifkuilen. Dit deelgebied op duinen met variërende hoogte tussen de 10 en 25m NAP ligt ten noorden van Langevelderslag en ten oosten van het gedempte Van Limburg Stirumkanaal. In 2000 waren hier veel schrale plekken en een groot aantal kleine stuifkuilen te zien. In 2014 zijn alle stuifkuilen verder gegroeid, zijn er extreem veel nieuwe stuifkuilen ontstaan (bijna verdrievoudigd t.o.v. 2000) en vormen de grote overstuivingszones nu grote clusters van stuifkuilen. Ook in dit gebied zijn veel sporen van betreding te zien (damherten).

.1.5 De Blink

In het zuiden bij de Blink is de dynamiek ook verder toegenomen. In de Amsterdamse Waterleiding Duinen heeft dit deelgebied de grootste dichtheid aan stuifkuilen. Het bonte patroon met kale en schrale plekken en flinke hoeveelheid stuifkuilen uit 2000 is verder uitgebreid. Het aantal stuifkuilen is flink toegenomen. In de Blink is net als in de andere deelgebieden in dit hoofdgebied een uitgebreid netwerk van paden te zien. Waarschijnlijk het resultaat van de grote damherten populatie in het gebied.

.2 Hollandsduin

Net ten zuiden van de Noordwijkse golfclub ligt hoofdgebied Hollandsduin. Dit hoofdgebied ligt achter een hoge en zeer brede, aangroeiende zeereep (± 20 m NAP en 100-150m breed) met beperkte dynamiek aan de voorzijde. De deelgebieden liggen op redelijk lage duinen (5-15m NAP). De gebieden worden zichtbaar veel betreden. Er zijn ruiterspaden en wandelpaden zichtbaar. De dynamiek in hoofdgebied Hollandsduin is extreem toegenomen. Dit is ook terug te zien in het aantal stuifkuilen wat tussen 2000 en 2014 is toegenomen van 30 naar 82.

.2.1 Hollands duin

Deelgebied Hollands duin toont een extreme toename in dynamiek. Er loopt een soort ruiterspad door het gebied en in 2000 is het gebied met uitzondering van een paar kleine stuifkuilen en wat schrale plekken volledig stabiel. In 2014 zijn er extreem veel nieuwe stuifkuilen ontstaan en zijn er uitgebreide overstuivingszones zichtbaar. Tussen 2005 en 2007 is de dynamiek extreem toegenomen, waarna de stuifkuilontwikkeling gestaag verder gaat.

.2.2 Duindamse slag

Ook bij Duindamse slag is de activiteit sterk toegenomen. Voornamelijk is het noorden zijn de stuifkuilen sterk gegroeid en zijn de overstuivingszones in omgang toegenomen. In 2014 bestaat deelgebied Duindamse slag uit een aantal aaneengeschakelde clusters van stuifkuilen en overstuivingszones die op sommige plekken zelfs het grondwater bereiken. In de tussenliggende zones zijn veel stuifplekken zichtbaar die in de toekomst ook mogelijk ook kunnen uitgroeien tot stuifkuilen.

.3 Noordwijk aan Zee

Aan de rand van Noordwijk bevindt zich een klein recreatiegebied op een duin van ± 20 m NAP. Het gebied bevindt zich deels achter een aangroeiende hoge zeereep en deels achter de niet actieve boulevard van Noordwijk.

.3.1 Noordduinen

Het aantal stuifkuilen is tussen 2000 en 2014 verviervoudigd van 5 tot 20. Ook de mate van dynamiek is extreem toegenomen van een nauwelijks actief gebied in tot een gebied met veel activiteit en overstuiving. Beiden zijn beïnvloed door de hoge mate van betreding.

.4 Coepelduynen

Ingesloten tussen Katwijk, Noordwijk en de zeereep ligt Coepelduynen. De zeereep is hier hoog en breed (20m NAP en 120-150m breed) en de dynamiek is beperkt tot de voorzijde. Voornamelijk in deelgebied Coepelduynen Noord zijn de duinen even hoog of hoger dan de zeereep, afgewisseld met enkele valleien. In het zuiden tegen Katwijk aan zijn de duinen lager (12-15m NAP). De

activiteit in de Coepelduynen is verder toegenomen. Het aantal stuifkuilen is sterk gestegen van 68 in 2000 naar 164 in 2014.

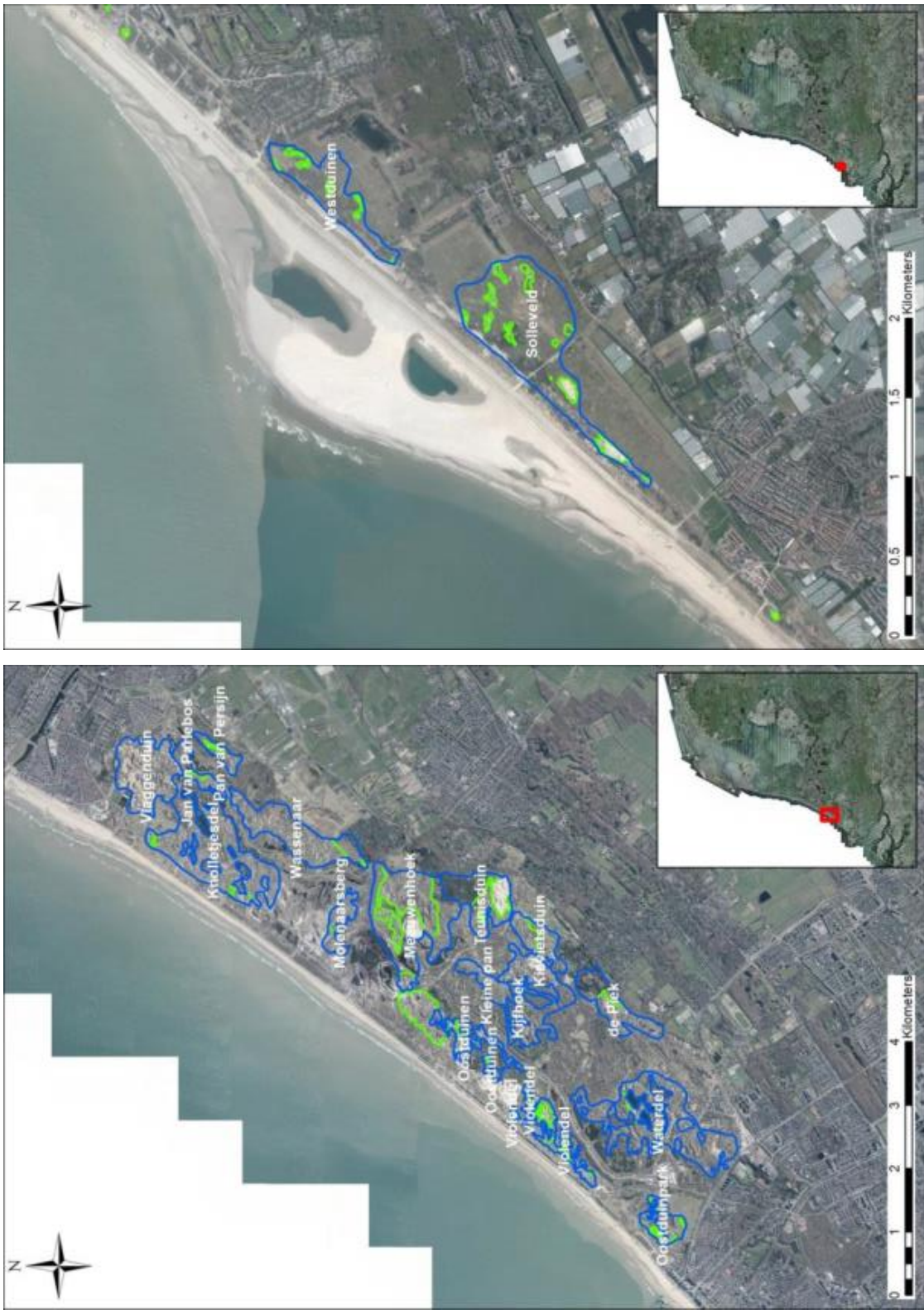
.4.1 Koepelduinen noord

Het centrale deel van Koepelduinen noord was al sterk actief, maar in 2014 is ook in het noorden en zuiden van dit deelgebied de activiteit sterk toegenomen. Hier waren veel kleine kale en bijna kale vlakken die nu samen een grote aaneenschakeling van stuifkuilen en overstuivingszones vormen. De tussenliggende vooral landwaartse zones waar nog geen activiteit wordt waargenomen tonen wel kale plekken en zeer dunne vegetatie.

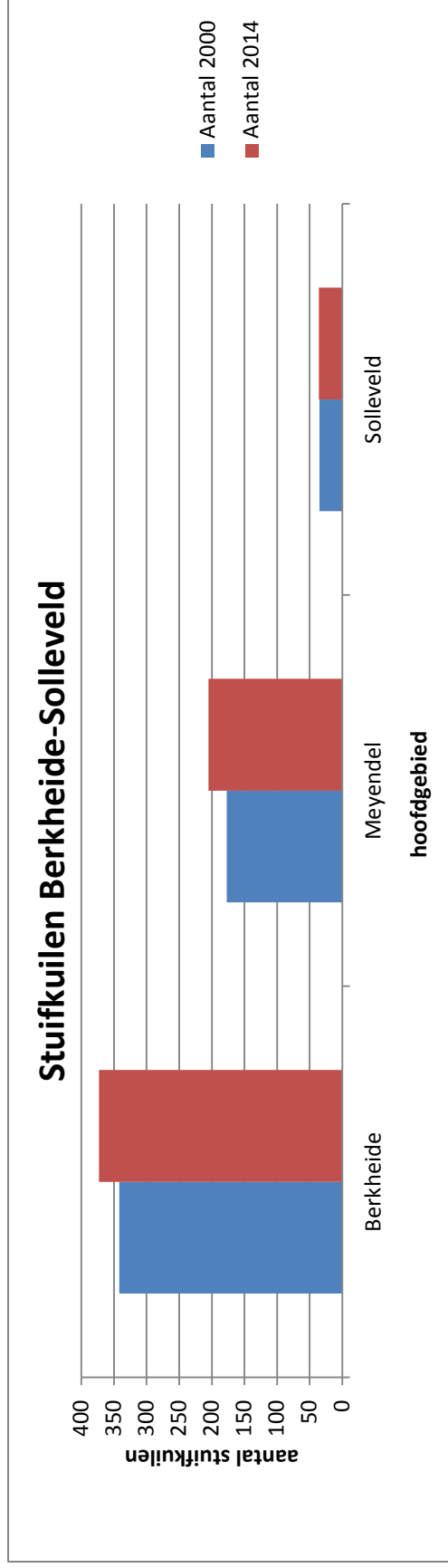
.4.2 Koepelduinen zuid

In deelgebied Koepelduinen zuid is de activiteit ook flink gestegen. Zeker de helft van de gebieden die in 2000 matig actief waren tonen nu veel tot extreem veel activiteit. Er zijn hier veel sporen van betreding te zien.

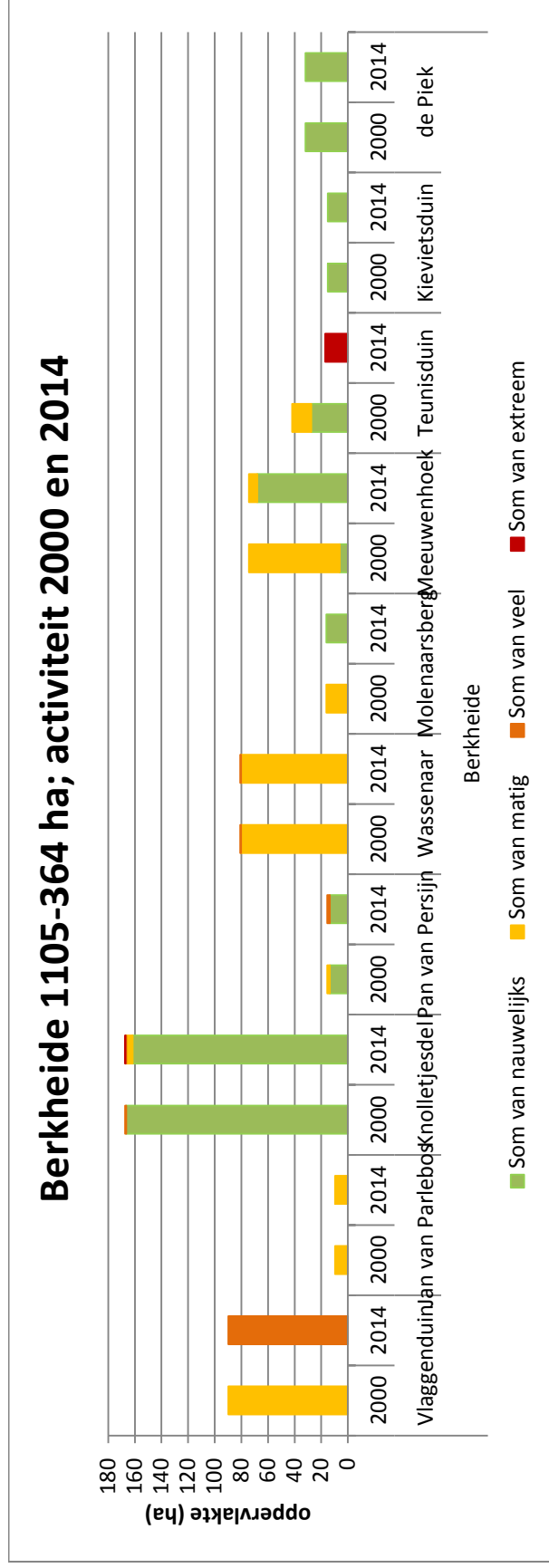
4.5.6 Berkheide – Solleveld



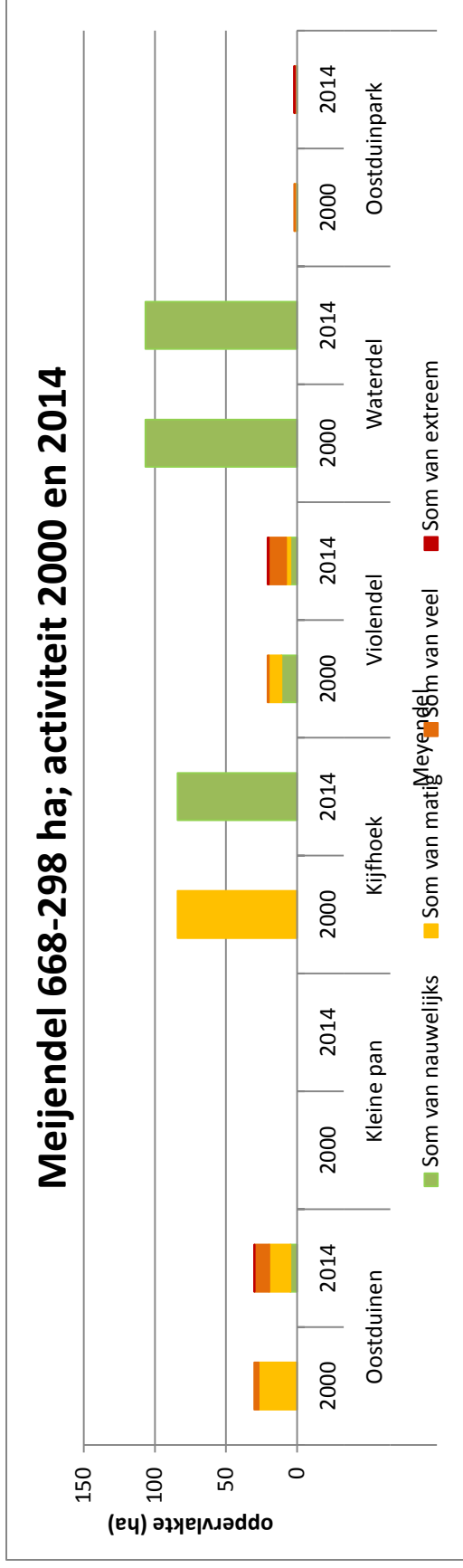
Figuur 4-56. Zuid-Holland zuid.



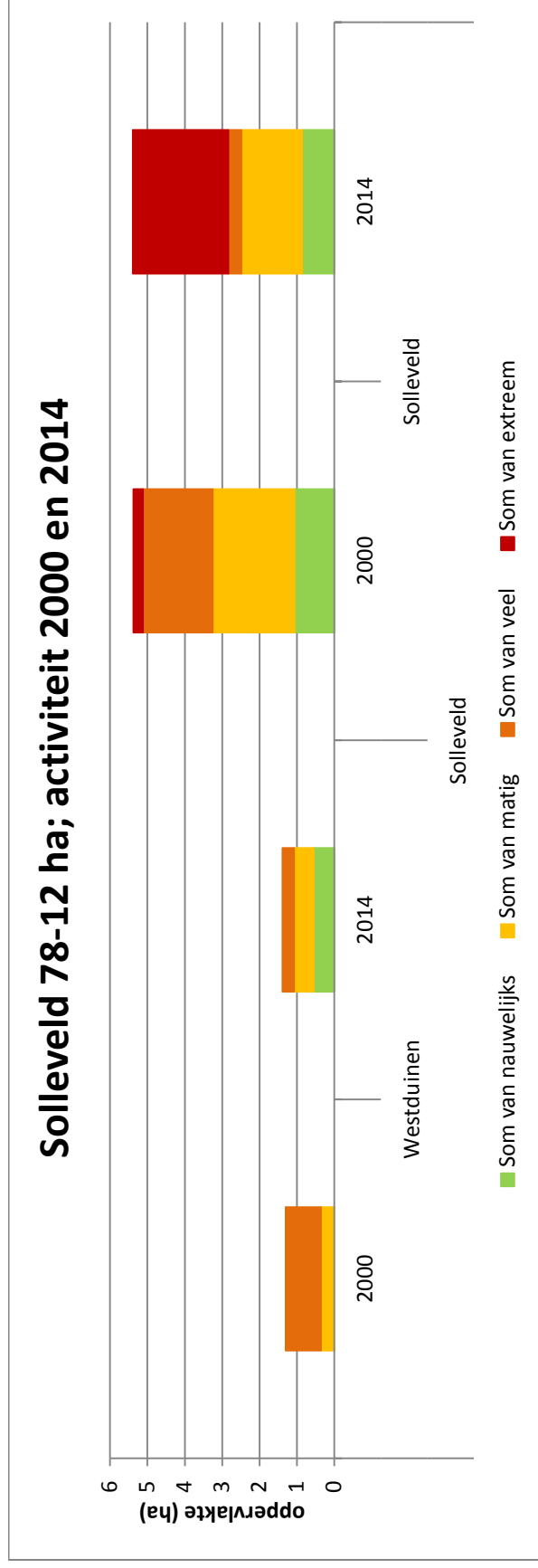
Figuur 4-58. Aantal stuifkuilen per hoofdgebiet.



Figuur 4-59. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.



Figuur 4-60. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.



Figuur 4-61. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

.1 Berkheide

Tussen Katwijk en Wassenaar ligt hoofgebied Berkheide. Het gebied ligt achter een hoge brede zeereep ($\pm 20\text{m}$ NAP en 150-175m breed) waar de dynamiek beperkt is tot de voorzijde. Het gebied bestaat uit veelal hoge duinen (25-35m NAP) met tussenliggende valleien en lage duinen.

.1.1 Vlaggenduin

In het noorden van Berkheide ligt een flink actief deelgebied. Vlaggenduin bestaat uit een groepje zeer hoge duinen (30-35m NAP) en wordt zichtbaar veel betreden. In het gehele deelgebied is de activiteit tussen 2000 en 2014 flink toegenomen. De stuifkuilen en schrale vegetatie die in 2000 zichtbaar zijn, hebben zich in 2014 op veel plekken verder ontwikkeld tot een groot aaneengesloten cluster van stuifkuilen. Het aantal stuifkuilen is vrijwel gelijk gebleven (± 100), maar de omtrek en de mate van overstuiving zijn flink toegenomen. In het noordelijke, zwaarder betreden gedeelte, is dit extremer.

.1.2 Pan van Perlebos

In dit deelgebied is weinig veranderd ten opzichte van 2000. Op de hoge duinen (25-30m NAP) zijn verspreid over een oppervlak van 9.5ha een aantal matig actieve stuifkuilen te zien.

.1.3 Knolletjesdel

Knolletjesdel ligt ingesloten tussen de hoge zeereep en de hoge duinen van Berkheide. Hier wisselen valleien en middelhoge duinen elkaar af. Dit gebied wordt flink betreden. Op de duinen zijn veel kleine stuifvlakken te zien waarvan er tussen 2000 en 2014 een aantal zijn uitgegroeid tot nieuwe stuifkuilen (van 66 in 2000 tot 67 in 2014). De activiteit is beperkt tot de stuifkuilen en is alleen in een sterk betreden gebied in het zuidwesten van het deelgebied echt toegenomen.

.1.4 Pan van Persijn

Achter de hoge duinen van Berkheide ligt de Pan van Persijn. Hier bevinden zich een paar middelhoge duinen (12-20m NAP) waar in een gebied van 2ha de dynamiek is toegenomen. Het aantal stuifkuilen is gestegen van 10 in 2010 naar 15 in 2014.

.1.5 Wassenaar

In deelgebied Wassenaar is het aantal actieve stuifkuilen bijna verdubbeld. In de hoge duinen ($\pm 25\text{m}$ NAP) op flinke afstand van de zeereep is deze verandering niet direct terug te zien in de mate van activiteit, die zich beperkt tot heel veel kleine vlakken. Een deel van deze vlakken is tussen 2000 en 2014 uitgegroeid tot stuifkuil.

.1.6 Molenaarsberg

Het hoge duin van Molenaarsberg ligt vrij direct achter de zeereep. De activiteit in dit gebied is afgenomen. De stuifkuilen zijn allemaal deels gestabiliseerd. Er zijn wel veel plekken met schrale vegetatie zichtbaar.

.1.7 Meeuwenhoek

Meeuwenhoek bestaat uit een aantal hoge duinen (25-30m NAP). Het meest landwaartse gedeelte van dit gebied is verder gestabiliseerd, waardoor en nu nauwelijks dynamiek zichtbaar is. Er zijn wel veel kleine plekken met schrale vegetatie zichtbaar. Een aantal van de stuifkuilen is gestabiliseerd. Een klein gebied in het westen toont juist een toename in dynamiek. Hier zijn een aantal stuifvlakken uitgegroeid tot nieuwe stuifkuilen.

.1.8 Teunisduin

Bij Teunisduin is sprake van gestuurde activering. Twee gebieden zijn tussen 2000 en 2014 kaal gemaakt. Het overige deel van dit gebied toont nauwelijks dynamiek.

.1.9 Kieviettsduin

Deelgebied Kieviettsduin toont nauwelijks dynamiek. In het gebied zijn een aantal kleine kale vlakken zichtbaar, maar er is tussen 2000 en 2014 niets veranderd.

.1.10 De Piek

De Piek is een zeer sterk betreden gebied. Naast een aantal stuifkuilen die duidelijk worden open gehouden door de sterke betreding is er nauwelijks activiteit in dit deelgebied.

.2 Meijndel

Tussen Berkheide en Scheveningen ligt hoofdgebied Meijndel. Het waterwingebied wordt gekenmerkt door vele valleien en relatief lage duinen (8-12m NAP) met enkele hogere pieken. Verder landinwaarts liggen de hogere duinen van Kleine Pan, Kijfhoek en Waterdel met hoogtes tot max. 30m NAP. In de hoge zeereep (± 20 m NAP) zijn een aantal (aangelegde) stuifkuilen/kerven zichtbaar. Hier vindt beperkte doorstuiving plaats.

.2.1 Oostduinen

Deelgebied Oostduinen is matig actief, maar in het noordwesten is de activiteit verder toegenomen. Hier ontstaan clusters van stuifkuilen waarbij de overstuivingszones elkaar beïnvloeden. Door de samenvoeging of stabilisatie van enkele stuifkuilen gaat het aantal iets omlaag.

.2.2 Kleine Pan

In deelgebied Kleine Pan is geen activiteit. Er zijn hier ook geen stuifkuilen zichtbaar.

.2.3 Kijfhoek

Deelgebied Kijfhoek is verder gestabiliseerd. Waar in 2000 nog redelijk veel kale plekken en kleine stuifkuilen zichtbaar waren is nu vrijwel alles gestabiliseerd. Het aantal actieve stuifkuilen is teruggelopen van 20 naar 1. In het oosten, tegen Kieviettsduin aan, is een gebied kaal gemaakt.

.2.4 Violendel

De Violendel beslaat een langgerekt gebied direct achter de zeereep ten noorden van Scheveningen. Dit redelijk lage gebied met enkele duinen van max. 20m NAP, is tussen 2000 en 2014 flink geactiveerd. Een deel hiervan is gestuurd, maar er zijn ook een aantal stuifkuilen uitgegroeid tot grote zeer actieve kuilen. De dynamiek is echter beperkt tot bepaalde zones. Het tussenliggende gebied is op een paar kleine sterk betreden gebieden na stabiel.

.2.5 Waterdel

Deelgebied Waterdel is vrijwel onveranderd ten opzichte van 2000. Het gebied is vrij stabiel met uitzondering van een flinke hoeveelheid kleine kale oppervlakken en schrale vegetatie. In dit gebied vindt veel betreding plaats.

.2.6 Oostduinpark

Aan de rand van Scheveningen ligt het sterk betreden Oostduinpark. Hier liggen een aantal individuele stuifkuilen met verschillende mate van activiteit. Opvallend is een stuifkuil ten zuiden van het park in een weiland, waar de activiteit sterk is toegenomen.

.3 Solleveld

De duinen van hoofdgebied Solleveld liggen achter de lage verbreedde zeereep (± 12 m NAP en 160m breed) bij de Zandmotor. Het vlakke landschap wordt gekenmerkt door een paar kopjes waarop en langs de meeste activiteit plaatsvindt.

.3.1 Westduinen

In deelgebied Westduinen is de dynamiek beperkt tot enkele stuifkuilen. De meeste stuifkuilen zijn ten opzichte van 2000 verder gestabiliseerd. In het noorden vlakbij Kijkduin is een nieuwe kuil ontstaan.

.3.2 Solleveld

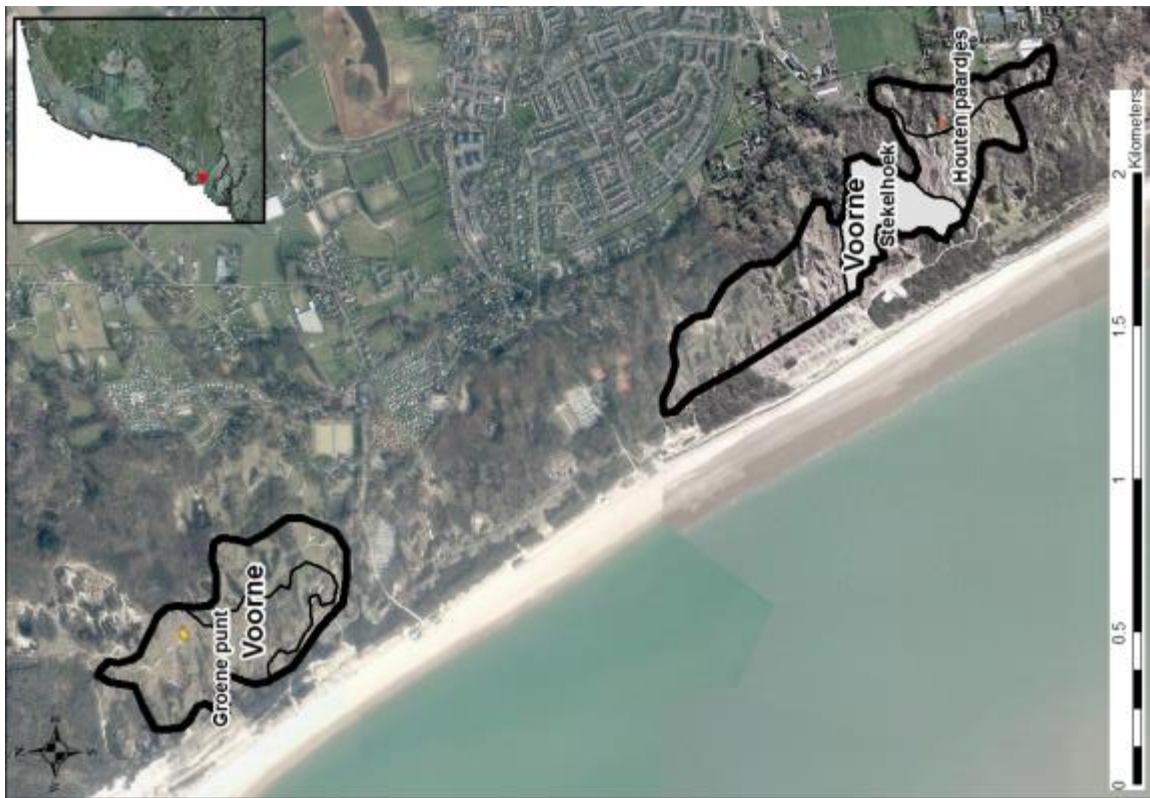
Ook in deelgebied Solleveld is de dynamiek beperkt tot een aantal stuifkuilen. Een paar van deze kuilen zijn verder gestabiliseerd, maar in het zuiden is na 2000 een extreem actieve stuifkuil ontstaan.

4.6 Delta

4.6.1 Voorne



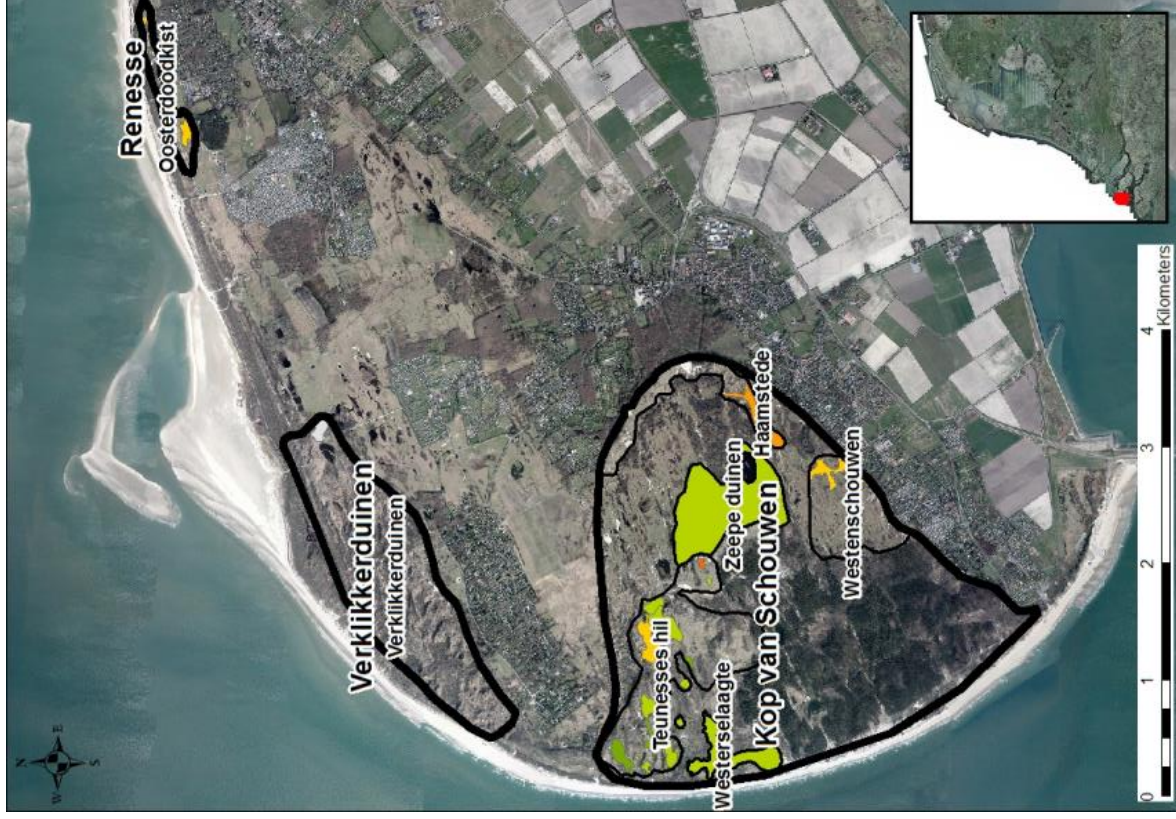
Figuur 4-62. Voorne en Goeree.



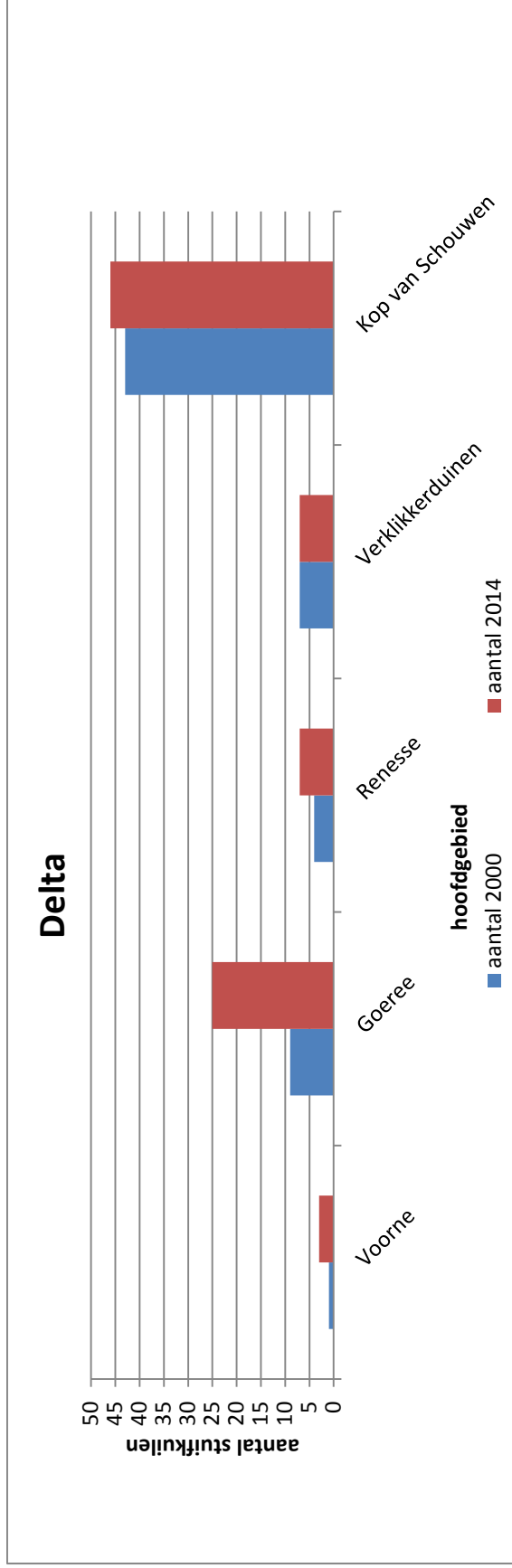
Figuur 4-63. Overzicht activiteit Voorne (links) en Goeree (rechts).



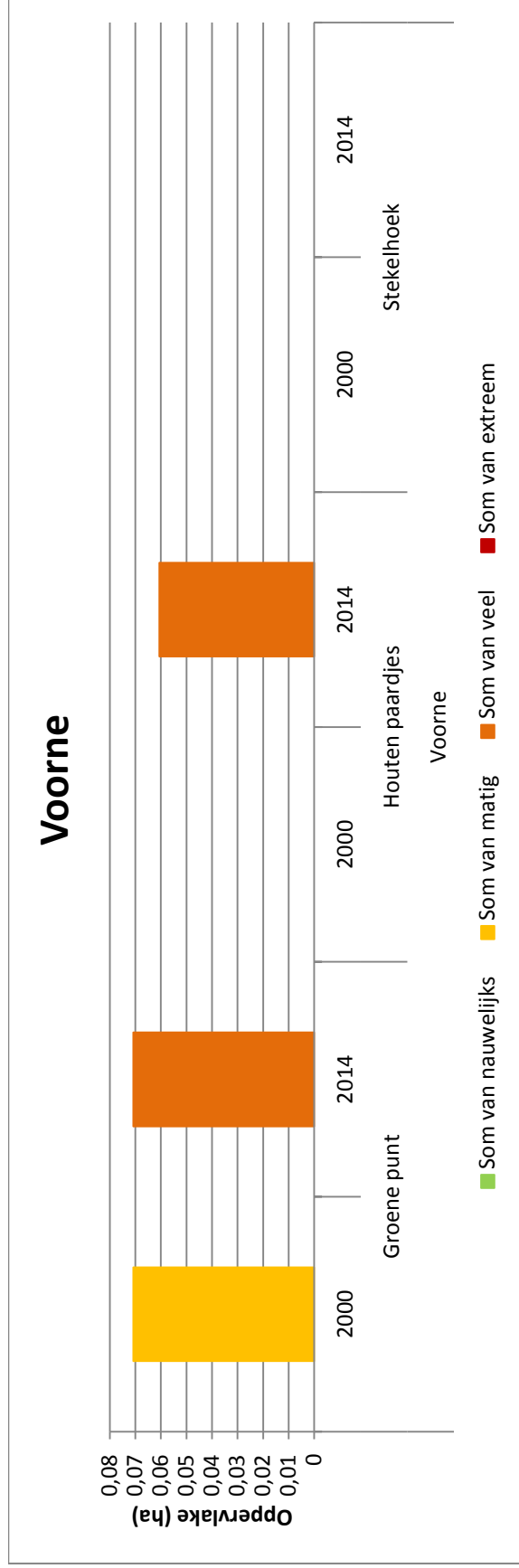
Figuur 4-64. Schouwen.



Figuur 4-65 Overzicht activiteit Schouwen

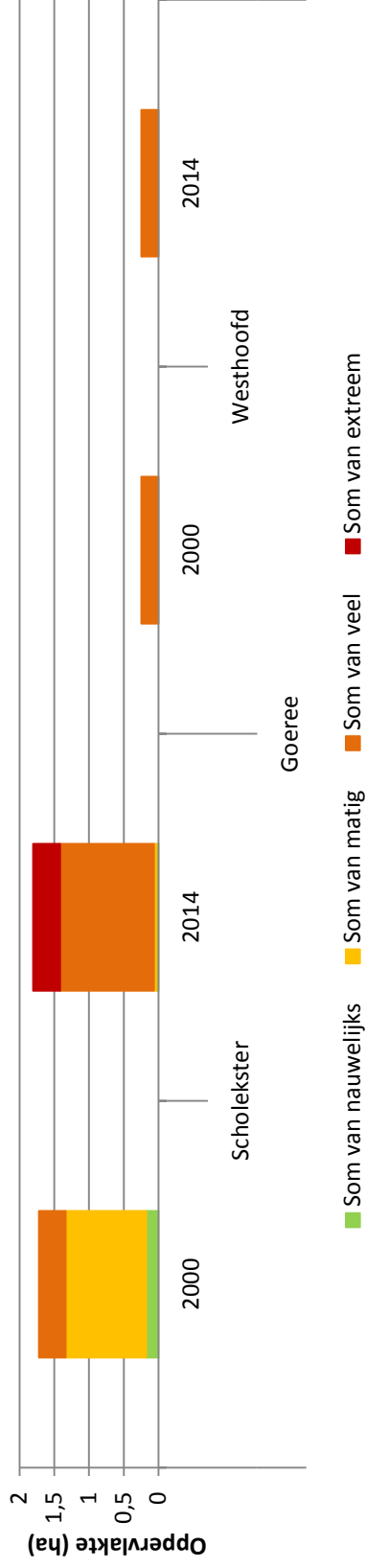


Figuur 4-66. Aantal stuifkuilen per hoofdgebied.



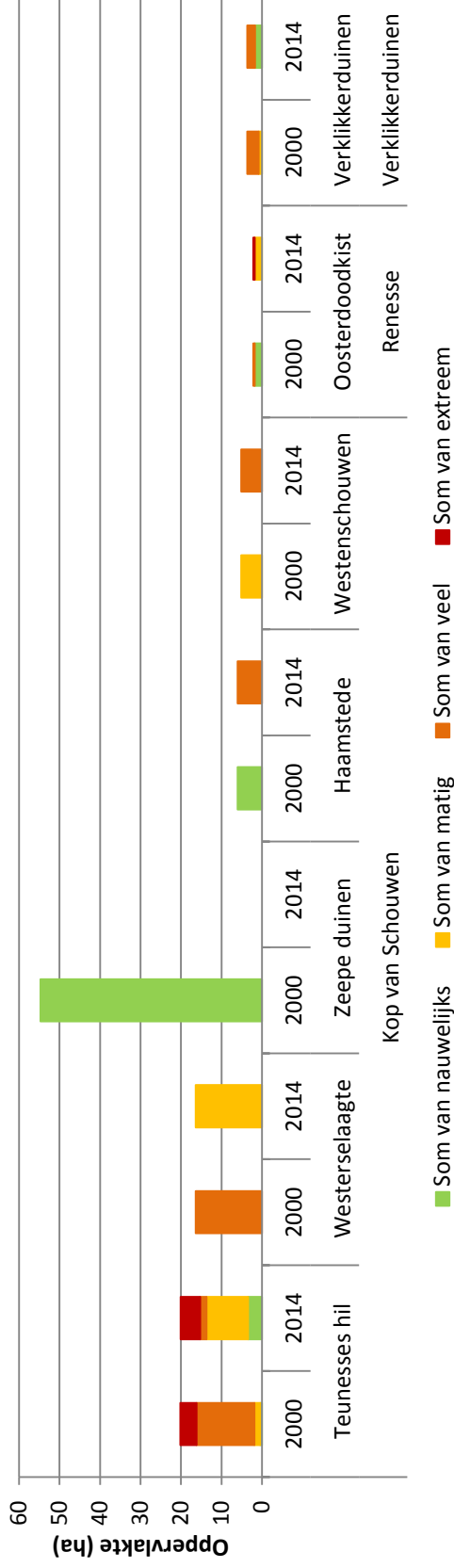
Figuur 4-67. Oppervlakte (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

Goeree



Figuur 4-68. Oppervlak (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

Schouwen



Figuur 4-69. Oppervlak (ha) en mate van activiteit in 2000 en 2014 in de deelgebieden.

Hoofdgebied Voorne bevat drie deelgebieden aan de zuidkant van Voornes Duin met enige dynamiek. De gebieden liggen direct achter een lage zeereep (Max. 15m NAP). Ook de duinen achter de zeereep zijn laag (8-10m NAP) en worden afgewisseld met valleien waar vaak water in staat. De deelgebieden bestaan uit grasachtige vegetatie, maar worden omringd door bos en struweel. De activiteit in de zeereep blijft beperkt tot de voorzijde. In de overige duingebieden van Voorne komt geen dynamiek voorl.

.1 Groene punt

In deelgebied Groene punt is geen activiteit. Er zijn een aantal kale vlakjes zichtbaar op plekken waar wandelpaden lopen. Er is één stuifkuil zichtbaar waar de activiteit sinds 2000 enigszins is toegenomen. Deze activering hangt waarschijnlijk samen met betreding.

.2 Stekelhoek

Tussen Rockanje en de zeereep ligt deelgebied Stekelhoek. In dit gebied is struweel verwijderd. De sporen hiervan zijn nog zichtbaar in het landschap. Er is geen activiteit zichtbaar, met uitzondering van wat kale plekken rond de paden.

.3 Houten paardjes

Direct ten zuiden van Stekelhoek ligt het deels bosachtige gebied van de Houten paardjes. De activiteit is hier iets toegenomen. Tussen de bomen zijn een aantal stuifvlakken zichtbaar die hier in 2000 nog niet waren. Twee hiervan zijn uitgegroeid tot stuifkuil.

4.6.2 Goeree

Aan de noordwestzijde van Goeree ligt een klein duingebied direct achter een lage zeereep (± 10 m NAP). De duinen hebben variërende hoogten van 7-10m NAP, met een hoog duin van 15m NAP. Voor de zeereep vindt veel embryonale duinontwikkeling plaats, maar er zijn ook een aantal openingen waardoor beperkte overstuiving in de zeereep plaatsvindt.

De grotere duingebieden van Goeree, de Middelduinen, Oostduinen en Westduinen, vormen de hoofdmoot van de duinen van Goeree, maar herbergen hoegenaamd geen dynamische stuifkuilen.

.1 Scholekster

In deelgebied Scholekster is de dynamiek toegenomen. In 2000 is er in dit gebied veel schrale vegetatie te zien. In 2014 is het gebied op veel plekken gestabiliseerd, maar heeft de activiteit zich meer geconcentreerd in kleine actieve plekken. Hier zijn veel nieuwe stuifkuilen ontstaan.

.2 Westkop

Net ten noorden van Visschershoek ligt een duin (± 12 m NAP) met daarop twee stuifkuilen. Deze stuifkuilen zijn flink actief, maar zijn ten opzichte van 2000 niet veranderd.

4.6.3 Schouwen

.1 Renesse

Dit kleine gebied tussen een aangroeiende zeereep (12-20m NAP) en Renesse bestaat uit een lage vlakte met kopjes.

.1.1 Oosterdoodkist

De activiteit is hier toegenomen, maar geconcentreerd rond een paar stuifkuilen. In het oosten vlakbij een strandopgang is een stuifkuil flink in activiteit toegenomen en toont nu een grote overstuivingszone. Het gebied wordt zichtbaar veel betreden

.2 Verklikkerduinen

Aan de noordwestzijde van Goeree direct achter een aangroeiende zeereep liggen de Verklikkerduinen. Het gebied bestaat uit hoge duinen tussen de 20 en 30m NAP met valleien en oude grote gestabiliseerde stuifkuilen achter een veel lagere zeereep.

.2.1 Verklikkerduinen

In de verklikkerduinen is vrijwel geen activiteit zichtbaar. De activiteit is beperkt tot een paar stuifkuilen langs de rand van het gebied. De meeste stuifkuilen zijn nu vrijwel geheel gestabiliseerd. In het oosten is nog een stuifkuil open, maar hier vind zichtbaar extreme betreding plaats.

.3 Kop van Schouwen

De Kop van Schouwen is het grootste duingebied van Schouwen en ligt aan de westkant van het eiland. Er zijn grote parabolische vormen te zien en de duinen zijn hier in het verleden ver landinwaarts getrokken. De hoogste toppen bereiken waarden van ruim 30m NAP. De zeereep is flink dynamisch. Bij de kop zijn grote kerven zichtbaar en vindt forse doorstuiving plaats.

.3.1 Theunesses hil

Bij de hoge duinen van Theunesses hil is de dynamiek geconcentreerd rond een aantal stuifkuilen. De meeste kuilen zijn minder actief geworden en deels gestabiliseerd. In het noordoosten van Theunesses hil ligt een paraboolvormig duin waar de activiteit in het zuiden is afgenomen, maar waar de dynamiek in het noorden nog toeneemt. Hier vind extreme overstuiving plaats waarvan de storthellingen op de luchtfoto's zichtbaar zijn.

.3.2 Westerselaagte

De Westerselaagte ligt direct achter de zeereep in een vlak landschap met valleien en kopjes. In het zuiden is de zeereep flink dynamisch en vind dusdanig veel doorstuiving plaats dat de overstuiving bijna is verbonden met een van de kale vlakken. De dynamiek is hier tussen 2000 en 2014 flink afgenomen. Waar in 2000 nog het hele deelgebied vrijwel kaal was, is de activiteit nu beperkt tot een paar grote stuifkuilen. Ook als is de dynamiek over het hele deelgebied flink afgenomen, plaatselijk vind er nog forse overstuiving plaats.

Een deel van de stuifkuilen is uitgestoven tot op het grondwater, waardoor er nu stabilisatie plaatsvindt. Bij de meest zuidelijke kuil die bijna is aangesloten op een kerf in de zeereep zijn grote overstuivingslobben met storthellingen zichtbaar.

.3.3 Zeepe duinen

Direct achter de hoge duinen van Teunesses hil liggen de veel lagere duinen en kopjes van Zeepe duinen. Het gebied wordt zichtbaar veel betreden, er zijn oneindig veel paadjes. De dynamiek is beperkt tot een aantal grote stuifkuilen/vlakken, maar in de rest van het gebied zijn veel schrale plekken door de betreding zichtbaar. In 2014 is de dynamiek verdwenen. De stuifkuilen zijn gestabiliseerd en alleen rond een paar plekken waar extreem betreding plaatsvindt zijn nog kale plekken zichtbaar.

.3.4 Haamstede

Aan de rand van de Kop van Schouwen tegen Burgh-Haamstede ligt een rij met middelhoge tot hoge duinen (15-20m NAP). De dynamiek in dit gebied is beperkt tot een aantal kale vlakken die tussen 2000 en 2014 zijn uitgegroeid van schrale vegetatie tot stuifkuilen. De stuifkuilen hebben hun activiteit te danken aan de extreem hoge mate van betreding in het gebied.

.3.5 Westenschouwen

Aan de zuidkant van de Kop van Schouwen ligt een grasachtig gebied met lage kopjes. Aan de rand van het gebied waar de duinen iets hoger zijn, zijn een aantal stuifkuilen

zichtbaar. Tussen 2000 en 2014 is de activiteit van de bestaande stuifkuilen toegenomen en zijn er grote overstuivingszones zichtbaar. De rest van het gebied is stabiel. In het actieve gebied zijn wederom veel sporen van betreding zichtbaar.

4.6.4 Walcheren

Het aantal autonome, actieve stuifkuilen op Walcheren is verwaarloosbaar. In Oranjezon begint wel weer enige dynamiek te ontstaan door actief ingrijpen, maar autonome verstuivingen ontbreken.

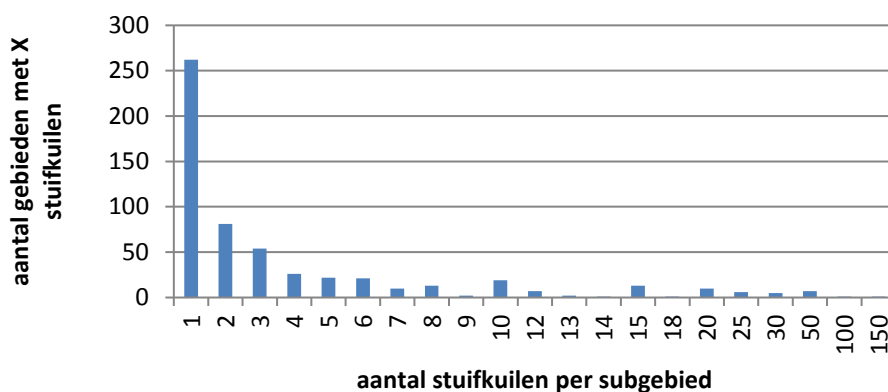
4.6.5 Zeeuws-Vlaanderen

Het aantal autonome, actieve stuifkuilen in Zeeuws-Vlaanderen is nihil.

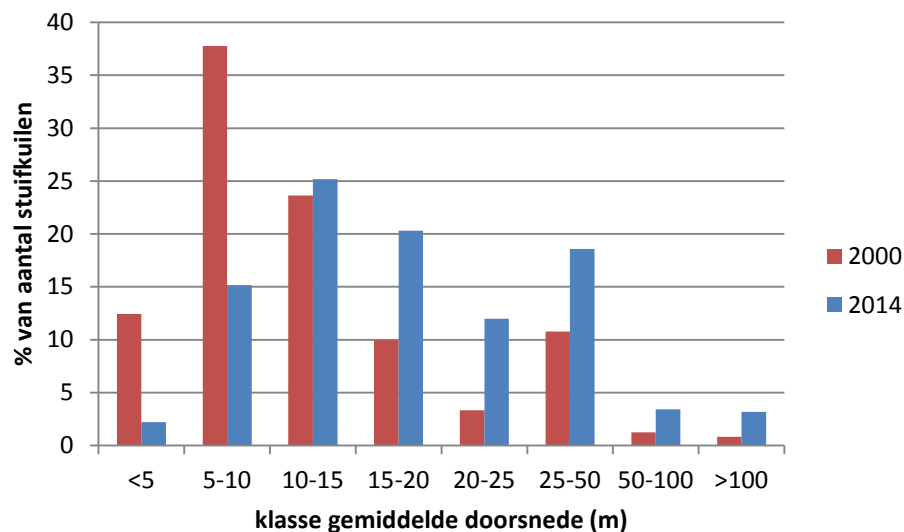
4.7 Variatie in omvang en dichtheid van stuifkuilen

In totaal zijn er 686 subgebieden geïnventariseerd waarvoor het aantal stuifkuilen in 2000 en 2014 is bepaald. In 30 hiervan zijn in 2000 wel actieve stuifkuilen aanwezig, in 2014 niet en in 71 hiervan zijn in 2000 geen actieve stuifkuilen aanwezig en in 2014 wel. In 492 subgebieden zijn in zowel 2000 als 2014 actieve stuifkuilen aangetroffen. In alle geïnventariseerde subgebieden bij elkaar zijn in 2000 in totaal 2013 actieve stuifkuilen aanwezig, in 2014 totaal 2743, een toename van ruim 30%.

Van een deel van de geïnventariseerde kuilen is ook de doorsnede en de breedte van de overstuivingszone bepaald. Wanneer in een subgebied meerdere stuifkuilen voorkomen dan is een schatting van de gemiddelde doorsnede en overstuivingszone gemaakt. Er zijn subgebieden waar het aantal stuifkuilen zo groot is, dat ook het aantal geschat is. Figuur 4-70 geeft een overzicht van het aantal subgebieden en de hoeveelheid stuifkuilen per subgebied. Er zijn 262 subgebieden met één stuifkuil, er is één subgebied met naar schatting 150 stuifkuilen. Voor alle subgebieden waar 1 of 2 kuilen aanwezig zijn is de verdeling van doorsneden en overstuivingszones gegeven in Figuur 4-71 en Figuur 4-72. Het is mogelijk dat in subgebieden met grotere hoeveelheden stuifkuilen de dimensies van zowel doorsnede als overstuivingszone anders zijn, bijvoorbeeld omdat er een onderlinge beïnvloeding is. Dit is echter niet onderzocht.

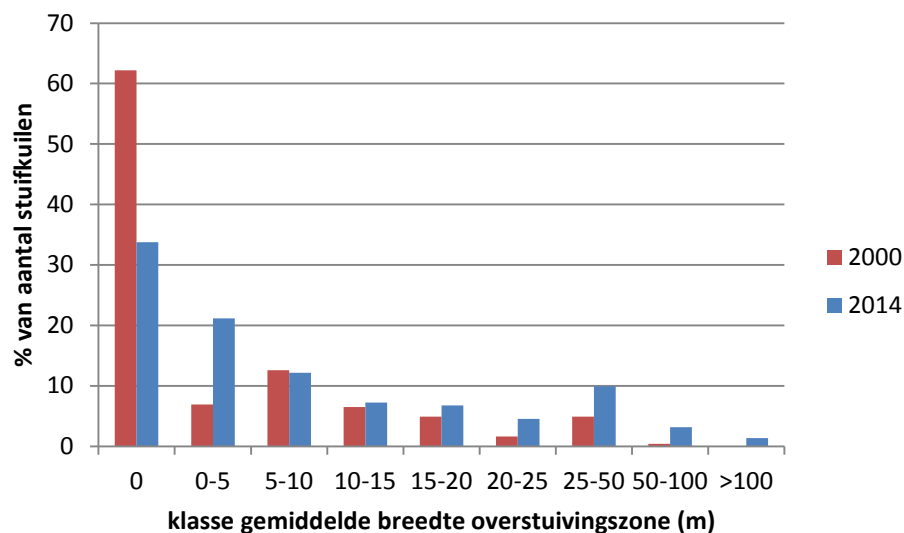


Figuur 4-70. Aantallen stuifkuilen per geïnventariseerd subgebied.



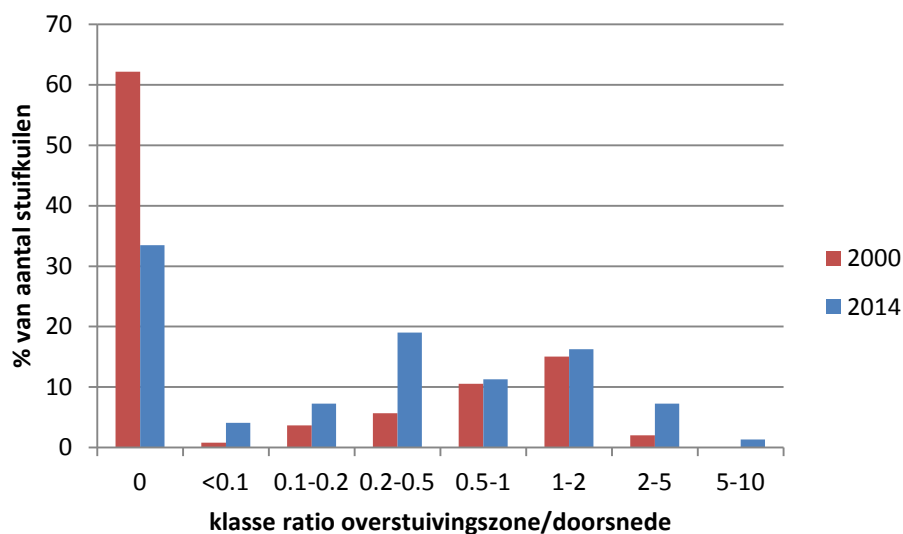
Figuur 4-71. Gemiddelde doorsnede stuifkuilen.

In Figuur 4-71 valt een aantal zaken op. Het aantal kleine kuilen is in 2014 afgenomen ten opzichte van 2000, de doorsnede is toegenomen. De piek ligt in 2000 bij de klasse 5-10m, in 2014 bij de klasse 10-15m. Alle grotere klassen zijn in 2014 toegenomen.



Figuur 4-72. Gemiddelde breedte overstuivingszone rondom stuifkuilen.

Voor de overstuivingszones geldt min of meer hetzelfde als voor de doorsnedes, een toename in 2014 van de breedte. Opvallend is overigens de klasse 0, wat het aantal stuifkuilen aangeeft waar geen overstuivingszone is waargenomen. In 2000 is dit zeer hoog, ruim 60% van de gevallen. Hier wordt wel benadrukt dat dit om alle subgebieden gaat met 1 of 2 stuifkuilen. Dit zou overigens ook een seizoenseffect kunnen zijn en afhankelijk van het tijdstip van de luchtfoto-opname. Ook in 2014 is het aandeel klasse 0 vrij hoog, met ruim 30%.



Figuur 4-73. Ratio van overstuuringszone en doorsnede.

De ratio van overstuuringszone gedeeld door doorsnede in Figuur 4-73 laat zien dat van de kuilen met een overstuuringszone in de meeste gevallen de overstuuringszone kleiner is dan de doorsnede. Dit is niet in overeenstemming met de bevindingen in Hoofdstuk 7. Waarschijnlijk komt dit deels door het seizoenseffect en het opnametijdstip van de luchtfoto, maar ook deels doordat de fijne overstuiving die in de vegetatie rondom een stuifkuil wordt afgezet op de luchtfoto niet of slecht zichtbaar is.

Tabel 4-2. Oppervlakte Hoofdgebieden per regio, aantal stuifkuilen en dichtheid stuifkuilen

	Totaal oppervlak Hoofdgebieden (ha)	Stabiel oppervlak in Hoofdgebieden (ha)	Aantal 2000	Aantal 2014	Dichtheid 2000 (1/ha)	Dichtheid 2014 (1/ha)
Wadden	2991	2228	236	212	0.31	0.28
Noord-Holland	2112	886	524	637	0.43	0.52
Zuid-Holland	4093	2764	981	1568	0.74	1.18
Delta	1231	676	64	88	0.12	0.16

De dichtheid van het aantal stuifkuilen per hectare is over het algemeen laag. Tabel 4-2 geeft de cijfers per regio. De verschillen komen er duidelijk uit naar voren, met verreweg de laagste dichtheden in de Delta, de hoogste in Zuid-Holland. De dichtheden zijn gebaseerd op de dichtheden binnen de subgebieden, berekend als het aantal stuifkuilen in een subgebied/oppervlakte van het subgebied. Als rekening wordt gehouden met de oppervlakte van het duingebied buiten de subgebieden, dan worden de dichtheden veel lager. In de tabel staan de totale oppervlaktes van de hoofdgebieden, en het oppervlak daarbinnen wat geheel stabiel is, om aan te geven hoe groot deel van het duingebied geheel verstoken is van dynamiek.

Binnen de regio's is er een grote variatie. Op de Wadden valt Texel op met dichtheden in 2014 van boven de 3/ha (Eierland midden, Slufterbollen), Vlieland met een aantal subgebieden met dichtheid 0/ha. In Noord-Holland valt Bergen aan zee zuid op met hele hoge dichtheden, groter dan 4/ha. In Zuid-Holland valt vooral op dat er een groot gebied is met dichtheden boven de 1/ha. In de Delta valt alleen Goeree Westhoofd op met een dichtheid groter dan 1/ha. Hierbij moet nog benadrukt worden dat grote delen van de Delta (Walcheren, Zeeuws-Vlaanderen) buiten beschouwing zijn gelaten omdat hier geheel geen stuifkuilen zijn te vinden.

4.8 Discussie en conclusies

Er is een groot verschil in aantal en ontwikkeling van aantallen stuifkuilen per regio.

Op de Wadden is het aantal stuifkuilen gering, met vooral op Texel en Terschelling-Landerumerheide een toename, in de overige gebieden vooral een afname van het aantal kuilen tussen 2000 en 2014. De gemiddelde dichtheid is laag, met 0.3 kuil per hectare.

Langs de Hollandse kust is er variatie met gebieden met een afname, vooral rond Bergen aan zee zuid (waar overigens de dichtheid zeer hoog was en is), maar verder overwegend toenames. De dichtheid hier is gemiddeld hoger, met 0.5 kuil per hectare. Rondom Bergen aan zee zuid zijn de dichtheden aanmerkelijk hoger, met soms meer dan 6 kuilen per hectare. In de Amsterdamse Waterleidingduinen, Hollands Duin, Berkheide en Meijendel zijn er veel subgebieden waar het aantal stuifkuilen aanzienlijk is toegenomen, soms met grote aantallen, zoals ook uit Tabel 4-2 blijkt. De gemiddelde dichtheid in alle subgebieden is zelfs gestegen tot boven de 1 kuil per hectare.

In de Delta is het aantal actieve stuifkuilen bijzonder laag. Op Walcheren en Zeeuws-Vlaanderen is zelfs hoegenaamd niets te vinden, op Voorne is het ook bijzonder mager. Alleen op Goeree en Schouwen zijn nog dynamische kuilen te vinden, op Goeree in aantal toenemend van 2000-2014. De gemiddelde dichtheid is 0.16 kuil per hectare, bijzonder laag.

Opvallend is dat met name in het kalkarme Waddendistrict het aantal kuilen overwegend is afgenomen, op enkele uitzonderingen na, met als gunstige uitzondering Texel en Groote Keeten. Rondom de Schoorlse duinen is de ontwikkeling vergelijkbaar met die op de Vlieland, met als uitzondering Camperduin, waar het aantal stuifkuilen is toegenomen. Langs de kalkrijke Hollandse kust zijn vooral in de hoge duinmassieven de aantallen veelal toegenomen, soms extreem.

De inventarisatie heeft een goed beeld opgeleverd van de huidige stand van zaken (2014) en de recente ontwikkeling sinds 2000. In het volgende hoofdstuk zal aan de hand van een groot aantal variabelen gepoogd worden een verklaring te vinden voor de gevonden ontwikkeling.

5 Patronen van omgevingsfactoren in relatie tot kleinschalige dynamiek langs de Nederlandse kust

Bas Arens

5.1 Samenvatting

Kustligging (expositie van de kust) lijkt geen invloed te hebben op de ontwikkeling van dynamiek in de achter de zeereep liggende duinen, hoewel opvalt dat de meeste gebieden waar het aantal stuifkuilen is toegenomen aan een zuidwest tot west geëxponeerde kust liggen, terwijl bij de meeste gebieden met een noord-expositie het aantal stuifkuilen is afgenomen. Dynamische zeerepen zijn echter op kusten met een expositie variërend van zuidwest tot noord te vinden. Als dit voor de buitenste duinzone (buitenduinen) al geen effect heeft, is niet te verwachten dat dit voor de midden- en binnenduinen wel het geval zal zijn. Opvallend is overigens de discrepantie in primaire (zeereep) en secundaire (binnenduinen) dynamiek tussen Wadden, Hollandse kust en Delta. Zeereepdynamiek is in alle gebieden in ontwikkeling, stuifkuildynamiek alleen langs de Hollandse kust en op Texel. Overigens is wel gebleken dat wind uit noordwest- tot noordelijke richtingen in frequentie is afgenomen.

Hoogteligging is een lokale factor die van invloed is. Veel stuifkuilen zijn ontwikkeld in hellingen in hogere duincomplexen, die hoog boven de voorliggende zeereep uitsteken. Dit is waargenomen in een aantal gebieden: Schiermonnikoog – Westerdunen, Texel – Hoge Nol, Noordkop, Schoorlse duinen, AWD-Van Limburg Stirumsduinen, De Blink, Coepelduynen, Vlaggenduin, Berkheide, waarbij opvalt dat de Zuid-Hollandse duinen hier het meest zijn vertegenwoordigd. Afstand vanaf zee speelt alleen een (duidelijke) rol wanneer de zeereep dynamisch is. De afstand vanaf de bron van instuivend zand is dan de relevante factor. Soms lijkt de combinatie van afstand van zee en hoogte elkaar te versterken. Als op korte afstand vanaf de zeereep het duinmassief hoog is, dan heeft de wind hier een versterkte werking, doordat er nog weinig remming is van voorliggend terrein en er een versnelling optreedt tegen het duinmassief.

Expositie van de duinhelling is een factor die een directe invloed op de ontwikkeling van stuifkuildynamiek heeft. Verwacht zou worden dat hellingen die het meest op de wind geëxponeerd zijn, dus zuidwest- west- en noordwesthellingen gevoeliger zijn voor winderosie, maar dit is niet het geval. Het zijn de hellingen met de grootste droogtestress, dus zuidoost-, zuid- en zuidwesthellingen die opvallend vaak door winderosie zijn aangetast. Overigens is het waarschijnlijk dat het dan niet winderosie, maar watererosie is dat het begin van een stuifkuil initieert. Hoewel deze relatie zeer waarschijnlijk is, is ze niet direct aangetoond; er is geen onderzoek gedaan naar het verschil in watererosie op zuid, west, noord en oost geëxponeerde hellingen. Verschillen in verdeling van de expositie van duinhellingen tussen kustdelen zelf blijkt geen verklarende variabele te zijn. De verdeling van hellingen varieert wel langs de kust. Op de Waddeneilanden bijvoorbeeld domineren zuidhellingen, terwijl langs de Hollandse kust zuidoosthellingen vaker domineren. Een variatie in deze verdeling heeft geen effect op de ontwikkeling van stuifkuildynamiek.

Stikstofdepositie, zeker in combinatie met kalk- en ijzergehalte van het moedermateriaal, moet één van de belangrijkste verklarende variabelen zijn. In het kalkarme Waddendistrict heeft stikstofdepositie geleid tot vergrassing met ontwikkeling van dikke grasmatten van vooral helm, met strooisellaag en dichte beworteling. Dit heeft een stabiliserend effect gehad, waardoor veel stuifkuilen in de loop der jaren zijn dichtgegroeid en er door de dichte bedekking en beworteling geen nieuwe stuifkuilen konden ontstaan. Bij terugdringen van stikstofdepositie verdwijnt dit niet snel en blijft de erosiegevoeligheid van de bodem laag.

In het kalkrijke Renodunaal district was in veel mindere mate sprake van vergrassing (m.n. Duinriet), de mate van stabilisatie misschien vergelijkbaar, maar de doorworteling en de vorming van een dikke strooisellaag veel minder. Bij het terugdringen van de stikstofdepositie blijkt ook de mate van vergrassing af te nemen en ontstaat er weer ruimte voor nieuwe stuifkuilen. De vergrassing kon hier door de aanwezige en toegenomen konijnenpopulatie, én de inzet van grote grazers gemakkelijker worden teruggedrongen.

Het ruimtelijke patroon van stikstofdepositie komt overeen met het ruimtelijke patroon in de ontwikkeling van stuifkuilen, dat wil zeggen dat in de gebieden met de hoogste stikstofdepositie de meeste stuifkuilen zijn ontstaan. Dit wijst er op dat een andere factor hier een cruciale rol speelt, namelijk het kalk- en ijzergehalte van de bodem. Effecten van stikstofdepositie op de kalkrijke duinen zijn blijikbaar al weer aan het afnemen, terwijl de effecten op de kalkarme duinen door de hierboven beschreven factoren niet afnemen. Bovendien is van belang dat op de Waddeneilanden ondanks een afname van de stikstofdepositie de kritische depositie waarde (KDW) nog steeds overschreden wordt, terwijl dit voor het kalkrijke district niet meer geldt. Overigens is er wel een positieve correlatie tussen het ruimtelijk patroon van stuifkuilen en de emmissie uit zee. Deze is niet te onderschatten, met hoge waarden in de Delta en op de Wadden, lage waarden langs de Hollandse kust laag. Hiervoor geldt geen afnemende trend.

Het effect van weersomstandigheden op de ontwikkeling van stuifkuilen is extreem complex en speelt via verschillende mechanismen. Wind drijft de verstuiving aan, neerslag beperkt het effect van de wind, maar kan via watererosie de bodem gevoeliger maken voor verstuiving. Een gebrek aan vocht kan de vegetatie doen verdrogen waardoor ook de gevoeligheid voor verstuiving toeneemt. Straling, met name op naar het zuiden gerichte hellingen, zorgt voor droogtestress, met als gevolg een gevoeligheid voor watererosie, gevolgd door winderosie.

Puur op basis van de hoeveelheid wind is er geen verklaring voor de gesignaleerde toename in dynamiek langs Hollandse kust en ook niet voor de variatie van Hollandse kust en Texel tegenover overige Waddeneilanden en Delta. Berekende transportcapaciteiten vertonen een gestaag afnemende trend tussen 1980 en 2013, wat verklarend zou kunnen zijn voor een afname van dynamiek op de Wadden en in de Delta, maar voor het station Hoorn-Terschelling is het net weer anders. Het biedt echter zeker geen verklaring voor de toenemende dynamiek langs de Hollandse kust en op Texel.

Neerslag als beperkende factor (hetzij voor de effectiviteit van de wind voor erosie, hetzij voor vegetatieontwikkeling) kent wel een zodanige variatie dat dit van invloed kan zijn op regionale variatie in verstuiving. De Hollandse kust tussen Petten en Goedereede is natter dan ten noorden en ten zuiden daarvan. Ook Ameland is natter, Vlissingen is droger. Gemiddeld genomen neemt de jaarsom van de neerslag toe, maar voor de Hollandse kust is het geen simpele lineaire trend vanaf 1950, maar is er ook een periode met afname. Vanaf 1970 is hier echter sprake van een significante toename, met name in de zomerperiode. Voor Ameland zou een hogere jaarsom een verklaring kunnen zijn voor een lagere verstuivingsdynamiek, voor de rest van de kust is de correlatie eerder andersom, hogere jaarsommen meer verstuiving, lagere jaarsommen minder.

Droge periodes zijn eveneens variabel in ruimte en vooral in tijd. Een langere droge periode kan de aanleiding zijn voor nieuwe verstuivingen omdat bestaande vegetatie bezwijkt en de bedekking van de bodem afneemt. Maar het patroon van variatie in

ruimte en tijd is dermate complex dat het niet zo maar vertaald kan worden naar regionale verschillen in dynamiek. Voor Ameland zou een geringere hoeveelheid droge dagen aanleiding kunnen zijn tot een afname van verstuivingen, voor Texel zou een toename aanleiding kunnen zijn voor de toename in verstuivingen. Voor de andere kustdelen is er geen directe duidelijke relatie.

De waargenomen toename van het aantal natte dagen (dagsom neerslag groter of gelijk aan 10mm) zou een verklaring kunnen geven voor een afname van winderosie. Het maakt echter voor winderosie waarschijnlijk weinig uit of het op een dag veel regent of extreem veel regent, omdat winderosie dan sowieso niet meer optreedt. Het hoogste aantal natte dagen komt voor langs de Hollandse kust tussen Bergen en Goedereede, waar de dynamiek juist toegenomen is. Het is daarom niet waarschijnlijk dat deze factor een beperkende rol speelt bij winderosie. Daarentegen veel natte dagen kunnen wel een versterkende rol hebben door het stimuleren van watererosie. Voor het optreden van watererosie zijn meer factoren van belang, o.m. expositie, hellingshoek, humusprofiel, mate van hydrofobie en vegetatiebedekking van het oppervlak. De genoemde regionale verschillen in het aantal natte dagen dragen bij aan een grotere kans op watererosie aan de Hollandse kust tussen Bergen en Goedereede en op Ameland. Overall zijn het aantal natte dagen toegenomen en in de Delta het meest. Het is goed mogelijk dat het ontstaan van verstuivingen langs de Hollandse kust in ieder geval voor een deel bepaald is door een toegenomen (kans op) watererosie. Dit moet dan samenhangen met andere factoren, omdat het aantal natte dagen ook op de Wadden en in de Delta is toegenomen en daar echter niet gecorreleerd is met een toename van verstuiving.

Wat waarschijnlijk doorslaggevend is voor het effect van meteorologische variabelen op verstuiving is een combinatie van factoren en daarnaast de opeenvolging in tijd van bepaalde omstandigheden. Hier valt nog veel over uit te zoeken. Hoewel voor de meeste variabelen nu uitgebreide datareeksen zijn opgesteld, is de combinatie van verschillende factoren, en het verloop in de tijd nog nauwelijks of niet onderzocht.

Konijnen spelen een uitermate belangrijke rol bij het ontstaan van stuifkuilen. Op grond van telgegevens en luchtfoto-analyse is voor een aantal gebieden duidelijk dat de ontwikkeling van stuifkuilen vaak parallel loopt aan de ontwikkeling van de konijnenstand. Er zijn gebieden waar de konijnenstand is ingestort en de dynamiek van stuifkuilen daarna is gaan haperen (Zwanenwater bijvoorbeeld). Er zijn ook gebieden waar de konijnenstand (tijdelijk) sterk is toegenomen, waarna het aantal stuifkuilen eveneens sterk is gestegen (Texel, Eierlandsche duinen en zuid; AWD). Op Ameland en Vlieland lijkt de konijnenstand goed, maar is er desondanks geen effect op de ontwikkeling van stuifkuilen.

Betreding is in sommige gevallen een factor van belang. Dit kan betreding door recreanten zijn, maar ook door grazers, bijvoorbeeld ook damherten. In sommige gebieden is op grond van luchtfotoanalyse duidelijk dat stuifkuilen kunnen ontstaan vanuit paden of open blijven doordat er paden doorheen lopen. In geval van begrazing draagt het structureel wegvreten van vegetatie, zoals op de Landerumheide op Terschelling dan ook bij aan de toename van dynamiek. Hoewel er dus een positief effect op dynamiek kan zijn, zijn er meestal ook negatieve effecten op de geomorfologie, omdat vormen worden verstoord en er sprake kan zijn van landschapsdegradatie.

5.2 Inleiding

Uit de inventarisatie van kleinschalige dynamiek (Hoofdstuk 4) kwamen enkele opmerkelijke regionale verschillen naar voren. Belangrijkste conclusies is dat in een groot aantal dungebieden langs de Hollandse kust en Texel de dynamiek in de vorm van stuifkuilen, stuifplekken en overige kale plekken was toegenomen, terwijl dit in de Delta en op de andere Wadden eilanden niet het geval was. Daarnaast is ook het verschil in aantal verschijnselen opmerkelijk, met weinig actieve verstuivingen in de Delta en op de Waddeneilanden met uitzondering van Texel, plaatselijk zeer veel actieve verstuivingen langs de Hollandse kust en in mindere mate op Texel.

Deze grote verschillen doen het vermoeden ontstaan dat hier regionale factoren voor verantwoordelijk zijn. Verschillende factoren die daarbij een rol zouden kunnen spelen, zijn genoemd:

- Stikstofdepositie (NO_x en NH_y) en SO₂-depositie
- Windklimaat
- Neerslag, natte en droge omstandigheden
- Afstand vanaf de kustlijn
- Expositie van de kust
- Hoogteligging van het duin
- Konijnenstand, damherten
- Begrazing
- Betreding
- Mate en aard van de begroeiing
- Bodem(eigenschappen)

Voor een aantal van deze factoren zijn gegevens beschikbaar. Gegevens zijn beschikbaar gesteld door verschillende instanties.

- Konijntelgegevens zijn beschikbaar gesteld door de zoogdiervereniging.
- Gegevens over NO_x, NH_y en SO₂depositie zijn verstrekt door het RIVM. Dit zijn modelberekeningen per jaar voor 1981-2015. De berekeningen voor 2013-2015 zijn inclusief de bijtelling voor emissies uit zee. Voor de jaren voor 2013 is een aparte kaart met bijtelling geleverd. Deze kaart wordt door de jaren heen als constant beschouwd. Het is niet bekend of en hoe de bijdrage uit zee door de decennia heen veranderd is. Er zijn te weinig metingen om dit te onderzoeken (bron: E. Noordijk, pers. commun.)
- Gegevens over begrazing zijn verzameld door Stichting Bargerveen in het kader van een OBN-onderzoek naar effecten van begrazing.
- Meteorologische gegevens zijn beschikbaar via de website van het KNMI (www.KNMI.nl).
- Hoogtegegevens zijn beschikbaar via de site van het AHN (www.AHN.nl).
- Luchtfoto's voor dit onderzoek zijn beschikbaar gesteld door Rijkswaterstaat.

Ook met deze beschikbare gegevens zal het lastig zijn om een correlatie tussen een of meerdere factoren en de ontwikkeling van verstuivingsdynamiek vast te stellen, omdat er voor wat betreft de dynamiek maar twee punten in de tijd geïnventariseerd zijn, en er voor een zeer beperkt aantal gebieden karteringen beschikbaar zijn waarmee veranderingen in aantallen stuifkuilen en oppervlaktes meer kwantitatief bepaald kunnen worden. Bovendien is het zeer waarschijnlijk dat niet één van bovenstaande factoren verantwoordelijk is voor het geconstateerde verschil, maar dat het een combinatie van factoren is, die bovendien op iedere plek weer anders uitwerkt.

Met behulp van GIS is onderzocht in hoeverre gebieden verschillen op kenmerken als hoogte van het duin, expositie van de hellingen, hellingshoek, afstand vanaf de kust etc. Voor enkele case-studies is dit verder in detail onderzocht. Het betreft deelgebieden die ook ten behoeve van andere onderzoeken zijn onderzocht en waar daardoor al verschillende gegevens beschikbaar waren.

5.3 Methoden

De inventarisatie van kleinschalige dynamiek voor 2000 en 2014 is uitgevoerd voor de gehele kust. Het zoeken naar verklaringen is ook zoveel mogelijk kustbreed uitgevoerd, maar gezien de beschikbare tijd was het onmogelijk voor alle onderzochte deelgebieden ook alle verschillende variabelen te inventariseren.

Voor enkele proefgebieden zijn detailkarteringen gemaakt van stuifkuilen in verschillende jaren. Deze gebieden zijn onderwerp geweest van studie van verschillende opdrachten. Voor het project Kleinschalige dynamiek zijn deze proefgebieden als case-study gebruikt en zijn extra analyses uitgevoerd. Het betreft de volgende gebieden:

- Noordkop (in beheer bij Landschap Noord-Holland)
- Luchterduinen (Amsterdamse Waterleidingduinen, in beheer bij Waternet)
- Vlaggenduin (Katwijk, in beheer bij Staatsbosbeheer)
- Meeuwenduinen (Schouwen, in beheer bij Staatsbosbeheer)

Voor een analyse van de relatie tussen mogelijke verklarende factoren en de gesignaleerde ontwikkelingen zijn twee databases opgezet.

De hoofddatabase is opgezet rondom de in Hoofdstuk 4 onderscheiden hoofdgebieden. Per hoofdgebied zijn aanvullende gegevens verzameld. Omdat sommige hoofdgebieden erg groot zijn, zijn deze opgesplitst in de onderliggende deelgebieden. Voor een hoofdgebied als de Amsterdamse Waterleidingduinen is het bijvoorbeeld niet zinvol om één getal voor maximale hoogte op te nemen, maar is voor de onderliggende deelgebieden (Zeeduinen, Luchterzeeduinen, van Limburg-Stirumduinen, Haasvelderduinen en de Blink) de maximale hoogte bepaald. Voor de hoofdgebieden Bergen aan zee zuid, Amsterdamse Waterleidingduinen, Berkheide en Meijndel zijn de onderliggende deelgebieden gebruikt.

Behalve maximale hoogte zijn per record de afstand tot de duinvoet (loodrecht op de kust gemeten tot het centrum van het hoofdgebied/deelgebied), expositie van de kust, aantal stuifkuilen in 2000, aantal stuifkuilen in 2014) en is een maat geschat voor de transportkracht (in percentage van de wind, afhankelijk van kustexpositie en ligging, waarbij 100% geldt voor een locatie die op WZW is geëxponeerd) en voor de mate van beschutting door omringende vegetatie, hoge duinen en omgeving (exposure, in percentage, waarbij 100% geldt voor een locatie die direct aan de kust ligt). Voor de hoofd/deelgebieden is een tijdreeks voor de stikstofdepositie bepaald aan de hand van de aangeleverde kaarten voor heel Nederland. Tijdreeksen van neerslaggegevens zijn gebaseerd op de beschikbare neerslagstations. Voor de meeste gebieden is er een neerslagstation op niet al te grote afstand beschikbaar (zie hieronder, Figuur 5-1). Tijdreeksen van windgegevens zijn gebaseerd op een beperkt aantal stations (zie hieronder, Figuur 5-2). Alles bij elkaar zijn er per afhankelijke variabele (aantal stuifkuilen per hoofd/deelgebied in 2000 en 2014) ruim 20 mogelijk verklarende variabelen verzameld. Met behulp van multivariate statistiek is gepoogd hier relaties in te vinden.

Twee variabelen die een zeer belangrijke rol spelen zijn konijnenactiviteit en mate van betreding/padvorming. Het is onmogelijk om voor deze twee variabelen voor ieder hoofd/deelgebied één maat aan te geven, omdat de variatie binnen de meeste gebieden dermate groot is, dat een gemiddelde maat niets zegt. Daarom is een aanvullende database gemaakt met een steekproef van 40 deelgebieden, waarvoor wel een maat is gegeven voor de mate van konijnenactiviteit en de mate van betreding/padvorming. Een steekproef was nodig, omdat het te veel tijd zou kosten om deze maten voor alle deelgebieden te inventariseren.

5.3.1 GIS-bewerkingen Lokale factoren

De verdeling van hellingen is onderzocht door in GIS een afgeleidekaart met "Aspect" te maken op basis van AHN2. Deze kaart geeft voor de verschillende gebieden de richtingen van de hellingen weer, de expositie dus. Van de Aspect-kaarten per kustvak is op basis van de onderscheiden hoofdgebieden een uitsnede gemaakt van het

relevante gebied. In Spatial Analyst is vervolgens per gebied een histogram gemaakt met de verdeling van hellingen binnen de stuifkuilen. Zo kan voor de verschillende gebieden worden onderzocht of er een verschil in expositie bestaat, wat mogelijk een verklaring kan bieden voor verschillen in dynamiek tussen gebieden. Verschillen in expositie kunnen van invloed zijn op de effectiviteit van de wind, op de mate van instraling en dus droogtestress, op de mate van hydrofobie en op de mate van watererosie. Wanneer voor een gebied ook een kartering van (omgrenzing van) stuifkuilen beschikbaar is, kan een uitsnede gemaakt worden van de aspect-kaart met de omgrenzing van stuifkuilen. Daarmee kan voor de stuifkuilen ook de verdeling van hellingen worden onderzocht, wat inzicht geeft of er binnen een gebied voorkeursellingen zijn waar stuifkuilen op voorkomen.

.1 Kustligging

Dit is vooral kwalitatief onderzocht op basis van luchtfoto's. Voor een aantal gebieden waar de dynamiek is toegenomen of afgenomen is beoordeeld of er een relatie met kustligging is. Kustligging is ook opgenomen in de database voor multivariate analyse.

.2 Afstand tot de duinvoet

Dit is vooral kwalitatief onderzocht op basis van luchtfoto's. Voor een aantal gebieden waar de dynamiek is toegenomen of afgenomen is beoordeeld of er een relatie met afstand vanaf de kustlijn is en of er enige invloed van zeereepdynamiek op achterliggende verstuingen waarneembaar is. Afstand tot de duinvoet is ook opgenomen in de database voor multivariate analyse.

.3 Expositie

Het is bekend uit eerder onderzoek (Luchterduinen, Vlaggenduin) dat er een relatie is tussen de activiteit van stuifkuilen en de expositie. Veel stuifkuilen ontstaan op zuidelijk gerichte hellingen, die veel straling invangen en waar de droogtestress groot is. Op basis van AHN2 is de expositie van hellingen afgeleid. In GIS zou hier ook de solar radiation voor berekend kunnen worden, als maat voor droogtestress. Hier wordt er echter van uitgegaan dat er een 1:1 relatie is tussen expositie en solar radiation. Voor alle gebieden zijn uitsneden gemaakt van de deelgebieden die op stuifkuilen zijn onderzocht. Alleen voor gebieden waar ook de omtrekken van de stuifkuilen zelf gekarteerd zijn, kan onderzocht worden hoe de expositie voor de vlakken van de stuifkuilen is. Wanneer dit niet beschikbaar is, geeft de verdeling van hellingen binnen een deelgebied aan wat de mogelijke mate van droogtestress is. In een deelgebied waar zuidhellingen domineren zal de gevoeligheid voor droogtestress groter zijn dan in een deelgebied waar noordwesthellingen domineren. In het eerste gebied is de kans voor het ontstaan van stuifkuilen dan groter dan in het tweede gebied.

.4 Hoogteligging

Voor de gebieden waarvoor karteringen van stuifkuilen beschikbaar zijn (zie hierboven) zijn uitsneden gemaakt van het AHN2. Voor het gehele deelgebied, en voor de uitsnede van de stuifkuilen is vervolgens onderzocht wat het verschil in hoogteligging is, door voor beide gevallen een histogram te maken met het aantal rastercellen per hoogteklaas. Hierdoor ontstaat inzicht in de verdeling en daarmee in eventuele verschillen tussen het deelgebied in zijn geheel en de uitsnede met alleen stuifkuilen.

Hoogteligging, dat wil zeggen de maximale hoogte per hoofd/deelgebied is ook opgenomen in de database voor multivariate analyse.

5.3.2 Stikstof, ammoniak en zwaveldioxide

Stikstofgegevens zijn beschikbaar gesteld door het RIVM (pers. commun. Eric Noordijk en Wilco de Vries). Het betreft modelresultaten, zogenaamde "glijbaanberekeningen". De berekeningen zijn uitgevoerd met OPS versie 4.3.03, waarin voor NH₃ een nieuwe depacmodule zit. Met deze gegevens zijn kaarten gemaakt van geheel Nederland met de NO_x, NH₃ en SO₂ depositie voor de periode 1981-2015. In dit rapport zijn slechts enkele jaren opgenomen, voor de analyse zijn echter alle gegevens gebruikt.

Gegevens zijn gecorrigeerd voor NH₄ depositie uit zee, jaarlijks een vast bedrag (maar wel ruimtelijk verschillend), omdat de ontwikkeling hiervan in de tijd niet bekend is. Hiermee wordt een goed beeld verkregen van de veranderingen in depositie tussen 1981 en 2015. Voor de onderzochte deelgebieden is op basis van de verstrekte kaarten een tabel gemaakt met het verloop van de deposities van 1981-2015 (Noordijk et al., 2014; RIVM, 2016).

5.3.3 Meteorologie

Voor verstuiving zijn verschillende meteorologische variabelen van belang. Zand wordt door de wind verplaatst, hoe dit precies gaat is behalve van de windsnelheid- en richting ook afhankelijk van onder andere verdamping, neerslag, luchtvochtigheid. Neerslag speelt een belangrijke rol bij het proces van winderosie, maar ook uitermate complex. Het kan zowel een positieve als negatieve invloed op verstuiving hebben. Daarnaast speelt neerslag een cruciale rol bij watererosie (bijvoorbeeld Jungerius en ten Harkel, 1994), wat de gevoeligheid voor winderosie weer kan vergroten.

.1 *Neerslag en winderosie*

Neerslag zorgt voor een vochtig oppervlak, waardoor de drempelwaarde van de windsnelheid waarbij verstuiving begint verhoogd wordt (dus er is meer wind nodig om het zand in beweging te krijgen). Bij voortdurende regen wordt het oppervlak zo vochtig dat geheel geen verstuiving meer optreedt. Bij het begin van een bui kan juist verstuiving toenemen, omdat regendruppels op een dan nog droog oppervlak zandkorrels juist los kunnen maken, door impulsoverdracht. Voor het bepalen van de exacte invloed van neerslag op verstuiving zijn gedetailleerde tijdreeksen nodig van zowel neerslag als zandtransport. Deze zijn er niet. Het effect van neerslag op verstuiving is daarom eigenlijk niet te kwantificeren, maar het is duidelijk dat onder natte omstandigheden de hoeveelheid verstuiving veel lager is dan tijdens droge omstandigheden. In de afgelopen jaren zijn er regelmatig jaren voorgekomen met een (extreem) droog voorjaar. Het is goed mogelijk dat hierdoor de winderosie in die jaren (veel) groter is geweest dan in gemiddelde jaren, of dat dit een trigger is geweest voor ontstaan, reactivatie of vergroting van stuifkuilen. De verdeling van neerslag over het jaar is onderzocht aan de hand van dagsommen van een groot aantal neerslagstations verdeeld over de kust (Figuur 5-1 en Figuur 5-2, KNMI, 2000). De regionale variatie is hier ook mee te bepalen. De dagsommen zijn gesommeerd naar maandsommen en jaarsommen. Met de maandsommen zijn perioden van droogte vastgesteld en hun mogelijk invloed op de ontwikkeling van verstuivingen. Gegevens vanaf 1954 zijn gebruikt.

Aanvullend is per station het aantal droge dagen per jaar bepaald (dagen met neerslag=0mm), voor het gehele jaar, voor maart-september, voor maart-mei en voor juni-augustus. Hier zit overigens wel een verschil tussen de KNMI-stations en de neerslagstations. De KNMI-stations registreren ook dagen dat het wel regent, terwijl de hoeveelheid zo klein is dat deze niet te meten is (code -1). De neerslagstations registreren dan neerslag=0. Het aantal droge dagen voor de neerslagstations is daarmee aanmerkelijk groter dan voor de KNMI-stations. Er is ook nog een maat bepaald voor de lengte van droge perioden binnen een jaar. Voor iedere droge dag waarbij ook de vorige dag geen neerslag is gevallen wordt een teller opgehoogd met 1. Vervolgens is per jaar de som van alle tellers bepaald, wat een maat geeft voor de lengte van droge perioden per jaar.

Afgeleide gegevens t.b.v. de analyse:

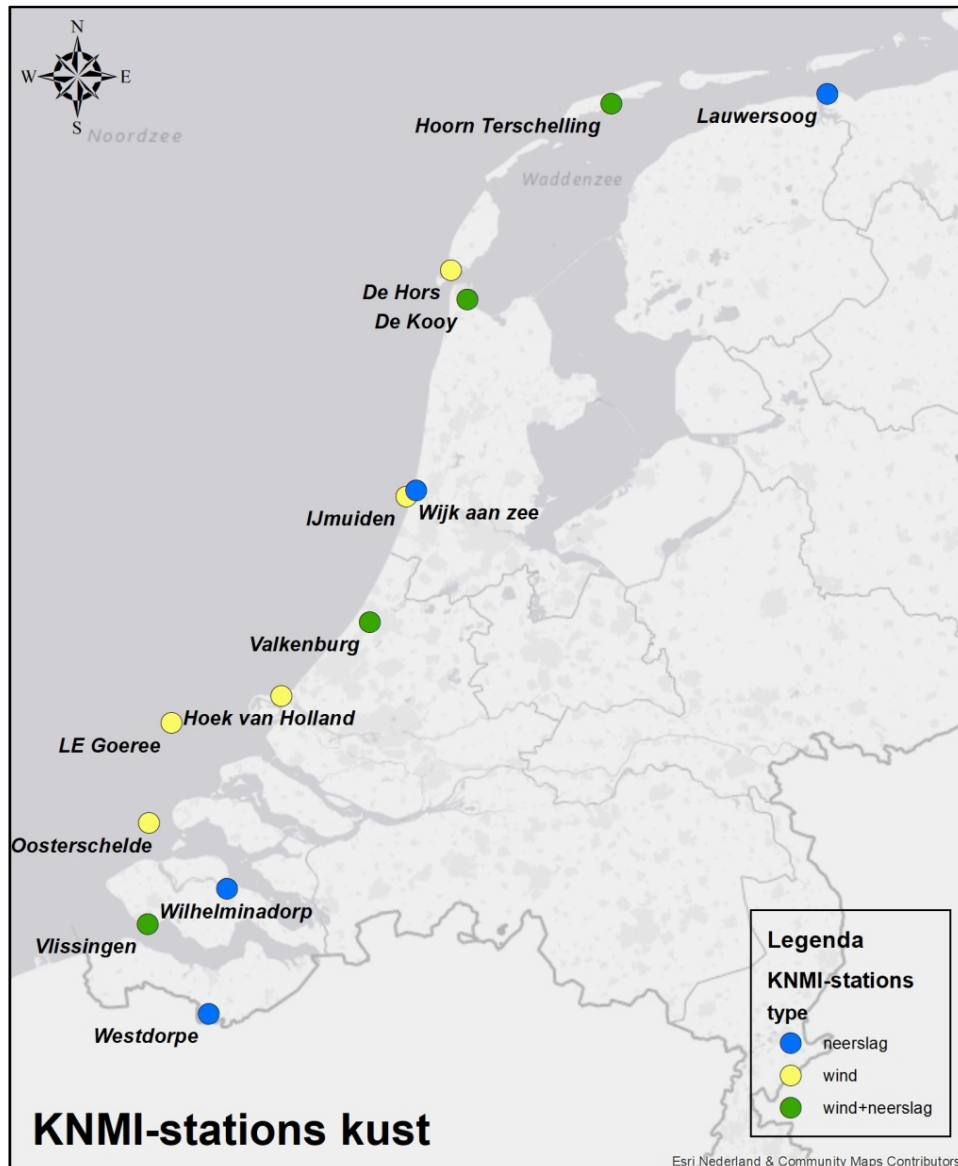
- Jaarsommen
- Jaarlijkse som van neerslag in maart-september
- Jaarlijkse som van neerslag in maart-juni
- (Voorjaars)droogte
- Aantal droge dagen per jaar
- Aantal droge dagen per jaar van maart-september
- Aantal droge dagen per jaar van maart-mei
- Aantal droge dagen per jaar van juni-augustus
- Lengte droge perioden



Figuur 5-1. Kaart met neerslagstations langs de kust voor dagsommen neerslag.

.2 Windgegevens

Voor de kuststations waar uurgegevens voor beschikbaar zijn, zijn berekeningen gemaakt van (potentieel) zandtransport per maand, gebaseerd op de uurgegevens windsnelheid en richting. Deze staan per jaar in onderliggende spreadsheets. Nadeel is dat maar voor een beperkt aantal stations deze gegevens beschikbaar zijn, waardoor de regionale spreiding met name op de wadden beperkt is (Hors Texel en Hoorn Terschelling). Wat dat betreft zou beter met daggemiddelden gewerkt kunnen worden, omdat dan veel meer stations beschikbaar zijn.

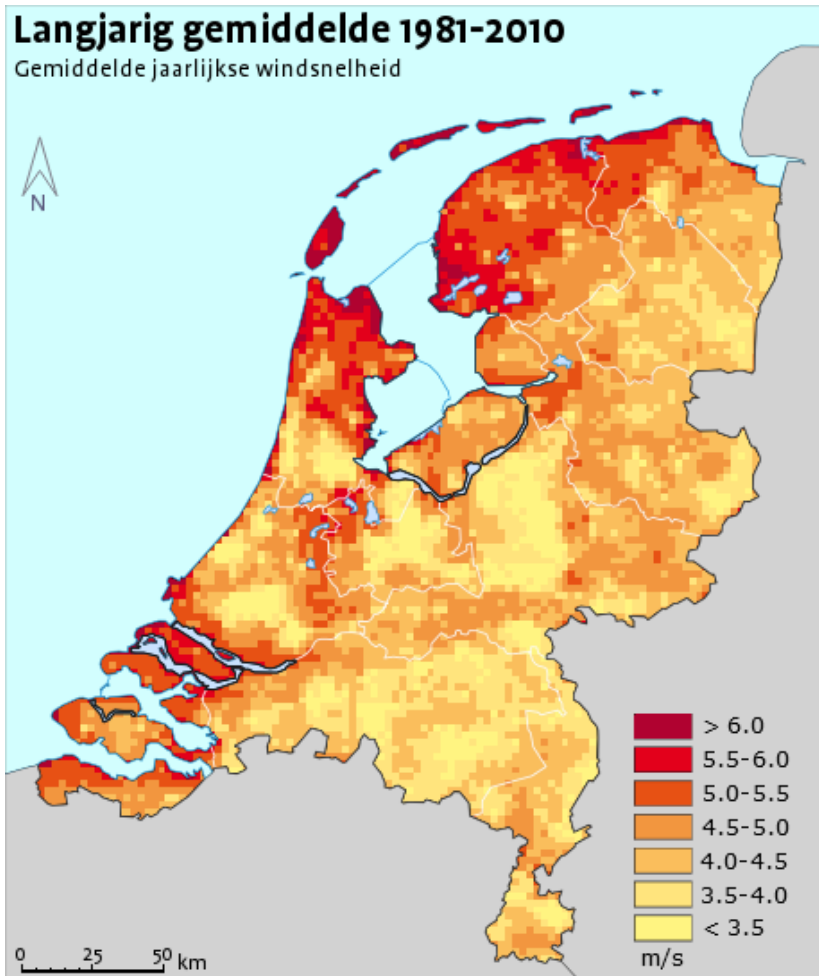


Figuur 5-2. Kaart met KNMI-stations voor gebruikte urregevens neerslag en wind.

De gebruikte stations zijn (zie ook Figuur 5-2) van noord naar zuid:

- Hoorn Terschelling
- De Hors Texel;
- De Kooy;
- IJmuiden;
- Valkenburg;
- Lichteiland Goeree;
- Oosterschelde;
- Vlissingen.

Relevante documentatie over de windstations zoals hoogte van de windmeter, toestand van het omringende terrein etc. is afkomstig van Verkaik, 2001. De meetgegevens zijn verwerkt tot en met 2013. Uit de gegevens is goed de windtransportkracht af te leiden per maand, ongeacht de neerslag. Dit geeft dus per station een gedetailleerde reeks van windtransportkracht (potentieel zandtransport).



Figuur 5-3. Gemiddelde jaarlijkse windsnelheid. Overgenomen uit *Klimaatatlas KNMI*. <http://www.klimaatatlas.nl/klimaatatlas.php>.

Figuur 5-3 laat de verschillen in windsnelheid langs de kust zien, aan de hand van de gemiddelde jaarlijkse windsnelheid. Hieruit blijkt dat op de Wadden en in de Delta de gemiddelde windsnelheid groter is dan langs de centraal Hollandse kust. Dit correleert niet met het gevonden ruimtelijk patroon in kleinschalige dynamiek.

Transport Potentieel (TP)

Transport potentieel is berekend m.b.v. de uurgemiddelde windsnelheid en de transport formule van Kawamura (Kawamura, 1951), ongeacht de windrichting. Dit geeft een maat voor het totale transport wat plaatsgevonden zou kunnen hebben, ongeacht welke kant het op gaat. De berekende uurwaarden zijn gesommeerd per maand, zodat voor alle beschikbare kuststations een matrix beschikbaar is met potentieel transport per maand voor 1980-2013 (voor sommige stations ontbreken data) en uiteindelijk per jaar. Voor details over de berekening van transport m.b.v. de transportformule van Kawamura wordt verwezen naar Bijlage 1). Per station worden uiteindelijk niet de berekende transporten gebruikt, maar de rangorde van de berekende jaartotalen, om onderlinge vergelijkbaarheid mogelijk te maken (zie uitleg in Bijlage 1).

Resultante Transport Potentieel (RTP)

Met de windfrequentieverdeling is een vectorberekening van potentieel transport gemaakt, dus door rekening te houden met de windrichtingen (niet met de expositie van de kust, dus puur een vectorberekening op basis van de windstatistieken). Omdat de wind nooit uitsluitend uit één windrichting waait is RTP altijd lager dan TP.

Richting van transport

Deze volgt uit de berekening van het resultante transport. De resultante is een vector, met een grootte (RTP) en een richting. De richting die aangegeven wordt is de richting waar de vector vandaan komt.

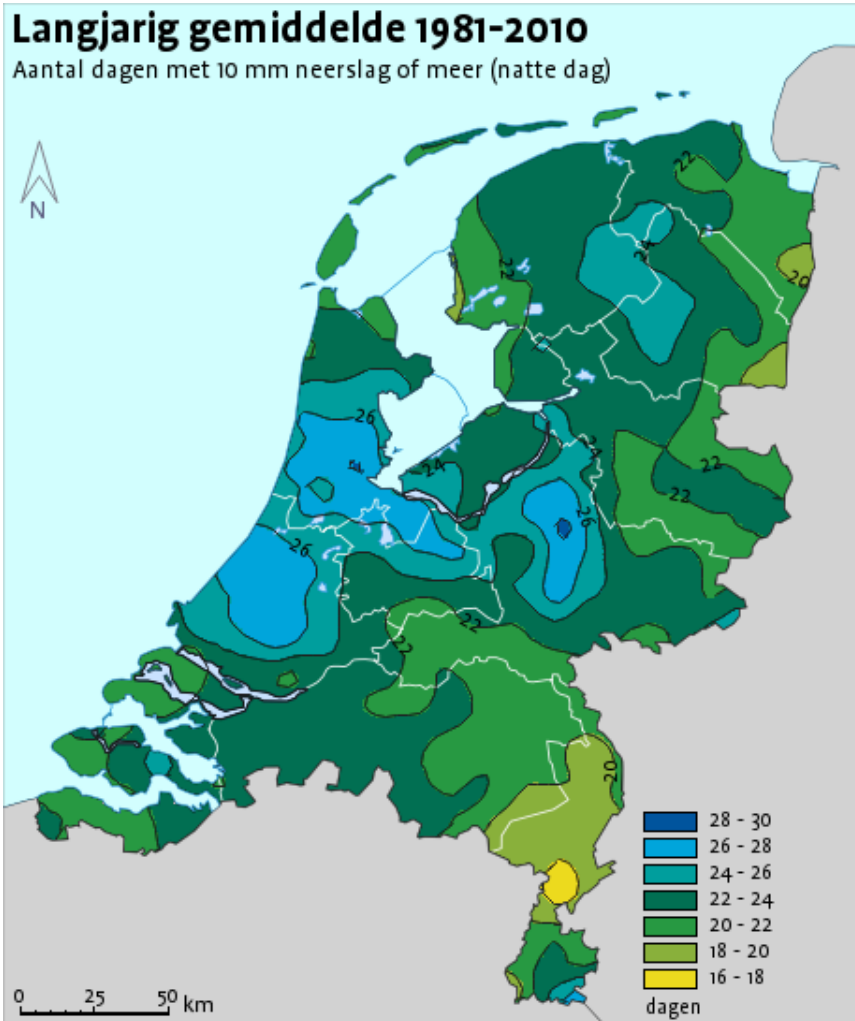
RTP/TP

Deze ratio zegt iets over de unidirectionaliteit van de wind. Als de ratio 1 nadert, dan komt vrijwel alle wind uit dezelfde richting. Hoe dichter de waarde naar 0 gaat, hoe kleiner de resultante windvector. Dit kan overigens betekenen dat de wind evenveel uit alle hoeken waait, maar ook bijvoorbeeld uitsluitend uit twee tegenovergestelde windrichtingen.

.3 Neerslag en watererosie

Een ander aspect van neerslag is dat het tot watererosie kan leiden. Watererosie speelt vermoedelijk een belangrijke rol bij het initiëren van verstuiwingen (Jungerius en van der Meulen, 1988). Hierbij is neerslag en neerslagintensiteit, verdamping en instraling van belang. Droogte en straling zorgen voor een versterking van hydrofobie, wat het oppervlak gevoelig maakt voor watererosie. Neerslag met hoge intensiteit of lange duur kan leiden tot oppervlakkige afstroming, waardoor watererosie op treedt. In een poging een correlatie te maken tussen neerslag en ontwikkeling van dynamiek zijn daarom verschillende variabelen onderzocht. Verrassend, en aangetoond is in ieder geval dat op een uitermate permeabele bodem, wat een duinbodem over het algemeen is, water oppervlakkig af kan stromen, als gevolg van waterafstotendheid (hydrofobie; zie [Tekstkader 1](#)) van de bodem (Jungerius & van der Meulen, 1988; Jungerius en de Jong, 1989; Jungerius & Dekker, 1990) of door een zeer hoge hydraulische weerstand van de bodem wanneer deze droog is. Het is buitengewoon moeilijk de relatie tussen watererosie en de ontwikkeling van dynamiek aan te tonen, omdat er geen directe gegevens van beschikbaar zijn. Er zijn wel kwalitatieve waarnemingen van watererosie en het is bekend dat het op grote schaal kan optreden, maar er is geen kwantitatieve reeks waarmee aangetoond kan worden of watererosie is toegenomen. Theoretisch zijn er wel argumenten voor te bedenken. De hoeveelheid neerslag neemt toe, evenals de neerslagintensiteit. In voorjaar en zomer nemen ook de periodes met droogtestress toe, wat behalve tot een mogelijke afname van de begroeiing gevolgen heeft voor de hydrofobie (en een hoge hydraulische weerstand) van de bodem. Een combinatie van een droge periode gevolgd door een periode met hevige regenval zal zeker tot watererosie op uitgebreide schaal leiden. Overigens is bij recente veldobservaties gebleken dat ook langdurige maar niet per se hevige regenval leidt tot oppervlakkige afstroming en watererosie.

Het aantal natte dagen per jaar, waarbij de neerslag op een locatie groter of gelijk is aan 10mm, zou een maat kunnen zijn voor de mogelijke hoeveelheid watererosie. Bekend is dat er een regionaal patroon is in aantal natte dagen (5.6.1) dat min of meer overeenkomt met het ruimtelijke patroon in kleinschalige dynamiek langs de kust. De vraag is of er ook een verandering in dit patroon is opgetreden, dus in de regionale variatie in het aantal natte dagen per jaar, wat een verklaring zou kunnen geven voor de toename in dynamiek langs de Hollandse kust en Texel, en niet in de Delta en op de Wadden.



Figuur 5-4. Aantal natte dagen, met een neerslag groter of gelijk aan 10 mm. Overgenomen uit Klimaatatlas KNMI.

<http://www.klimaatatlas.nl/klimaatatlas.php?wel=neerslag&ws=kaart&wom=Gemiddeld%20aantal%20dagen%20met%2010.0%20mm%20of%20meer>

Voor het bepalen van mogelijke dagen met watererosie zijn verschillende gegevens gebruikt. Het aantal natte dagen per jaar is bepaald aan de hand van de dagsommen van de neerslagstations. Hiervoor kunnen alle neerslagstations gebruikt worden waarvoor dagsommen beschikbaar zijn, dezelfde als in paragraaf 2.2.1 beschreven (en Figuur 5-4 afgebeeld). Als criterium voor een natte dag is een neerslaghoeveelheid van tenminste 10mm in één dag genomen, overeenkomstig het criterium wat door het KNMI is gebruikt in de klimaatatlas. Voor de meeste stations zijn de gegevens vanaf 1951 beschikbaar. De gegevens van 1951-1953 blijken echter vaak niet volledig of niet betrouwbaar, en zijn daarom verder buiten beschouwing gelaten.

Voor enkele stations zijn per uur ook uursommen en neerslagduur beschikbaar. Door uursom en neerslagduur (beschikbaar in tienden per uur) te combineren, is hiermee ook een neerslagintensiteit te bepalen. Vervolgens is hiermee per jaar uitgezocht hoe vaak hoge intensiteiten voorkomen, hoe dit verschilt per station en of hier een temporele trend in zichtbaar is. De verdeling van de stations waarvoor deze gegevens beschikbaar zijn langs de kust is niet helemaal optimaal. Op de Wadden is slechts één station beschikbaar (Hoorn, Terschelling). Deze regio is aangevuld met station Lauwersoog. Langs de Hollandse kust zijn meer stations beschikbaar: De Kooy (bij Den Helder), Wijk aan Zee en Valkenburg. Voor de Delta is ook slechts één kuststation beschikbaar, Vlissingen. Daarom zijn hier ook de gegevens van stations Westdorpe (ten zuiden van Terneuzen, flink eind van de kust) en Wilhelminadorp (ten noorden van Goes, aan de Oosterschelde) gebruikt. Voor ligging van de stations zie Figuur 5-1.

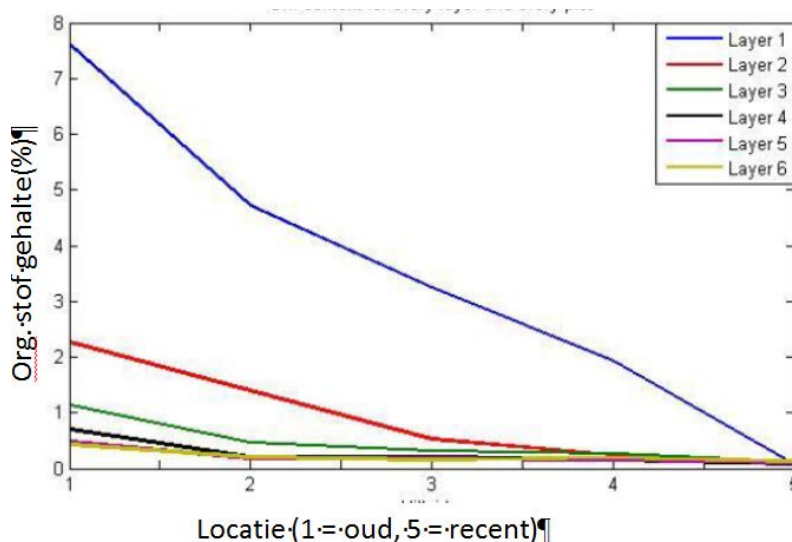
Tekstkader 1: Waterafstotendheid en watererosie langs een duin chronosequentie

Erik Cammeraat

Waterafstotendheid is een belangrijke factor bij de infiltratie van water in de bodem en als zodanig uitgebreid bestudeerd ook in de Nederlandse duinen. Er is echter veel minder bekend over de temporele ontwikkeling van waterafstotendheid en de invloed daarvan op water erosie. In deze studie wordt de ontwikkeling van waterafstotendheid en infiltratie gepresenteerd langs een chronosequentie van duinen en daaropvolgende vegetatiesuccessie. Vegetatie successie en bodemontwikkeling gaan samen met verzuring van de bovengrond en ophoping van voedingsstoffen op de duinzanden.

Op Texel werd een reeks van 4-5 gebieden bestudeerd, variërend van actieve stuifzandvelden tot (bijna) volledig met lage vegetatie bedekte gebieden op duinen die 200-300 jaar geleden werden gevormd. Er werden in-situ regen simulaties uitgevoerd, met verschillende regenvalintensiteiten, om infiltratie, afvoer en door de afvoer getransporteerd sediment te meten, en daarnaast werden ook metingen op monolieten in het laboratorium uitgevoerd. De waterafstotendheid werd bepaald met behulp van de contacthoek en WDPT-methoden, van het oppervlak tot 30 cm diepte.

Het organische stof gehalte van de grond nam geleidelijk toe met de tijd en met de diepte waarbij de grootste en duidelijkste toename optrad bij de langste vegetatiesuccessie periode (figuur A). Met toenemende diepte van de bodemontwikkeling nam ook de waterafstotendheid aan het oppervlak toe, en met de diepste waterafstotende effecten in de oudste bodems (figuur B). Het gehalte aan bodemorganische stof vertoonde een goede correlatie met de waterafstotendheid. De infiltratie van water vertoonde een duidelijk waterafstotend effect met zeer lage infiltratiesnelheden gedurende de eerste 10 minuten, zodra vegetatie successie was opgetreden (figuur C) bij relatief hoe neerslagintensiteiten. De sedimentopbrengst was zeer variabel en bevatte grote hoeveelheden organisch materiaal bij het begin van de eerste overland flow.

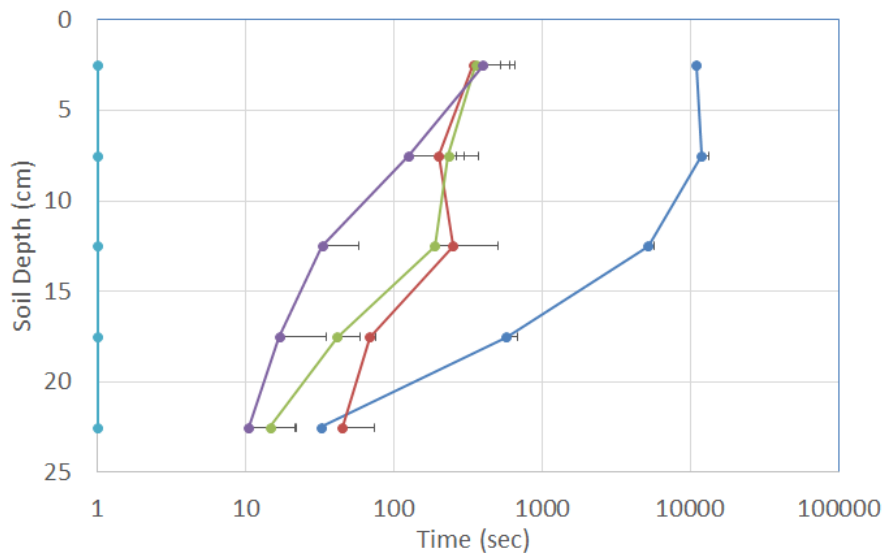


Figuur A: Verandering in organische stof gehalten voor verschillende bodemdiepten (laag 1 = 0-5cm, laag 2 = 5-10cm...laag 7 = 25-30cm) voor 5 locaties met verschillende ouderdommen (1 = 1700-1730AD, 2= 1800-1850 AD, 3=1900-1910 AD, 4=1969-1979AD, 5= actief stuifzand).

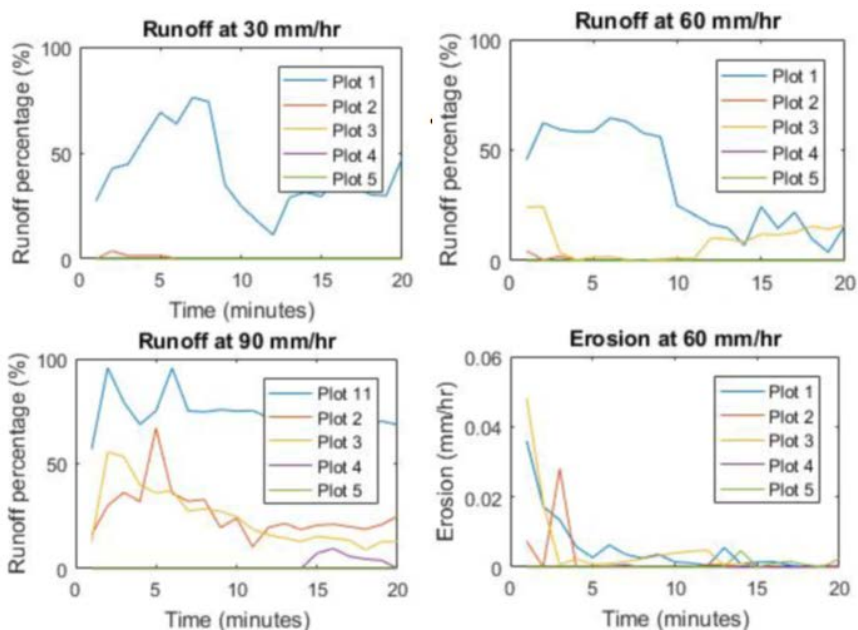
De waterafstotendheid beïnvloedt de infiltratie van water in de duinen sterk, en vooral na droge periodes zal de regen niet infiltreren. Dien ten gevolge zal bij regen oppervlakte afvoer worden geproduceerd, waarbij water, sediment en organische stof van hoger gelegen kale plekken naar lagere gebieden in de duinen stroomt. Het is te

verwachten dat deze reallocatie van resources zowel effecten heeft in de brongebieden als in de accumulatiegebieden. Omdat de gevonden waterafstotendheid op bodemdiepten van 20 tot 30 cm gering is, kan watererosie een belangrijk proces zijn om in oudere duinbodems het onderliggende zand aan het oppervlak te krijgen. Als het hydrofobe materiaal verdwenen is, kan water weer infiltreren, maar dat kan ook aanleiding geven tot winderosie of een hernieuwde vegetatie successie, vergelijkbaar met condities in stuifkuilen.

Water Repellency (WDPT) with Depth



Figuur B: Verandering van waterafstotendheid met bodemdiepte en bodemouderdom (1-5 zie figuur 1 voor 5 locaties met verschillende ouderdommen (1 = 1700-1730AD, 2= 1800-1850 AD, 3=1900-1910 AD, 4=1969-1979AD, 5= actief stuifzand). De waterafstotendheid is uitgedrukt in tijd tot infiltratie met de WDPT test.



Figuur C: Afvoer en erosie voor de 5 verschillende bodemoppervlakken gemeten aan bodemmonolieten met een hellingshoek van 5 graden (1 = oud, 5 = recent, zie figuur 1 en 2).

Afgeleide gegevens t.b.v. de analyse:

- Jaarlijkse som van neerslag in juli en augustus
- Aantal natte dagen per jaar (neerslag groter dan 10mm per dag)
- Aantal natte dagen per jaar van maart-september
- Aantal natte dagen per jaar van juni-augustus
- Aantal natte dagen per jaar voor juli+augustus
- Aantal uren met extreme neerslagintensiteit per jaar
- Aantal uren met extreme neerslagintensiteit van mei-september
- Aantal uren met extreme neerslagintensiteit voor juli+augustus

5.3.4 Konijnen

Gegevens over konijnen zijn beschikbaar gesteld door de Zoogdiervereniging. De gegevens bestaan uit telroutes en telgegevens. Konijnen worden geteld op verschillende momenten in voorjaar en najaar, langs vaststaande routes. Figuur 5-5 toont de ligging van de routes. Niet in alle kustvakken worden konijnen geteld, of er zijn geen gegevens beschikbaar. In de Delta zijn geen gegevens bekend of verstrekt, en voor wat betreft de Waddeneilanden werd er op Schiermonnikoog niet geteld.

Voor de steekproef van deelgebieden is aan de hand van de luchtfoto's de mate van konijnenactiviteit bepaald van 0 (geen) tot 5 (extreem). Dit is overigens een interpretatie (zie ook hieronder bij de uitwerking). Konijnensporen zijn over het algemeen goed zichtbaar op de luchtfoto's, d.w.z. sporen in de vorm van kleine, kale zandplekjes zijn geïnterpreteerd als konijnensporen. Hiervoor is geen veldcheck uitgevoerd, dus het is niet 100% zeker dat de waargenomen sporen inderdaad van konijnen zijn, maar het is wel waarschijnlijk. Er is gecheckt of het veel voorkomen van zulke sporen correspondeert met hoge konijnaantallen. Dit blijkt vaak het geval, maar niet altijd. Ook kan het zijn dat een telroute net naast een gebied met een interessante ontwikkeling ligt, waardoor de maat kan afwijken van de tellingen.



Figuur 5-5. Ligging konijntelroutes. Gegevens Zoogdiervereniging.

5.3.5 Bodem(eigenschappen)

Bodem(eigenschappen) zijn in dit deelonderzoek buiten beschouwing gelaten. De inschatting is dat oude bodems minder of niet stuiven door de ophoping van organische stof. Hydrofobie zou een cruciale factor kunnen zijn, maar hier is maar weinig over bekend. Er is wel het een en ander aan gemeten, maar hydrologische implicaties zijn lastig te kwantificeren. Wel is bekend dat er een gradiënt is in hydrofobie dwars op de kust (Scholten, 2014, scriptie UvA) en zijn er gegevens over regionale spreiding (Dekker et al., 2000), a.h.v. gegevens voor Goeree en Zwanenwater. Er kunnen n.a.v. dit onderzoek verschillende hypothesen m.b.t. hydrofobie worden opgesteld die in een vervolgonderzoek getoetst zouden kunnen worden.

5.3.6 Vegetatie

Voor verstuiving zijn de mate van bedekking met vegetatie, de doorworteling van de bodem en de ruwheid van de vegetatie belangrijke factoren. Hoe hoger de vegetatie hoe meer de wind in de omringende duinen geremd wordt; hoe meer de bodem doorworteld is, hoe beter bestand deze is tegen winderosie; hoe lager de vegetatiebedekking hoe groter het oppervlak is waar zand door de wind kan worden opgenomen. Hoewel deze factor voor de lokale dynamiek misschien extreem belangrijk is, is dit niet verder in verband met de beschikbare tijd niet uitgewerkt.

Voor de onderzochte gebieden is in de database met steekproef alleen de mate van begroeiing opgenomen met een kwalitatieve klasse. De mate van begroeiing is vanzelfsprekend omgekeerd evenredig met de mate van kaalheid van de bodem, en daarmee tevens een maat voor de verstuivingsdynamiek. De onderverdeling naar mate van begroeiing is als volgt:

- Klasse 4: 50-60% begroeid, 40-50% sterk dynamisch, komt overeen met activiteit klasse 5 (Hoofdstuk 4)
- Klasse 5: 60-70% begroeid, 30-40% sterk dynamisch, komt overeen met activiteit klasse 4
- Klasse 6: 70-80% begroeid, 20-30% sterk dynamisch, komt overeen met activiteit klasse 4
- Klasse 7: 80-90% begroeid, 10-20% dynamisch, komt overeen met activiteit klasse 3
- Klasse 8: 90-95% begroeid, komt overeen met activiteit klasse 3
- Klasse 9: 95-99% begroeid, komt overeen met activiteit klasse 2
- Klasse 10: 100% begroeid, komt overeen met activiteit klasse 1

Deelgebieden met minder dan 50% begroeid blijken in de praktijk niet voor te komen.

5.3.7 Begrazing

Gegevens over begrazing zijn beschikbaar uit eerder OBN-onderzoek naar effecten van begrazing (Nijssen et al., 2014). Het meest directe effect van begrazing wat relevant is voor verstuiving is het open trappen van de bodem door betreding en padvorming. Begrazing als zodanig is niet verder onderzocht.

5.3.8 Recreatie/betreding

Dit is kwalitatief beoordeeld op luchtfoto's. Effecten van betreding en ontstaan van paden wordt vaak veroorzaakt door recreatief gebruik, maar vaak ook door betreding door ingezette grazers of damherten. Aan de hand van de mate van paden-activiteit (d.w.z. duidelijk zichtbare paden die door actieve verstuivingen lopen) is voor de onderzochte deelgebieden een kwalitatieve maat opgenomen variërend, van 0 (geen paden zichtbaar) tot 5 (extreem doorsneden door paden). Paden die geen effect hebben op verstuiving (bijvoorbeeld een pad door een vallei of een geasfalteerd pad) zijn vanzelfsprekend niet meegenomen. De gegevens zijn opgenomen in de database met steekproef.

5.3.9 Militaire activiteiten

Militaire activiteiten zijn in sommige gebieden van belang of van belang geweest (bijvoorbeeld een schietbaan in het Vlaggenduin). Gegevens hierover zijn echter zeer beperkt. Deze factor is daarom niet in de verdere analyse betrokken.

5.4 Effect van lokale factoren

5.4.1 Kustligging en afstand t.o.v. de kustlijn

Er is een discrepantie tussen de ontwikkeling van dynamiek in de zeereep en die in de binnenduinen. Het gebrek aan dynamiek in de achter de zeereep liggende duinen in de Delta en op de Waddeneilanden staat in schril contrast tot de enorme toename die plaatselijk zowel op de Waddeneilanden als in de Delta in de zeereep wordt gevonden. Met name langs de kust van Vlieland, Terschelling en Ameland, aan de zuidwestkust van Texel en langs de kop van Schouwen is de dynamiek van de zeereep sinds de start van dynamisch kustbeheer rond 1990 aanmerkelijk toegenomen (zie bijvoorbeeld Arens et al., 2007 en Van der Valk et al., 2012). Met name delen van Terschelling en de kop van Schouwen vertonen een mate van dynamiek die langs de Hollandse kust wel hier een daar te vinden is, maar toch op kleinere schaal. Deze ontwikkeling lijkt op geen enkele wijze verband te houden met de ligging van de kust. Tussen Schouwen en Ameland varieert de expositie van de kust van zuidwest tot noord, waardoor de hoeveelheid aanlandige wind behoorlijk kan verschillen. Dit heeft blijkbaar geen invloed op de ontwikkeling van dynamiek, en zelfs maar een beperkte invloed op de aanzanding van de zeereep.



Verstuiving in de zeereep van de Noordvaarder (Terschelling)

Voor de binnenduinen zijn deze verschillen in kustexpositie veel minder belangrijk. Juist op de Waddeneilanden kunnen ook winden uit zuid en zuidwest sterk bijdragen aan verstuiving vanuit stuifkuilen, omdat in die gevallen de duinen niet in de luwte van de zeereep liggen, maar juist er voor (vanuit de wind gezien). Lijkt dit verschil in expositie voor de ontwikkeling van de zeereep al niet veel verschil te maken, dan is het niet voor te stellen dat dit voor de dynamiek van stuifkuilen wel het geval zou zijn. Met andere woorden, de expositie van de kust kan voor de gesignaleerde stuifkuildynamiek geen verklarende factor zijn, omdat dit voor de zeereep zelf, waar het effect van een verschil in expositie het grootste zou moeten zijn, al niet op gaat.

De mate van dynamiek in verschillende gebieden lijkt over het algemeen geen relatie te vertonen met afstand vanaf de kust. In sommige gevallen is afstand vanaf de kustlijn echter wel een belangrijke factor, namelijk in die gevallen waarbij de dynamiek van de zeereep zelf doorwerkt tot in de achterliggende duinen. In die gevallen bestaat er een gradiënt in de beïnvloeding die afneemt met toenemende afstand vanaf de kust. Het kan zijn dat de dynamiek van de zeereep het gevolg is van secundaire verstuiving, dus van het opnieuw in verstuiving gaan van zeereepzand zelf, of van doorvoer vanaf het strand, via de zeereep, naar de achterliggende duinen. In beide gevallen neemt de invloed op de achterliggende duinen af met toenemende afstand vanaf de kust.

Een kwalitatieve beoordeling aan de hand van de luchtfoto's van 2000 en 2014 geeft de volgende resultaten. Met groen gemarkeerd zijn de gebieden die ook zijn opgenomen in de database met steekproef.

- Schiermonnikoog, Kapenglop: afname van dynamiek tussen 2000 en 2014, geen duidelijke relatie met afstand vanaf de kust. Ingrepen ter bevordering van dynamiek.

- Schiermonnikoog, Westerduinen: afname van dynamiek tussen 2000 en 2014, geen duidelijke relatie met afstand vanaf de kust, meest dynamiek in hoogste duinen. Ingrepen ter bevordering van dynamiek.
- Terschelling, Landerumerheide: toename van dynamiek, ligt op overgang van polder naar duinen, en daarmee vol op zuidwestenwind. Geheel geen relatie met afstand t.o.v. kustlijn. Deels begrazingseffect (terreurbegrazing is hier uitgevonden).
- Vlieland: afname van dynamiek, sterkere afname op grotere afstand vanaf kustlijn (maar ook verder vanaf fietspad, dus mogelijk ook afname van recreatiedruk).
- Texel, Sebastepol: twee gebieden waarbij het meest zeewaartse deel toeneemt in dynamiek, het meest landwaartse afneemt, terwijl in 2000 de dynamiek juist in het meer landwaartse deel groter was. Afstand t.o.v. kust, hoogte van de verstuingen in het duin en konijnendynamiek lijken hier de drie belangrijke factoren.
- Texel, Eierlandsche duinen: effect van konijnen, verst van de zeereep afliggende deel (noord) minst dynamische ontwikkeling, midden meest, maar vanwege recreatie. Afstand vanaf de kust lijkt hier wel een rol te spelen, omdat bij de dichtst achter de zeereep liggende delen de zeereepdynamiek nog meespeelt, bij de verder afgelegen delen niet.
- Texel slufferbollen: direct aangrenzend aan intergetijdegebied van de Slufter. Interactie met dynamiek van het intergetijdegebied, maar ook behoorlijke invloed van recreatie.
- Texel, de Nederlanden, Korverskooi: omgekeerde relatie want hoe verder van de kust hoe dynamischer en ook hoe lagere duinen. Zou ook nog met konijnendynamiek samen kunnen hangen, die is in Korverskooi groter.
- Texel, Hoge nol: dicht achter zeereep iets meer dynamisch, maar is tegelijk ook een iets hogere duinenrij.
- Texel, Duinpark: ligt gelijk achter zeereep, waarschijnlijk enige invloed vanuit zeereep. Afstand hier dus wel belangrijk.
- Texel, Stooknol, Pieter Rozenvlak: relatie is hier eerder andersom, Pieter Rozenvlak ligt stuk verder van zee. Maar Pieter Rozenvlak is ook al in 2000 dynamisch en Stooknol geheel niet. Bij Stooknol lijkt konijnendruk hoger, bij Pieter Rozenvlak mogelijk ook begrazingseffect.
- Texel, Maffenvlak, Kapenol: net als Stooknol en Pieter Rozenvlak, alleen kleinere verschillen en duinen Kapenol zijn iets hoger, wat effect van kleinere afstand te niet kan doen.
- Texel, Boterpotsnollen, Wittenol: geen duidelijk verschil, hoewel afstand vanaf zee van Boterpotsnollen naar Wittenol toeneemt.
- Texel, Kelderhuispolder: zuidkant ligt verder van zee af, maar geen verschil in ontwikkeling.
- Grafelijkheidsduinen: omgekeerde relatie, maar verst van zee afgelegen is deels ook dichtst op bebouwing, wat waarschijnlijk een belangrijkere rol speelt (betreding).
- Zandloper, Zanddijk, Botgat, Groote Keeten: afstand en hoogte spelen beide een rol. Er is hier zeker een effect van de zeereep. Deze duinen liggen echter allemaal direct achter de zeereep.
- Schoorlse duinen, Camperduin: toename van dynamiek met toenemende afstand, op hogere duinen die hier achter een zeer hoge (35m NAP) zeereep liggen.
- Schoorlse duinen, centraal: geen relatie, nauwelijks dynamiek. Meeste dynamiek in hoge duingordel (20-25m NAP) ver van de kust, vóór het bos met de binnenduintrand (>40m NAP).
- Bergen-Egmond: hier lijkt wel een duidelijke gradiënt aanwezig, met een langzame afname van dynamiek met toenemende afstand en afnemende invloed van de zeereep.
- Egmond-Castricum-Wijk aan zee: de gradiënt bij Bergen-Egmond vervaagt hier. Afstand lijkt geen rol meer te spelen, maar zeereepdynamiek zelf is ook lager.
- Zeeveld bij AWD: ligt allemaal achter zeereep, hier vooral omgekeerde relatie met hoogte, bijna alle verstuingen liggen in de valleien.
- Luchterzeeduinen: vooral duidelijke relatie met hoogte, maar de verder gelegen, even hoge massieven lijken wel iets minder dynamisch te zijn.

- De Blink: geen relatie met afstand, vrij homogene dynamiek. Hoogstens wordt een afname door toenemende afstand teniet gedaan door een toename door toenemende hoogte.
- Hollands duin: ligt direct achter zeereep, geen relatie met afstand, ook geen duidelijke relatie met hoogte.
- Coepelduynen: hoogstens relatie met hoogte, in hogere, noordelijk deel zit meer dynamiek dan in lagere, zuidelijke deel.
- Vlaggeduin: geen relatie met afstand tot de kust, wel met recreatie. Alle dynamiek in de hogere complexen.
- Berkheide: geen relatie met afstand, vooral dynamiek in de hogere complexen.
- Meijendel: geen relatie met afstand vanaf de kustlijn.
- Solleveld: verstuingen dicht bij zee zijn iets groter dan die verderaf.
- Schouwen, Meeuwenduinen: hoe dicht bij zee, hoe minder gestabiliseerd.
- Schouwen, Theunesses hil, Zeepeduinen: grote afstand van de zee, maar hoge dynamiek, hier op hogere duinen

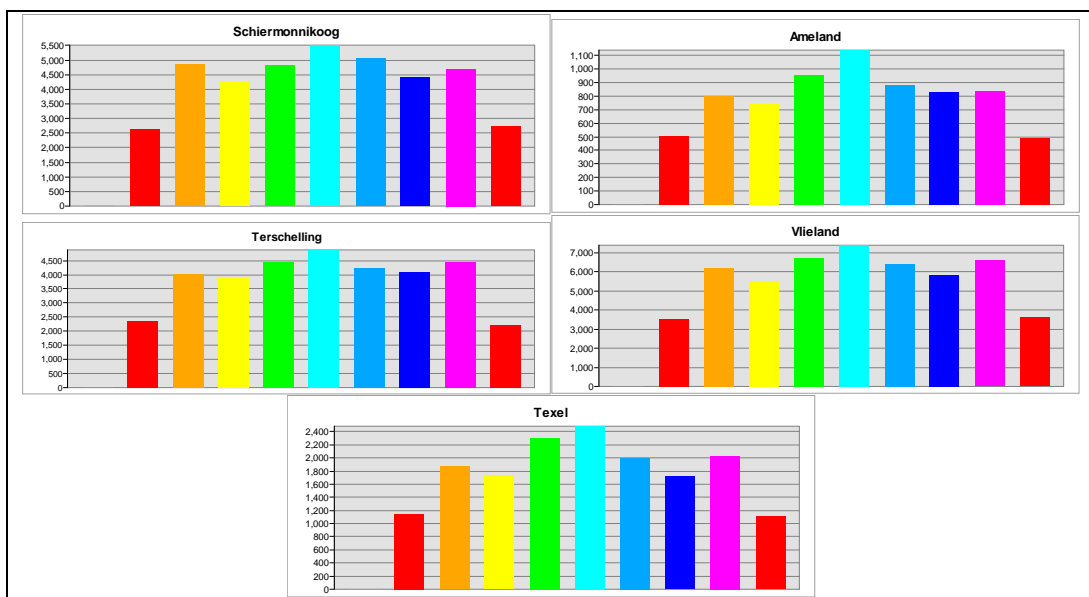
Conclusie is dat de afstand vanaf zee alleen een (duidelijke) rol speelt wanneer de zeereep dynamisch is. De afstand vanaf de bron van instuivend zand is dan de relevante factor. Soms lijkt de combinatie van afstand van zee en hoogte elkaar te versterken. Als op korte afstand vanaf de zeereep het duinmassief hoog is, dan heeft de wind hier een versterkte werking, doordat er nog weinig remming is van voorliggend terrein en er een versnelling optreedt tegen het duinmassief.

Zie voor de resultaten van de multivariate analyse Hoofdstuk 6.

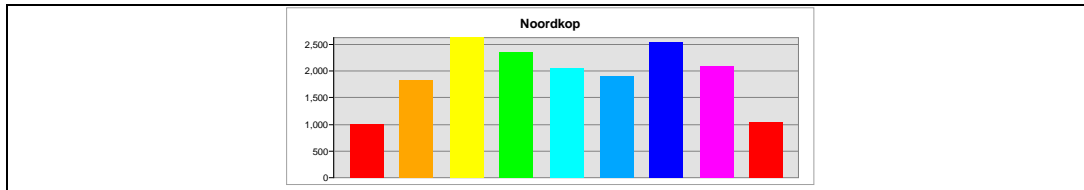
5.4.2 Invloed expositie

Op basis van AHN2 is de expositie van hellingen afgeleid. Voor alle gebieden zijn uitsneden gemaakt van de deelgebieden die op stuifkuilen zijn onderzocht. Figuur 5-6 t/m Figuur 5-10 geeft de verdeling voor alle gebieden. Dit is dus niet de verdeling van hellingen voor de stuifkuilen, maar voor de duinen waar stuifkuilen in liggen.

Op de Wadden domineren zuidhellingen. Dan in wisselende verhoudingen noord, zuidoost, zuidwest en noordwest. Noordoost is ook relatief belangrijk, vergeleken met de andere gebieden. Oost en west zijn steeds de kleinste.

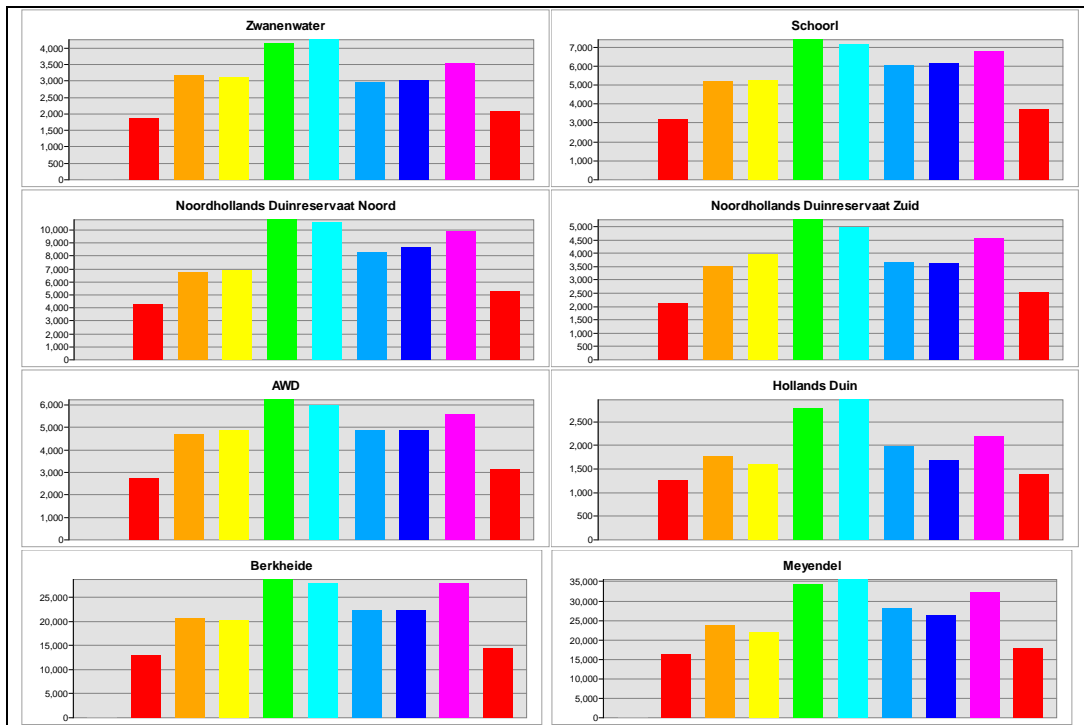


Figuur 5-6. Verdereiding van helling-expositie voor de Waddeneilanden. Betekenis kleuren: rood: noord, oranje: noordoost, geel: oost, groen: zuidoost, lichtblauw: zuid, middenblauw: zuidwest, donkerblauw: west, paars: noordwest, rood: noord.



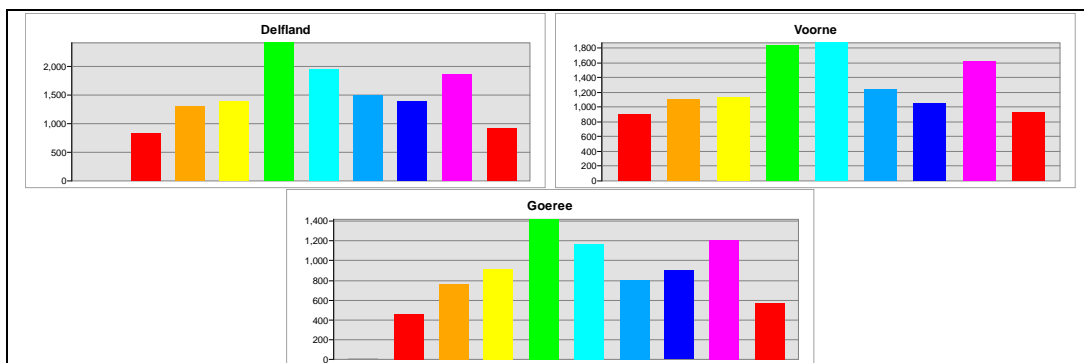
Figuur 5-7. Verdeling van helling-expositie Noordkop.

Noordkop is het enige gebied waar oosthellingen domineren, west heel belangrijk is en zuid vrij klein. Dit is wel een duidelijk afwijkende verdeling in vergelijking met de andere gebieden.



Figuur 5-8. Verdeling van helling-expositie vastelandsduinen van Zwanevater tot en met Meijndel.

Langs vrijwel de gehele Hollandse kust zijn zuidoost- en zuidhellingen wisselend de belangrijkste en is ook noordwest en noord een belangrijke pool. Zuidwest en west zijn meestal kleiner en nauwelijks groter dan oost en noordoost die het kleinst zijn.

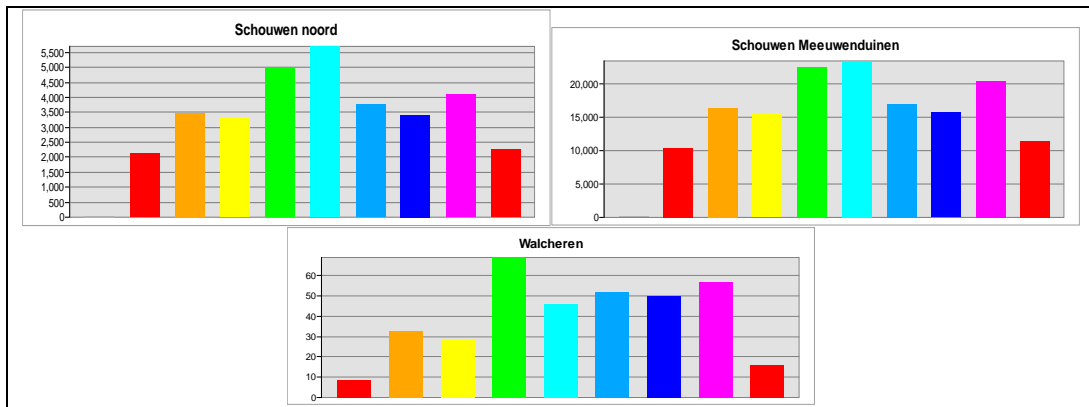


Figuur 5-9. Verdeling van helling-expositie Delfland (Solleveld-Kapittelduinen), Voorne en Goeree.

Delfland: Iets afwijkend omdat zuidoost hier zo groot is.

Voorne: Verdeling lijkt erg op Hollandse kust.

Goeree: Bijna zelfde als Delfland, alleen zuidwest en west omgedraaid.



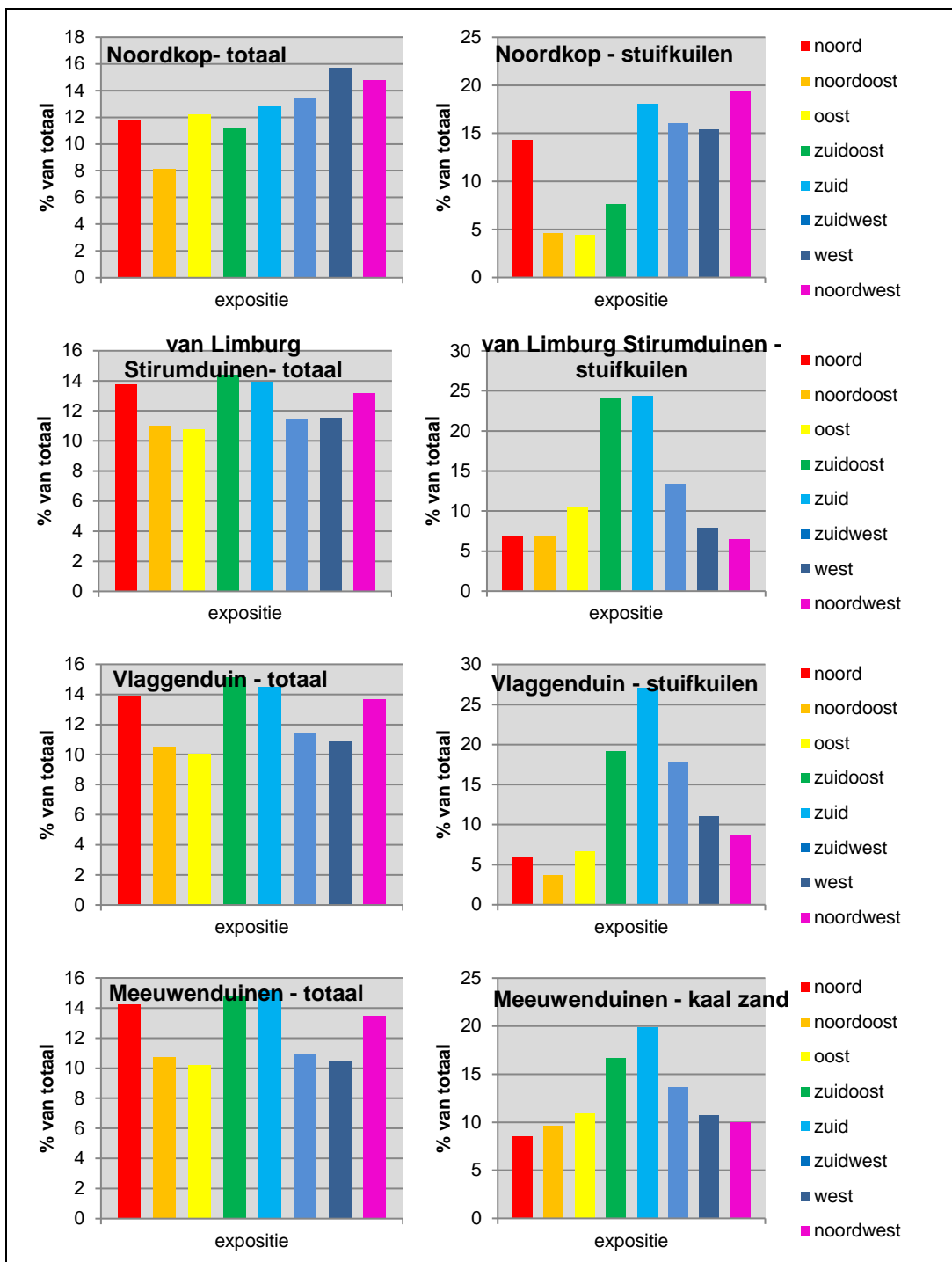
Figuur 5-10. Verdeling van helling-expositie Schouwen en Walcheren.

Schouwen noord en zuid zijn vrijwel gelijk. Lijkt ook behoorlijk op Hollandse kust. Walcheren: Is een minuscuul gebied, niet te veel waarde aan deze afwijkende verdeling hechten.

Het belangrijkste verschil is grofweg een tweedeling tussen de Waddeneilanden en de rest, waarbij op de Wadden hellingen op noordoost en zuidwest vaker voorkomen, hellingen op zuidoost iets minder en hellingen op zuid domineren. Bij de rest van de kust komen hellingen op zuidoost en soms zuid vaker voor en zijn daarna hellingen op noordwest meestal het belangrijkste. Dit lijkt in overeenstemming te zijn met voorkeursrichtingen in duinvormen die op de Waddeneilanden vaak van noordwest naar zuidoost lopen (en waarbij hellingen op zuidwest en noordoost dan domineren) en langs de rest van de kust meestal westzuidwest naar oostnoordoost lopen (waarbij dan hellingen op zuidoost en noordwest domineren).

Hoewel de verschillen in verdeling duidelijk zijn, zijn de effecten hiervan waarschijnlijk beperkt. Het iets frequenter voorkomen van zuid en zuidoost hellingen langs de Hollandse kust en in de Delta zou de potentie voor het voorkomen van hydrofobie en hoge intreedweerstand kunnen verhogen, waardoor watererosie een iets belangrijkere rol zou kunnen spelen dan op de Waddeneilanden. Dit hangt dan echter ook nog af van de bedekkingsgraad van de vegetatie en natuurlijk vooral of hydrofobie daadwerkelijk optreedt. Hier zijn vrijwel geen gegevens over bekend. (Dekker et al., 2000, vergelijking Goeree en Zwanenwater, Scholten, 2014). Voor Texel kan het geen verklarende variabele zijn, aangezien de verdeling van hellingen voor Texel vrijwel identiek is aan die voor de andere Waddeneilanden.

Voor enkele gebieden is ook onderzocht wat de verdeling aan hellingen binnen de stuifkuilen zijn. Hiervoor is gebruik gemaakt van karteringen die uit eerdere projecten beschikbaar zijn. De verdeling is daarom enigszins willekeurig. De gebieden zijn Noordkop (Noord-Holland), Van Limburg Stirumduinen (AWD), Vlaggenduin (bij Katwijk) en Meeuwduin (Schouwen). Figuur 5-11 toont de verschillen tussen de verdeling van hellingen in een geheel deelgebied en de verdeling voor de uitsnede met alleen de stuifkuilen (of kaal zand in geval van de Meeuwduinen). De resultaten tonen duidelijk aan dat voor de stuifkuilen zuid- en zuidoosthellingen veel meer voorkomen. In de Meeuwduinen is ook een deel van de zeereep mee gekarteerd, wat het grotere deel aan noordoost- en oosthellingen verklaart. Afgezien hiervan hebben Meeuwduinen, Van Limburg Stirumduinen en Vlaggenduin een grote overeenkomst in verdeling. Noordkop wijkt nogal af met een dominantie van noordwest- en zuidhellingen. Het betreft hier een klein deel van de Noordkop (tussen RSP 6.28 en 7.68), met enkele zeer grote stuifkuilen in een duinenrij direct achter de zeereep. De verdeling van hellingen in de rest van het gebied wijkt hier ook af van de andere gebieden. Gezien de ligging direct achter de zeereep, de hoogte van de duinenrij (2-025m NAP) en de meer westelijke richting van geomorfologische structuren in vergelijking wat tot meestal wordt aangetroffen, is het waarschijnlijk dat in dit gebied stuifkuilvorming door windstress belangrijker is dan door watererosie.

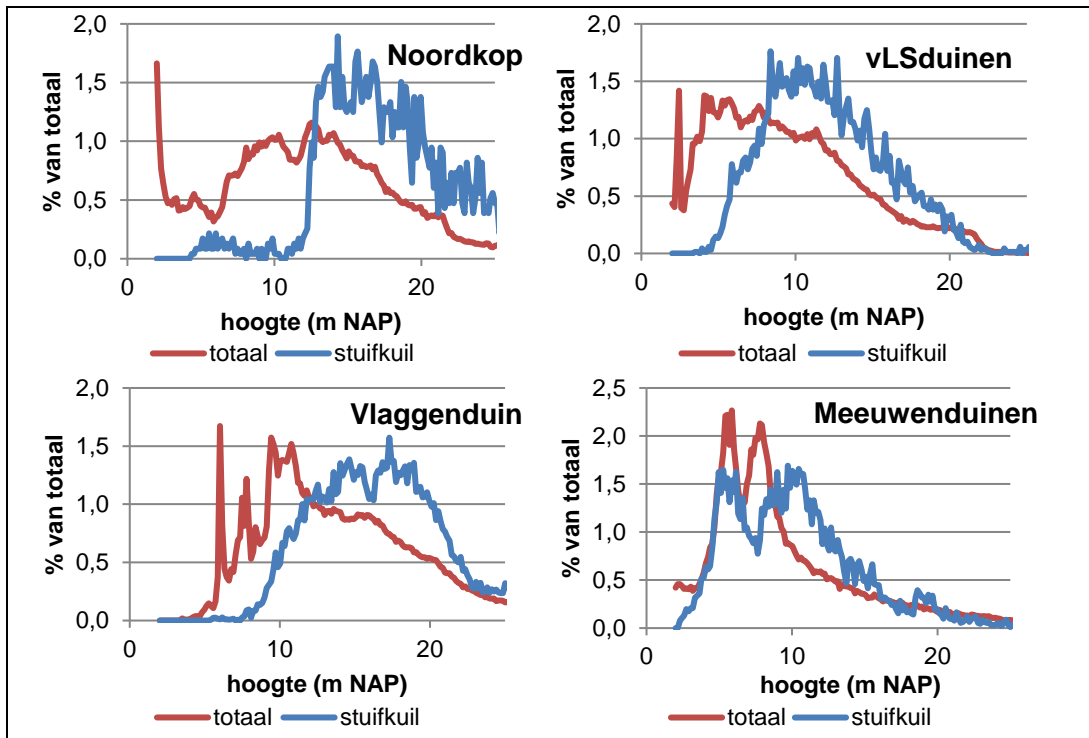


Figuur 5-11. Verdeling van helling-expositie voor het gehele gebied (links) en voor uitsneden met stuifkuilomtrek (rechts) voor een aantal gebieden. De Y-as geeft het percentage van het aantal rastercellen met expositie X.

5.4.3 Invloed hoogteligging

Voor een aantal gebieden is een uitsnede gemaakt van het AHN met de beschikbare karteringen van omtrekken van stuifkuilen. Hiermee is inzicht te krijgen in de hoogteligging van stuifkuilen. Figuur 5-12 geeft de grafieken voor de gehele deelgebieden en de uitsneden. Het is weinig verrassend, maar uit de grafieken blijkt wel duidelijk dat er meer stuifkuilen in het hogere deel dan in het lagere deel van het gebied ligt. Veel stuifkuilen liggen aan of in de bovenkant van de grotere paraboolstructuren en dan vooral, zoals uit de vorige paragraaf bleek, op de zuidwest, zuid en zuidoost georiënteerde hellingen. Deze hoge locaties zijn het meest

geëxponeerd op de wind en het meest gevoelig voor watererosie, wat verklaart dat het aantal stuifkuilen hier hoger is dan lager op de hellingen.



Figuur 5-12. Verdeling van hoogteligging voor gehele deelgebieden en voor de uitsneden van stuifkuilen. De Y-as geeft het percentage van het aantal rastercellen met hoogte X.

Figuur 5-12 laat wel zien dat er verschillen zijn tussen de gebieden. Voor Noordkop is het contrast het sterkst en komen stuifkuilen vrijwel alleen in het hoge deel voor. Voor Vlaggenduin en Van Limburg Stirumduinen is dit effect minder sterk. Voor Schouwen is er ook een cluster van stuifkuilen dat juist in het lagere deel voorkomt. Dit zijn de stuifvlaktes die in de valleien zijn gevormd (en waar veel archeologische vondsten worden gedaan).

Zie voor de resultaten van de multivariate analyse Hoofdstuk 6.

5.4.4 Conclusies lokale factoren

Kustligging (expositie van de kust) lijkt geen invloed te hebben op de ontwikkeling van dynamiek in het binnenduin. Dynamische zeerepen zijn op kusten met een expositie variërend van zuidwest tot noord te vinden. Als dit voor de buitenste duinzone al geen effect heeft, is niet te verwachten dat dit voor de binnenduinen wel het geval zal zijn. Opvallend is overigens de discrepantie in primaire (zeereep) en secundaire (binnenduinen) dynamiek tussen Wadden, Hollandse kust en Delta. Zeereepdynamiek is in alle gebieden in ontwikkeling, stuifkuildynamiek alleen langs de Hollandse kust en op Texel.

Op de Waddeneilanden speelt bovendien vaak dat veel voorkomende zuidwesten- en westenwind eerst over de polderkant van het eiland waaien, voordat de duinen worden bereikt. De kustligging doet er dan helemaal niet toe. Belangrijker is in een aantal gevallen de afstand tot de kustlijn. Er is een relatie met afstand vanaf de zeereep maar deze is niet eenduidig. Er zijn gebieden waar de stuifkuildynamiek toeneemt op grotere afstand van de zeereep, maar hier spelen waarschijnlijk andere factoren mee, omdat dit vaak duinen betreft die een hoger massief achter de zeereep vormen. Het meest duidelijk is het effect van afstand wanneer de voorliggende zeereep dynamisch is, waarbij een duidelijke overstuivingsgradiënt vanaf het strand landinwaarts bestaat. Duinen die direct achter de zeereep liggen ontvangen dan zand, wat bijdraagt aan de

lokale stuifkuildynamiek. Deze invloed neemt af met toenemende afstand vanaf de zeereep. De relatie is gevonden op Vlieland (waarschijnlijk ook in combinatie met afstand vanaf fietspad), Texel – Eierlandsche duinen, Texel- Hoge Nol (ook gerelateerd aan hogere duinen), Texel – Duinpark, Noordkop – Zandloper, Zanddijk en Botgat, Bergen – Egmond, Solleveld en Schouwen – Meeuwenduinen. Voor de overige gebieden is de relatie onduidelijk of geheel afwezig (of omgekeerd, d.w.z. meer dynamisch op grotere afstand van de zeereep).

Expositie is een factor die een directe invloed op de ontwikkeling van stuifkuildynamiek heeft. Verwacht zou worden dat helling die het meest op de wind geëxponeerd zijn, dus zuidwest- west- en noordwesthellingen gevoeliger zijn voor winderosie, maar dit is niet het geval. Het zijn de hellingen met de grootste droogte stress, dus zuidoost-, zuid- en zuidwesthellingen die opvallend vaak door winderosie zijn aangetast. Overigens is het waarschijnlijk dat het dan niet winderosie, maar watererosie is wat het begin van een stuifkuil initieert. Hoewel deze relatie zeer waarschijnlijk is, is ze niet direct aangetoond; er is geen onderzoek gedaan naar het verschil in watererosie op zuid, west, noord en oost geëxponeerde hellingen.

Verschillen in expositie tussen kustdelen zelf blijkt geen verklarende variabele te zijn. De verdeling van hellingen varieert wel langs de kust. Op de Waddeneilanden bijvoorbeeld domineren zuidhellingen, terwijl langs de Hollandse kust zuidoosthellingen vaker domineren. Een variatie in deze verdeling heeft geen effect op de ontwikkeling van stuifkuildynamiek.

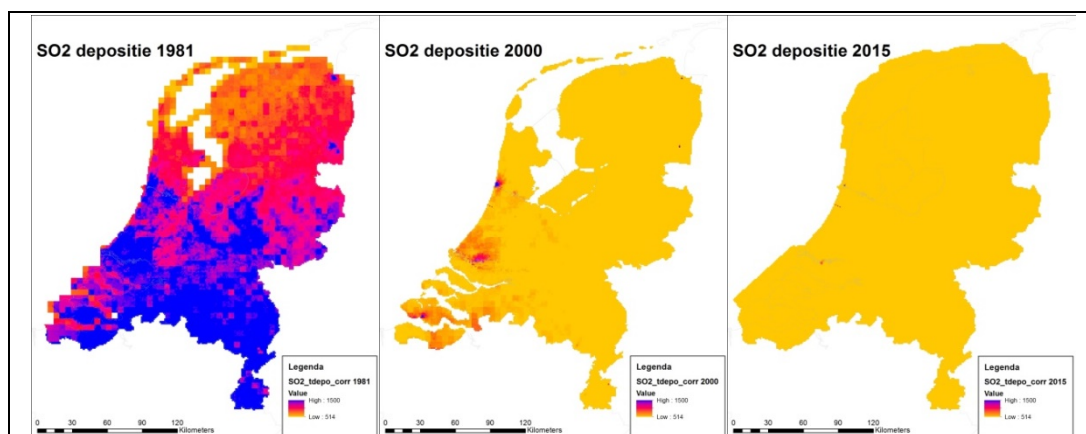
Een andere lokale factor die van invloed is, is de hoogteligging. Veel stuifkuilen zijn ontwikkeld in hellingen in hogere duincomplexen, die hoog boven de voorliggende zeereep uitsteken. Dit is waargenomen in een aantal gebieden: Schiermonnikoog – Westerduinen, Texel – Hoge Nol, Noordkop, Schoorlse duinen, Luchterduinen, De Blink, Coepelduynen, Vlaggenduin, Berkheide, waarbij opvalt dat de Zuid-Hollandse duinen hier het meest zijn vertegenwoordigd.

5.4.5 Conclusies m.b.t. proces en nader onderzoek

- Afstand vanaf de kust speelt een rol wanneer er vanuit een dynamische zeereep zand over de achterliggende duinen stuift. Hoe dichterbij de kust, hoe groter het effect van het instuivende zand dan is. Bij verder van de kust gelegen gebieden, waar geen effect van een dynamische zeereep merkbaar is, heeft afstand vanaf de kust nog weinig invloed. In combinatie met hoogte lijkt er wel enig effect te zijn.
- Hoogte en hoogte in combinatie met afstand geeft een hogere windstress. Wanneer hoge duinen op korte afstand achter de zeereep liggen, en daar bovenuit steken, lijkt er wel een groter effect van windstress op te treden. Bij hogere duinen speelt sowieso dat de belasting van de wind op het oppervlak, aan de bovenkant van de hellingen, groter is dan bij lagere duinen.
- Expositie op het zuiden geeft meer droogtestress en een grotere gevoeligheid voor watererosie. Waarschijnlijk is bovenaan de helling het effect sterker, hier erodeert alleen maar zand van het oppervlak en komt geen zand van bovenaf ingespoeld, terwijl lager op de helling juist colluvatie kan optreden en zaad afgezet, wat stabilisatie bevordert.
- Over verspreiding van hydrofobie, regionale variatie, ruimtelijke variatie en temporele variatie is nog weinig bekend. Hydrofobie is waarschijnlijk een zeer belangrijke factor in het optreden van watererosie, en daarmee in het creëren van aangrijpingspunten voor de wind. Aanvullend onderzoek is gewenst.

5.5 Effect van stikstof en zwaveldepositie

Uit de verstrekte gegevens blijkt dat de depositie van stikstof en zwavel enorm is afgenomen. De kleuren op de kaarten zijn zodanig gekozen dat de verschillen optimaal duidelijk worden. Figuur 5-13 toont de afname in SO₂-depositie. In 1981 was die nog zeer hoog. In 2000 waren alleen aan de Hollandse kust vanaf IJmuiden tot Hoek van Holland en aan de zuidkust van Walcheren de deposities nog redelijk hoog. In 2015 is de depositie zodanig afgenomen dat er geen verschillen langs de kust meer waarneembaar zijn. Het is de vraag of een afname in SO₂-depositie gevolgen kan hebben voor de ontwikkeling van stuifkuilen.

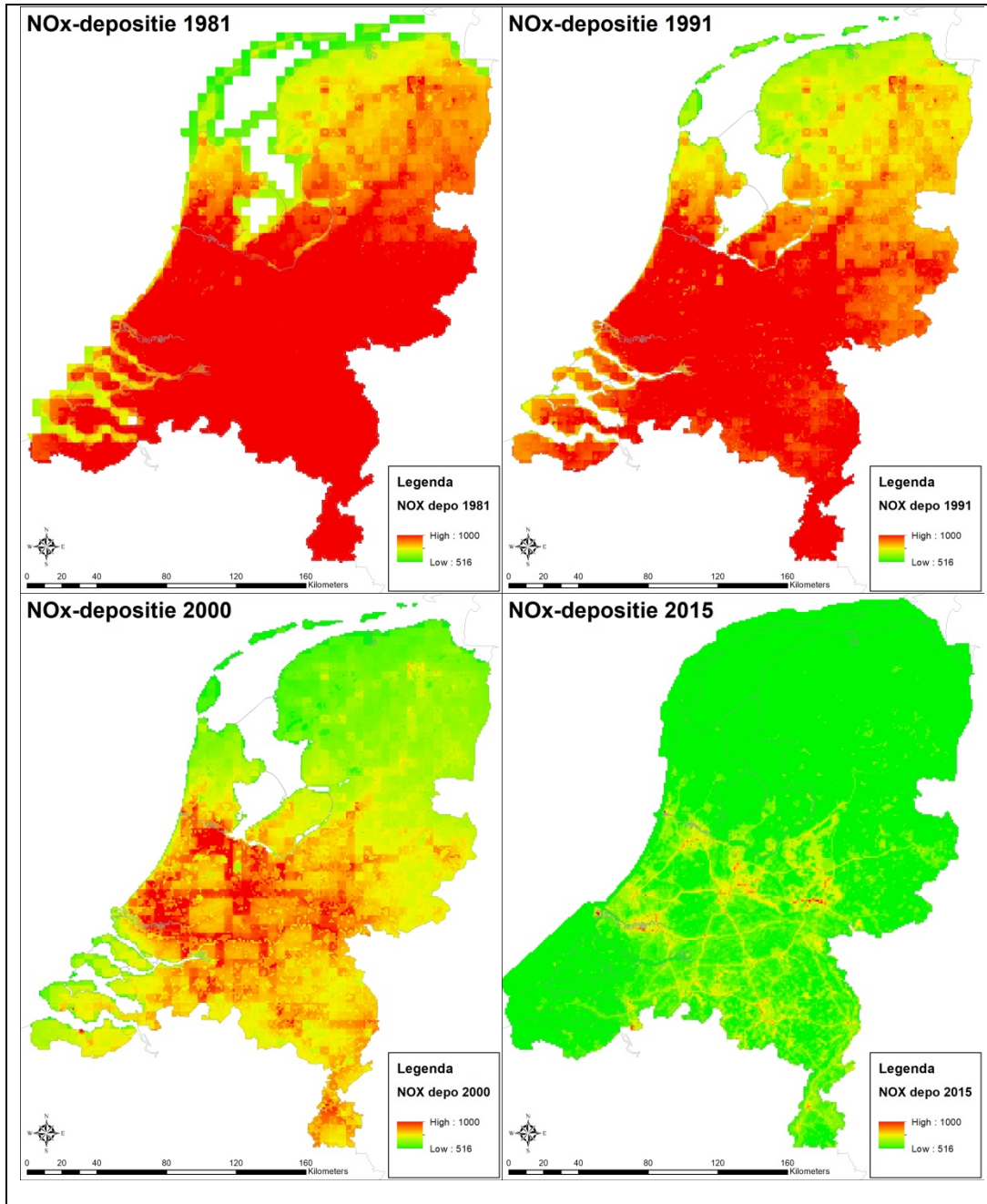


Figuur 5-13. Afname in SO₂-depositie tussen 1981 en 2015. Waarden in mol/jaar/ha. Bron: RIVM.

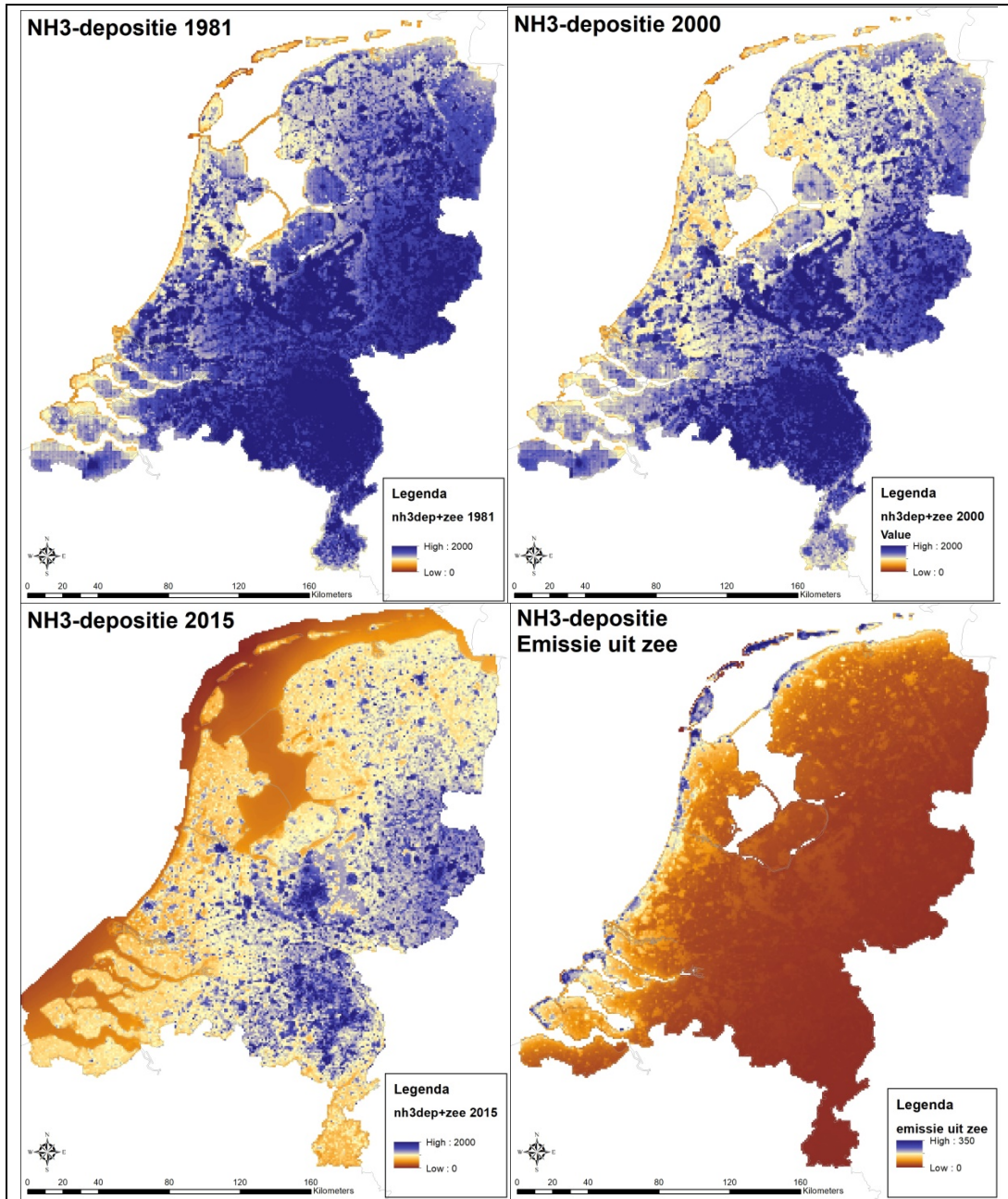
Figuur 5-14 toont de afname in NO_x-depositie. De afname is minder extreem dan die voor de SO₂-depositie, maar de patronen zijn wel vergelijkbaar. De hoogste waarden zijn in 1981 tussen de 1000 en 1260 mol/ha in Noord-Holland tussen Duin- en Kruidberg en Kraansvlak en in Zuid-Holland tussen Vlaggeduin en Solleveld, de laagste in Camperduin met 411 mol/ha. De grootste afname is in de Delta tussen 1981 en 2000 en daarna langs de Hollandse kust tussen 1981 en 2000 en vervolgens 2000-2015 tot waarden die schommelen tussen de 262 en 602 mol/ha. Depositie op de Waddeneilanden was al laag en is in 2000 al op het laagste niveau gekomen. De afname in depositie is niet overal constant. Bijvoorbeeld langs de Hollandse kust neemt de depositie vanaf 1981 af, maar daarna weer toe tot een nieuwe piek rond 1991 (overigens iets lager dan de waarde in 1981). In Duin- en Kruidberg neemt de waarde pas vanaf 2000 gestaag af.

Figuur 5-15 toont de veranderingen in NH₃-depositie. Zowel patronen van depositie als veranderingen zijn complexer dan voor de NO_x-depositie. Daarbij komt dat er een bron voor NH₃-emissie uit zee is, die als constant in de tijd wordt beschouwd (bij gebrek aan gegevens), maar ruimtelijk wel aanzienlijk varieert. Voor de emissie uit zee is er een regionaal patroon wat overeenkomt met de gesignaleerde veranderingen in dynamiek. Langs de Hollandse kust tussen Duin- en Kruidberg en Meijndel is de emissie uit zee het laagst, op de Wadden en in de Delta het hoogst. De emissie uit zee bedraagt in 1981 grofweg 12-52% van de totale NH₃-depositie, in 2015 21-72%.

Voor de totale NH₃-depositie vallen de pieken op Schiermonnikoog en in het Westduinpark bij Den Haag op. Hier waren en zijn de waarden hoog, met in 2010-2012 zelfs extreme waarden van rond de 1700 mol/ha voor de noordkant van het Westduinpark bij Den Haag.



Figuur 5-14. Afname in NO_x -depositie tussen 1981 en 2015. Waarden in mol/jaar/ha. Bron: RIVM.



Figuur 5-15. Afname in NH₃-depositie tussen 1981 en 2015. Rechtsonder de emissie uit zee, NB voor deze kaart geldt een andere schaal. Waarden in mol/jaar/ha. Bron: RIVM.

Tabel 5-1. Kritische depositiewaarden (van Dobben et al., 2012)

habitatype	Omschrijving	KDW (mol N/ha/j)	Gevoeligheid
H2110	Embryonale duinen	1429	Gevoelig
H2120	Witte duinen	1429	Gevoelig
H2130A	Grijze duinen - kalkrijk	1071	Zeer gevoelig
H2130B	Grijze duinen - kalkarm	714	Zeer gevoelig
H2130C	Grijze duinen - heischraal	714	Zeer gevoelig
H2140A	Duinheiden met kraaihei – vochtig	1071	Zeer gevoelig
H2140B	Duinheiden met kraaihei – droog	1071	Zeer gevoelig
H2150	Duinheiden met struikhei	1071	Zeer gevoelig
H2160	Duindoornstruwelen	2000	Gevoelig
H2170	Kruipwilgstruwelen	2286	Gevoelig
H2180Abe	Duinbossen - droog, eiken-berkenbos	1071	Zeer gevoelig
H2180Ao	Duinbossen - droog, overig	1429	Gevoelig
H2180B	Duinbossen - vochtig	2214	Gevoelig
H2180C	Duinbossen - binnenduinderand	1786	Gevoelig
H2190Aom	Vochtige duinvalleien - open water, oligotroof-mesotroof	1000	Zeer gevoelig
H2190Ae	Vochtige duinvalleien - open water, (matig) eutroof	2143	Gevoelig
H2190B	Vochtige duinvalleien – kalkrijk	1429	Gevoelig
H2190C	Vochtige duinvalleien - kalkarm	1071	Zeer gevoelig
H2190D	Vochtige duinvalleien - hoge moerasplanten	>2400	Minder/niet gevoelig

Zie voor de resultaten van de multivariate analyse hoofdstuk.

5.5.1 Conclusies stikstofdepositie

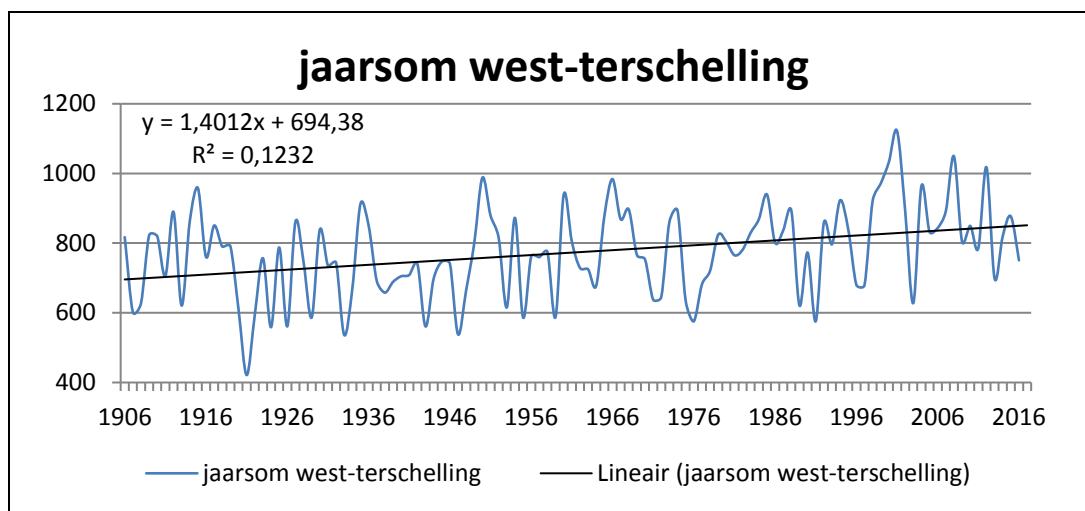
- Aanvankelijk hoogste deposities van grofweg Castricum tot Solleveld. Daar sterkste afname.
- Overal geleidelijke afname.
- Schiermonnikoog blijft hoog.
- Emissie uit zee niet te onderschatten, ruimtelijk patroon, met hoge waarden in Delta en op Wadden, langs Hollandse kust laag.
- Temporeel patroon emissie uit zee niet bekend.
- Patroon van kleinschalige dynamiek (toename Hollandse kust, afname Delta en Wadden) is omgekeerd evenredig met patroon van emissie uit zee, en evenredig met afname van depositie in tijd.
- KDW nog overschreden voor groot aantal habitattypen, vooral op Wadden
- Afname van stikstofdepositie lijkt langs Hollandse kust wel zijn vruchten af te werpen, in het kalkarme duin niet.

5.6 Effect van meteorologie

Om de relatie tussen meteorologische variabelen en verstuiving tot in detail te onderzoeken, vergt een inzet die dit onderzoek ver te boven gaat. Omdat voor gegevens over verstuiving bovendien slechts twee tijdstippen zijn onderzocht, is een meer correlatief onderzoek bovendien niet mogelijk. Daarom is vooral kwalitatief onderzocht of er relaties bestaan tussen verschillende meteorologische variabelen en de gevonden patronen in verstuiving en ontwikkeling daarvan.

5.6.1 Neerslag

De gebruikte neerslagstations, weergegeven in Figuur 5-2, zijn van noordoost naar zuidwest: Schiermonnikoog, Nes Ameland, Hollum Ameland, **Hoorn-Terschelling**, Formerum, West-Terschelling, Oost-Vlieland, Vlieland, Cocksdorp, de Koog, Den Burg, **De Kooy**, Callantsoog, Petten, Bergen, Castricum, Wijk aan zee, Beverwijk, Overveen, Zandvoort, Katwijk aan de Rijn, **Valkenburg**, **Hoek van Holland**, Oostvoorne, Goedereede, Ouddorp, Brouwershaven, Haamstede, Vrouwenpolder, Westkapelle, **Vlissingen**, Breskens, Cadzand. Dikgedrukt zijn de locaties waar zowel een neerslagstation als een KNMI-station aanwezig is, en waar dus twee waarnemingen beschikbaar zijn (NB hoewel de naam suggereert dat het om dezelfde locaties gaat, zijn ze wel geografisch verschillend). Van al deze stations zijn dagsommen beschikbaar, die lopen van 8 uur tot 8 uur de volgende dag. Voor West-Terschelling is er een tijdreeks beschikbaar vanaf 1906. Deze laat een toenemende neerslag zien, met lage R^2 (0.12) maar zeer significant (P-waarde 0.000159). Hoewel de jaarsom van de neerslag uitermate variabel is, is er dus wel een significante stijging. Dit is al eerder aangetoond door o.a. Van Boxel & Cammeraat, 1997.



Figuur 5-16. Trend in neerslag in de 20e eeuw voor West-Terschelling.

Een stijging van de neerslaghoeveelheid per jaar is niet direct gunstig voor het optreden van winderosie. Immers, hoe vochtiger, hoe moeilijker het zand transport door de wind verloopt. In eerste instantie zou verwacht worden dat een toename van de jaarsom van neerslag gecorreleerd zou zijn aan een afname van de hoeveelheid zandtransport.

.1 Jaarsommen

De jaarsommen voor de verschillende stations van 1954 t/m 2016 zijn weergegeven in Figuur 5-17. Door conditional formatting te gebruiken ontstaat snel inzicht in de verschillen in ruimte en tijd. De jaarsommen variëren van 435mm in Vlissingen, 1976 tot 1326mm in Beverwijk, 1998. Er is een opvallend regionaal patroon, met een scheiding bij Petten en Goedereede. Het lijkt er voor wat betreft de jaarsommen op dat het Wadden-district zich van Schiermonnikoog tot Petten uitstrekt, de Delta vanaf Goedereede naar het zuiden, en de Hollandse kust daar tussenin. De Hollandse kust

In Figuur 5-17 zijn de KNMI-stations niet meegenomen. De jaarsommen hebben bij de KNMI stations iets lagere waarden dan bij de neerslagstations. Overigens zouden de regio's iets anders ingedeeld moeten worden. Uit 5-17 blijkt opnieuw dat er een driedeling is met een scheiding bij Petten en één bij Goedereede.

De jaarsommen voor de periode maart t/m september (niet in de figuren) tonen een vergelijkbaar patroon, maar toch zijn er verschillen. Ameland is opnieuw opvallend nat op de Wadden, Schiermonnikoog ook een beetje. De grens tussen de Delta en Hollandse kust is niet meer zo duidelijk. Het verschil zit weer vooral in de trend die voor de Delta duidelijk toenemend is, maar voor de Hollandse kust eerst afneemt, dan weer toeneemt. De Hollandse kust is voor deze periode ook het natst. Ameland past hier overigens goed bij (bij jaarsommen is Ameland nog een stukje droger dan Hollandse kust).

Jaarsommen voor periode juli+augustus (Figuur 5-18) tonen een zeer opvallend patroon in de tijd, met nattere omstandigheden 1954 en 1956 en 1957-1966, veel drogere van 1967-1986 (West-Terschelling tot Petten zelfs tot 1996), en dan weer een stuk natter, met name vanaf 2004. Ook nu springen Ameland en Schiermonnikoog eruit met vergelijkbare hoge waarden als Hollandse kust. Er is nu geen duidelijke continue trend in de tijd voor enig station, maar fluctuaties in de orde van enkele tot een tiental jaren.

.2 (Voorjaars)droogte

Een langdurige droge periode kan tot gevolg hebben dat het transport van zand door de wind veel efficiënter verloopt. Als de temperaturen, en daardoor verdamping, wat hoger zijn is de mate van uitdroging ook sterker. Minder neerslag in de zomer- of voorjaarsmaanden zal dan meer effect hebben dan minder neerslag in de wintermaanden. Bovendien kan een droge periode leiden tot verdroging van de vegetatie en daarmee een toename voor gevoeligheid voor winderosie.

Eerst is onderzocht aan de hand van station Valkenburg hoe het verloop van neerslag per maand-jaar is, door een kruistabel te maken met een matrix van jaar en maand en de maandsom van neerslag.

Maanden die relevant lijken zijn april t/m mei (misschien ook juni?). Waarschijnlijk gaat het vooral om een langdurige droge periode, en maakt het op zich niet zo veel uit wanneer zich die voordoet, behalve dat er in maart en april vaak wel meer wind is dan in juni t/m september.

	jan	feb	maart	april	mei	juni	juli	aug	sept	okt	nov	dec	jaar
1973	31.2	56.6	14.4	66.4	61.7	40.1	95.8	37.6	124.9	99.6	90.1	48.9	767
1974	48.8	43.1	54.8	15.7	24.1	59.6	75.7	57.1	174.3	189.6	98.6	70.0	911
1975	94.1	17.6	77.5	54.2	34.1	52.7	46.6	37.4	92.3	22.1	100.3	49.2	678
1976	69.6	18.7	26.0	3.8	14.2	34.7	34.9	10.2	89.8	62.3	69.7	79.3	513
1977	78.6	76.9	42.8	45.0	31.9	39.9	26.1	98.5	13.2	54.2	165.3	45.8	718
1978	49.4	26.9	56.7	39.7	23.6	64.6	83.2	59.5	79.8	35.3	59.2	91.3	669
1979	40.8	52.5	109.0	66.6	141.2	65.4	28.0	66.0	44.5	42.6	99.0	143.8	899
1980	59.2	47.3	74.0	37.8	8.1	96.0	101.7	41.5	24.1	78.1	63.0	101.5	732
1981	89.4	28.7	112.2	16.2	95.3	68.8	66.9	23.2	49.9	165.4	73.7	71.3	861
1982	42.0	19.2	63.9	22.5	24.5	96.3	22.0	93.3	38.6	149.3	76.3	79.5	727
1983	70.4	22.5	66.6	84.6	108.7	24.7	5.9	10.2	158.3	56.2	83.2	56.4	748
1984	134.7	58.0	53.0	14.1	68.6	64.3	52.1	26.7	164.6	91.3	67.8	50.3	845
1985	71.8	2.4	69.7	56.5	50.5	128.9	97.6	88.1	49.1	45.7	92.1	90.5	843
1986	113.4	1.0	64.3	48.4	72.7	44.3	48.3	93.1	44.5	111.5	94.5	107.6	844
1987	34.8	21.6	70.1	25.1	76.3	105.3	175.3	101.5	63.2	92.1	107.1	41.2	913
1988	160.4	83.0	107.9	18.6	40.4	14.8	106.9	118.2	91.6	71.3	66.0	52.9	932
1989	17.4	55.1	83.7	65.8	7.6	74.2	38.7	41.1	69.6	91.6	34.3	94.3	673
1990	47.9	107.3	26.6	55.2	14.8	76.6	25.0	66.0	111.2	60.5	104.1	45.0	740
1991	48.3	37.3	24.9	32.8	30.3	110.8	108.3	12.9	92.9	46.7	107.4	34.3	687
1992	33.9	22.8	71.3	44.1	44.6	77.9	56.0	166.7	42.3	118.8	101.5	61.8	842
1993	67.2	17.9	9.3	41.6	34.9	59.3	153.3	59.6	158.5	72.2	58.1	138.4	870
1994	75.3	28.5	71.8	96.5	44.3	37.1	25.0	47.2	153.2	137.9	33.0	110.1	860
1995	132.5	84.9	81.5	27.6	31.5	44.6	89.3	22.4	91.7	19.0	36.4	40.6	702
1996	6.8	58.7	16.0	4.5	45.1	25.5	31.8	91.2	55.7	87.6	175.9	37.1	636
1997	4.1	67.2	25.6	22.3	75.5	88.6	42.6	52.3	30.0	93.7	47.8	70.6	620
1998	90.1	17.8	92.4	110.1	28.7	141.9	46.3	79.4	163.5	141.8	104.5	73.1	1090
1999	80.7	55.3	87.0	64.4	29.3	77.4	36.7	106.9	91.8	126.9	87.9	156.1	1000
2000	39.3	99.1	54.9	49.1	94.2	37.0	70.5	29.2	91.8	155.2	211.8	97.1	1029
2001	84.3	101.8	64.3	82.0	33.3	38.7	59.6	164.7	238.8	37.9	90.2	86.9	1082
2002	67.6	120.3	35.3	55.8	38.5	65.5	67.7	127.1	47.3	86.6	104.3	77.9	894
2003	83.3	21.2	9.9	39.8	74.2	36.9	47.8	11.5	70.6	94.4	75.1	95.6	660
2004	107.0	72.7	49.2	41.3	24.1	48.8	121.0	215.8	91.5	61.9	79.0	50.7	963
2005	55.1	59.6	43.9	65.5	38.0	44.8	99.1	94.2	88.5	63.5	112.3	69.8	834
2006	15.6	62.4	72.3	33.9	95.9	37.7	15.8	190.5	17.9	123.8	94.6	96.5	857
2007	94.9	77.5	81.1	0.3	112.5	105.8	166.6	35.0	92.2	22.3	52.8	74.3	915
2008	99.4	29.9	112.2	33.1	51.4	20.0	163.5	113.5	72.8	113.2	96.6	91.6	997
2009	52.9	44.9	40.4	18.4	99.5	42.3	93.2	46.4	45.4	69.3	150.4	102.1	805
2010	43.6	80.7	43.5	24.9	65.4	18.1	54.7	200.8	109.7	98.7	107.1	51.8	899
2011	69.7	73.8	13.7	7.3	15.3	93.1	174.8	126.0	55.7	57.8	4.4	125.0	817
2012	65.3	19.1	22.3	58.3	52.8	67.3	113.9	97.4	97.7	123.5	58.7	124.0	900
2013	53.2	31.3	38.9	19.8	79.1	65.6	38.9	25.3	108.1	164.1	116.4	69.8	810
2014	105.1	78.2	31.1	30.8	92.1	35.5	78.2	129.0	11.3	73.7	51.1	85.1	801
2015	97.3	59.5	47.1	20.3	46.0	22.1	70.4	135.4	104.7	25.7	148.2	45.1	822

Figuur 5-19. Kruistabel maandelijkse neerslag voor Valkenburg. Maandsom in mm. Spreadsheet Neerslag_NL_kust. Rood=droger dan gemiddeld, blauw=natter dan gemiddeld.

Figuur 5-18 geeft de maandsommen, onderliggende data zijn de dagsommen van KNMI-station Valkenburg. Deze kruistabellen zijn voor alle neerslag- en KNMI-stations gemaakt. De figuur toont duidelijk dat het voorjaar (globaal de eerste helft van het jaar) droger is, met april als droogste maand. In sommige jaren komen meer droge maanden achter elkaar voor, bijvoorbeeld 1976, 1983, 1996, 2011. Ook is zichtbaar dat de zomerneerslag toeneemt, met een steeds nattere juli en vooral augustus. De jaren 1998-2001 springen er uit met een jaarlijkse neerslag van meer dan 1000mm.

Voorjaarsdroogte zou een verklaring kunnen zijn voor de toenemende dynamiek van 2000-2014. Voorjaarsdroogte komt echter ook op de Waddeneilanden voor en heeft daar dan blijkbaar geen gevolgen voor de dynamiek (m.u.v. Texel). Dit geeft aan dat er meer factoren van belang zijn. De meer gesloten vegetatie op de Waddeneilanden, met vaak een gesloten dek van Kraaiheide, speelt daar waarschijnlijk een rol bij.

In Figuur 5-20 zijn per jaar en per station de sommen voor de neerslag in maart t/m juni weergegeven. Vergeleken met Figuur 5-17 zijn er enkele verschillen die mogelijk

van belang zijn. De regionale variatie voor maart-juni is kleiner dan die voor de jaarsommen. Sinds 2003 is er een opvallend ander patroon met langs de gehele kust lage waarden voor maart-juni. Terwijl voor de jaarsommen vanaf 2003 de waarden "normaal" zijn, zijn de sommen voor maart-juni voor 6-7 van de 14 jaren beduidend lager en is het voorjaar dus droger.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33		
1954	148	142	117	137		147	141		156	134	126		132	113	157	192	177		201	177	162			177		186	199	173	192	194	234		178		
1955	187	155	169	180		159	139		151	166	162		138	151	174	172	185		186	188	155			156		151	146	151	163	143	155		160		
1956	165	148	172	140		130	107	72	121	142	130		121	132	146	166	159		156	141	134			119	47	110	120	106	111	112	138		147		
1957	144	136	100	102		103	106	113	118	114	115		109	104	133	131	138		149	137	169			134	139	135	143	141	160	127	147		132		
1958	169	168	177	164		166	134	141	181	159	158		154	144	176	171	191		203	178	162			153	134	137	143	140	174	151	160		161		
1959	158	162	137	136		136	156	155	153	161	150		156	160	158	160	145		174	164	156			156	148	154	153	156	175	178	162		173		
1960	113	146	122	116		138	138	123	123	119	127		117	119	127	118	93		109	105	87			114	96	120	104	129	123	122	134		147		
1961	161	171	242	154		151	160	148	162	144	145		124	128	151	162	148		150	158	140			158	152	155	172	170	149	135	161		151		
1962	174	174	168	148		156	152	152	160	158	157		155	172	189	188	168		215	203	154			149	119	136	138	136	128	132	143		153		
1963	188	222	190	193		214	194	222	236	229	221		221	203	226	235	219		294	265	242			263	234	242	255	265	281	263	258		263		
1964	193	224	219	193		238	236	237	243	233	224		216	201	212	214	186		199	207	223			247	247	232	226	237	268	244	244		234		
1965	352	303	276	258		256	233	224	241	209	237		214	209	216	241	230		259	238	237			262	245	236	270	258	253	199	221		237		
1966	252	252	208	275		246	218	240	272	262	271		222	234	243	271	232		245	266	275			259	240	222	234	230	232	222	257		263		
1967	246	229	197	199		235	222	191	208	173	190		164	169	168	176	175		186	184	160	177		212	169	165	156	178	206	194	215		203		
1968	255	262	247	214		224	214	182	240	193	199		183	189	233	237	209		218	200	206	230		197	179	190	186	211	191	165	176		177		
1969	183	242	243	211		242	220	187	239	199	209		216	213	239	235	212		234	225	231	241		234	253	226	243	264	293	295	263		298		
1970	180	154	148	150		150	156	129	185	147	142		104	111	130	129	110		127	141	114	126		124	163	149	136	129	146	129	163		162		
1971	211	175	185	155		166	153	138	172	176	171		191	199	213	209	187		199	199	180	205	209	244	220	206	196	206	196	201	223		223		
1972	258	266	204	194		195	201	176	214	206	194	191	197	207	234	226	220		213	216	200	191	188	237	231	194	204	203	207	178	203		229		
1973	147	141	148	158		140	130	108	140	133	136	138	126	120	125	139	145		154	166	155	185	180	175	181	166	171	182	185	137	184		180		
1974	137	153	103	96		96	107	82	96	100	115	102	104	107	104	129	124		126	157	144	150	150	147	137	122	135	132	111	110	112		117		
1975	189	174	164	197		171	178	163	170	172	172	197	173	151	183	204	199		214	202	206	211	215	248	272	239	241	243	240	250	225		219		
1976	91	106	77	90		82	88	63	66	62	60	60	62	61	62	77	70		83	82	70	91	80	100	90	92	90	91	97	84	86		84		
1977	174	172	162	128		136	148	148	144	156	156	137	159	142	141	150	148		145	174	150	149	157	157	175	185	175	178	174	185	175	198		224	
1978	229	191	189	210		214	179	194	185	194	193	156	197	160	187	184	188		191	202	176	201	182	190	204	187	202	209	198	191	176	178		189	216
1979	315	296	265	264		263	244	263	277	277	278	296	318	304	345	385	371		378	375	331	371	380	358	361	326	333	330	360	394	347	324	326	323	
1980	147	224	201	142		143	130	131	137	142	146	154	179	146	159	158	208		223	192	217	211	156	189	180	199	184	168	181	161	202	185	188		
1981	187	203	231	249		200	185	181	167	219	224	214	254	221	268	276	299		283	320	281	328	298	311	320	308	323	335	326	288	316	331	339		
1982	220	226	209	218		220	192	196	174	171	194	224	211	159	193	176	157		168	176	185	208		167	151	141	173	181	163	194	203	229	286	236	
1983	343	342	309	341		275	275	275	284	282	297	273	326	277	334	356	304		304	353	325	352	348	310	322	318	298	295	304	271	254	250	275	282	
1984	216	240	213	233		230	204	230	212	218	229	232	242	202	217	222	212		215	208	209	216	208	208	207	191	184	196	188	194	187	201	203	196	
1985	237	273	270	255		284	264	238	244	239	248	248	243	228	283	236	226		234	266	268	289	300	268	281	256	250	226	272	286	265	303	309	306	
1986	196	172	159		168	148	164	161	179	183	209	191	199	156	174	180	186		173	207	195	233	247	244	261	206	227	246	231	228	217	231	233	241	
1987	233	221	199		193	192	187	206	201	219	237	187	203	175	210	210	213		222	262	241	279	273	269	256	259	243	247	270	267	253	301	308	302	
1988	199	204	140		164	154	160	164	173	144	169	161	214	196	199	170	165		171	188	182	207	193	218	209	204	187	182	204	175	183	183	223		
1989	204	217	185		177	177	173	182	204	197	162	190	237	198	224	232	228		248	268	244	271	250	243	238	223	215	226	230	211	208	201	226		
1990	159	192	203		169	174	203	196	202	204	146	178	201	185	185	189	162		165	178	165	172	169	123	150	153	132	146	149	126	157	160	180		
1991	210	194	160		168	178	181	182	183	190	164	204	213	188	249	208	226		225	255	242	207	211	189	198	194	180	210	202	193	204	198	241		
1992	225	250	252		286	270	280	299	304	263	243	236	285	253	227	264	219		234	234	212	245	248	226	288	254	245	252	287	231	268	246	245		
1993	170	133	117		118	111	136	169	154	169	142	146	163	144	136	144	163		173	170	154	154	149	150	175	188	148	155	166	160	183	137	160		
1994	270	299	263		258	227	229	235	218	214	199	217	251	249	237	273	251		286	254	229	248	244	222	214	212	217	222	256	223	236	222	250		
1995	259	293	251	230		250	203	212	197	209	220	198	209	234	201	206	206		198	212	196	195	199	205	172	184	156	179	171	189	175	184	178		
1996	118	123	118	128		128	130	112	99	90	93	88	95	89	91	106	108		95	97	101	86	93	93	88	80	81	76	80	110	120	101	111	134	
1997	232	234	293	244		232	205	175	173	190	199	187	210	193	205	231	220		193	199	199	184	227	229	268	222	207	214	179	238	291	284	264	256	
1998	293	292	303	253	259	251	284	246	275	264	274	289	326	376	396	418	405		417	373	338	357	394	391	364	336	287	335	278	296	250	323	312		
1999	212	241	253	254																															

3 Aantal droge dagen

Het aantal droge dagen is het aantal dagen zonder neerslag (RH=0). Er is een berekening gemaakt per station door het aantal opeenvolgende droge dagen te tellen. Er komen perioden van maximaal 45 opeenvolgende droge dagen voor (Zandvoort, 2007), 13-19 per jaar is gemiddeld. Er zijn enkele jaren die er uit springen: 1959, 1976, 1989, 1995-1997, 2003, 2007. Er is veel variatie.

Er is zoals verwacht een grote spreiding in de tijd. Interessanter is de geografische spreiding. Bijvoorbeeld voor 2011 is er een groot verschil op vrij korte afstand tussen Vlieland met 202 droge dagen tegen 158 droge dagen bij Formerum. Verder langs de kust fluctueert het ook flink, van 206 dagen in Hoek van Holland, 207 in Westkapelle, tot 164 bij Callantsoog en 179 bij Valkenburg. Dit soort verschillen kan goed tot verschillen in verstuiving aanleiding geven. Het patroon is echter dermate complex dat het niet zo maar vertaald kan worden naar verschillen in dynamiek. Bovendien is ook de combinatie met windsnelheid van belang. Een afname van dynamiek op Ameland zou wel verklaard kunnen worden aan de hoeveelheid droge dagen die vanaf 2003 steeds verder afneemt, voor Schiermonnikoog en Vlieland gaat dit echter niet op. Voor Texel zou het juist wel weer een verklaring kunnen geven voor de toename in dynamiek, omdat daar het aantal droge dagen vanaf 2000 hoger is dan daarvoor.

station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
alle maanden																																	
1954-1956	160	160	163	149		163	175		152	176	167		167	168	163	163	161		173	182	173		155		179	180	172	170	190	143		165	
1957-1966	150	166	143	152		147	169	158	122	154	148		164	158	157	145	165		152	147	166		146	162	172	160	164	158	169	157		155	
1967-1976	167	166	159	166		177	173	149	153	159	169		183	173	161	177	170	169	156	162	170		183	170	168	165	165	169	189	172		162	
1977-1986	187	146	165	147		166	176	118	158	147	139	160	154	159	171	172	172	163	159	160	172	165	202	172	166	168	205	157	175	192	166	149	156
1987-1996	192	182	173		152	185	181	131	160	152	159	168	164	165	176	193	187	182	175	175	181	181		183	183	163	200	174	179	186	168	193	176
1997-2006	168	174	161		147	165	177	152	148	177	166	158	176	153	146	163	173	161	170	166	162	164	186	159	181	158	186	174	170	161		175	179
2007-2016	173	145	144		150	157	181	178	169	173	163	162	153	149	150	167	179		165	171	167	165	194	166	185	178	180	163	182	163		175	181
maart-mei																																	
1954-1956	54	55	53	51		52	57		54	57	56		55	53	51	52	51		54	57	54		49		57	59	55	52	58	49		53	
1957-1966	45	50	43	44		45	50	45	36	44	44		49	47	46	43	48		44	44	48		44	47	49	47	46	46	48	45		45	
1967-1976	47	46	46	47		50	49	45	44	44	47		51	48	45	49	47	46	44	44	47		48	46	45	46	44	46	49	45		44	
1977-1986	51	40	47	44		47	49	35	43	40	39	43	40	42	43	46	44	41	42	41	44	40	50	42	42	42	49	39	43	47	39	39	37
1987-1996	55	54	53		47	55	51	41	48	45	47	48	48	48	52	56	53	53	50	51	53	52		51	52	48	55	50	51	52	47	54	49
1997-2006	49	51	48		45	48	50	44	44	52	49	46	51	45	44	47	51	50	49	49	48	46	53	46	51	45	52	47	47	43		47	47
2007-2016	55	50	47		48	50	57	56	54	54	52	53	51	47	49	53	56		54	55	53	53	58	54	57	55	56	53	57	52		54	56
juni-augustus																																	
1954-1956	47	44	48	46		49	47		41	48	43		47	47	44	43	44		45	49	48		44		50	50	50	49	53	41		48	
1957-1966	44	46	43	45		45	50	49	41	47	47		48	46	45	44	48		44	45	47		45	49	50	47	49	47	50	47		46	
1967-1976	54	54	54	56		57	58	52	53	56	58		58	58	52	55	55	55	51	55	56		55	57	54	56	55	56	60	54		54	
1977-1986	51	43	48	46		51	54	39	49	47	46	49	49	51	52	49	50	48	46	50	52	50	56	51	52	50	59	51	54	57	50	49	48
1987-1996	53	52	49		47	53	54	42	50	49	49	51	50	51	52	54	53	52	50	51	53	51		54	52	52	57	51	54	55	49	56	51
1997-2006	49	51	50		47	51	54	49	49	55	51	50	54	50	47	50	52	51	52	50	49	54	48	54	49	55	53	54	52		53	54	
2007-2016	47	42	43		46	46	50	49	48	49	45	46	45	45	43	46	49		45	49	47	44	52	46	50	49	49	47	50	49		48	47

Figuur 5-21. Gemiddeld aantal droge dagen per jaar per station, voor alle maanden (bovenste blok), maart-mei (midden) en juni-augustus (onderste blok). Stations: 1=Schiermonnikoog, 2=Nes Ameland, 3=Hollum Ameland, 4=Hoorn-Terschelling, 5=Formerum, 6=west-Terschelling, 7=Oost-Vlieland, 8=Vlieland, 9=Cocksdorp, 10=de Koog, 11=Den Burg, 12=De Kooy, 13=Callantsoog, 14=Petten, 15=Bergen, 16=Castricum, 17=Wijk aan zee, 18=Beverwijk, 19=Overveen, 20=Zandvoort, 21=Katwijk aan de Rijn, 22=Valkenburg, 23=Hoek van Holland, 24=Oostvoorne, 25=Goedereede, 26=Ouddorp, 27=Brouwershaven, 28=Haamstede, 29=Vrouwenpolder, 30=Westkapelle, 31=Vlissingen, 32=Breskens, 33=Cadzand.

	Wadden	Noord-Holland	Zuid-Holland	Delta		Wadden	Noord-Holland	Zuid-Holland	Delta
1954-1956	160	168	164	171	1954-1956	53	53	43	55
1957-1966	153	153	158	162	1957-1966	45	45	46	47
1967-1976	167	166	175	170	1967-1976	47	46	47	45
1977-1986	156	166	175	171	1977-1986	43	43	43	42
1987-1996	166	181	181	180	1987-1996	49	53	53	51
1997-2006	163	163	170	172	1997-2006	48	48	49	47
2007-2016	161	166	175	174	2007-2016	52	53	55	55

Figuur 5-22. Gemiddeld aantal droge dagen per jaar per regio, voor alle maanden (links) en voor maart-mei (rechts).

Regionaal blijken er wel degelijk duidelijke verschillen te zijn. Figuur 5-22 geeft het aantal droge dagen gemiddeld per regio (grens Wadden en Noord-Holland bij Petten,

grens Zuid-Holland en Delta bij Goedereede). Daaruit blijkt het aantal droge dagen in de Delta en Zuid-Holland structureel hoger te zijn dan op de Wadden en in mindere mate in Noord-Holland. 1989-1997 was een periode met veel droge dagen en 2003-2011 had vooral de Delta veel droge dagen. In maart-mei is er geen duidelijk verschil tussen de regio's, wel in de tijd.

.4 Natte dagen

De data bevestigen het KNMI-plaatje uit Figuur 5-23, namelijk dat de grootste hoeveelheid natte dagen (neerslag >10mm/dag) voorkomt langs de kust van Zuid-Holland (27) en de minste op de Waddeneilanden (22). Voor alle regio's geldt dat het aantal natte dagen per jaar is toegenomen, het meest in de Delta (+8) en het minst op de Wadden (+3).

station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33			
alle maanden																																				
1954-1956	22	18	17	19		18	18		18	17	18		19	17	21	18	21		23	20	19		19		16	19	16	17	15	15					11	
1957-1966	21	22	20	18		20	21	20	21	22	21		19	20	22	23	20		24	24	22		24	20	21	21	20	22	19	20					20	
1967-1976	20	21	19	17		18	18	14	18	18	20		18	18	20	21	18	19	20	18	20		21	18	16	17	19	18	17	17					18	
1977-1986	23	22	20	20		21	19	20	19	20	21	18	22	16	22	23	21	21	22	19	23	23	22	22	21	20	20	20	22	21	20	18	22			22
1987-1996	19	23	20		20	21	18	20	20	21	19	21	24	21	24	25	24	26	27	23	26	23		21	21	18	18	19	22	19	21	18	21			21
1997-2006	20	24	23	22		23	24	22	20	22	23	23	22	22	24	26	30	28	28	28	26	30	29	27	27	23	22	23	23	21	21	21	22			22
2007-2016	21	24	25	22		21	21	23	19	23	21	23	22	21	20	28	29	24		28	25	26	30	25	29	26	23	25	26	24	19	24	24			24
maart-september																																				
1954-1956	14	10	10	9		9	9		9	9	10		11	10	13	11	12		15	12	12		11		10	11	8	10	10	10					7	
1957-1966	12	12	11	10		12	12	12	11	12	12		10	12	14	13	12		14	14	13		13	12	12	13	11	13	11	11					11	
1967-1976	12	13	11	10		10	9	8	10	9	10		9	10	11	11	10	10	10	10	11		12	10	9	10	11	10	9	10					11	
1977-1986	13	12	11	11		11	9	9	10	10	10		9	10	9	11	11	10	10	11	9	11	12	11	12	10	10	11	11	11	11	11	11			11
1987-1996	11	13	11		10	11	9	10	10	11	10	11	13	11	12	13	12	13	15	13	14	13		12	12	11	10	12	10	13	10				11	
1997-2006	11	13	13	12		12	13	12	11	12	12	12	11	12	13	16	15	17	15	15	16	16	15	15	13	12	13	12	12	13	11	12	12			12
2007-2016	13	15	15	14		11	11	13	10	13	11	12	12	11	11	14	15	13		14	13	14	16	14	15	15	13	13	15	15	15	12	10	12		12
juli-augustus																																				
1954-1956	7	5	5	6		4	4		5	5	5		6	5	6	5	5		7	6	6		6		4	5	4	4	4	4	4				3	
1957-1966	6	6	5	4		5	5	5	5	6		5	6	6	5	5		6	6	6		5	5	5	6	5	5	5	4	5	4	5			5	
1967-1976	5	5	4	4		4	3	2	3	3	3		3	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5			5
1977-1986	4	4	4	3		3	4	3	3	3	3	3	4	3	4	3	3	3	3	2	3	3	3	3	5	3	3	3	4	4	4	3	3			3
1987-1996	4	5	4		3	4	3	4	4	4	3	4	4	4	5	4	5	6	6	6	5		5	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4			4
1997-2006	5	6	5	4		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	5	5	4	4	5	5	5	4	5	4	5		5
2007-2016	6	7	7	6		5	5	5	5	5	5	6	6	5	5	7	6	6		7	6	6	7	6	7	7	7	7	7	6	6	5	4	5	5	5

Figuur 5-23. Aantal natte dagen per station, voor alle maanden (boven), maart tot september (midden) en juli-augustus (onder). Stations: 1=Schiermonnikoog, 2=Nes Ameland, 3= Hollum Ameland, 4=Hoorn-Terschelling, 5=Formerum, 6=west-Terschelling, 7= Oost-Vlieland, 8=Vlieland, 9=Cocksdorp, 10=de Koog, 11= Den Burg, 12=De Kooy, 13= Callantsoog, 14=Petten, 15=Bergen, 16=Castricum, 17=Wijk aan zee, 18=Beverwijk, 19=Overveen, 20=Zandvoort, 21=Katwijk aan de Rijn, 22=Valkenburg, 23=Hoek van Holland, 24=Oostvoorne, 25=Goedereede, 26=Ouddorp, 27=Brouwershaven, 28=Haamstede, 29=Vrouwenpolder, 30=Westkapelle, 31=Vlissingen, 32=Breskens, 33=Cadzand.

	Wadden	Noord-Holland	Zuid-Holland	Delta		Wadden	Noord-Holland	Zuid-Holland	Delta
1954-1956	18	21	19	16	1954-1956	5	6	6	4
1957-1966	20	23	22	20	1957-1966	5	6	6	5
1967-1976	18	19	20	17	1967-1976	4	4	4	4
1977-1986	20	21	22	20	1977-1986	3	3	4	4
1987-1996	20	25	22	19	1987-1996	4	5	5	4
1997-2006	22	28	27	22	1997-2006	5	6	5	5
2007-2016	22	27	26	24	2007-2016	5	6	7	6

Figuur 5-24. Gemiddeld aantal natte dagen per jaar per regio, voor alle maanden (links) en voor juli+augustus (rechts).

Wat is hiervan het effect op watererosie? Natte dagen in de winter hebben vermoedelijk geen of minder effect op watererosie, omdat de bodem zo vaak bevochtigd wordt dat er geen of nauwelijks sprake is van hydrofobie (bijvoorbeeld Witter et al., 1991). Daarom is er ook nog het aantal natte dagen in de periode maart-september en de periode juli-augustus onderzocht. Voor watererosie is ook de mate van hydrofobie van belang, en deze is onder meer afhankelijk van de mate van uitdroging, die in juli en augustus het meest extreem zal zijn. Daarnaast is ook de

mate van bedekking van de bodem van belang. Bij een volledig bedekte erosie zal watererosie nauwelijks of geen rol spelen. Ook hier komt weer een patroon in de tijd uit naar voren, met voor sommige delen een continue, stijgende trend, voor andere een periode met dalende gevolgd door een periode met stijgende trend. Ook hier springen Ameland en in mindere mate Schiermonnikoog en Oost-Terschelling er uit met meer natte dagen dan gemiddeld voor de Wadden. De ruimtelijke scheiding ligt opnieuw bij Petten in het noorden en Oostvoorne/Goedereede in het zuiden.

Zuid-Holland dus extremer dan de rest, met een groter aantal droge dagen en een groter aantal natte dagen. De patronen zijn voor gehele jaar, maart t/m september en juli+augustus sterk vergelijkbaar, de contrasten worden alleen in juli+augustus wat groter.

.5 Neerslag intensiteit, door het jaar heen en zomers

Voor de KNMI-stations is behalve de uursom neerslag ook het deel van het uur dat het regent beschikbaar (in tienden). Hiermee is een soort van neerslagintensiteit te berekenen in mm per 6 minuten. Vervolgens is aan ieder uur een klasse toegekend volgens:

Klasse

0	0 mm/6 min
1	0-0.5 mm/6 min
2	0.5-1 mm/6 min
3	1-1.5 mm/6 min
4	1.5-2 mm/6 min
5	2-5 mm/6 min
6	5-10 mm/6 min
7	10-20 mm/6 min
8	20-30 mm/6 min
9	30-40 mm/6 min
10	40-50 mm/6 min
11	>50 mm/6 min

Voor intensiteiten klasse 6 en groter en klasse 7 en groter is per jaar-maand het aantal uren bepaald met een kruistabel. Het aantal uren met klasse 7 en groter is te klein om onderscheidend te zijn. Daarom is voor de analyse alleen het aantal uren met klasse 6 en groter onderzocht, dus neerslagintensiteiten die groter zijn dan 5mm in 6minuten. Dit is weer van jaar tot jaar onderzocht voor de volgende perioden:

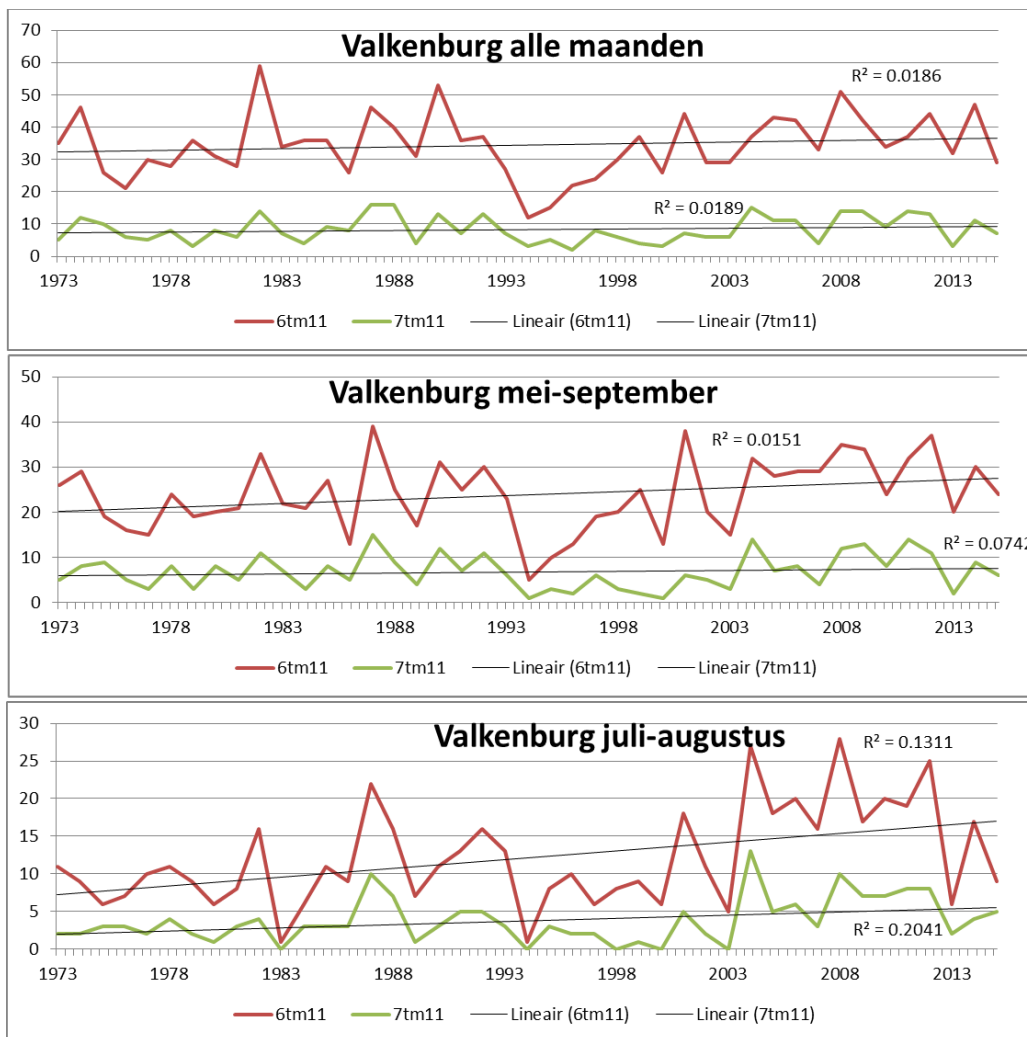
- Alle maanden
- Mei-september
- Juli-augustus

Deze analyse is uitgevoerd voor de beschikbare kuststations:

- Hoorn-Terschelling
- Lauwersoog (bij gebrek aan kuststations in het oostelijk Waddengebied)
- De Kooy
- Wijk aan zee
- Valkenburg
- Hoek van Holland
- Wilhelminadorp (bij gebrek aan kuststations in de centrale Delta)
- Vlissingen
- Westdorpe (bij gebrek aan kuststation in de zuidelijke Delta)

Westdorpe, Wilhelminadorp en Lauwersoog zijn geen kuststations, maar gebruikt om een betere ruimtelijke spreiding te krijgen, aangezien het aantal beschikbare gegevens in het Waddengebied en langs de Delta kust beperkt is.

Figuur 5-25 geeft een voorbeeld van de uitgewerkte gegevens voor Valkenburg. Voor dit station is er sinds 1973 sprake van een positieve trend in de verandering van de neerslagintensiteit, voor alle maanden, voor mei t/m september en voor juli+augustus.



Figuur 5-25. Trends in neerslagintensiteit. Voorbeeld voor Valkenburg. CA: is is ook een meer jarig fluctuerend patroon!

Voor de verschillende stations zijn de resultaten:

- Lauwersoog positieve trend voor alle drie perioden.
- Hoorn (Terschelling) positieve trend voor alle drie perioden, sterke trend voor juli+augustus.
- De Kooy negatieve trend voor alle maanden en mei-september, zeer licht positief voor juli+augustus.
- Wijk aan zee negatieve trend voor alle drie de perioden. Dit station wijkt af van de andere stations.
- Valkenburg positieve trend voor alle drie de perioden, sterk positieve trend voor juli+augustus.
- Hoek van Holland negatieve trend voor alle maanden en mei-september, positieve trend voor juli+augustus.
- Wilhelminadorp positieve trend voor alle drie de perioden, sterk positieve trend voor juli+augustus.
- Vlissingen negatieve trend voor alle maanden, geen trend voor mei-september, zeer licht positieve trend voor juli+augustus.
- Westdorpe positieve trend voor alle drie de perioden.

Voor Vlissingen, de Kooy en Wijk aan zee is er geen duidelijke toename van neerslagintensiteit in de zomermaanden, voor de andere stations wel. Hoorn, Valkenburg, Wilhelminadorp kennen zelfs een sterk positieve trend. Voor Lauwersoog, Hoorn, Valkenburg, Wilhelminadorp en Westdorpe is de trend voor alle drie de perioden positief.

Ook dit kan geen verklaring bieden voor de gesignaleerde regionale verschillen in (ontwikkeling van) dynamiek. De positieve trend in Zuid-Holland betekent wel weer een extra factor die bij kan dragen aan het toenemen van dynamiek.

5.6.2 Wind

.1 *Transport berekeningen uit windsnelheid en richting*

Voor de kuststations waar urengegevens voor beschikbaar zijn (zie Figuur 5-3. Gemiddelde jaarlijkse windsnelheid. Overgenomen uit Klimaatatlas KNMI. <http://www.klimaatatlas.nl/klimaatatlas.php>), zijn berekeningen van zandtransport per maand, gebaseerd op de urengegevens windsnelheid en richting t/m 2013. Deze staan per jaar in onderliggende spreadsheets. Hieruit is goed per station en per maand de windtransportkracht af te leiden, waarbij geen rekening is gehouden met neerslag, een belangrijke beperkende factor. Er is maar een beperkt aantal stations waarvoor urengegevens beschikbaar zijn, waardoor de regionale spreiding met name op de Wadden beperkt is (Hors Texel en Hoorn Terschelling). Wat dat betreft zou beter met daggemiddelden gewerkt kunnen worden, omdat dan veel meer stations beschikbaar zijn en er meer zicht ontstaat in de ruimtelijke variatie.

Zoals uitgelegd hierboven worden berekeningen gemaakt van de transportcapaciteit van de wind zonder windrichting (totale transportpotentieel, TP) en met windrichting (vectorberekening, netto of resultante transportpotentieel, RTP). De totale transportcapaciteit geeft een indruk van de hoeveelheid wind. Een onderlinge vergelijking van de verschillende stations is lastig (zie uitleg Bijlage 1), maar de resultaten geven wel een indruk van welke jaren windrijk zijn en welke niet.

Tabel 5-2. Resultaten van transportberekeningen voor KNMI-stations.

	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013			
Terschelling-Hoorn																																					
Texel Hoers																																					
De Kooy																																					
IJmuiden																																					
Valkenburg																																					
Hoek van Holland																																					
Goeree																																					
Oosterschelde																																					
Vlissingen																																					
Terschelling-Hoorn																																					
Texel Hoers																																					
De Kooy																																					
IJmuiden																																					
Valkenburg																																					
Hoek van Holland																																					
Goeree																																					
Oosterschelde																																					
Vlissingen																																					
Terschelling-Hoorn																																					
Texel Hoers																																					
De Kooy																																					
IJmuiden																																					
Valkenburg																																					
Hoek van Holland																																					
Goeree																																					
Oosterschelde																																					
Vlissingen																																					
Terschelling-Hoorn																																					
Texel Hoers																																					
De Kooy																																					
IJmuiden																																					
Valkenburg																																					
Hoek van Holland																																					
Goeree																																					
Oosterschelde																																					
Vlissingen																																					
Terschelling-Hoorn																																					
Texel Hoers																																					
De Kooy																																					
IJmuiden																																					
Valkenburg																																					
Hoek van Holland																																					
Goeree																																					
Oosterschelde																																					
Vlissingen																																					

De resultaten van de transportberekening staan vermeld in Tabel 5-2. Resultaten van transportberekeningen voor KNMI-stations..

Transport potentieel (TP) per maand

De uitkomsten zijn redelijk consistent, met soms een verrassende variatie. De hoogste transporten worden berekend voor de wintermaanden. 1990 is voor een aantal stations het jaar met de hoogste TP. De perioden 1990-1994 en 1998-2000 zijn voor de meeste stations windrijke jaren. Vanaf 2003 is het TP aanmerkelijk lager. Een toename in dynamiek langs de Hollandse kust en op Texel vanaf 2000 kan dus in ieder geval niet verklaard worden door een toename in wind. Een afname van dynamiek op de Wadden zou er wel door verklaard kunnen worden, hoewel Hoorn-Terschelling juist net weer een ander beeld geeft met een minder duidelijk verschil tussen 1995-2002 en 2003-2013.

Onderlinge vergelijkbaarheid van de berekende TP's is niet direct mogelijk in verband met keuzes voor de ruwheidslengte. Waarden voor Texel zijn onwaarschijnlijk hoog, waarden voor Terschelling, Valkenburg en Vlissingen zijn waarschijnlijk ook te hoog. Het is wel te verwachten dat de waarde voor Texel het hoogst is, omdat gemiddeld de windsnelheid op de Wadden hoger is dan in de rest van Nederland (zie Figuur 5-3), en omdat de windmeter op Texel op een strandvlakte staat, met open ligging naar alle windrichtingen. Dit is voor Oosterschelde en Lichteiland Goeree, waar de meters op zee staan overigens ook het geval. Desondanks zijn de waarden voor Texel circa twee keer zo hoog als de waarden voor Oosterschelde en Goeree, wat niet realistisch is.

Wanneer de gegevens allemaal onder elkaar worden gezet valt op dat er wel duidelijke regionale verschillen zijn m.b.t. het Transport potentieel. In de jaren 1980 is het TP variabel met opvallend lagere cijfers voor Goeree en Hoek van Holland en met 1987 en 1989 die er algemeen uitspringen als laag. 1983 heeft een hoge waarde, 1986 hoog m.u.v. Hoek van Holland en LE Goeree en 1988 hoog in de noordelijke helft van het land. De waarden voor de jaren 1990 zijn minder variabel met hoge waarden van 1990-1995, lage waarden voor 1996-1997, hoge waarden voor 1998-2000. Alleen voor 1998-2000 neemt TP voor de Hollandse kust geleidelijk af, voor Delta en Terschelling niet. Dan zijn de waarden voor de jaren 2000 over het algemeen laag, met uitschieters voor 2007 en 2008 op de Wadden en Goeree en voor 2011 een hogere waarde in noordelijke helft. Toename in dynamiek langs Hollandse kust tussen 2000 en 2011 kan dus niet verklaard worden door een toename in wind. Terschelling valt wel op met 2007-2008, dit zou een (extra) trigger kunnen zijn voor de toenemende dynamiek bij Formerum. In ieder geval verklaart de wind op de Wadden niet de afname in dynamiek. Mogelijk biedt het wel een verklaring voor een afname van dynamiek halverwege jaren 1990, omdat vanaf dan TP duidelijk lager is.

RTP

Voor RTP, dus rekening houdend met de richting, zijn de resultaten vergelijkbaar met hierboven. Jaren met overall lage waarden zijn 1987, 1989, 1996-1997, 2001, 2005, 2009-2010, 2013. Jaren met overall hoge waarden zijn 1983, 1990, 1994, 1998. Dit biedt niet echt een verklaring voor regionale verschillen in dynamiek.

Het is de vraag of het zinvol is voor de ontwikkeling van stuifkuilen rekening te houden met de windrichting. Op zich kan wind uit iedere richting zand opnemen in een stuifkuil en over de rand afzetten, en zal het zelden of nooit gebeuren dat zand wat uit de kuil gewaaid is, weer terug waait. Iedere wind kan dan bijdragen aan het kaal houden van het oppervlak door winderosie. De richting is wel van belang in verband met de afremming van de wind. Wind direct uit zee komt minder geremd aan dan wind die parallel aan de kust waait.

Richting van transport

Hier zijn niet echt verschuivingen in te zien. De effectieve richting is op Wadden t/m de Kooy en Vlissingen wel meestal wat zuidelijker dan langs de Hollandse kust t/m Oosterschelde. 1996 springt eruit met voor vrijwel alle stations een behoorlijk afwijkende windrichting.

RTP/TP

Er zijn twee groepen te onderscheiden, maar geografisch gezien zijn het er vier. Terschelling, Texel, Hoek van Holland, Goeree en Oosterschelde hebben een lagere ratio, De Kooy, IJmuiden,

Valkenburg, Vlissingen een hogere. 1996 en 2010 wijken behoorlijk af van de rest, met zeer lage ratio's.

5.6.3 Conclusies meteorologie

.1 Jaarsommen (januari t/m december)

Er is een trend in toenemende neerslag in de afgelopen eeuw, maar dit geldt niet voor Schiermonnikoog en Vlieland. Langs de Hollandse kust is er rond 1970 sprake van een tijdelijke afname van de jaarsom. Er is kustlangs een behoorlijke variatie in de jaarsom, de scheidingen liggen bij Petten en Goedereede. De Hollandse kust tussen Petten en Goedereede is natter, met hogere jaarsommen, vooral in de laatste decennia. Op de Wadden springt Ameland er uit met een hogere jaarsom, in de Delta springt Vlissingen er uit met een lagere jaarsom. 1998-2001 kent een serie heel natte jaren, langs Hollandse kust soms extreem, met bijvoorbeeld bij Beverwijk 1326mm in 1998!

Voor de periode maart t/m september is de variatie in jaarsommen iets anders. De grens tussen Wadden, Holland en Delta is minder duidelijk. Jaarsommen voor Ameland en Schiermonnikoog nu vergelijkbaar, en ook niet heel anders dan Hollandse kust.

Voor de periode juli+augustus is er een zeer opvallend patroon in de tijd, met nergens meer een duidelijke trend van toename, maar een golfbeweging. Er zijn droge perioden, van 1973-1985, 1989-1991 en 1994-2000. Augustus wordt wel natter.

.2 (voorjaars)droogte

Het voorjaar is vrijwel altijd droger, met april als droogste maand, daarna februari. De lengte van droge perioden is waarschijnlijk belangrijk. Er zijn verschillende langere droge perioden, 1996, 2003, 2011. De patronen zijn lastig te analyseren. In ieder geval is het duidelijk dat ook in deze variabele een flinke geografische spreiding zit en dat dit bij kan dragen in regionale verschillen in verstuiving.

.3 Aantal droge dagen

Er is een grote spreiding in ruimte en tijd, waarbij de spreiding in ruimte ook van jaar tot jaar varieert. Er zijn geen vaste regionale patronen zoals bij de jaarsommen. Sommige jaren hebben over de gehele, of bijna gehele kust een groot aantal droge dagen, zoals 1959, 1976, 2003. Mogelijk correleert dit met de langjarige periodiciteit van secundaire verstuiving, maar voor de inventarisatie van dynamiek zijn geen luchtfoto's ouder dan 1996 onderzocht. Andere jaren hebben langs een deel van de kust veel droge dagen, maar langs een ander deel weinig, zoals 1995-1997 met o.h.a. veel droge dagen, maar niet Hollum, Formerum, Vlieland en 2007 met veel droge dagen ten zuiden van Castricum, weinig ten noorden daarvan.

Sinds 2003 is het aantal droge dagen op Ameland en Terschelling en rondom de Kooy-Callantssoog lager dan elders, dit scheelt tot 50 dagen in een jaar. Voor maart-september zijn deze verschillen minder duidelijk en is vooral het aantal in de delta en op Vlieland-Texel hoger. Hetzelfde geldt voor maart-mei. Voor juni-augustus zijn de verschillen klein, maar springt Ameland er weer uit met relatief weinig droge dagen.

Dit soort verschillen kan goed tot verschillen in verstuiving aanleiding geven. Het patroon is echter dermate complex dat het niet zo maar vertaald kan worden naar verschillen in dynamiek. Een afname van dynamiek op Ameland zou wel verklaard kunnen worden aan de hoeveelheid droge dagen die vanaf 2003 steeds verder afneemt, voor Schiermonnikoog en Vlieland gaat dit echter niet op. Voor Texel zou het juist wel weer een verklaring kunnen geven voor de toename in dynamiek, omdat daar het aantal droge dagen vanaf 2000 hoger is dan daarvoor.

Wellicht zijn er verschillen in de exacte trigger voor verstuiving. Bijvoorbeeld langdurige droogte stress doet grassen en kruiden afsterven (1976 situatie) -> de wind krijgt daardoor meer vat op de bodem. Andere mogelijkheid: droogtestressperiode leidt niet tot afsterven van grassen en kruiden, maar maakt de bodem gevoelig voor watererosie. Sterke buien triggeren erosie van de bodem (2003 situatie?), vervolgens krijgt de wind er vat op.

.4 Aantal natte dagen

De overgang ligt ook bij deze variabele bij Petten en Goedereede. Daartussen is het aantal natte dagen per jaar groter dan ten noorden en ten zuiden. Het aantal natte dagen in Zuid-Holland

bedraagt 27 (meeste van NL) en op de Waddeneilanden 22 (minste van NL). Voor alle regio's geldt dat het aantal natte dagen per jaar is toegenomen, het meest in de Delta (+8) en het minst op de Wadden (+3), waardoor het verschil tussen Delta en Hollandse kust aanmerkelijk is afgenomen.

Dit betekent dat de kans op watererosie langs de Hollandse kust groter is. Hierbij is de aanname dat natte dagen ook dagen met veel watererosie zijn, wat niet per se zo hoeft te zijn. Ook dagen met minder neerslag kunnen voor watererosie zorgen. Het is in feite onbekend waar de grens ligt.

.5 Neerslagintensiteit

Voor Vlissingen, de Kooy en Wijk aan zee is geen duidelijke toename van de neerslagintensiteit in de zomermaanden waargenomen, voor de rest van de kust wel. Hoorn-Terschelling, Valkenburg, Wilhelminadorp kennen zelfs een sterk positieve trend. Voor Lauwersoog, Hoorn-Terschelling, Valkenburg, Wilhelminadorp en Westdorpe is de trend voor alle maanden, mei-september én juli+augustus positief.

Er is geen duidelijk regionaal verschil dat verklarend kan zijn voor verschillen in dynamiek. De verschillen zijn daar te klein voor. Het aantal uren met extreme neerslagintensiteiten is redelijk vergelijkbaar (Tabel 5-3).

Tabel 5-3. Aantal uren met hoge neerslagintensiteit (>5 mm/6min)

	alle maanden	mei-september	juli+augustus
Lauwersoog	27	21	12
Hoorn-Terschelling	30	21	12
de Kooy	30	19	10
Wijk aan Zee	30	20	12
Valkenburg	32	23	13
Hoek van Holland	31	22	13
Wilhelminadorp	27	21	11
Vlissingen	31	22	12
Westdorpe	30	23	13

.6 Transportvectoren

Er is een grote jaar tot jaar variatie. De transportcapaciteit is laag in 1996-1997, vanaf 2003 is er o.h.a. een periode met lagere capaciteiten i.v.t. de perioden 1980-1995 en 1998-2000. Hoeveelheid wind is dus zeker geen verklaring voor variatie in dynamiek

De effectieve richting is op de Wadden t/m de Kooy en Vlissingen meestal wat zuidelijker dan langs de Hollandse kust t/m Oosterschelde.

Voor de ratio RTP/TP zijn twee groepen te onderscheiden, maar geografisch gezien zijn het er vier. Terschelling, Texel, Hoek van Holland, Goeree en Oosterschelde hebben een lage ratio, De Kooy, IJmuiden, Valkenburg, Vlissingen een hogere. 1996 en 2010 wijken behoorlijk af van de rest, met zeer lage ratio's.

Een directe vergelijking tussen stations is lastig i.v.m. de parameters voor de gebruikte transportformule. Daarom zijn verschillen alleen te beoordelen a.h.v. derangorde van jaren (vanaf 1: jaar met hoogste transportcapaciteit omhoog). Door deze uitwerking is niet te zeggen wat de regionale variatie in transportcapaciteit is.

5.6.4 Conclusies m.b.v. winderosie

Puur op basis van de hoeveelheid wind is er geen verklaring voor de gesignaleerde toename in dynamiek langs Hollandse kust en ook niet voor de variatie van Hollandse kust en Texel tegenover overige Waddeneilanden en Delta. Berekende transporten zijn vanaf 2003 wel lager dan over de periode daarvoor, wat verklarend zou kunnen zijn voor een afname van dynamiek op de Wadden en in de Delta, maar voor het station Hoorn-Terschelling is het net weer anders. Dit biedt echter zeker geen verklaring voor de toenemende dynamiek langs de Hollandse kust en op Texel.

Neerslag als beperkende factor kent wel een zodanige variatie dat dit van invloed kan zijn op regionale variatie in verstuiwing. De Hollandse kust tussen Petten en Goedereede is natter dan ten noorden en ten zuiden daarvan. Ook Ameland is natter, Vlissingen is droger. Gemiddeld

genomen neemt de jaarsom van de neerslag toe, maar voor de Hollandse kust is het geen simpele lineaire trend vanaf 1950 maar is er ook een periode met afname. Voor Ameland zou een hogere jaarsom een verklaring kunnen zijn voor een lagere verstuivingsdynamiek, voor de rest van de kust is de correlatie eerder andersom, hogere jaarsommen meer verstuiving, lagere jaarsommen minder.

Droge periodes zijn ook variabel in ruimte en vooral in tijd. Een langere droge periode kan de aanleiding zijn voor nieuwe verstuivingen. Maar het patroon van variatie in ruimte en tijd is dermate complex dat het niet zo maar vertaald kan worden naar regionale verschillen in dynamiek. Voor Ameland zou een geringere hoeveelheid droge dagen aanleiding kunnen zijn tot een afname van verstuivingen, voor Texel zou een toename aanleiding zijn voor de toename in verstuivingen. Voor de andere kustdelen is er geen directe duidelijke relatie.

Toename van het aantal natte dagen zou ook een verklaring kunnen geven voor een afname van winderosie. Het maakt echter voor winderosie waarschijnlijk weinig uit of het op een dag veel regent of extreem veel regent, omdat winderosie dan sowieso niet meer optreedt. Het hoogste aantal natte dagen komt voor langs de Hollandse kust, waar de dynamiek juist toegenomen is. Het is daarom niet waarschijnlijk dat deze factor een beperkende rol speelt bij winderosie, daarentegen wel een versterkende rol bij watererosie, zie volgende paragraaf.

5.6.5 Conclusies m.b.t. waterosie

Het aantal natte dagen (dagsom neerslag groter of gelijk aan 10mm) kan van invloed zijn op de kans dat watererosie optreedt. Voor het optreden van watererosie zijn meer factoren van belang, o.m. expositie, hellingshoek, mate van hydrofobie en bedekking van het oppervlak.

Voor wat betreft het aantal natte dagen is aan de Hollandse kust ten zuiden van Bergen en ten noorden van Westkapelle en op Ameland de kans op watererosie het grootst. In de Delta is de kans t.o.v. de periode voor 1980 flink toegenomen.

Het is goed mogelijk dat het ontstaan van verstuivingen langs de Hollandse kust in ieder geval voor een deel bepaald is door een toegenomen (kans op) watererosie.

5.6.6 Overige conclusies

Wat waarschijnlijk doorslaggevend is voor het effect van meteorologische variabelen op verstuiving is een combinatie van factoren en daarnaast de opeenvolging in tijd van bepaalde omstandigheden. Hier valt nog veel over uit te zoeken. Hoewel voor de meeste variabelen nu uitgebreide datareeksen zijn opgesteld, is de vergelijking van verschillende factoren, en het verloop in de tijd nog helemaal niet onderzocht.

Een van de combinaties die uit de analyse van meteorologische variabelen naar voren is gekomen is een toename van het aantal droge dagen en een toename van het aantal natte dagen met $P > 10\text{mm}$ voor Zuid-Holland. Deze factoren zijn van invloed op zowel wind- als watererosie, en zouden elkaar kunnen versterken.

5.6.7 Aanbevelingen voor nader onderzoek

- Met meteorologische reeksen patroon in ruimte en tijd van droogtestress doorrekenen voor uiteenlopende situaties (bodem, expositie ect) en regio's; met vochtcondities van de bodem kun je ook optreden runoff afleiden.
- Verschillen in humusprofielen -> bv wadden zwaardere humusprofielen?
- Effecten van vegetatie op erosie gevoeligheid -> bv een gesloten kraaiheide weinig gevoelig.
- Ruimtelijke variatie van hydrofobie.
- Regionale variatie van hydrofobie.
- Grens van optreden van watererosie (dag- of uursom, neerslagintensiteit).
- Gedetailleerdere tijdreeksen verstuiving om meer punten in de tijd te krijgen (dus globale schatting van dyn opp voor een aantal – regionaal verspreide – gebieden). Bijvoorbeeld: fotoreeksen van Meijndel en Luchterduinen geven voor secundaire verstuivingen een fluctuerend patroon op een tijdschaal van decennia. Daar was helemaal geen eenduidige lange termijn trend.

5.7 Effect van konijnen

De beschikbare telgegevens bestrijken niet het hele land. Voor de Delta en Schiermonnikoog zijn geen telgegevens beschikbaar, voor Terschelling is er geen volledige tijdreeks. Interpretatie van konijnenactiviteit op luchtfoto's is er wel voor het hele land, en geeft ook een tijdreeks vanaf 1996. Op grond van de combinatie van telgegevens en luchtfoto-interpretatie is een inventarisatie gemaakt van het belang van al dan niet aanwezige konijnen op de ontwikkeling van dynamiek.

- Ameland: sectie 22.12, Westkop, sterk toenemend (70), 22.3 oost-Buurderduinen sterk fluctuerend toenemend (60), 22.6 en 22.7 midden gelijk en zeer weinig, rest matig toenemend, 30. Komt niet tot uiting in dynamiek. Nauwelijks actieve stuifkuilen en ook weinig verandering of afname.
- Terschelling: telling is duidelijk gestopt. Redelijke aantallen in sectie 20.5 (Koegelwiecksduin) en 20.6 (Oosterend), 25-60, in 2011, daarna afnemend in 2012, nu onbekend. Landerumerheide toename dynamiek door terreurbegrazing (expositie zuid- en zuidoosthellingen), Oosterend waarschijnlijk recreatie (expositie minder duidelijk). Weinig verband met konijnenstand. Maar het zijn wel ongeveer de locaties met veel konijnen in die tijd.
- Vlieland: extreme piek in sectie 1.2 (Kooisplek, Cranberryvlakte) in 2006, 102. Daarna nog hoog, maar wel afnemende trend tot 30. Andere secties 10-30, lijkt redelijk constant vanaf 2006. Komt niet tot uiting in dynamiek, want alle stuifkuilen zijn minder geworden.
- Texel noord: flinke piek in sectie 17.2 in 2014 met 25, daarna afnemend. Rest stuk minder, 5-10 en ook afnemend.
 - Bij sectie 17.1 en 17.2 (Eierlandsche duinen) kan toename dynamiek met konijnen samenhangen. Toename van hele kleine open plekje en ontstaan van stuifkuilen. Bij sectie 17.4 is het waarschijnlijk recreatie, langs pad. Bij 17.10-17.12 (De Nederlanden, Korverskooi, zie Figuur 5-26. Voorbeeld van toename van de konijnenstand, Texel, Korverskooi in 2014 (links) en 2015 (rechts).) zou de ontwikkeling ook met konijnen samen kunnen hangen. In 2007 meer kleine open plekje, in 2014 is een deel daarvan stuifkuil geworden, maar verder is het juist afgenomen.



Figuur 5-26. Voorbeeld van toename van de konijnenstand, Texel, Korverskooi in 2014 (links) en 2015 (rechts).

- Texel zuid: sectie 16.4, 16.6 en 16.7 nog hoog, tot 40, met zeer grote fluctuaties steeds en nu dus ook geen duidelijke trend, hoewel wel afnemend. Overduidelijk de zuidhellingen, is hier een extreme correlatie. Vegetatie wordt schraler, en dan komen er stuifkuilen in. Er lijkt een relatie te zijn tussen hogere aantallen in 2006 en 2010 en de toegenomen stuifkuildynamiek.
- Noordkop: gigantische piek in 2006, 180 in sectie 18.5. Vanaf 2006 gestage afname. Alleen sectie 18.9 stelt nu nog wat voor 5-20, maar ook afnemend. Bij Zandloper enorme toename van kleine kale plekje in 2007, die zijn in 2014 grotendeels weer weg, maar sommige zijn wel stuifkuil geworden. Lijken wel op alle hellingen voor te komen.
- Noordkop, Zandloper: afname van kleine kale plekken, parallel aan achteruitgang konijnenstand, gevolgd stabilisatie en dichtgroeien (zie Figuur 5-27).



Figuur 5-27. Voorbeeld van afname van de konijnenstand Zandloper, Noordkop, 2005, 2010, 2014, 2015.

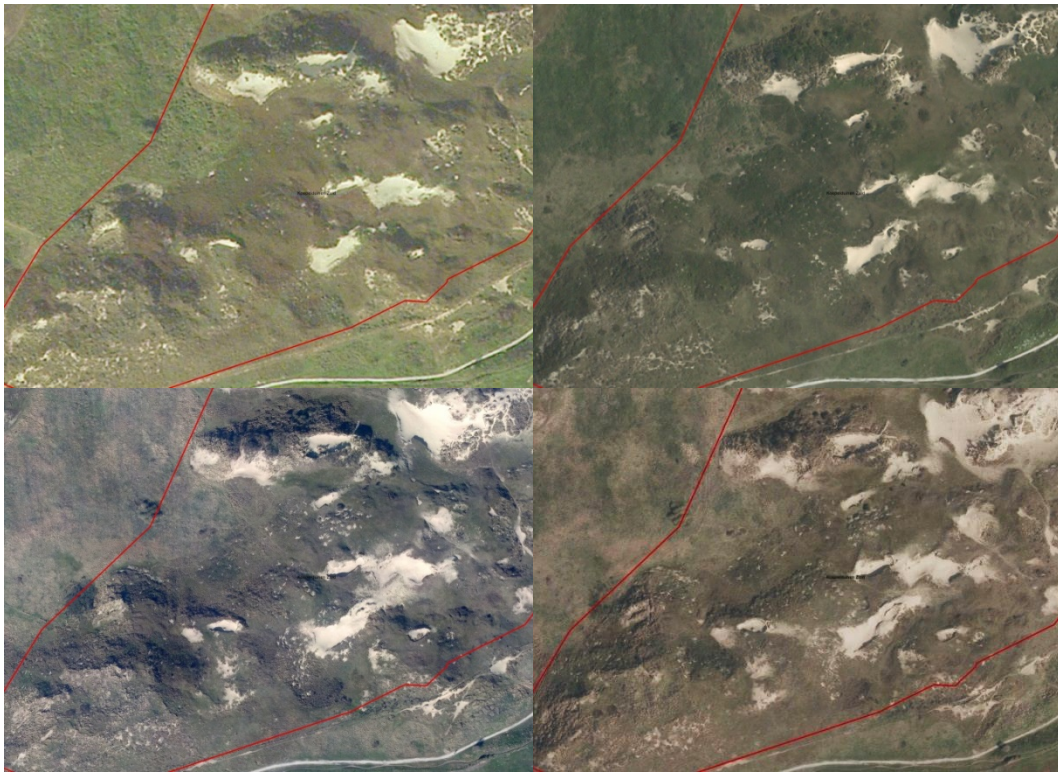
- Huisduinen, Grafelijkheidsduinen zuidhellingen. Duinoord idem, ontwikkeling lijkt op Texel. Zandloper wat meer gevarieerde expositie. Heel veel kleine kale plekjes (zijn dit graafplekjes)? In 2007, groeien vaak uit tot stuifkuil.
- Omslag tussen Botgat en Zwanenwater, van toename naar afname.
- Zwanenwater: hele lage aantallen, na flinke populaties 50-100 in 1989-1995?, die neemt af tot een dieptepunt in 2002 tot bijna niks. Daarna fluctueert het om bijna niks met af en toe een opleving, sectie 2.2 in 2005 en 2010, 10-15 en ook andere secties in 2010, maar 5. Dit is goed te zien aan de luchtfoto's (Figuur 5-28). Op de foto van 2000 zijn veel kleine witte stippen te zien, in 2007 zijn die vrijwel allemaal verdwenen, in 2014 helemaal verdwenen, waardoor stuifkuildynamiek dus afneemt. Hier lijkt een duidelijk verband tussen witte stipjes op luchtfoto, afname konijnenstand en afname stuifkuildynamiek.
- Pettemerduinen: sectie 3.2 heeft redelijk hoge aantallen, tot 40, ook in 2016 gestegen, wel behoorlijk fluctuerend. Sectie 3.1 is laag, vanaf 5 en 1995 afnemend tot bijna 0 nu. Hier gebeurt niet zo veel. Stuifkuil aan de noordkant lijkt gerelateerd aan recreatie. Er lijkt geen link tussen konijnenaantallen en stuifkuilontwikkeling.
- Schoorl: sectie 4.3 en 4.4 hadden hoge aantallen, 20-90, maar vanaf 1990 afnemend. Nu bijna niks, max 5 in 2010, nu 1-2 hooguit.



Figuur 5-28. Voorbeeld van afname van de konijnenstand. Zwanenwater, Hazekamer, 2000, 2007, 2011, 2015.

- Van Camperduin geen tel gegevens. Zuidhellingen en mogelijk zeereëpinvloed, geeft een forse toename van 2007 tot 2014. Het lijkt wel veel meer te overstuiven. Vegetatie wordt ook wat schraler, maar geen witte stipjes, dus het lijkt dat konijnen hier geen rol spelen.
- In de rest van de Schoolse duinen gebeurt niet zo veel, behalve veel ingrepen. Konijnen lijken er inderdaad niet toe te doen, met een afname van dynamiek, die echter door de mens teruggedraaid wordt. Bij het Vogelmeer is sprake van een behoorlijke verschralling van de zuidoosthellingen als je 1996 en 2015 vergelijkt, begint in 2013. Afname dynamiek kan wel samenhangen met afname konijnenstand.
- Bergen (route 5, 1 t/m 7): meeste hoog (20-45) rond jaren 1990, daarna gekelderde, nu hooguit 2. Het typische aan dit gebied is dat de zuidhellingen altijd al kaal en schraal zijn. Dit lijkt niet echt te veranderen. Is het hier de overgang van Renodunaal naar wadden district dat dit triggert? Zou begrazing hier wat in doen? Inmiddels zijn er vele terraspaadjes langs de hoogtelijnen te zien. Konijnen doen in dit geval weinig omdat ze er niet of nauwelijks zijn, en opvallend dat het toch zo schraal blijft. Afname in konijnenstand komt wel overeen met afname in stuifkuilactiviteit.
- Egmond noord (route 6): afname vanaf 1993-1994, toename vanaf 2007-2010 tot 10-12, nu weer afname, maar wel redelijke aantallen 2-26. Lichte stijging vanaf 2016 komt wel overeen met toename stuifkuilen.
- Naar het zuiden toe neemt de kaalheid van zuidhellingen af. Onder Egmond nog wel zichtbaar, maar richting Castricum houdt het snel op.
- Egmond zuid (route 7): hoge aantallen 25-45 in 1984, daarna forse afname, dieptepunt 2001-2007, daarna lichte toename tot 0-20 rond 2014, nu weer afname. Lichte stijging van 2002 tot 2014 komt overeen met toename stuifkuildynamiek.
 - Konijnen lijken hier inderdaad weer belangrijk te worden, te zien aan de vele kleine witte stipjes, vanaf de Kaap, Soeckebakker naar het zuiden. Bij de Zeeweg houdt dat op.
- Castricum (route 8): hele lage aantallen na 1993, toen 5, nu max 1.5. In sectie 8.9 een opleving naar 3 in 2008-2009, nu weer afgenomen. Kale plekken vooral op zuidhellingen. Stuifkuiltjes ook. Op stuifkuilengebied gebeurt hier niet veel, in sommige gebieden een toename.
- Heemskerk (route 9): hoge aantallen 20-30 1984, afname vanaf ca 1990 tot dieptepunt in 2007 (vrijwel niks). lichte toename daarna, met in sectie 5 een eenmalige piek van 25 in 2010. Nu weer afname, andere secties slechts tussen 2 en 5. Op stuifkuilengebied gebeurt hier niet veel, in sommige gebieden een toename.

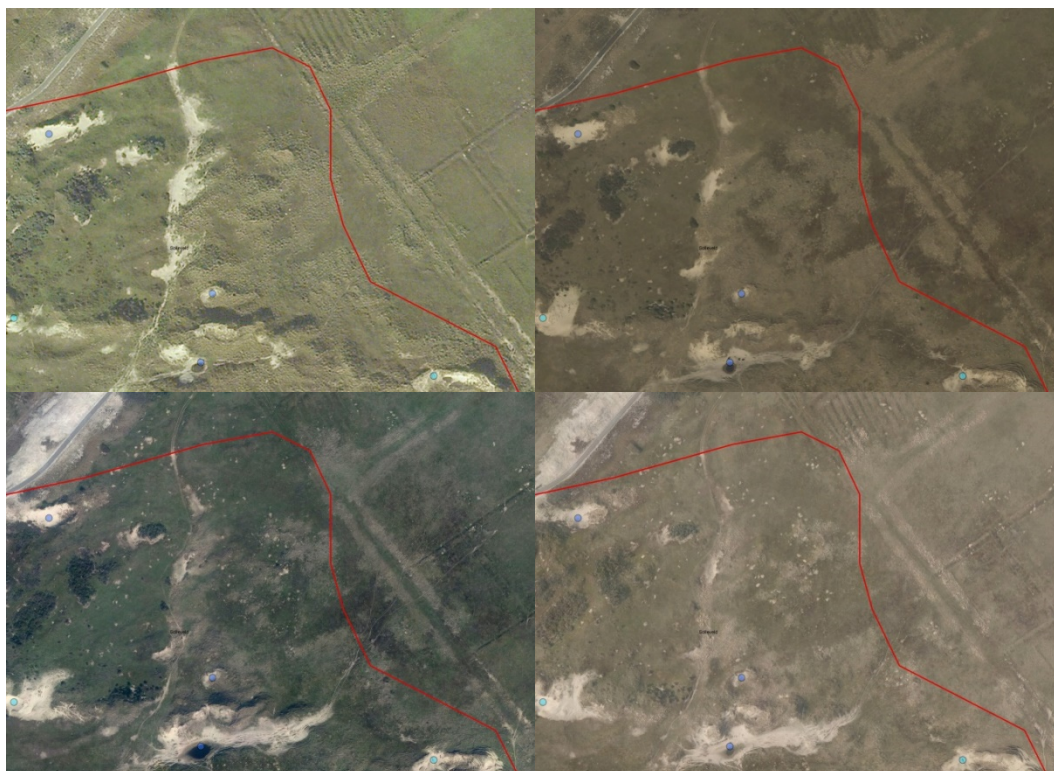
- Vrij beperkte dynamiek, gerelateerd aan zuid en zuidoosthellingen. Inderdaad geen sporen van konijnen.
- Russenduin, Wijk aan Zee: geen telgegevens.
- Duin- en Kruidberg: flinke toename vanaf 2010 in sectie 10-6 naar boven de 40. Ook in andere, maar dan tot 15-25. Daarna vanaf 2015 weer afname.
 - Waarschijnlijk stuifkuildynamiek gerelateerd aan recreatie. Veel paden. Zuidhellingen. Veel kale plekken tussen struweel, behoorlijk ruige begroeiing overheerst.
 - Inderdaad tussen 2014-2016 behoorlijke toename van kale plekken, maar ook vrij groot (3-5m), vast niet (alleen) gerelateerd aan konijnen, mogelijk ook damherten? Heel veel kale plekken, vaak omringd door struweel. Lijkt toch veel gerelateerd aan zuidhellingen.
- Kennemerduinen: veel wisselender beeld, met afname vanaf 1989 naar hele lage aantallen tussen 1997 en 2004, daarna opleving met aantallen tot 20-40, vanaf 2015 weer afname. Hoogste in 11.6, 11.7, 11.8, 11.9
 - Idem als duin en kruidberg.
- Kraansvlak: meestal laag, maar piek vanaf 2012 rond 2014, nu weer afname. Dan 20-25. In sectie 12.10-12.12
 - Kale plekken op zuidhellingen. Lijken er in 2016 veel meer dan in 2014. Verschraling houdt wel gelijke tred met aantal konijnen.
- AWD: 13.19 enorm piekend rond 2007-2009 (120), 13.14 sterk fluctuerend, toenemend tot 60 in 2013, nu weer afnemend, 13.6 grote piek 70 rond 1994, rest fluctuerend tot max 40, begin jaren 1990-2003 afname, vanaf 2003 t/m 2006 enorme toename, daarna gestage afname, hoewel aantallen t/m 2010 nog wel hoog waren.
 - Hoop kale plekken gerelateerd aan zuidhellingen. Lijkt iets meer kaal te worden van 2014-2016, maar kwaliteit van de foto is anders en dat zou ook de oorzaak kunnen zijn (versterkt waarschijnlijk het effect). Toename dynamiek Van Limburg Stirumduinen zou wel samen kunnen hangen met konijnenpiek tussen 2005-2010.
- Van Limburg Stirumduinen en de Blink lijkt ook nog kaler te worden tussen 2014 en 2016. Hier geen telroutes.
- Hollands duin geen gegevens over konijnen. Ook hier kaler, net als in de Blink en Van Limburg Stirumduinen. Vaak zuid en zuidoosthellingen. Richting oude golf gaat struweel overheersen.
- Coepelduinen geen gegevens over konijnen. Overduidelijke relatie met zuidhellingen. In Coepelduinen zuid lijkt weer een stuk met konijnenvlekjes te zijn (Figuur 5-29).
- Berkheide: soms hele hoge aantallen (75), met piek rond 2009 en 2014, licht toenemende trends 14.4, 14.5, 14.6 (waaronder Vlaggenduin) tot 30. 14.7, 14.1 en 14.2 weinig, nu licht dalende trend vanaf 10
 - Ook weer overduidelijke correlatie zuidhellingen en kale plekken. Konijnenpiek lijkt terug te zien in witte vlekjes 2007. Groeien gedeeltelijk uit tot stuifkuilen. Toename dynamiek in het Vlaggenduin en kan samenhangen met konijnen.
 - Berkheide, Molenaarsberg: toename van kleine kale plekken, gevolgd door toename in grotere dynamiek (Figuur 5-30).
- Meijndel: piek sectie 15.5 die tussen 2006 en 2011 piekt tot 110, daarna afname. Overige secties ook toename vanaf 2008 tot 10-30, nu afname. 30 is sectie 3 2013-2015.
 - Toename met veel kale plekken op zuidhellingen. In 2016 stuk kaler dan in 2014, maar mogelijk fotokwaliteitseffect. Licht toenemende trend in konijnenaantallen vanaf 2005 komt overeen met toename stuifkuilen, maar er zijn ook gebieden waar konijnenaantallen toenemen en stuifkuilen afnemen (Kijfhoek) of gelijk blijven (Waterdel).
- Op het Netteboetstersveld (geen telgegevens) wemelt het van de kleine konijnenvlekjes. Toename van kleine kale plekken, gevolgd door toename in grotere dynamiek.
- Westduinpark: zeldzaam toenemende trends, alleen in 2016 wel afname. Tot ruim 40, alleen secties 21.2 en 21.4 blijven achter.
 - Zoveel ingrepen dat autonome veranderingen hier moeilijk te bepalen zijn en effect van konijnen ook niet zichtbaar is.
- Solleveld: pas in 2004 begonnen met tellen, en sindsdien wel een duidelijk toenemende trend, tot zelfs 120 in sectie 3. De andere secties hebben lagere aantallen, 10-40. Het beeld op de luchtfoto ziet er net uit als bij het Netteboetstersveld (Scheveningen), ook wemelt het van de witte stipjes die flink toenemen in 2016 (Figuur 5-31). Dit is in overeenstemming met de konijnen-telgegevens. Het aantal stuifkuilen is hier overigens niet of nauwelijks toegenomen.



Figuur 5-29. Voorbeeld van toename van de konijnenstand, Coepelduynen zuid, 2005, 2010, 2014, 2015.



Figuur 5-30. Voorbeeld van toename van de konijnenstand, Berkheide, Molenaarsberg, 2005, 2010, 2014, 2015.



Figuur 5-31. Voorbeeld van toename van de konijnenstand, Solleveld, 2005, 2010, 2014, 2015.

Vanaf Voorne naar het zuiden geen telgegevens meer.

- Voorne: bij groene punt geen konijnen. Ruigte weggehaald en begraaasd. Stuifkuil ligt langs weg. Bij Houten paardjes/Stekelhoek ook door weghalen ruigte. Zuidhellingen blijven kaler. Geen konijnen op basis van luchtfotobeeld.
- Goeree: Kale plekken waren er al, variëren wel een beetje, maar neemt niet heel erg toe. Stuifkuilen groeien wel, het zijn er niet veel. Kale plekken gecorreleerd aan zuidhellingen. Wel veel witte vlekjes en kleine kale plekken, dus mogelijk konijnen.
- Schouwen, Oosterdoodkist toename kaal zand, maar waardoor? Veelal zuidhellingen, soms zuidwest/zuidoost. Effect van grazers?
- Schouwen, Verklikkerduinen. Mogelijk wat plekjes door begrazing (?). Lijkt geen konijnenwerk. Verandert verder niet zo veel. In 2016 opeens een heleboel paden, in 2014 geen (!).
- Schouwen, Meeuwenduinen neemt alleen maar af en verstruweelt. Westenschouwen zitten wel wat konijnachtige plekjes.
- Walcheren: kale plekken allemaal op zuidhellingen. Hier gebeurt verder niets op stuifkuilengebied.
- Zeeuws-Vlaanderen: Hier gebeurt niets op stuifkuilengebied.

5.7.1 Conclusies m.b.t. konijnen

- Niet voor alle gebieden zijn telgegevens (beschikbaar).
- Er zijn enkele gebieden die opvallen door een enorme hoeveelheid witte stipjes op de luchtfoto's. Dit correspondeert niet altijd met aantallen konijnen?, maar moet wel het gevolg van graafactiviteit van konijnen zijn.
- Er is een aantal gebieden met bijna geen konijnen meer: Noordkop, Zwanenwater, Schoorlse duinen, Bergen.
- Meestal is de huidige trend (2015-2016) (sterk) afnemend.
- Er is vaak sprake van een afname vanaf jaren 80-90 tot een dieptepunt rond 2000-2007.
- Er is vaak sprake van een toename vanaf 2007 tot 2015, daarna neemt de konijnenstand in de meeste gebieden weer af.
- Er zijn enkele opvallende gebieden waar de konijnenstand nu juist toeneemt: Ameland, Kraansvlak, Westduinpark, Solleveld.

- Er zijn enkele gebieden waar de konijnenstand in 2015 nog redelijk tot goed was: Vlieland, Pettemerduinen, Egmond, Duin- en Kruidberg, Kennemerduinen, Berkheide, Meijendel.
- Vanaf 2015 is in veel gebieden sprake van een (sterke) achteruitgang ten gevolge van een nieuwe variant van het VHS virus (VHS2).
- Het verband met de huidige dynamiek is niet altijd direct zichtbaar.
- Er is heel vaak sprake van een correlatie van kale plekken en zuidhellingen (en in mindere mate zuidoost en nog minder zuidwest hellingen).
- In veel gevallen lijkt er een duidelijk verband tussen konijnenaantallen en de ontwikkeling van stuifkuilen. Dit geldt voor: Texel, Eierlandsche duinen, de Nederlanden, Korverskooi en Texel zuid.
- Ook omgekeerd verband, afname en stabilisatie. Dit geldt voor het Zwanenwater.
- In enkele gevallen is er geen verband en is er ondanks een toename of nog goede konijnenstand geen sprake van een toename van verstuivingen of het aantal stuifkuilen. Dit geldt voor Ameland en Vlieland.

6 Nadere verklaringen voor de ontwikkeling van kleinschalige dynamiek in de periode 2000-2014: multivariate analyses

Annemieke Kooijman

6.1 Samenvatting

Het aantal stuifkuilen per km² en het percentage actief en zeer actief oppervlak is in de kalkrijke duinen van het Renodunaal district gemiddeld vele malen hoger dan in de kalkarme duinen van het Waddendistrict. Omdat het niet mogelijk was dit verschil goed te verklaren aan de hand van individuele factoren is in dit hoofdstuk een overkoepelende multivariate analyse van deze factoren uitgevoerd om hier meer inzicht te krijgen. De verschillen in eolische activiteit lijken vooral veroorzaakt door een combinatie van elkaar versterkende factoren, die los staan van de huidige dynamiek van de zeereep. Samen kunnen deze factoren tot 70% en 79% van de variantie in het aantal kuilen en het actieve oppervlak verklaren, maar in de kalkrijke en kalkarme duinen zijn verschillende factoren van belang.

In de kalkarme duinen van het Waddendistrict is de eolische activiteit relatief laag door een optelsom van (1) lagere maximum hoogte, (2) ongunstiger ligging op de wind, (3) minder neerslag en natte dagen waardoor er mogelijk minder watererosie optreedt, (4) een N-depositie die hoger is dan de KDW met een overmaat aan NH₄, (5) een lagere konijnenstand en (6) een lagere kalkrijkdom en pH van de bodem, waardoor de P-beschikbaarheid voor de vegetatie relatief hoog is en sterk woekerende soorten als Helm, Zandzegge en Kraaiheide gaan domineren. De hoogste eolische dynamiek wordt in het Waddendistrict gevonden bij een relatief korte afstand tot de duinvoet en een gunstige ligging t.o.v. de WZW wind, de nettotransportrichting. Daarom gaat het in de kop van Noord-Holland en op Texel iets beter dan op de andere Waddeneilanden.

Ook in de kalkrijke duinen is de eolische dynamiek hoger op korte afstand van de duinvoet, en lager als er weinig konijnen of paadjes zijn. Maar verder is de situatie in de kalkrijke duinen van het Renodunaal district veel gunstiger dan in het Waddendistrict, dankzij de optelsom van (1) hogere maximum hoogte, (2) gunstiger ligging op de wind, (3) meer neerslag en natte dagen, (4) een N-depositie die rond de KDW ligt en gedomineerd wordt door NO₃, (5) meer konijnen en (6) een hogere kalkrijkdom en pH van de bodem, waardoor soorten als Helm, Zandzegge en Kraaiheide minder dominant zijn. Nog een voordeel is dat veel kalkrijke duingebieden ook begin jaren negentig sterk actief waren, waardoor de vegetatie rond 2000 in ieder geval in de buitenduinen vooral nog uit pioniersoorten en mossen bestond en relatief gemakkelijk opnieuw in verstuiving te krijgen was.

6.2 Inleiding

Uit de vorige hoofdstukken over de kleinschalige dynamiek kwamen een aantal factoren naar voren die mogelijk van belang zijn voor de ontwikkeling hiervan. Hoewel er een duidelijk verschil lijkt te zijn tussen de Waddeneilanden en met name de Hollandse kust, is het niet mogelijk dit goed te verklaren aan de hand van individuele factoren. In dit hoofdstuk wordt een overkoepelende en ten dele multivariate analyse van deze factoren uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de verschillen in dynamiek van de kleinschalige verstuivingen in verschillende gebieden.

6.3 Methoden

Voor de multivariate analyse van de ontwikkeling van stuifkuilen en de mogelijke factoren die daarbij een rol spelen is gebruik gemaakt van de 51 hoofdgebieden uit de regionale analyse van de kleinschalige dynamiek (Tabel 6-1). Voor elk van de 51 gebieden is uitgezocht hoe groot het is, hoeveel stuifkuilen er waren in 2000 en 2014, en hoe groot het geheel begroeide, actieve en zeer actieve oppervlak was in beide jaren. Zoals eerder aangegeven was de intentie hierbij om het gehele Nederlandse duingebied te onderzoeken, wat naar schatting voor rond de 90% van het duingebied is gelukt. Met behulp van deze gegevens zijn een aantal indicatoren voor de eolische activiteit berekend, waaronder het aantal stuifkuilen per ha of km², het percentage stabiel, actief en zeer actief oppervlak en het oppervlak per stuifkuil in 2000 en 2014, alsmede de toename (of afname) hiervan in de periode 2000-2014.

Voor ieder van de 51 duingebieden is op basis van de analyse van mogelijk verklarende factoren in het eerdere hoofdstuk een dataset opgesteld van een aantal standplaatsfactoren. Dit zijn de dynamiek van de zeereep, de ligging in kalkarme of kalkarme duinen, de gemiddelde afstand tot de duinvoet, de maximale hoogte in het duingebied en de expositie in relatie tot de WZW-wind, wat de nettotransportrichting is. Voor de expositie t.o.v. de WZW-wind is een grove schatting gemaakt van het mogelijke profijt van deze windrichting, met 100% voor een WZW-expositie van de kust, 75% voor W en ZW, 50% voor WNW, 25% voor NW en N en 0% voor NNW. Dit is natuurlijk een grove indeling die geen recht doet aan bijvoorbeeld de invloed van de NW-wind. Maar omdat de ligging t.o.v. de WZW-wind toch van belang blijkt te zijn, hebben we deze factor meegenomen. Verder is voor veertig gebieden de pH-waarde van de bovengrond geschat op grond van gegevens uit andere onderdelen van dit onderzoek, alsmede uit het OBN-begrazingsonderzoek langs de hele Nederlandse kust (Nijssen et al. 2015). Voor ieder gebied is de gemiddelde neerslag bepaald in de periode 1990-2000 en 2000-2015, alsmede het gemiddelde aantal natte dagen. Verder is voor ieder gebied de totale N-depositie bepaald voor 2000 en 2015, alsmede de depositie van NO_x en NH_y. Ook is de relatieve bijdrage van NH_y aan de totale N-depositie in 2000 en 2015 meegenomen, alsmede de afname van de depositie van N, NO_x en NH_y tussen 2000 en 2015. Daarnaast is een schatting gemaakt van de overschrijding van de kritische depositiewaarde (KDW) voor Grijze duinen, vooral omdat dit invloed heeft op de vegetatie rondom de stuifkuil. Voor kalkarme duinen is een KDW gebruikt van 700 mol of 10 kg ha⁻¹ jaar⁻¹, en voor kalkrijke 1000 mol of 15 kg ha⁻¹ jaar⁻¹. Voor de gemiddelde activiteit van konijnen en dichtheid van paden in de periode 2000-2015 is gebruik gemaakt van een GIS-analyse van de luchtfoto's voor 45 van de hoofdgebieden of representatieve deelgebieden binnen een hoofdgebied in 2000, 2005, 2010 en 2015. Hierbij zijn het aantal graafjes van konijnen en de dichtheid van paden gekarakteriseerd in 6 klassen van geen tot extreem.

Voor de statistische analyse is allereerst een correlatiematrix gemaakt, waarin de positieve en negatieve correlaties tussen alle variabelen en factoren onderling zijn berekend (Cody & Smith 1987). Het doel hiervan was nader te bekijken welke factoren wel en niet van belang zouden kunnen zijn voor de verschillende indicatoren van de eolische activiteit. Omdat het aantal stuifkuilen sterk varieerde van 0 tot 349 per km², zijn ook analyses uitgevoerd voor de log-waarden hiervan (log-transformatie), om de onderlinge variatie te verminderen. Hierbij werd het aantal stuifkuilen per km² met een vermeerderd om ook een waarde voor nul stuifkuilen te hebben. Vervolgens is een stapsgewijze multiële lineaire regressie toegepast met een selectie van variabelen en factoren, om te analyseren wat de relatieve bijdrage is van verschillende factoren aan de verklaarde variantie van de indicatoren voor eolische activiteit. Bij deze analyse is de pH van de bovengrond niet meegenomen, omdat er anders voor de stapsgewijze multivariate analyse maar 40 gebieden over zouden blijven, en deze informatie voor een groot deel ook in de kalkrijkdom van het gebied aanwezig is. Omdat voor de activiteit van konijnen en de paddichtheid geen andere factor kon worden gebruikt, zijn deze wel meegenomen, wat betekent dat de analyse is uitgevoerd voor de 45 gebieden waarvan voor elke parameter gegevens bekend zijn.

Tabel 6-1: De 51 deelgebieden uit het hoofdstuk over de regionale analyse van verschillen in verstuivingsdynamiek die gebruikt zijn voor de overkoepelende analyse van de verklarende factoren.

gebied	oppervlak totaal ha	aantal stuifkuilen 2000	oppervlak actief 2000	oppervlak zeer actief 2000	aantal stuifkuilen 2014	oppervlak actief 2014	oppervlak zeer actief 2014
1 Schiermonnikoog Bernardweg	106	20	9	0.2	13	6	0.5
2 Schiermonnikoog Berkenplas	42	1	0	0.0	1	0	0.0
3 Schiermonnikoog Noorderduinen	36	12	11	9.7	9	11	0.0
4 Schiermonnikoog Westerduinen	59	21	11	9.6	17	10	0.0
5 Ameland Oerd	114	7	2	0.0	2	2	0.0
6 Ameland Oost	16	3	0	0.0	2	0	0.0
7 Ameland Buurderduinen	186	23	9	4.7	13	6	1.2
8 Ameland Nes	25	0	0	0.0	1	0	0.0
9 Ameland Ballumerduinen	68	1	0	0.1	1	0	0.1
10 Ameland West	160	1	0	0.2	0	0	0.0
11 Terschelling Oosterend	205	6	1	0.0	6	1	1.3
12 Terschelling Midden	446	26	10	1.2	37	10	5.0
13 Terschelling West	167	2	1	0.0	2	1	0.0
14 Terschelling Eldorado	81	29	16	0.0	6	11	0.0
15 Terschelling Kroonspolders	25	4	3	0.0	4	3	0.0
16 Terschelling Groene strand	30	0	0	0.0	1	0	0.0
17 Vlieland oost	141	12	19	0.0	7	2	0.0
18 Vlieland Rug van het veen	12	5	12	0.0	1	0	0.0
19 Vlieland Midden	182	12	11	0.0	0	0	0.0
20 Texel Eijerlandsche duinen	206	13	16	0.0	11	1	1.4
21 Texel Slufter zuid	127	19	16	0.1	31	6	4.8
22 Texel de Koog	180	3	10	0.0	12	10	0.0
23 Texel Zuid	202	9	3	0.0	32	5	4.1
24 Texel de Hors	176	7	11	0.0	3	9	0.0
25 Huisduinen	83	22	8	3.3	28	11	0.1
26 Grote Keeten	189	27	11	0.3	57	13	11.1
27 Zwanenwater	174	30	7	4.0	21	7	0.0
28 Pettemerduinen	56	16	1	0.9	10	1	0.2
29 Schoorlse duinen	402	43	9	2.5	43	9	6.7
30 Bergen aan zee Noord	5	2	0	0.0	3	0	0.0
31 Bergen aan zee Zuid	42	171	25	21.8	146	25	22.8
32 Zegeveld	286	65	6	5.8	40	6	1.5
33 Egmond aan zee Noord	37	23	4	0.2	25	4	2.2
34 Egmond aan zee Zuid	113	34	9	0.8	101	9	8.2
35 Egmond Binnen	266	24	38	0.8	42	38	2.8
36 Vleuose weg	67	12	8	0.2	26	8	2.6
37 Casticum aan zee	319	14	5	0.3	39	55	1.7
38 Wijk aan zee	50	22	3	0.3	14	3	0.6
39 Parnassia	24	19	6	4.9	42	6	5.9
40 AWD	1016	324	239	5.0	688	252	185.1
41 Hollands duin	49	30	15	0.6	82	15	15.4
42 Noordwijk aan zee	6	5	3	0.0	20	3	2.6
43 Koepelduinen	90	68	58	22.1	164	58	47.7
44 Berkheide	1105	342	542	1.4	373	517	110.4
45 Meyendel	668	177	244	4.5	205	244	24.6
46 Solleveld	78	35	7	3.1	36	7	3.2
47 Voorne	67	1	0	0.0	3	0	0.1
48 Goeree	67	9	2	0.6	25	2	2.0
49 Renesse	19	4	2	0.4	7	2	0.4
50 Schouwen Verklikkerduinen	192	7	4	2.8	7	4	1.9
51 Kop van Schouwen	886	43	102	34.6	46	48	17.5

Omdat kalkrijkdom en pH steeds een belangrijke verklarende factor bleken te zijn, is vervolgens een indeling gemaakt van de 51 gebieden in districten: het kalkarme Waddendistrict vs het kalkrijke Renodunaal district. Voor ieder district zijn de gebieden ingedeeld in verstuivingsklassen op basis van het aantal stuifkuilen per km² in 2014 (1 = 0-10; 2 = 11-20; 3 = 21-50; 4 = 51-100 en 5 = >100). District en verstuivingsklasse zijn gebruikt als onafhankelijke factoren in een tweewegvariantieanalyse (met General Linear Model, Cody & Smith 1987), om te toetsen of er verschil bestaat tussen de verstuivingsklassen en/of districten in de gemiddelde pH, afstand tot de duinvoethoogte, maximum hoogte, ligging t.o.v. de WZW-wind, de konijnenactiviteit, de paddichtheid, het aantal natte dagen in 2000-2015 en de overschrijding van de KDW. In het Waddendistrict bleek verstuivingsklasse 5 helemaal niet en klasse 4 slechts voor een gebied voor te komen. Omdat dit laatste de statistische analyse onevenredig sterk beïnvloedde, en het gebied met 59 stuifkuilen per km² relatief dicht bij klasse 3 lag, is dit gebied ingedeeld in verstuivingsklasse 3. De individuele verschillen tussen de drie verstuivingsklassen voor het Waddendistrict en de vijf voor het Renodunaal district zijn verder getoetst met een post-hoc LSmeans toets.

6.4 Resultaten: correlaties en multivariate analyse

De correlaties tussen indicatoren voor eolische activiteit en de mogelijke verklarende factoren geven aan dat kalkrijkdom en pH van de bovengrond belangrijke factoren zijn. De correlaties met kalkrijkdom en pH van de bovengrond zijn significant voor bijna alle indicatoren van de eolische activiteit in 2000, zoals het aantal stuifkuilen per km² en het percentage actief oppervlak van het gebied (Tabel 6-2). Dit blijkt ook uit de stapsgewijze multivariate analyse, waarin kalkrijkdom de meest bepalende factor is voor de eolische activiteit in 2000 (Tabel 6-3). Voor het aantal stuifkuilen per km² is verder de neerslag van belang, met positieve correlaties voor zowel de gemiddelde neerslag als het aantal natte dagen in 1990-2000. Neerslag en natte dagen zijn in de stapsgewijze analyse echter niet belangrijk, omdat kalkrijkdom en neerslapatronen onderling gecorreleerd zijn en allebei hogere waarden hebben in het Renodunale district. Wel wordt het aantal kuilen beïnvloed door de afstand tot de duinvoet, en voor de logwaarden van het aantal kuilen ook konijnen, paddichtheid en ligging t.o.v. de WZW wind.

Tabel 6-2: Correlatiematrix van indicatoren voor eolische activiteit in 2000 met mogelijk verklarende factoren. Het aantal stuifkuilen per km² of de actieve oppervlakte is gebaseerd op de 51 hoofdeenheden. Significante correlaties zijn weergegeven met hun R-waarde ($p < 0.05$).

	Aantal kuilen (per km ²)	Log aantal kuilen (per km ²)	Oppervlakte actief (%)	Oppervlakte sterk actief (%)	Oppervlak stuifkuil (m ²)
Kalkarm of kalkrijk	0.32	0.42	0.28	-	-
pH bovengrond	0.35	0.57	0.34	-	-
Konijnen	-	-	-	-	-0.32
Paden	-	-	-	0.30	0.41
Dynamiek zeereep	-	-	-	-	-0.31
Ligging WZW	-	-	-	-	-
Maximum hoogte	-	-	-	-	-
Afstand duinvoet	-	-	-	-	-
Neerslag 1990-2000	0.29	0.36	-	-	-
Natte dagen	0.29	0.40	-	-	-
Droge dagen	-	-	-	-	-
N-depositie	-	-	-	-	-
NOx depositie	-	0.44	-	-	-
NHy depositie	-	-	-	-	-
Overschrijding KDW	-	-	-	-	-

Tabel 6-3: Stapsgewijze multi-pele lineaire regressie van mogelijk verklarende factoren voor de verschillen in eolische activiteit in 2000. In ieder vakje staat de partiele R²-waarde voor de betreffende fractor. De totale R² is de som van alle partiele waarden, en een maat voor het percentage verklaarde variantie.

	Aantal kuilen (per km ²)	Log aantal kuilen (per km ²)	Oppervlak actief (%)	Oppervlak sterk actief (%)	Oppervlak stuifkuil (m ²)
Kalkarm of kalkrijk	0.08	0.13	0.07	-	-
Konijnen	-	-	-	0.01	0.09
Paden	-	0.05	0.01	0.09	0.17
Ligging WZW	0.02	0.03	-	0.05	0.09
Max hoogte	0.02	-	-	0.01	0.02
Afstand duinvoet	0.02	0.05	-	0.04	0.03
Natte dagen	0.02	0.03	0.01	-	0.08
N-depositie	-	-	-	0.01	-
Overschrijding KDW	-	-	-	-	0.01
Totale R ²	0.17	0.30	0.09	0.21	0.47

Voor het actieve oppervlak zijn vooral kalkrijkdom en pH van belang, maar in de stapsgewijze analyse speelt ook het aantal natte dagen nog een rol. Voor het extreem actieve oppervlak is in 2000 kalkrijkdom niet belangrijk. Wel speelt de paddichtheid een rol, en in de stapsgewijze analyse ook de ligging t.o.v. de WZW wind, de afstand tot de duinvoet en de maximum hoogte. Voor het gemiddelde oppervlak per stuifkuil zijn konijnen, paden en de dynamiek van de zeereep van belang. De paddichtheid heeft echter een positieve correlatie met de oppervlakte van een stuifkuil, maar konijnen en zeereepdynamiek een negatieve. In de stapsgewijze analyse spelen vele factoren een rol, maar vooral de paden en de ligging t.o.v. de WZW wind.

Tabel 6-4: Correlatiematrix van indicatoren voor eolische activiteit in 2014 met mogelijk verklarende factoren. Het aantal stuifkuilen per km² of de actieve oppervlakte is gebaseerd op de 51 hoofdeenheden. Significante correlaties zijn weergegeven met hun R-waarde ($p < 0.05$).

	Aantal kuilen (per km ²)	Log aantal kuilen (per km ²)	Oppervlak actief (%)	Oppervlak sterk actief (%)	Oppervla k stuifkuil (m ²)
Kalkarm of kalkrijk	0.47	0.58	0.51	0.48	0.48
pH bovengrond	0.54	0.74	0.66	0.52	0.43
Actief gebied in 2000	0.55	0.50	0.70	0.61	-
Konijnen	-	0.41	-	-	-
Paden	-	-	0.31	-	-
Dynamiek zeereep	-	-	-	-	-
Ligging WZW	-	0.39	-	-	-
Max hoogte	-	-	-	-	0.36
Afstand duinvoet	-	-0.37	-	-	-
Neerslag 2000-2015	0.36	0.35	0.36	0.32	-
Natte dagen	0.47	0.53	0.51	0.46	0.35
N-depositie	-	-	-	-	-
NOx depositie	0.39	0.57	0.53	0.39	0.32
NHy depositie	-	-	-	-	-
Afname N-depositie	-	-	0.29	-	-
Afname NOx depositie	-	0.35	0.32	-	-
Afname NHy depositie	-	-	-	-	-
Overschrijding KDW	-	-0.28	-	-0.28	-0.35

Tabel 6-5: Stapsgewijze multiële lineaire regressie van mogelijk verklarende factoren voor de verschillen in eolische activiteit in 2014. In ieder vakje staat de partiele R²-waarde voor de betreffende fractor. De totale R² is de som van alle partiele waarden, en een maat voor het percentage verklaarde variantie.

	Aantal kuilen (per km ²)	Log aantal kuilen (per km ²)	Oppervlak actief (%)	Oppervlak sterk actief (%)	Oppervlak stuifkuil (m ²)
Kalkarm of kalkrijk	-	0.29	-	-	0.21
Actief gebied 2000	0.29	0.13	0.47	0.36	0.01
Konijnen	0.01	0.08	0.02	0.02	-
Paden	-	0.01	0.06	-	-
Ligging WZW	0.02	0.03	-	-	0.01
Max hoogte	0.01	-	0.01	-	0.07
Afstand duinvoet	0.02	0.05	0.03	-	0.01
Natte dagen	0.12	0.02	0.16	0.12	-
N-depositie	0.01	0.09	-	0.02	-
Overschrijding KDW	-	-	0.04	-	-
Totale R ²	0.47	0.70	0.79	0.51	0.31

Voor de eolische activiteit in 2014 zijn kalkrijkdom en pH van de bodem ook van belang (Tabel 6-4). In 2014 is echter ook belangrijk hoe het gebied er in 2000 uitzag (Tabel 6-5). Daarnaast spelen vrijwel alle andere factoren een rol, behalve de dynamiek van de zeereep en de depositie van NH_x. Het aantal stuifkuilen per km² in 2014 is significant positief gecorreleerd met kalkrijkdom, pH, het percentage actief gebied in 2000, de neerslag en het aantal natte dagen in de periode 2000-2015 en de atmosferische depositie van NO_x. Voor de logwaarden van het aantal stuifkuilen komen konijnen, de ligging t.o.v. de WZW wind, de afname van de NO_x-depositie hier nog bij, terwijl de afstand tot de duinvoet en de overschrijding van de KDW een significant negatieve correlatie laten zien. Ook in de stapsgewijze analyse zijn vrijwel alle factoren relevant. Er lijkt een discrepantie op te treden wat betreft de correlaties met depositie van NO_x, afname van de NO_x-depositie en overschrijding van de KDW. Dit komt door het verschil tussen kalkrijke en kalkarme duinen. In de kalkrijke duinen is door verstedelijking en industrialisatie de depositie van NO_x significant hoger dan in de kalkarme duinen (zie ook hoofdstuk xxx), maar tegelijkertijd zijn hier in de periode 2000-2015 de NO_x-depositie en de overschrijding van de KDW sterker afgenomen.

De overschrijding van de KDW is ook belangrijk voor het actieve oppervlak in 2014, en vertoont ook hier een negatieve correlatie, wat wil zeggen dat het actieve oppervlak toeneemt als de overschrijding van de KDW lager is. Verder zijn voor het actieve en sterk actieve oppervlak factoren als kalkrijkdom, actief oppervlak in 2000, konijnen, paden, maximum hoogte, afstand duinvoet, natte dagen en N-depositie van belang, met een positieve correlatie met oppervlak in de correlatiematrix en/of stapsgewijze analyse. Het oppervlak van de stuifkuil in 2014 vertoont een significante correlatie met kalkrijkdom, pH, actief gebied in 2000, ligging t.o.v. de WZW wind, maximum hoogte, afstand tot de duinvoet, natte dagen en NO_x-depositie in de correlatiematrix en/of de stapsgewijze analyse. De correlatie tussen stuifkuiloppervlak en overschrijding van de KDW is echter negatief.

Ook de toename van de eolische activiteit tussen 2000 en 2014 is hoofdzakelijk gecorreleerd met kalkrijkdom en pH (Tabel 6-6 en Tabel 6-7). Ook het in 2000 actieve gebied speelt een rol, vooral wat betreft de toename van het actieve gebied zelf. Verder is de toename van het aantal stuifkuilen vooral positief gecorreleerd met konijnen, de ligging t.o.v. de WZW wind en het aantal natte dagen, terwijl in de stapsgewijze analyse ook maximum hoogte een rol speelt. De toename in eolische activiteit is positief gecorreleerd met NO_x-depositie als gevolg van de hogere waarden in de kalkrijke duinen, maar negatief met de overschrijding van de KDW. Ook is het stuifkuiloppervlak positief gecorreleerd met de afname in depositie van N, NO_x en NH_y.

Tabel 6-6: Correlatiematrix van indicatoren voor de toename in eolische activiteit tussen 2010-2014 met mogelijk verklarende factoren. Het aantal stuifkuilen per km² of de actieve oppervlakte is gebaseerd op de 51 hoofdeenheden. Significante correlaties zijn weergegeven met hun R-waarde.

	Toename aantal kuilen (per km ²)	Toename log aantal kuilen (per km ²)	% van aantal kuilen in 2000	Toename oppervlak actief (%)	Toename oppervlak sterk actief
Kalkarm of kalkrijk	0.37	0.36	0.41	-	0.28
pH bovengrond	0.44	0.47	0.49	-	-
Actief gebied in 2000	-	-	-	-0.61	-
Konijnen	-	0.40	0.49	-	-
Paden	-	-	-	-	0.33
Dynamiek zeereep	-	-	-	-	-
Ligging WZW	-	0.39	0.41	-	-
Max hoogte	-	-	-	-	-
Afstand duinvoet	-	-	-	-	-
Neerslag	-	0.36	-	0.33	-
Natte dagen	0.41	0.45	0.42	0.32	-
N-depositie	-	-	-	-	-
NOx depositie	0.37	0.33	0.32	0.29	-
NHy depositie	-	-	-	-	-
Afname N-depositie	-	-	-	-	0.37
Afname NOx depositie	-	-	-	-	0.28
Afname NHy depositie	-	-	-	-	0.37
Overschrijding KDW	-	-	-0.35	-	-

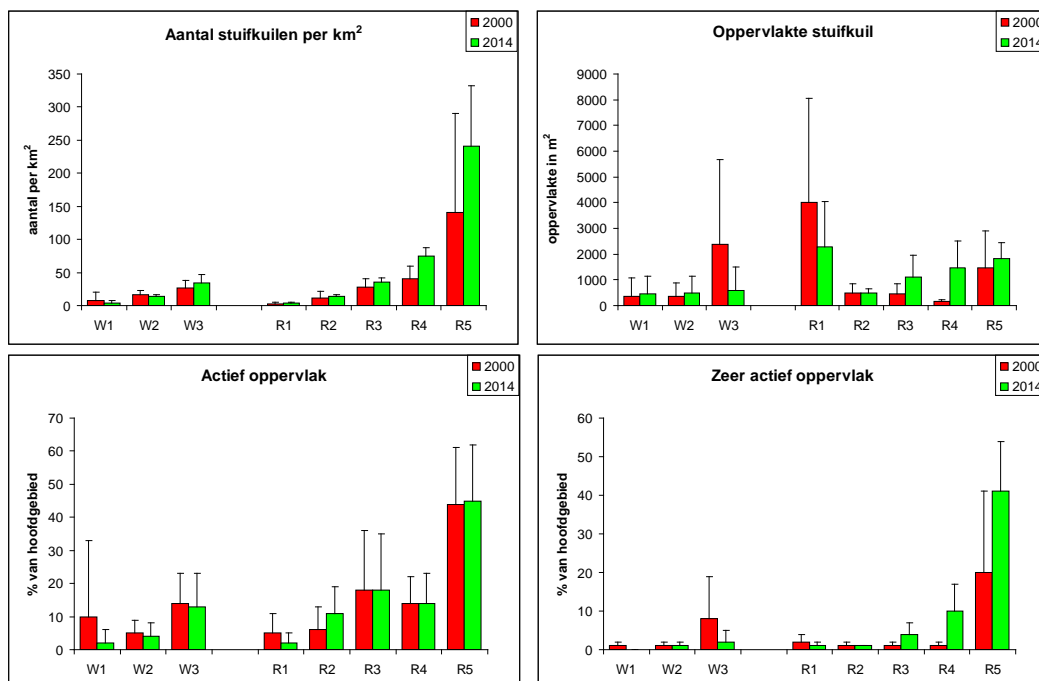
Tabel 6-7: Stepwise multiple linear regression van de toename van stuifkuilen in de periode 2000-2014. Het aantal stuifkuilen per ha of de actieve oppervlakte is gebaseerd op de 51 hoofdeenheden. In ieder vakje staat de partiele R²-waarde voor de betreffende variabele.

	Toename aantal kuilen (per km ²)	Toename log aantal kuilen	% aantal kuilen 2000	Toename oppervlakte actief (%)	Toename oppervlakte sterk actief
Kalkarm of kalkrijk	-	-	-	-	-
Stabiele vegetatie 2000	-	0.04	-	0.38	-
Konijnen	-	0.10	0.24	0.03	0.06
Paden	-	-	-	0.07	0.07
Ligging WZW	-	-	0.04	-	-
Max hoogte	-	-	0.04	-	-
Afstand duinvoet	-	-	-	-	-
Natte dagen	0.14	0.23	0.11	0.19	-
N-depositie	-	0.06	-	0.03	-
Afname N-depositie	-	-	-	-	0.18
Totale R ²	0.14	0.44	0.42	0.69	0.31

6.5 Resultaten: stuifkuilclassen in Wadden en Renodunaal district

Omdat kalkrijkdom en pH van de bovengrond in veel van de statistische analyses als belangrijkste factoren naar voren kwamen, is nader onderscheid gemaakt tussen het kalkarme Wadden en kalkrijke Renodunaal district. Voor ieder district zijn de gebieden gegroepeerd aan de hand van het aantal stuifkuilen per km² (Figuur 6-1). In deze figuur is duidelijk te zien dat het aantal stuifkuilen per km² in de kalkarme duinen in het algemeen beduidend lager is dan in de kalkrijke duinen. In de kalkarme duinen komen gebieden met meer dan 50 stuifkuilen per km² vrijwel niet voor. In de kalkrijke duinen zijn zowel gebieden met relatief weinig als veel stuifkuilen te vinden. Wel kan in gebieden met weinig stuifkuilen de oppervlakte per stuifkuil behoorlijk groot zijn, vooral in 2000. Maar ook in deze gebieden is het percentage actief en zeer actief oppervlak lager dan in gebieden met veel stuifkuilen. Opvallend is dat de kalkrijke gebieden met meer dan 20 stuifkuilen per km² in 2014 wel een duidelijke en significante toename van het aantal stuifkuilen en het zeer actieve oppervlak laten zien tussen 2000 en 2014, maar geen toename in het actieve oppervlak als geheel. Dit wijst erop dat de nieuwe stuifkuilen vooral zijn ontstaan in gebied dat in 2000 ook nog of al enigszins actief was. Dit komt overeen met de ervaringen in de kalkrijke Luchterduinen, waar de locaties van de chronosequentie die tussen 1990 en 2000 gestabiliseerd waren in 2012 allemaal opnieuw waren verstooven (Aggenbach et al. 2013, 2017). Stuifkuilen die niet meer actief zijn worden in eerste instantie gekoloniseerd door kleine, ondiep wortelende pionierplanten en mossen die helemaal geen wortels hebben. Met een dergelijke vegetatie is een stuifkuil nog relatief makkelijk te reactiveren. Grotere soorten met diepe en stevige wortels spelen pas ca 17 jaar na stabilisatie een rol (Aggenbach et al. 2013).

Figuur 6-1: Gemiddelde waarden en standaarddeviaties (n = 3-17) voor 2000 en 2014 voor verschillende stuifkuilclassen in de kalkarme en kalkrijke duinen van het Wadden- en Renodunaal district. W = Waddendistrict; R = Renodunaal district; 1 = 0-10; 2 = 11-20; 3 = 21-50; 4 = 51-100 en 5 = >100 stuifkuilen per km² in 2014.



Uit de analyse van de correlatiematrix en de stapsgewijze lineaire regressie kwam naar voren dat behalve kalkrijkdom ook factoren als afstand van de duinvoet, maximum hoogte, ligging t.o.v. de WZW wind, konijnen, paden, natte dagen en overschrijding van de KDW van belang waren. Het was echter niet duidelijk hoe dit precies uitpakt voor de verschillende situaties. Met een uitsplitsing per district en verstuivingsklasse gaat dit beter (Figuur 6-2). In zowel de

kalkarme als kalkrijke duinen is de afstand tot de duinvoet significant lager voor de meest actieve gebieden. In beide districten liggen gebieden met relatief veel verstuiving op gemiddeld ca 400 m van zee. Bij een grotere afstand van zee neemt de eolische activiteit af.

De maximumhoogte van het duingebied is vooral ongunstig in het Waddendistrict. In de kalkarme duinen verschilt de maximumhoogte niet tussen de verstuivingsklassen, maar deze is wel significant lager dan in de kalkrijke duinen, met gemiddeld ca 3.5 m. Dit kan een deel van de lagere eolische activiteit verklaren. Ook de ligging t.o.v. de WZW wind is minder gunstig voor het Waddendistrict, vooral in de laagste verstuivingsklasse. Gebieden met een gering aantal stuifkuilen per km² hebben vaak een N en NNW-orientatie, zoals op Vlieland, Terschelling en Ameland.

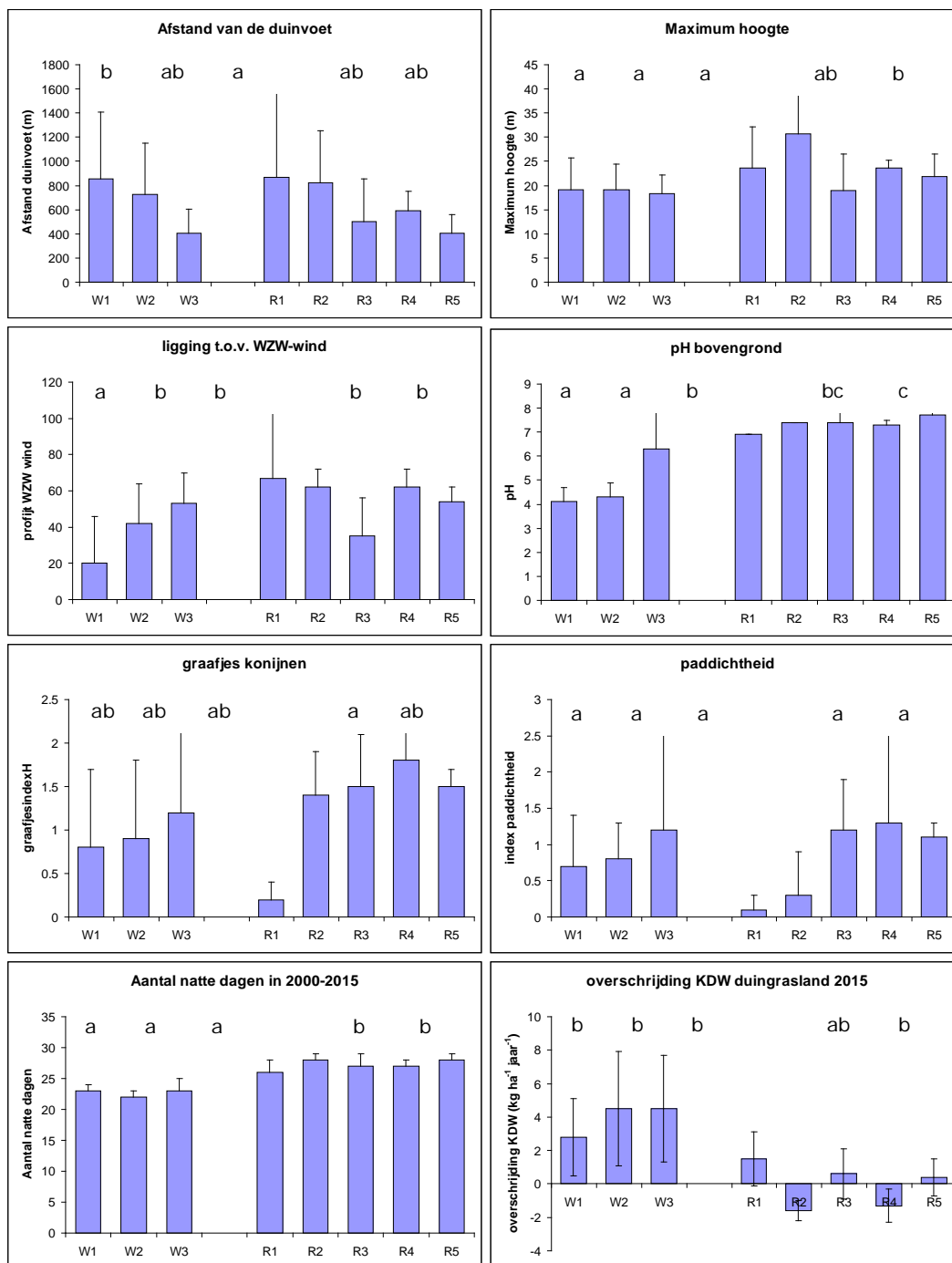
De pH van de bovengrond is significant lager in de kalkarme duinen, vooral in de laagste verstuivingsklassen. Dit heeft op zichzelf geen invloed op de eolische activiteit, maar kan wel de verstuifbaarheid van het zand beïnvloeden door de hogere accumulatie van organische stof bij een lagere pH. In het hoofdstuk over (re)activering van stuifkuilen kwam een duidelijk verband naar voren tussen de pH en de hoeveelheid C in de bovengrond. Ook is de pH van belang voor de soortensamenstelling van de vegetatie, en soorten als Kraaiheide komen alleen bij lage pH voor. Kraaiheide bleek zelfs overstuiving te kunnen weerstaan, en zich te vestigen in de accumulatiezones van gereactiveerde stuifkuilen in Eldorado op Terschelling. Ook vergrassing door soorten als Helm en Zandzegge is bij een lage pH een veel groter probleem dan bij hoge pH. Als deze soorten zich eenmaal hebben gevestigd en/of dominant zijn, wordt de bodem sterk vastgelegd en zal verstuiving niet makkelijk spontaan meer optreden.

Ook konijnen lijken belangrijk voor de eolische dynamiek, hoewel dit niet eenduidig is. Het aantal graafjes was niet significant verschillend tussen kalkarme en kalkrijke duinen, maar er waren wel significant minder graafjes in de laagste verstuivingsklasse van de kalkrijke duinen. Voor de dichtheid aan paden was het verschil tussen verstuivingsklassen echter niet significant, hoewel er wel een tendens is van minder paden in gebieden met relatief lage eolische activiteit.

Zoals eerder is opgemerkt is het aantal natte dagen, net als de totale neerslag, significant hoger in de kalkrijke dan in de kalkarme duinen. Dit speelt mogelijk een rol bij de hogere eolische activiteit in de kalkrijke duinen als gevolg van waterosie. Binnen de kalkarme of kalkrijke duinen is er echter geen verschil in natte dagen tussen verstuivingsklassen, wat de rol van watererosie minder eenduidig maakt. Dit moet nader worden onderzocht.

Ook de rol van N-depositie is niet geheel eenduidig. De totale N-depositie in de kalkarme duinen is op dit moment niet verschillend van die in de kalkrijke duinen. Wel is de bijdrage van NO_x hoger in de kalkrijke duinen, wat een aantal positieve correlaties oplevert tussen eolische dynamiek en NO_x-depositie. Uit het deelonderzoek naar temporele dynamiek blijkt zelfs dat de verstuiving langs de Hollandse kust toenam tussen 1980 en 1990, ondanks de piek in N-depositie. Dit was vermoedelijk het gevolg van de zware stormen van 1983, 1986, 1988 en vooral 1990, in combinatie met het stoppen van het vastleggingsbeheer. Beide onderzoeken geven aan dat verstuiving op kan treden bij hoge NO_x-depositie, in ieder geval in de kalkrijke duinen. Mogelijk is NO₃ ook een minder groot probleem dan NH₄. In eolisch actieve gebieden zijn nog weinig plantenwortels aanwezig om NO₃ of NH₄ op te nemen. NO₃ wordt ook niet vastgehouden door het adsorptiecomplex in de bodem, en het spoelt waarschijnlijk snel uit naar het grondwater (Kooijman et al. 2014). Uit eerder onderzoek kwam naar voren dat een hoge N-depositie in kalkrijke duinen niet leidt tot sterkere accumulatie van N in de bodem van kalkrijke duinen, mogelijk als gevolg van de hoge nitraatuitspoeling (Aggenbach et al. 2017). Ook nemen micro-organismen in de bodem waarschijnlijk meer NH₄ dan NO₃ op, omdat ze NH₄ als bouwstof of brandstof kunnen gebruiken, en NO₃ niet. De behoefte aan NO₃, dat grotendeels als alternatief voor zuurstof gebruikt wordt in natte bodems, is in de droge duinen minder groot. Een groot deel van de NH₄ wordt vervolgens ook nog omgezet in NO₃, wat bij gebrek aan plantenwortels snel kan verdwijnen naar het grondwater.

Figuur 6-2: Gemiddelde waarden en standaarddeviaties voor verschillende stuifkuilklassen in de kalkarme en kalkrijke duinen van het Wadden- en Renodunaal district. W = Waddendistrict; R = Renodunaal district; 1 = 0-10, 2 = 11-20; 3 = 21-50; 4 = 51-100 en 5 = >100 stuifkuilen per km². Verschillende letters geven aan dat de waarden voor een bepaalde variabele onderling significant verschillen ($p < 0.05$).



De overschrijding van de KDW voor Grijze duinen is voor de kalkarme duinen tezamen gemiddeld gesproken significant hoger dan voor de kalkrijke duinen, hoewel de onderlinge variatie groot kan zijn. Dit is waarschijnlijk voor het kale zand niet van direct belang, maar wel voor de vegetatie die daarna volgt, of om de stuifkuil heen ligt. De KDW is hoger voor kalkarme Grijze duinen als gevolg van de sterkere gevoeligheid voor verzuring en de hogere P-beschikbaarheid dan in kalkrijke Grijze duinen (Kooijman et al. 2017). Vergrassing als gevolg van hoge N-depositie is in de kalkarme duinen een veel groter probleem dan in de kalkrijke duinen. Naar de toenemende dominantie van Kraaiheide is geen onderzoek gedaan, maar het is mogelijk dat ook dit door hoge N-depositie wordt bevorderd. Zodra vegetatie zich gevestigd

heeft wordt het moeilijker het zand spontaan in verstuiving te krijgen. Dit zal een groter probleem zijn als zich eenmaal sterk wortelende soorten als Helm, Zandzegge en Kraaiheide hebben gevestigd.

6.6 Discussie en conclusies

De verschillen in eolische activiteit tussen de kalkarme en kalkrijke duinen lijken veroorzaakt door elkaar versterkende factoren, die los staan van de huidige dynamiek van de zeereep. In de kalkarme duinen van het Waddendistrict is de situatie relatief ongunstig door een optelsom van lagere maximum hoogte, ongunstiger ligging op de wind, minder neerslag en natte dagen, lagere kalkrijkdom en pH van de bodem, en een N-depositie die hoger is dan de KDW met een overmaat aan NH_4 . In duingebieden met enige verstuiving is de maximum hoogte gemiddeld 3.5 m lager dan in de kalkrijke duinen van het Renodunaal district. Ook de ligging t.o.v. de WZW-wind, de nettotransportrichting, is ongunstiger, met name in gebieden met weinig verstuiving. De laag-actieve gebieden liggen vooral op Vlieland, Terschelling en Ameland, die een N-NNW orientatie van de kust hebben. Ook zijn de gemiddelde neerslag en het aantal natte dagen lager dan in de kalkrijke duinen, wat mogelijk ongunstig is voor de waterosie. Verder zijn er in de kalkarme duinen minder konijnen. Ook is de kalkrijkdom van de bodem lager, wat een lagere pH oplevert van de bovengrond. Dit leidt tot verhoogde accumulatie van organische stof in de bovengrond, en een lagere gevoeligheid voor verstuiving. Ook gaat een lagere pH gepaard met de vestiging of uitbreiding van zand-vastleggende planten als Kraaiheide en Zandzegge. Daarnaast lijkt atmosferische N-depositie een probleem, door de grotere overschrijding van de KDW voor kalkarme Grijze duinen en de relatieve overmaat aan NH_4 , dat minder snel uitspoelt en in de droge duinen meer door microorganismen wordt opgenomen dan NO_3 . De hoogste eolische dynamiek wordt in het Waddendistrict gevonden bij een relatief korte afstand van de duinvoet en een gunstige ligging t.o.v. de WZW wind.

Ook in de kalkrijke duinen is de eolische dynamiek hoger op korte afstand van de duinvoet, en lager als er weinig konijnen of paadjes zijn. In de kalkrijke duinen van het Renodunaal district is de situatie verder veel gunstiger dan in het Waddendistrict, dankzij de optelsom van hogere maximum hoogte, gunstiger ligging op de wind, meer neerslag en natte dagen, een hogere konijnenstand, hogere kalkrijkdom en pH van de bodem, en een N-depositie die om en nabij de KDW van kalkrijke grijze duinen ligt en gedomineerd wordt door NO_3 . Nog een voordeel is dat veel kalkrijke duingebieden ook in de jaren negentig sterk actief waren, waardoor de vegetatie rond 2000 waarschijnlijk vooral nog uit pioniersoorten en mossen bestond. Dit is makkelijker opnieuw spontaan in verstuiving te krijgen dan een stuifkuil met dichte begroeiing van diep-wortelende planten.

7 Temporele dynamiek in Wadden en Renodunaal district

7.1 Samenvatting

De eolische activiteit vertoont niet alleen regionale verschillen tussen duingebieden, maar ook een temporele dynamiek. Langs de Hollandse kust nam de verstuivingsactiviteit toe tussen 1980 en 1990, waarschijnlijk als gevolg van het stoppen van het vastleggingsbeheer, in combinatie met het relatief hoge aantal konijnen. In de periode 1990-2003 nam de eolische activiteit langs de Hollandse kust echter sterk af. Dit is mogelijk veroorzaakt door het ontbreken van zeer zware stormen na januari 1990, hoewel de gemiddelde transportkracht niet verschilde van de periode hiervoor. De stabilisatie werd in ieder geval versterkt door de nog steeds veel te hoge N-depositie, in combinatie met de afname van de konijnenstand door de virusziekte VHS. De afname in eolische activiteit na 1990 vond plaats langs de hele Nederlandse kust, met een dieptepunt in de hoeveelheid kaal zand en de activiteit van konijnen tussen 2000 en 2005 in zowel het kalkarme Wadden als het kalkrijke Renodunaal district.

In de kalkrijke duinen van het Renodunaal district nam de eolische activiteit na 2003 weer toe, hoewel zeer zware stormen pas weer in 2013 voorkwamen, en de gemiddelde transportkracht significant lager was dan in de voorgaande decennia. De toename van verstuiving is waarschijnlijk vooral toe te schrijven aan de verdere daling van de N-depositie, in combinatie met een herstel van de konijnenstand. In de kalkrijke duinen daalde de N-depositie significant naar waarden rond de KDW voor kalkrijke Grijze duinen. Hierdoor nam de vastlegging van het zand door algengroei af, maar werd ook de groei van de vegetatie geremd. Mogelijk had de vegetatie in de dichtgegroeide stuifkuilen in 2003 nog grotendeels een pionierkarakter, waardoor de kuilen relatief gemakkelijk weer in verstuiving kwamen. Daarnaast trad herstel van de eolische dynamiek vooral op in gebieden met veel konijnen. De konijnenstand herstelde zich na 2003 met name in de kalkrijke duinen, wat de eolische dynamiek verder versterkte door graafoveractiviteiten en het korthouden van de vegetatie.

In het Waddendistrict bleef herstel van de eolische dynamiek na 2005 echter uit, behalve lokaal bij een gunstige ligging t.o.v. de WZW wind, of drukkbe grazing. In het grootste deel van het Waddendistrict bleef de activiteit van konijnen ook na 2005 laag, maar zelfs bij hoge konijnenactiviteit trad geen herstel op. In het Waddendistrict bleef de N-depositie hoger dan de KDW voor kalkarme Grijze duinen. De hoge N-depositie heeft sinds 1990 op grote schaal geleid tot vergrassing met Helm, Zandzegge en mogelijk ook tot uitbreiding van Kraaiheide. Dit zijn grote en robuuste soorten met een uitgebreid wortelstelsel, die verstuiving sterk tegengaan.

7.2 Inleiding

Uit de voorgaande hoofdstukken komt naar voren dat er een groot verschil bestaat in de recente ontwikkelingen van de kleinschalige dynamiek tussen het kalkarme Waddendistrict en het kalkrijke Renodunaal district. In de kalkrijke duinen nam de eolische activiteit tussen 2000 en 2014 vrijwel overal sterk toe, maar in de kalkarme duinen veel minder, met name op de Waddeneilanden met een N-NNW oriëntatie van de kust. Voor een goed begrip van de huidige regionale verschillen in dynamiek en de veranderingen tussen 2000 en 2014 is het belangrijk terug te kijken naar het iets verdere verleden. Dit was geen deel van de opdracht, maar wel nodig om de regionale verschillen in eolische activiteit in een breder perspectief te plaatsen. In dit hoofdstuk wordt een korte analyse gemaakt van de verstuivingsactiviteit in een aantal gebieden langs de Hollandse kust in de periode 1975-2015, deels gebaseerd op eerder OBN-onderzoek naar effectgerichte maatregelen tegen verzuring en eutrofiering in open droge duinen (van der Meulen et al. 1996; Kooijman et al. 2005). Hierbij is met een schuin oog gekeken naar de transportkracht van de wind in de periode 1980-2013, de gemiddelde N-depositie langs de

Hollandse kust, het aantal konijnen in Nederland en de neerslag. Verder is voor 39 duingebieden een inschatting gemaakt van de oppervlakte aan actieve gebieden en de graaactiviteit van konijnen in 1996, 2000, 2005, 2010 en 2015.

7.3 Methoden

Voor de hoeveelheid kaal zand in verschillende gebieden in de periode 1975-2015 is gebruik gemaakt van diverse bronnen. Voor de Noorderpan in Meijndel en de Blink zijn de waarden voor de periode 1975-1997 afkomstig uit Kooijman et al. (2005). De waarden voor begraasde en onbegraasde gebieden in de Amsterdamse waterleidingduinen voor de periode 1988-2014 zijn afkomstig uit Kooijman et al. (2017). De overige waarden zijn afkomstig uit het huidige onderzoek en gebaseerd op luchtfotointerpretaties van verschillende jaren. De transportkracht van de wind in de periode 1980-2013 is gebaseerd op de berekeningen in het hoofdstuk over verklarende factoren van de regionale verschillen in verstuiving. De transportkracht is berekend als percentage van de hoogst gemeten waarde in een bepaald weerstation, en weergegeven als het gemiddelde van de Kooy, IJmuiden, Valkenburg, Hoek van Holland en Vlissingen. Gegevens over de jaarlijkse neerslag en het aantal droge dagen gaven geen significante verschillen of verbanden te zien en worden verder niet besproken. Voor de N-depositie langs de Hollandse kust is gebruik gemaakt van de berekeningen uit hetzelfde hoofdstuk over verklarende factoren, waarbij per jaar het gemiddelde is genomen van de gebieden tussen Den Helder en Hoek van Holland. De dataset is deels gebaseerd op de trends in N-depositie voor heel Nederland, omdat niet voor ieder jaar gegevens van de kust beschikbaar waren. Voor de wel beschikbare jaren bleek de correlatie tussen N-depositie aan de kust en in heel Nederland heel hoog te zijn ($R^2 = 0.93$). De ontbrekende jaren zijn met behulp van de bijbehorende regressievergelijking berekend.

Gegevens over de konijnenstand in verschillende jaren zijn afkomstig van de duinbeheerders en NEM. Het gemiddeld aantal konijnen per jaar is vanaf 1984 gebaseerd op officiële tellingen in het voorjaar en het najaar. Het aantal konijnen is uitgedrukt als percentage van het aantal in het voorjaar van 1984, dat op 100% is gesteld. Voor de periode 1980-1983 is gebruikt gemaakt van schattingen op basis van de jacht vanaf 1950. De N-depositie en het aantal konijnen hebben waarschijnlijk een tegengestelde invloed op de verstuivingsactiviteit.

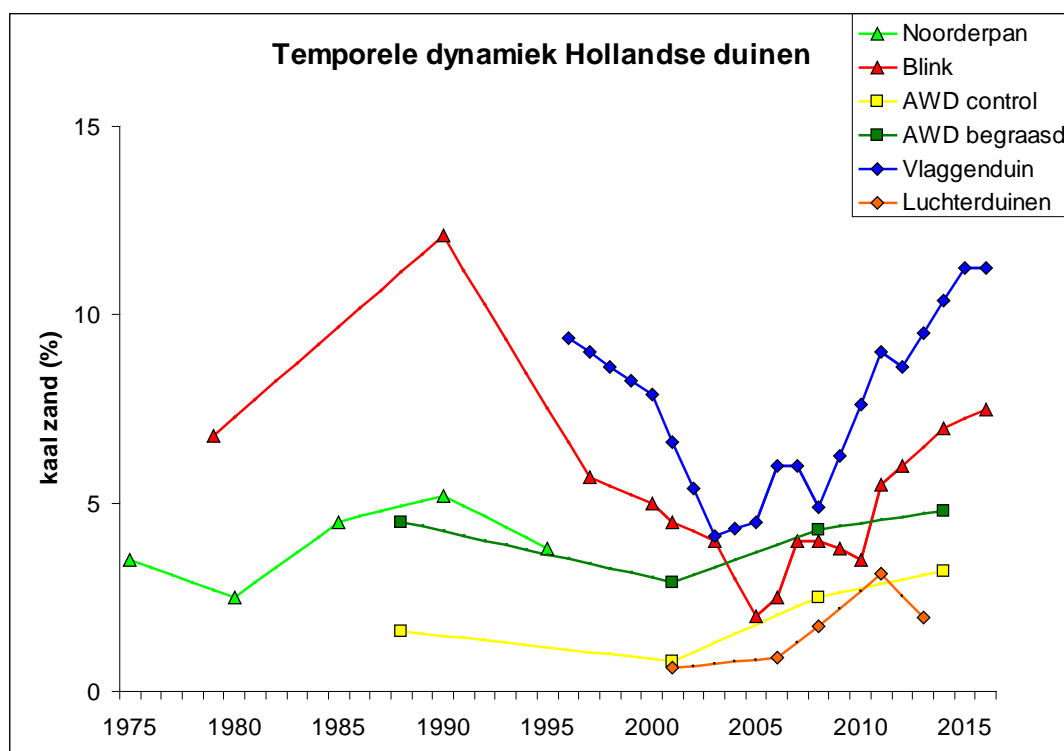
Om dit nader te onderzoeken is een ruwe schatting gemaakt van het relatieve belang van N-depositie en het aantal konijnen aan de hand van een gecombineerde index. Voor deze index zijn de N-depositie en het aantal konijnen voor ieder jaar tussen 1980 en 2013 uitgedrukt als percentage van het maximum in die periode. Daarna is het getal voor konijnen afgetrokken van het getal voor N-depositie. Een hoge waarde voor deze index betekent derhalve een grote belasting voor het duinsysteem, met hoge N-depositie en weinig konijnen, en een lage waarde een lage belasting, met weinig N-depositie en veel konijnen. Mogelijke statistische verschillen tussen de tijdvakken 1980-1990, 1991-2003 en 2004-2013 in de transportkracht van de wind, het aantal konijnen, de N-depositie en de gecombineerde index voor N-depositie en konijnenstand zijn getoetst met eenwegvariantieanalyse, met tijdvak als onafhankelijke variabele (General Linear Models, Cody & Smith 1987). Verschillen tussen de drie perioden zijn posthoc getoetst met een LSmeans test. De mogelijke relatie tussen de index voor N-depositie en konijnenstand en de verstuivingsactiviteit is verder geanalyseerd met lineaire regressie voor de Blink, het duingebied met de langste tijdreeks. Voor de ontbrekende jaren is de oppervlakte kaal zand geschat op basis van interpolatie tussen het voorafgaande en het volgende jaar.

Omdat langjarige reeksen voor het Waddengebied ontbreken, zijn luchtfoto's uit 1996, 2000, 2005, 2010 en 2015 van 21 duingebieden in het Waddendistrict met tenminste enige eolische activiteit vergeleken met die van 18 gebieden in het Renodunaaldistrict. Hierbij is een inschatting gemaakt van het actieve oppervlak (kaal of zeer dynamisch), de graaactiviteit van konijnen en de dichtheid van paden. De eolische activiteit is geschat in klassen (0%, 0-5%, 5-10%, 10-20%, 20-30%, 30-40%, 40-50%), die later weer vertaald zijn naar percentages actief oppervlak. De graaactiviteit van konijnen en de dichtheid van paden zijn geschat in zes klassen, van geen naar extreem. Met de waarden voor het actieve oppervlak, konijnen en paden voor ieder gebied en jaar is een tweewegvariantieanalyse uitgevoerd met district (Wadden vs Renodunaal) en jaar (1996, 2000, 2005, 2010 en 2015) als onafhankelijke variabelen (General Linear Models, Cody & Smith 1987). Ook zijn posthoc LSmeans tests uitgevoerd om verschillen tussen ieder gebied en jaar te toetsen. Daarnaast zijn correlaties berekend tussen kaal zand, konijnen en paden. De statistische toetsen zijn ook uitgevoerd voor gebieden met weinig en veel konijnenactiviteit afzonderlijk, in zowel Wadden als Renodunaal district. De gebieden zijn

verdeeld op basis van de konijnenindex in 2015, met waarden van 0-1 voor weinig en 2-3 voor veel konijnen.

7.4 Temporele dynamiek langs Hollandse kust

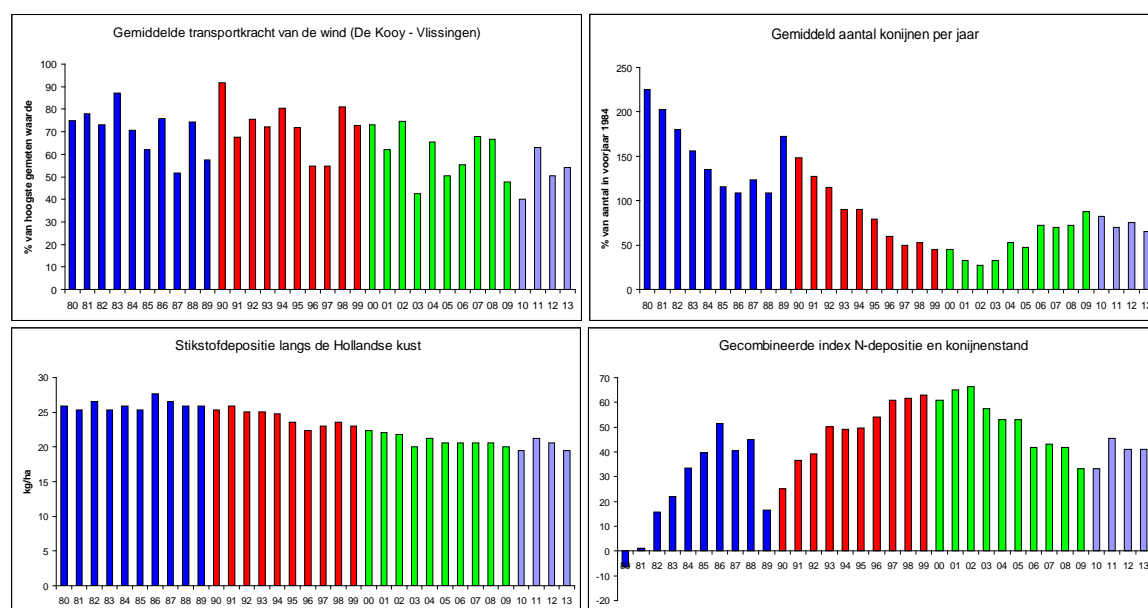
In de Hollandse duinen nam de verstuivingsactiviteit in de onderzochte gebieden toe in de periode 1980-1990 (Figuur 7-1). De toename in verstuiving tussen 1980 en 1990 is gebaseerd op slechts twee gebieden (Kooijman et al. 2005), maar ook andere duingebieden vertoonden rond 1990 een hoge eolische activiteit. De hoge verstuivingsactiviteit was ten dele het gevolg van het stoppen met het vastleggingsbeheer sinds eind jaren 1970 (Jungerius et al. 1981). Ook traden er twee zeer zware stormen op met windsnelheden van meer dan 100 km per uur, in november 1983 en januari 1990 (Figuur 7-2). De sterke verstuiving was mogelijk ondanks de hoge N-depositie, die in de jaren tachtig piekwaarden bereikte, en significant hoger was dan in latere decennia (Tabel 1). Wel was de konijnenstand relatief hoog, hoewel niet meer zo hoog als voor de uitbraak van de myxomatose. Het aantal konijnen was in de jaren tachtig significant hoger dan in latere decennia. De gecombineerde index voor N-depositie en verstuiving was ondanks de hoge N-depositie gemiddeld juist significant lager dan in latere perioden, wat suggereert dat een hoge konijnenstand de invloed van hoge N-depositie kan compenseren.



Figuur 7-1. Het verloop van de eolische dynamiek in de afgelopen decennia in een aantal Hollandse duingebieden.

Tussen 1990 en 2003 nam de verstuivingsactiviteit langs de Hollandse kust echter sterk af. De hoeveelheid kaal zand vertoonde in veel gebieden een dieptepunt tussen 2000 en 2005. Zoals ook het hoofdstuk over de regionale analyse laat zien waren er in 2000 langs de hele Hollandse kust relatief weinig actieve stuifkuilen. Het is niet geheel duidelijk in hoeverre de afname in verstuivingsactiviteit het gevolg was van het weer. Hoewel er na januari 1990 geen zeer zware stormen meer geweest tot oktober 2013, was de gemiddelde transportkracht van de wind in de jaren negentig vergelijkbaar met die van de jaren tachtig. Wel was de N-depositie nog steeds erg hoog, waardoor de groei van de vegetatie werd bevorderd. Daarnaast was de konijnenstand sterk aan het dalen als gevolg van de nieuwe virusziekte VHS, en significant lager dan in de jaren tachtig. De gecombineerde index van N-depositie en het aantal konijnen was in de jaren negentig echter significant hoger dan in de jaren tachtig, vooral als gevolg van de sterke daling in de konijnenstand. De piek in de index lag rond 2001-2002. Ook de vergrassing bereikte in de

Hollandse kalkrijke duinen een hoogtepunt rond 2001, als gevolg van hoge N-depositie en lage konijnenstanden (Kooijman et al. 2017).



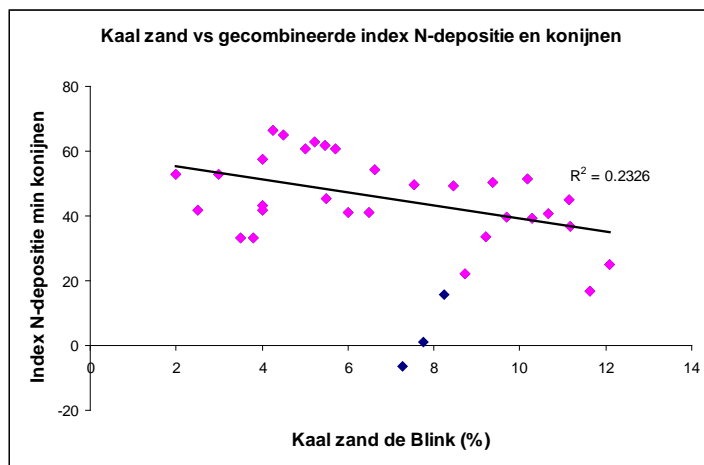
Figuur 7-2. Trends over de periode 1980-2013 in de gemiddelde transportkracht van de wind langs de Hollandse kust (bron: KNMI), gemiddelde N-depositie in Nederland (bron: RIVM), de konijnenstand in de duinen (bron: duinbeheerders, NEM) en de gecombineerde index van N-depositie minus de konijnenstand.

Tabel 7-1. De gemiddelde transportkracht van de wind, het aantal konijnen, de N-depositie en de gecombineerde index voor N-depositie minus konijnen langs de Hollandse kust in de perioden 1980-1990, 1991-2003 en 2004-2013. De index is een maat voor de gecombineerde stress van N-depositie als (gebrek aan) konijnen. De weergegeven waarden zijn gemiddelden en standaarddeviaties, gebaseerd op de gemiddelde waarden voor de afzonderlijke jaren uit Figuur 2. Significante verschillen voor een bepaalde variabele tussen de verschillende periodes zijn weergegeven met verschillende letters ($p < 0.05$).

	Transportkracht (% maximum)	Aantal konijnen (% voorjaar 1984)	N-depositie (kg ha ⁻¹ jaar ⁻¹)	Index N- depositie minus konijnen
1980-1990	72 (12) ^b	153 (39) ^b	26,0 (0,7) ^c	26 (18) ^a
1991-2003	68 (11) ^b	65 (32) ^a	23,3 (1,6) ^b	55 (10) ^c
2004-2013	56 (9) ^a	70 (12) ^a	20,4 (0,6) ^a	43 (7) ^b

Na 2003 nam de eolische activiteit in het kalkrijke deel van het Nederlandse duingebied weer sterk toe. Deze toename is echter niet toe te schrijven aan een algemene verhoging van de windsnelheid. De gemiddelde transportkracht van de wind was in de periode 2001-2013 juist significant lager dan in de voorgaande decennia. Ook trad de eerste zeer zware storm pas op in oktober 2013, terwijl de eolische activiteit al vanaf 2003 toenam. Blijkbaar is er ook zonder zware stormen wind genoeg voor verstuiving, wat overeenkomt met Jungerius et al. (1991), die aangaven dat de meeste verstuiving plaats vindt bij windkracht 6-7. Wel nam het aantal konijnen weer iets toe, hoewel de waarden significant lager waren dan in de jaren tachtig voor de uitbraak van VHS, en statistisch niet verschillend van de jaren negentig. Ook nam de N-depositie verder af, en was significant lager dan in de jaren tachtig en negentig. De beste verklaring voor de toename in verstuiving wordt waarschijnlijk gegeven door de combinatie van meer konijnen en lagere N-depositie. De indexwaarde voor N-depositie en konijnenstand laat vanaf 2003 een forse daling zien vergeleken met de periode 1990-2003. Ook de hoeveelheid kaal zand in de Blink vertoonde een significante correlatie met de indexwaarde, behalve voor de jaren 1980, 1981 en 1982, net na het stoppen van het vastleggingsbeheer (Figuur 7-3). Na de

zeer zware storm van 1983 was de relatie tussen index en kaal zand waarschijnlijk meer natuurlijk. De hoeveelheid kaal zand was laag bij een hoge indexwaarde, d.w.z. bij hoge N-depositie en relatief weinig konijnen, en nam significant toe bij een lage indexwaarde, bij lagere N-depositie en hogere konijnenstand.



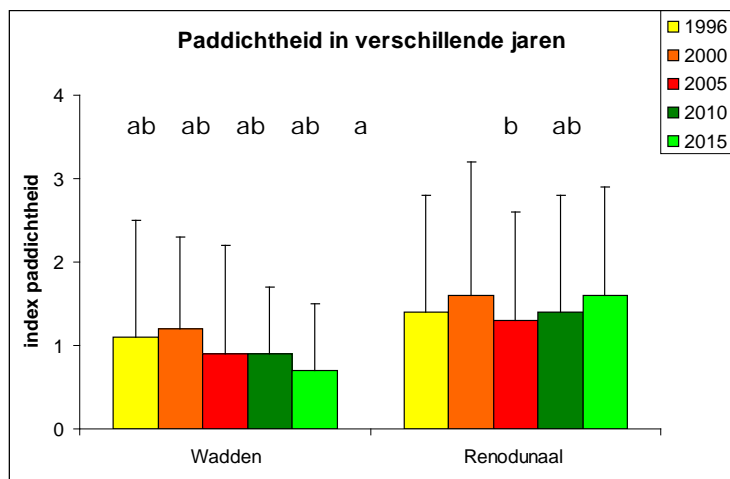
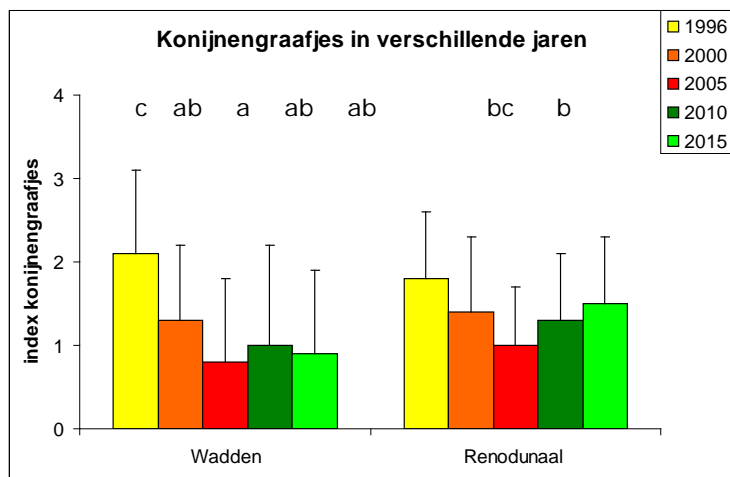
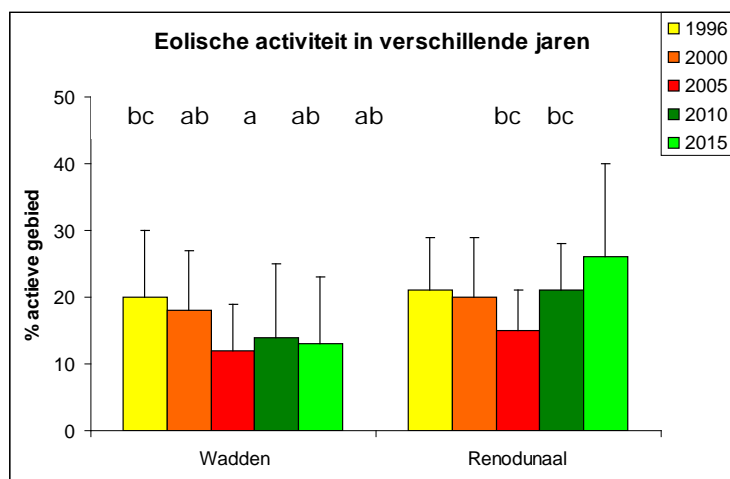
Figuur 7-3. De relatie tussen de hoeveelheid kaal zand in de Blink en de gecombineerde index voor N-depositie en aantallen konijnen. De waarden voor 1980, 1981 en 1982 zijn niet in de trendlijn meegenomen, omdat het vastleggingsbeheer waarschijnlijk nog een grote rol speelde.

7.5 Renodunaal en Waddendistrict

Voor het Waddendistrict zijn weinig langjarige reeksen van de verstuivingsactiviteit beschikbaar, en het is niet duidelijk of de verstuiving ook in de Wadden toenam tussen 1980 en 1990. Wel is voor de latere periode voor 21 gebieden in het Waddendistrict een analyse uitgevoerd van de eolisch actieve gebieden in 1996, 2000, 2005, 2010 en 2015 (Figuur 7-4). Dit maakt het mogelijk een eventuele daling te traceren in activiteit tussen 1990 en 2000-2005, en de mogelijke opleving daarna. Voor een goede vergelijking is eenzelfde analyse uitgevoerd voor 18 duingebieden in het Renodunaal district. Naast de eolische activiteit is ook een inschatting gemaakt van de activiteit van konijnen en van de dichtheid van paden.

In zowel het Wadden als het Renodunaal district nam de eolische activiteit af tussen 1996 en 2000, net als in de langere tijdserie langs de Hollandse kust. In het Waddendistrict was het kale of zeer dynamische oppervlak in 2005 significant lager dan in 1996. Ook in het Renodunaal district vertoonde de eolische activiteit een dieptepunt in 2005. Zoals eerder aangegeven lijkt dit vooral te wijten aan de afname van konijnen in de jaren negentig, in combinatie met de nog steeds te hoge N-depositie. De activiteit van konijnen en de hoeveelheid kaal zand zijn onderling significant gecorreleerd ($R = 0.37$). De konijnenactiviteit in de vorm van graafjes nam in beide districten tussen 1996 en 2005 af, al was deze afname alleen voor het Waddendistrict significant. In de dichtheid van paden is in beide gebieden niet echt een verandering met de tijd te zien, hoewel er wel een significante correlatie is met de hoeveelheid kaal zand ($R = 0.41$). De paddichtheid kan wel bijdragen aan verschillen tussen gebieden in dynamisch oppervlak, maar is geen verklaring voor de veranderingen in temporele dynamiek.

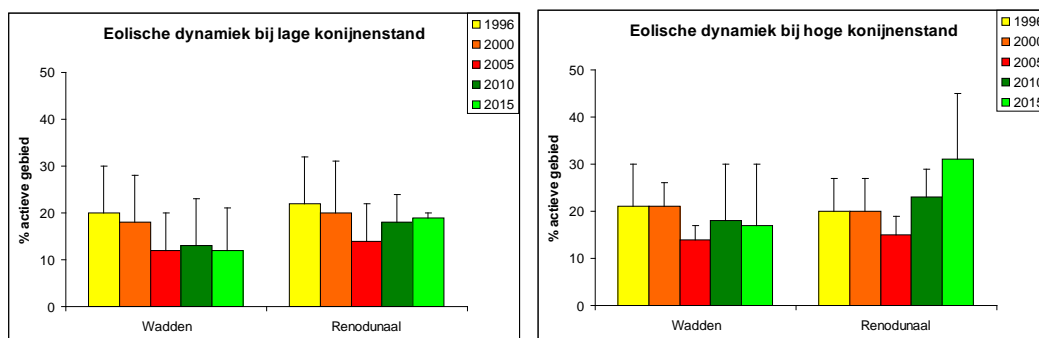
Na 2005 nam de verstuivingsactiviteit in het kalkrijke Renodunaal district weer sterk toe, net als in de eerdere paragrafen van dit hoofdstuk. De hoeveelheid kaal zand was in 2015 significant hoger dan in 2005. De toename in verstuiving is ten dele toe te schrijven aan verhoogde activiteit van konijnen, maar in het Renodunaal district was de toename in graafjes niet significant. Zoals eerder aangegeven speelt waarschijnlijk ook de daling van de N-depositie hier een rol. In het kalkarme Waddendistrict trad na 2005 in de meeste gebieden echter helemaal geen verbetering op, zoals ook al bleek uit de regionale analyse. Ook de activiteit van konijnen bleef relatief laag, en vertoonde geen herstel zoals in het Renodunaal district. Alleen in gebieden als de Landerummerheide op Terschelling en de Nederlanden op Texel nam de eolische activiteit weer toe, als gevolg van de drukkbe grazing met schapen en geiten of de relatief gunstige ligging t.o.v. de WZW wind en de permanent hoge activiteit van konijnen.



Figuur 7-4. De eolische activiteit, activiteit van konijnen en dichtheid van paden in de kalkarme duinen van het Waddendistrict ($n = 21$) en de kalkrijke duinen van het Renodunaal district ($n = 18$) in de jaren 1996, 2000, 2005, 2010 en 2015. De weergegeven waarden zijn gemiddelden en standaarddeviaties. Verschillende letters geven significante verschillen aan tussen gebieden en/of jaren ($p < 0.05$).

De mogelijke invloed van konijnen is verder bekeken aan de hand van een analyse van kalkarme en kalkrijke gebieden met weinig of veel konijnen in zowel Renodunaal als Waddendistrict (Figuur 7-5). Net als in de eerdere analyse was de eolische activiteit in 2005 significant lager dan in andere jaren, voor zowel gebieden met weinig als gebieden met veel konijnen. Herstel van de eolische dynamiek na 2005 trad in gebieden met veel konijnen wel op, maar alleen in de kalkrijke duinen van het Renodunaal district. In het Renodunaal district is het

herstel van de eolische dynamiek in gebieden met veel konijnen tamelijk spectaculair geweest. De eolische activiteit was in 2015 zelfs hoger dan in 1996, wat kan wederom wijst op de positieve effecten van de afname van de N-depositie. In het Waddengebied trad echter nauwelijks herstel op van de verstuivingsdynamiek, ook niet in gebieden met veel konijnen. De uitzonderingen zijn de Landerumerheide op Terschelling en de Nederlanden op Texel. Op de Landerumerheide is de vergrassing van de jaren negentig met drukkbe grazing door geiten en schapen tegengegaan, en in de Nederlanden zijn de stuifkuilen eigenlijk steeds actief gebleven, mogelijk dankzij de gunstige ligging t.o.v. de WZW wind en de relatief korte afstand tot zee.



Figuur 7-5. Gemiddelde eolische activiteit in gebieden met weinig of veel konijnenactiviteit in de kalkarme duinen van het Waddendistrict ($n = 16$ en 8) en de kalkrijke duinen van het Renodunaal district ($n = 8$ en 10) in de jaren 1996, 2000, 2005, 2010 en 2015.

7.6 Discussie en conclusies

De temporele analyse maakt duidelijk dat de eolische activiteit van periode tot periode kan verschillen. De eolische activiteit nam toe in de periode 1980-1990, in ieder geval langs de Hollandse kust, en af in de jaren daarna, ook in de Wadden, met een dieptepunt in activiteit tussen 2000 en 2005. Spontaan herstel van eolische activiteit trad na die tijd wel op in het Renodunaal district, maar niet in de Wadden.

Voor de temporele dynamiek spelen wind, N-depositie en konijnen waarschijnlijk allemaal een rol. Gek genoeg is de transportkracht van de wind zelf niet van heel groot belang. Langs de Hollandse kust was de gemiddelde windkracht tussen 2001 en 2013 zelfs lager dan in de jaren tachtig en negentig, terwijl de eolische activiteit sterk toenam. Zeer zware stormen zoals die in januari 1990 en oktober 2013 spelen wel een rol, en ook de storm van januari 2018 zal waarschijnlijk tot flink wat verstuiving hebben geleid. Maar verder vindt veel verstuiving plaats bij windkracht 6-7 (Jungerius et al. 1991). Ook het aantal droge dagen kan een rol spelen, maar het gemiddelde aantal was niet verschillend tussen perioden met toename en met afname van verstuiving.

Konijnen en N-depositie zijn belangrijke factoren, die elkaar kunnen versterken. Konijnen kunnen verstuiving bevorderen door hun graafactiviteiten en het korthouden van de vegetatie rondom de stuifkuil. Een hoge N-depositie zorgt juist voor versterkte vastlegging, via sterkere groei van algen in het kale zand (Pluis & van Boxel 1993, Sparrius et al. 2012), en door verhoogde groei van de vegetatie. De hoge eolische activiteit in de kalkrijke duinen in de jaren tachtig was behalve aan het stoppen met het vastleggingsbeheer vooral te danken aan de hoge konijnenstand. In de jaren negentig nam de eolische dynamiek sterk af als gevolg van de afname van konijnen, in combinatie met de nog steeds te hoge N-depositie. In de periode na 2003 nam de eolische dynamiek echter weer sterk toe, als gevolg van zowel de toename van konijnen en de verdere daling van de N-depositie. In de Amsterdamse Waterleidingduinen nam ook de vergrassing in de kalkrijke duinen achter de zeereep sterk af (Kooijman et al. 2017).

De rol van N-depositie verschilt tussen gebieden en kan in verschillende fasen van verstuiving anders zijn. Zoals eerder aangegeven is hoge eolische activiteit niet perse onmogelijk bij hoge N-depositie, al zal de mobiliteit van het zand geremd worden door hogere algengroei (Pluis en van Boxel 1993, Sparrius et al. 2012). Het is denkbaar dat de N-depositie in het kale zand in de

kalkrijke duinen vooral uitspoelt. Er zijn nog weinig plantenwortels zijn die dit op kunnen nemen, en in kalkrijke duinbodems wordt NH_4 door micro-organismen snel omgezet in NO_3 (Kooijman et al. 2017). NO_3 is negatief geladen, en wordt vrijwel niet vastgehouden aan het kationadsorptiecomplex van de bodem, waardoor het snel kan uitspoelen naar het grondwater (Ten Harkel en van der Meulen 1995). Eerder onderzoek naar N-opslag in de bodem liet zien dat de accumulatie van N tijdens de successie in kalkrijke duinen in gebieden met hoge N-depositie (AWD) inderdaad niet hoger was dan in gebieden met lage N-depositie in Wales (Aggenbach et al. 2017), waarschijnlijk als gevolg van hoge uitspoeling naar het grondwater. In de kalkarme duinen van het Waddendistrict is de uitspoeling mogelijk minder, omdat de nitrificatie veel lager is (Kooijman et al. 2005). Ook bestaat de N-depositie voor een groter deel uit NH_4 , wat beter aan het kationadsorptiecomplex blijft hangen, zeker in zure bodems waar de basenverzadiging laag is.

Zodra de vegetatie gaat groeien wordt hoge N-depositie een groter probleem. Een hoge N-depositie bevordert de plantengroei, waardoor de windsnelheid afneemt en het zand beter wordt vastgelegd. De vegetatie is echter gevoeliger voor N-depositie in kalkarme dan in kalkrijke gebieden. De kritische depositiewaarde (KDW) bedraagt 700 mol of 10 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ in de kalkarme Grijze duinen, en 1000 mol of 15 kg ha⁻¹ jaar⁻¹ in de kalkrijke Grijze duinen. Dit heeft te maken met een grotere gevoeligheid voor verzuring en een hogere beschikbaarheid van P (Kooijman et al. 2017). Met name in het Waddendistrict is in de jaren negentig op grote schaal vergrassing opgetreden met Helm en Zandzegge (van der Meulen et al. 1996). Ook de grootschalige uitbreiding van Kraaiheide in dit gebied heeft waarschijnlijk te maken met hoge N-depositie, hoewel dit nog niet goed is onderzocht (Kooijman en de Haan 1995). Helm, Zandzegge en Kraaiheide zijn allemaal hoge en sterk wortelende soorten, die ervoor zorgen dat het zand moeilijk opnieuw in verstuing kan komen.

Daarnaast zorgt een hoge biomassa-productie als gevolg van hoge N-depositie voor een hogere strooiselproductie, en in combinatie met verzuring ook voor een slechtere afbraak. Hierdoor kan het organische stofgehalte van de bodem vooral in de kalkarme duinen van het Waddendistrict snel toenemen, waardoor het zand wordt vastgelegd. In het onbegraasde deel van het Zwanenwater leidde de vervanging van Buntgrasvegetaties door Helm en Kraaiheide tussen 1986 en 1992 tot een forse toename van de dikte van de strooisellaag en de Ah (Kooijman en de Haan 1995). In het hoofdstuk over de multivariate analyse van de regionale verschillen in verstuing kwam naar voren dat het actieve oppervlak in 2000 een van de belangrijkste verklarende factoren was voor de eolische activiteit in 2014, zelf als het matig actief was. In het Waddendistrict was het actieve oppervlak in 2000 echter al veel kleiner dan in het Renodunaal district, en de vegetatie daaromheen waarschijnlijk sterker vergrast.

De resultaten van dit hoofdstuk maken wederom duidelijk dat voor de ruimtelijke en temporele dynamiek van kleine stuifkuilen verschillende factoren van belang zijn, maar ook dat combinaties van factoren verschillend kunnen uitpakken. In de kalkrijke duinen van het Renodunale district is de situatie wat betreft ligging t.o.v. de WZW wind en hoogte van het duinmassief relatief gunstig, en is een hoge N-depositie minder problematisch dan in het Waddendistrict. Wel is de konijnenstand erg belangrijk, en de combinatie van hoge N-depositie met een lage konijnenstand zeer ongunstig. Dit lijkt belangrijker dan windkracht, gezien de grootschalige stabilisatie van stuifkuilen tussen 1990-2003 bij relatief hoge transportcapaciteit. In de periode na 2003 nam de konijnenstand in veel kalkrijke duinen weer enigszins toe, en nam net name de N-depositie verder af. De stuifkuilen konden zich hierdoor weer uitbreiden, ondanks de gemiddeld lagere transportcapaciteit.

In het kalkarme Waddendistrict is de situatie wat betreft ligging aan zee, hoogte van het duinmassief en overschrijding van de KDW veel ongunstiger. Verhoging van de konijnenstand lijkt de situatie nauwelijks te verbeteren, gezien het uitblijven van spontaan herstel na 2005 ook in gebieden met veel konijnen. De hoge N-depositie is met de bevordering van Helm, Zandzegge en mogelijk ook Kraaiheide een blijvend probleem. Spontaan herstel van de eolische dynamiek in het Waddendistrict treedt mogelijk alleen op in zeer gunstig gelegen gebieden met blijvend hoge konijnenactiviteit, of in gebieden waar de vegetatie met drukkbe grazing is opengetrapt.

8 Patronen van bodem en vegetatie van actieve en gestabiliseerde stuifkuilen in Luchterduinen en Meijendel

Camiel Aggenbach, Yuki Fujita & Pieter Stuyfzand

Het onderzoek van dit onderdeel is gefinancierd door het onderzoeksprogramma de duinwaterbedrijven in Nederland (DPWE)

8.1 Samenvatting

In dit hoofdstuk is een analyse gemaakt van de verschillen in bodem en vegetatie tussen vier actieve en vier gestabiliseerde stuifkuilen (10-20 jaar geleden gestabiliseerd) in oppervlakkig tot dieper ontkalkte (ca. 0.1 tot 1 m) duinzones in het midden- en binnenduin van de Luchterduinen en Meijendel (Renodunaal district). Het betrof alle stuifkuilen die gedurende enkele decennia eolisch actief waren en kalkhoudend tot kalkrijk zand verstoven. De aangetroffen patronen zijn gerelateerd aan de zandbalans, de omvang van deflatie- en accumulatiezones en het kalkgehalte van het verstoven zand. Waar mogelijk zijn relaties kwantitatief gerelateerd aan factoren als omvang van de deflatiezone en het kalkgehalte van de deflatiezone.

De ruimtelijke invloed van uitstuiving van de deflatiezone op de omgeving is van drie factoren afhankelijk. Ten eerste werkt de omvang van de deflatiezone door op de hoeveelheid zand in de accumulatiezone, de oppervlakte van de accumulatiezone en de oppervlakte van de zone waarin de basenrijkdom en pH worden verhoogd. Ten tweede zorgt de combinatie van een (relatief) hoge positie van de deflatiezone in het duinlandschap, ZW/W-expositie van de deflatiezone en een hoog aandeel korte vegetatie aan de ZW-zijde van de deflatiezone voor een grotere relatieve omvang van de zandbalans, de accumulatiezone en de zone waarin de pH is verhoogd als gevolg van instuiving t.o.v. de deflatiezone. Ten derde werkt de kalkrijkdom van de bodemtoplaag (0-5 cm) in de deflatiezone positief door op de relatieve omvang van de zone waar de pH van de bodemtoplaag is verhoogd. Het kalkgehalte van het verstuivende zand in deflatiezones wordt bepaald door het kalkgehalte op enige diepte en de verhouding waarin kalkarm en kalkrijk zand in de deflatiezone mengen. Bij alle acht stuifkuilen vertoont het ruimtelijke patroon van het humusprofiel, ontkalkingsdiepte en bodem-pH een sterke samenhang met het verstuivingspatroon. Rond de deflatiezone is van dichtbij naar verder verwijderd een duidelijk aflopende gradiënt in kalkgehalte en pH van de bodemtoplaag aanwezig. Daarnaast werkt de kalkrijkdom van het stuifzand door in het kalk- en pH-patroon van de bodemtoplaag van zowel de accumulatiezone, als een zone grenzend aan de buitenkant van hiervan. Deze pH- en kalkgradiënten verschillen voor actieve en gestabiliseerde stuifkuilen. Bij gestabiliseerde stuifkuilen is de invloedzone met verhoogd kalkgehalte kleiner dan bij actieve stuifkuilen, maar is daarnaast nog een duidelijke zone met een verhoogde pH aanwezig.

De structuur en soortensamenstelling van de vegetatie van stuifkuilen vertoont een duidelijke samenhang met de gradiënten van humusprofiel, kalkrijkdom en zuurgraad. De deflatiezones van actieve stuifkuilen hebben geen of nauwelijks een vegetatie van mossen en vaatplanten, die van gestabiliseerde stuifkuilen een vegetatie met veel (korst)mosses en een weinig vaatplanten. In de zone buiten de deflatiezone is een gradiënt aanwezig met 1) een relatief lage soortenrijkdom in de zone dichtbij de deflatiezone door sterke stress a.g.v. droogtetekorten (geen Ah laag) en sterke instuiving met zand, 2) de hoogste soortenrijkdom in de zone op enige afstand van de deflatiezone met invloed van (voormalige) zwakke instuiving op een oude bodem met een Ah-C profiel, en 3) weer een relatief lage soortenrijkdom ver verwijderd van de

deflatiezone met een oude bodem zonder of met zeer geringe invloed van instuiving. Deze patronen van soortenrijkdom worden sterk bepaald door verschillen in het aantal soorten van gesloten duingraslanden grenzend aan de deflatiezones. Geringe instuiving kan faciliterend werken voor laag productieve soorten door een lagere bedekking van de grasachtige en lage struiksoorten. Dit kan veroorzaakt worden door de volgende mechanismen: 1) de instuiving leidt tot een geringere beschikbaarheid van een of meerdere nutriënten en daarmee tot een geringere productiviteit en 2) de instuiving leidt tot een betere voedselkwaliteit van de boven- en ondergrondse biomassa voor grazers en plantparasieten waardoor de aanwezige bovengrondse biomassa beperkt wordt.

De patronen van duingraslandsoorten van voedselarme, basenrijke omstandigheden zijn in de deflatiezone van gestabiliseerde stuifkuilen indifferent voor de kalkrijkdom van de deflatiezone. Deze zone heeft door de aanwezigheid van kalk in de toplaag altijd een hoge pH en daardoor komen er relatief veel basenminnende duingraslandsoorten voor. Het aantal basenminnende pioniersoorten is relatief hoog in de deflatiezone en het deel van de accumulatiezone dichtbij de deflatiezone van de stabiliseerde stuifkuilen. Tegen de verwachting in, is voor een hoge soortenrijkdom van pioniersoorten juist stabilisatie nodig (10-20 jaar geleden bij de onderzochte stuifkuilen). Voor de zone buiten de deflatiezone heeft het kalkgehalte van de bodemtoplaag in de deflatiezone wel een duidelijk effect op de patronen van zowel voedselarme basenrijke als voedselarme basenarme soorten in actieve en stabiele stuifkuilen. De soortgroep van voedselarme, basenrijke duingraslanden heeft hier een hoog soortenaantal en bedekking in geval van een kalkrijke deflatiezone. In de deflatiezone van gestabiliseerde stuifkuilen komen meer soorten van basenarme duingraslanden voor in geval van een relatief kalkarme toplaag, dan in geval van een kalkrijke toplaag. In de zone daarbuiten heeft deze soortgroep het grootste aantal bij actieve stuifkuilen met een relatief kalkarme deflatiezone. Bij actieve stuifkuilen met een kalkrijke deflatiezone komen ze vooral verder verwijderd van de deflatiezone voor. Bij gestabiliseerde stuifkuilen komen ze van dichtbij tot ver weg van de deflatiezone voor.

De successie van de vegetatie is bij de gestabiliseerde stuifkuilen verder gevorderd dan bij de actieve. Bij gestabiliseerde stuifkuilen vertoont het aantal duingraslandsoorten van basenrijke en basenarme omstandigheden in de omgeving van de deflatiezones dezelfde soort gradiënten als die van actieve stuifkuilen. Dit geeft aan dat de vroegere instuiving van kalkhoudend zand bij de gestabiliseerde stuifkuilen na 1 tot 2 decennia nog steeds een sterke weerslag heeft op de kwaliteit van de gesloten duingraslandvegetatie. Indicatieve berekeningen van ontkalkingsnelheden geven aan dat na instuiving van enkele cm's kalkrijk zand op een tijdschaal van enkele decennia nog steeds basenrijke omstandigheden aanwezig kunnen zijn. Dit betekent dat in de zones met sterkere instuiving door kleinschalige dynamiek met verstuiving van kalkrijk zand, na stabilisatie de effecten op de basenhuishouding en vegetatie gedurende decennia kunnen doorwerken (ordegrootte 50-100 jaar).

8.2 Inleiding

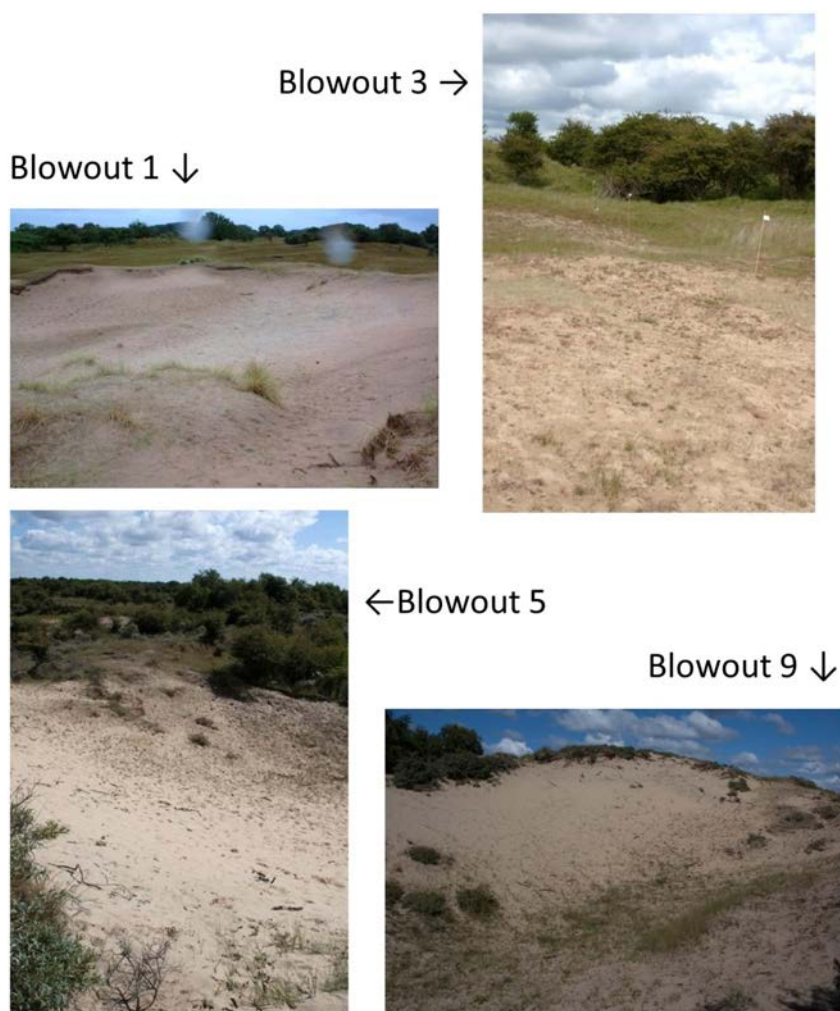
8.2.1 Specieke vragen

In het onderzoek aan de invloed van kleinschalige verstuiving op duingraslanden van de duinwaterbedrijven zijn vier langdurig actieve stuifkuilen en twee gestabiliseerde stuifkuilen in de Luchterduinen en twee gestabiliseerde stuifkuilen in Meijendel onderzocht (Fujita & Aggenbach 2015a+b). In aanvulling op de onderzoeksvragen D2 t/m D4 (zie H1) was het onderzoek ook gericht op de volgende specifieke vragen:

1. In hoeverre werkt de oppervlakte van de stuifkuil door in het effect van overstuiving op de bodem en vegetatie?
2. In hoeverre werkt het kalkgehalte van de stuifkuil door in het effect van overstuiving op de bodem en vegetatie?
3. In hoeverre zijn effecten van verstuiving nog aanwezig in de bodem en vegetatie na stabilisatie?

8.2.2 Selectie stuifkuilen

Ten einde bovenstaande vragen te beantwoorden werden 4 langdurig actieve stuifkuilen (LD_1, LD_3, LD_5, LD_9) geselecteerd en 4 gestabiliseerde stuifkuilen (LD_16, LD_21, ME_2, ME_8). Criteria voor de selectie waren: 1) een zoveel mogelijk geïsoleerde stuifkuil waarvan de effecten op de omgeving niet overlappen met die van een andere stuifkuil, 2) de omgeving van de uitstufzone bestaat zoveel mogelijk uit open, korte begroeiing, 3) de omgeving van uitstufzone is niet sterk beïnvloed door recente ingrepen in de bodem (plaggen, afgraven), 4) steile hellingen worden relatief weinig beïnvloed door graverij van konijnen, 5) actieve stuifkuilen zijn minstens 3 decennia eolisch actief en zijn dat nog steeds op het moment van het onderzoek, 6) gestabiliseerde stuifkuilen zijn minstens 10 jaar geleden gestabiliseerd. De verstuivingshistorie werd gereconstrueerd op basis van sequentiële luchtfoto's (zie verderop). Tabel 8-1 bevat een overzicht van de kenmerken voor landschappelijke ligging, geomorfologie, verstuivingshistorie, kalkrijkdom en de ontkalkingsdiepte van oude bodems in de omgeving van de stuifkuil. De stuifkuilen liggen in het midden- en achterduin van de Luchterduinen (code LD_x) en in het midden- en achterduin van Meijndel (code ME_x) met afstand tot zee die varieert tussen 1400 en 3950 m (foto's in Figuur 8-1 en Figuur 8-2). Alle stuifkuilen verstuiven/ verstoven kalkhoudend tot kalkrijk zand en het kalkgehalte van het duinzand onder de ontkalkingsgrens is matig hoog tot hoog. De locaties verschillen sterk in ontkalkingsdiepte van de oude bodems in omgeving (enkele decimeters tot meer dan 80 cm). De morfologie van de deflatiezone is ofwel schotelvormig of sleufvormig.



Figuur 8-1. Foto's van de actieve stuifkuilen in de Luchterduinen.



Figuur 8-2. Foto's van de gestabiliseerde stuifkuilen in de Luchterduinen (LD_16 en LD_21) en Meijendel (ME_2 en ME_8)

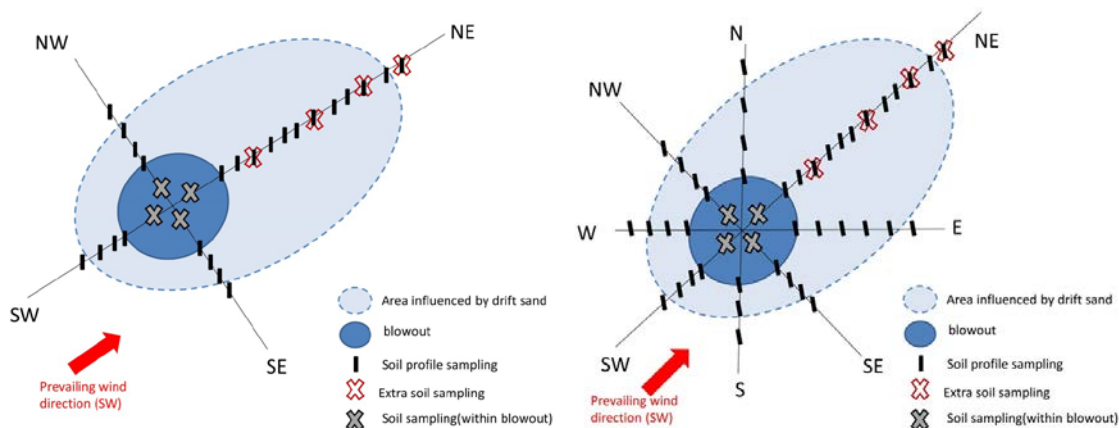
Tabel 8-1. Kenmerken van de acht geselecteerde stuifkuilen in de Luchterduinen en Meijndel.

Gebied	Locatie code	Duinzone	Afstand tot de zee (m)	Hoogte rand deflatiezone (m NAP)	Oorzaak eolische dynamiek	Morfologie	Oppervlakte deflatiezone (m ²)	Oppervlakte accumulatiezone (m ²)	Status eolische dynamiek	Periode eolische dynamiek (jaartal)	Duurvan eolische dynamiek (jaar)	Duurvan stabilisatie (jaar)	kalkgehalte onder ontkalkingsgrens (% DG)	kalkgehalte toplaag deflatiezone (% DG)	ontkalkingsdiepte omgeving (cm-mv)
Luchterduinen	LD_1	binnenduin	3480	5	secundaire stuifkuil, blijft open door sterke betreding	schotel	1358	2947	actief	<1979-2016	> 35	0	3.24 ± 0.57	1.64	30-60
Luchterduinen	LD_3	binnenduin	3450	4.5	secundaire stuifkuil, blijft open door sterke betreding	schotel	577	2255	actief	<1979-2016	> 35	0	2.09 ± 0.19	1.39	40->80
Luchterduinen	LD_5	middenduin	2800	10	spontane stuifkuil	sleuf	119	291	actief	<1979-2016	> 35	0	3.22 ± 0.43	3.14	20-25
Luchterduinen	LD_9	middenduin	2400	10	spontane stuifkuil	sleuf	522	714	actief	<1979-2016	> 35	0	2.88 ± 0.13	2.98	10-25
Luchterduinen	LD_16	binnenduin	3950	9	spontane stuifkuil	sleuf	404	4268	stabil sinds 14-25 j	<1979 t/m 1990	>11/22	14-25	1.52 ± 0.35	0.33 ± 0.20	40-80
Luchterduinen	LD_21	binnenduin	2120	6.5	spontane stuifkuil	schotel	227	487	stabil sinds ca. 25 j	<1979 t/m 1990	>11/22	14-25	2.51 ± 0.82	0.62 ± 0.44	30-60
Meijndel	MD_2	middenduin	1400	25	spontane stuifkuil	sleuf	356	1910	stabil sinds 6-15 y	1980/1990 - 2001/2009	11-29	6-14	2.78 ± 0.57	1.57 ± 0.29	15-20
Meijndel	MD_8	binnenduin	2450	10.5	spontane stuifkuil	sleuf	261	1278	stabil sinds 6-15 j	1962/1975 - 2001/2009	26-47	6-14	2.30 ± 0.50	1.30 ± 0.96	20

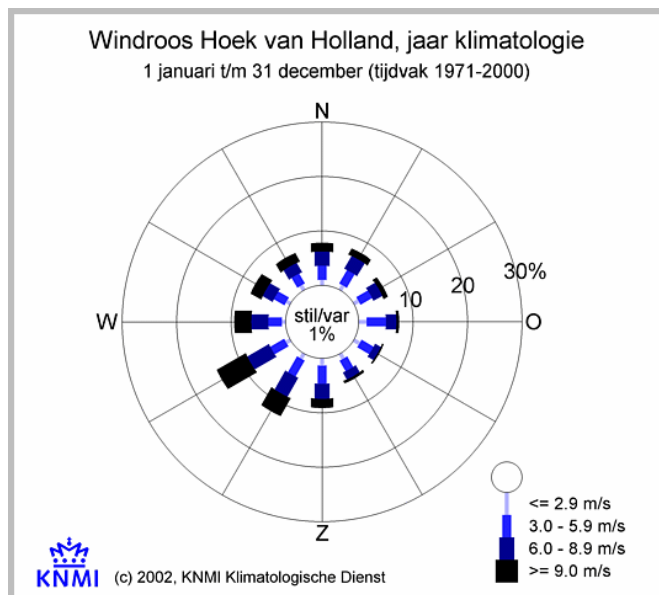
8.3 Methoden

8.3.1 Opzet meetnet

De beschrijving van bodem en vegetatie werd uitgevoerd in de deflatiezone en via transecten in een radiaal patroon die liepen van de rand van de uitstuifzone naar buiten toe. Het bodemprofiel is bij de actieve stuifkuilen (LD_1, LD_3, LD_5 en LD_9) beschreven in 4 transecten en in de gestabiliseerde stuifkuilen in 8 transecten (LD_16, LD21, ME_2, ME_8) (Figuur 8-3). De ligging van deze transecten werd zo gepland dat eventuele opgaande begroeiing van bomen en struiken zoveel mogelijk werd ontweken. De lengte van de transecten werd aan de excentrische zijde zo ver opgerekt totdat geen overstuivingslaag zichtbaar was in het bodemprofiel en de in situ gemeten pH van de toplaag niet verder daalde. De lengte van de transecten varieerde tussen 20 en 115 m. Detailonderzoek werd verricht op meetpunten in de uitstuifzone en in het transect met de sterkste instuiving aan de NO- of O-zijde van de deflatiezone. In het onderzoeksgebied treden hoge windsnelheden het vaakst op vanuit westzuidwestelijke richting (Figuur 8-4). Hierdoor accumuleert het meeste zand aan de noordoostzijde van de deflatiezone. Het bodemchemisch onderzoek en opnamen van de volledige vegetatie vonden daarom plaats in het noordoostelijke transect of indien de meeste accumulatie meer aan de oostzijde had plaatsgevonden in het oostelijke transect. Beschrijving van bodemprofielen en de bemonstering van de bodem vonden voor de actieve stuifkuilen plaats in 2014 en voor de gestabiliseerde stuifkuilen in 2015. In 2016 werden bij alle stuifkuilen ter plekke van de meetpunten voor bodemprofielen de vegetatiestructuur en de bedekking van veel voorkomende mossoorten opgenomen. Voor de actieve stuifkuilen werden daarvoor tevens 4 nieuwe transecten tussen de oude transecten opgenomen conform de configuratie van de meetpunten voor bodemprofielen in de gestabiliseerde stuifkuilen (Figuur 8-3 rechts). Van alle meetlocaties werden coördinaten en hoogte met een RTK-GPS ingemeten. Voor de bepaling van de zandbalans van elke stuifkuil zijn in 2016 aanvullend bodemprofielen beschreven en is de topografie ingemeten (zie par. 8.3.4).



Figuur 8-3. Opzet van het meetnet voor bodemprofielen, bodemchemie en vegetatie-opnamen in actieve stuifkuilen (links) en gestabiliseerde stuifkuilen (rechts).



Figuur 8-4. Windroos met de verdeling van windsnelheden.

8.3.2 Reconstructie verstuiwingshistorie

Op basis van luchtfoto'series werd de verstuiwingshistorie gereconstrueerd. Voor de locaties in de Luchterduinen werden daarvoor geo-gereferende foto's uit de jaren 2011, 2006, 2001, 1990, 1979, 1968 gebruikt, voor die in Meijndel uit de jaren 2009, 2001, 1995, 1990, 1985, 1980, 1962, 1938. Visueel werden voor elk jaar met een luchtfoto in GIS polygonen met veel kaal zand begrensd. Omdat de oudere foto's een relatief lage resolutie hadden en de belichting van foto's ook varieerde, werd geen onderscheid gemaakt in klassen van bedekking van kaal zand. Tijdens het veldonderzoek werd op basis van de morfologie ook de begrenzing van de uitstuiwzone met een RTK-GPS ingemeten.

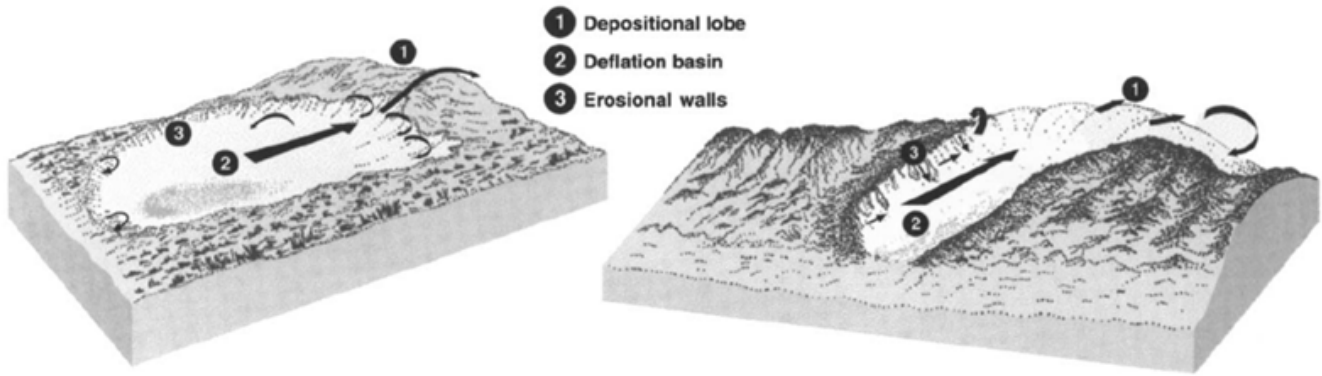
8.3.3 Classificatie morfologie stuifkuilen

De acht onderzochte stuifkuilen zijn op basis van de morfologie van de deflatiezone geclassificeerd volgens de typologie van Hesp (2002) (Figuur 8-11). Dit betreft de typen:

- 'schotel'-vorm (in Engels 'saucer') waarvan de deflatiezone een ondiepe, holle vorm heeft die lijkt op een schotel ;
- 'sleuf'-vorm (in Engelst 'trough') waarvan de deflatiezone een smalle, langgerekte, diepe vorm heeft. De erosiewallen of -hellingen zijn langer en steiler dan bij het schotel-type.

De variatie in deze typen is gradueel. Als onderscheidende variabele voor de indeling is de ratio hoogteverschil in de stuifkuil met de breedte van de stuifkuilgenomen (laag bij schotel-type en hoog bij sleuf-type).

De morfologie van de stuifkuilen werd verder beschreven met de lengte en breedte van de deflatiezone en accumulatiezone en daarvan afgeleide variabelen. Tevens werd gekeken of de morfologische typen een speciale positie hebben in het reliëf van het duinlandschap.

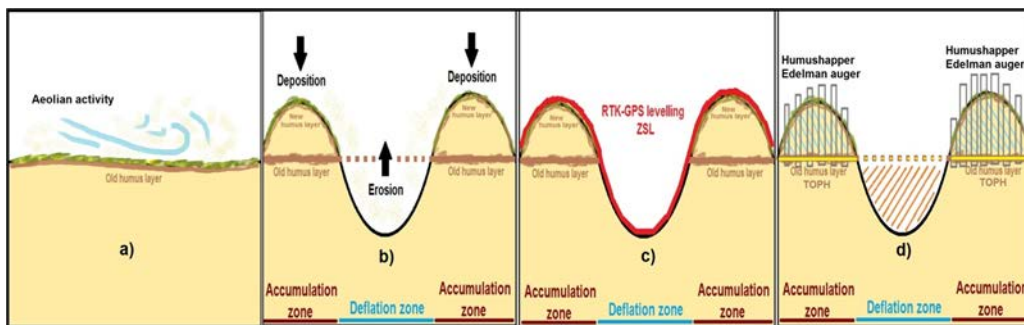


Figuur 8-5. Schematische weergave van twee geomorfologische typen stuifkuilen volgens de typologie van Hesp (2002; figuur overgenomen). Link het 'schotel'-type en rechts het 'sleuf'-type.'

8.3.4 Opstellen zandbalansen

Veldmetingen

De hoeveelheid zand die wordt uitgestoven, is van belang voor de mate waarin in een oppervlakkig ontkalkt duingebied kalkhoudend zand wordt uitgestoven en verspreid naar de omgeving. Omdat we vermoedden dat de acht stuifkuilen grote verschillen vertoonden in hoeveelheden uitgestoven en geaccumuleerd zand in de omgeving, zijn zandbalansen opgesteld waarbij de hoeveelheid uitgestoven zand in de deflatiezone en de hoeveelheid geaccumuleerd zand in de instuifzone werd berekend op basis van maaiveldhoogten, metingen van de dikte van de overstuivingslaag en reconstructie van de hoogteligging van het oude overstoven maaiveld rond de stuifkuil. Om de ruimtelijke verdeling van geaccumuleerd zand rond de deflatiezone te kwantificeren werd de maaiveldhoogte op veel plekken ingemeten ('ZSL' in m NAP) en ook het ruimtelijke patroon van de top van de oude humuslaag ('TOPH' in m NAP). In de accumulatiezone is ZLS minus TOPH de dikte van het geaccumuleerde zand, en in de deflatiezone is TOPH minus ZSL de dikte van het geërodeerde zand (Figuur 8-6).



Figuur 8-6: Schematische weergave van de aanpak voor het opstellen van de zandbalans. a: door eolische activiteit ontstaat een stuifkuil, b: er is een deflatiezone en accumulatiezone ontstaan, c: het actuele maaiveld wordt ingemeten; d: met profielbeschrijvingen en het opzoeken van het oude maaiveld in de rand van de deflatiezone wordt de diepteligging van de oude humuslaag in beeld gebracht.

Voor het vaststellen van de huidige maaiveldhoogte gebruikten we de hoogtemetingen van de meetpunten in het meetnet (zie boven) aangevuld met hoogtemetingen rond de deflatiezone en in de deflatiezone. In zones met veel accumulatie van ingestoven zand (vastgesteld op basis van bodemprofielen) en in de stuifkuilen werden de hoogtemetingen (RTK-GPS nauwkeurigheid $\pm 0.02-0.03$ m) met een hoge dichtheid uitgevoerd, omdat in deze zones ruimtelijke verschillen sterk bepalend zijn voor de zandbalans. Voor de top van het oude, overstoven humusprofiel gebruikten we de bodemprofielen van de transecten en bodemprofielen van aanvullende

locaties. Deze bodemprofielen werden gestoken met een humushapper en in geval van dikkere accumulatielagen werd doorgeboord met een Edelmanboor tot in het oude humusprofiel (maximaal tot 2.10 m diepte). Van deze meetpunten werden ook nauwkeurig de coördinaten en hoogte ingemeten. In de randen van de deflatiezone werd ook met afsteken van zand het oude bodemprofiel opgezocht. Hiervan werden puntsgewijs de coördinaten en de hoogte van de bovenkant van het humusprofiel ingemeten.

Vaststellen zonering geomorfodynamiek: deflatiezone en accumulatiezone

De actuele begrenzing van de deflatiezone werd op basis van geomorfologie nauwkeurig ingemeten met een RTK-GPS. Deze inmeting werd gecheckt met het patroon van humusprofielen.

Op basis van bodemprofielen werd de buitengrens van de accumulatiezone van zand bepaald door vast te stellen of er boven op een oud bodemprofiel zand is afgezet en door visuele beoordeling van zandinstuiving in de actuele situatie (relatief sterke zanddepositie open zand, open zand met mos, open zand met weinig grasachtige, open zand met Helm). Aanvullend werden voor de interpolatie tussen de punten met bodemprofielen ook luchtfoto's gebruikt voor het onderscheiden van de accumulatiezone, omdat in het verleden perioden zijn geweest waarin de sterke instuifzone zich verder uitstrekte dan in de actuele situatie (zones met veel kaal wit zand in periode met sterke verstuiving). Zeer geringe instuiving waarbij het zand snel gemengd raakt met de humusrijke toplaag werd niet aangemerkt als de accumulatiezone, omdat de grens tussen deze zwakke strooizone en geen instuiving niet is af te leiden uit bodemprofielen en luchtfoto's. Zeer geringe afzetting van zand buiten de vastgestelde accumulatiezone was af en toe wel zichtbaar aan licht-gekleurde zandkorrels op planten en mos wanneer instuiving zeer recent had plaatsgevonden en het afgezette zand nog niet door regen de moslaag en de Ah-laag was ingespoeld.

De vastgestelde begrenzing van de deflatiezone en accumulatiezone zijn in kaarten van de stuifkuilen weergegeven. Met GIS is hiervan ook de oppervlakte berekend. De oppervlakte van de accumulatiezone is berekend uit het verschil van de oppervlakte van de polygoon die de buitenkant van de accumulatiezone begrenst en de polygoon van de deflatiezone.

Merk op dat de in het veld gekarteerde deflatiezone kan afwijken van de begrenzing van 0 m zanddepositie grens waar het oude bodemprofiel door het maaiveld wordt aangesneden (grens DEF-ACC=0, zie onder). Reden hiervoor is dat de deflatiezone in eerst instantie zand erodeert uit de oude ondergrond. Wanneer de deflatiezone zich uitbreidt, gaat de stuifkuil ook zand eroderen op locaties waar eerder zand is afgezet. Daarbij wordt door de stuifkuil zelf afgezet zand weer verstoven en ook zand van de oude ondergrond. De grens DEF-ACC=0 ligt daarom deels op geringe afstand binnen de begrenzing van de gekarteerde, actuele deflatiezone. Het onderscheid tussen beide type grenzen was van belang bij de berekening van zandbalansen.

Interpolatie maaiveldhoogten en hoogte bovenkant oude humusprofiel

Voor elke stuifkuil werd op basis van alle verzamelde metingen van ZLS en TOPH respectievelijk het maaiveld en de hoogte van de top van de oude humuslaag geïnterpoleerd. Vervolgens is het hoogteverschil berekend voor beide lagen. Binnen een vooraf gedefinieerde deflatiezone en accumulatiezone werd het volume berekend van respectievelijk de deflatiezone (erosie) en de accumulatiezone (sedimentatie). Deze berekeningen werden uitgevoerd met GIS software ArcMap v10.4 (zie Bijlage 2 voor uitleg).

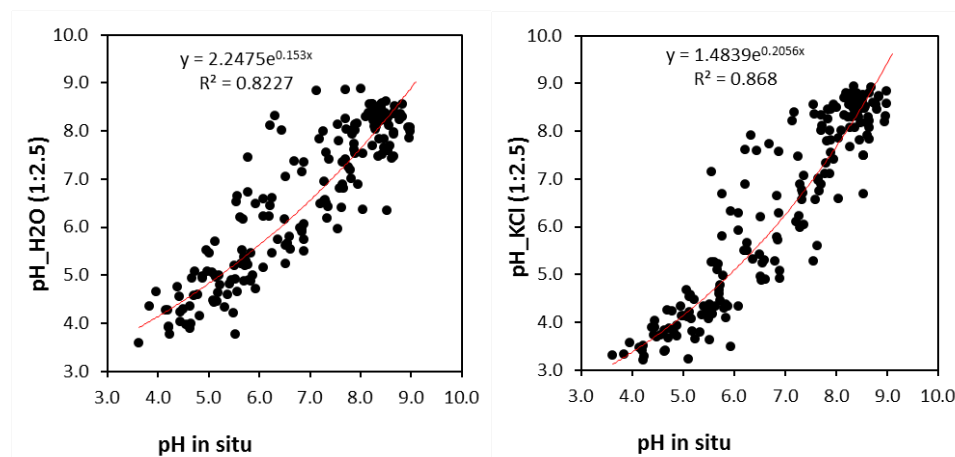
Het veldwerk voor en de eerste berekeningen van de zandbalansen werden uitgevoerd door Oriol Cervera Subirats (2016). Na beoordeling van deze resultaten zijn de berekeningen nadien nog verbeterd door toevoeging van bovengenoemde randvoorwaarden voor 0 cm accumulatie.

8.3.5 Beschrijving bodemprofielen

De bovenste 25 tot 40 cm werd gestoken met een humushapper met een interval tussen de meetlocaties van ca. 3-10 m. Beschreven werden het humusprofiel, kalkprofiel met de zoutzuurbuismethode en het profiel van de zuurgraad doormiddel van in situ metingen met een speciale pH-bodemelectrode (Hanna H199121). Horizonten voor het humusprofiel en kalkprofiel werden

onafhankelijk van elkaar vastgesteld met een verticale resolutie van 0.5 cm. De horizonten werden onderverdeeld in levend mos, dood mos, vers tot licht verteerd strooisel (L+F), sterk verteerd strooisel (H), organisch-stofrijk zand (Ah), zand met een matige hoeveelheid organische stof (AC) en organisch-stofarm zand (C). Het kalkprofiel werd in beeld gebracht met de reactie op het bedruppelen met 10% HCl oplossing. Daarbij werden als klassen onderscheiden: geen zichtbare en hoorbare reactie (K0), zichtbaar zwak bruisen en/of zwak hoorbare reactie (K1) en zichtbaar sterk bruisen (K2). Voor de actieve stuifkuilen werden diepten voor in situ pH-metingen afgestemd op de gecombineerde horizonten van het humus- en kalkprofiel en voor de gestabiliseerde stuifkuilen werd op vaste diepte van 2.5, 5.0, 7.5, 10, 15, 20, 25 en 30 cm onder de bovenkant van het minerale profiel gemeten. Metingen in een eventuele strooisellaag waren meestal niet mogelijk wegens de veelal zeer losse structuur. De pH electrode werd regelmatig gecontroleerd met pH buffers en zo nodig opnieuw gecalibreerd of vervangen.

De in het veld gemeten pH heeft een sterke correlatie met de pH gemeten in H₂O- en KCl-extracten (zie onder), maar de spreiding bij hogere pH waarde is vrij groot (Figuur 8-7). Deze relaties zijn niet volledig-lineair (beste fit met exponentiële functie). Bij hogere pH-waarden valt de in situ gemeten pH iets lager uit dan de pH in het extract. Een aantal meetpunten wijkt sterker af (pH in extract veel hoger dan de in situ pH). Mogelijk heeft dat ermee te maken dat in sommige monsters dat er bij roeren van de suspensie CO₂ ontwijkt waardoor de pH toeneemt.



Figuur 8-7: Relatie tussen veldmetingen van pH (pH in situ) met pH in H₂O-extract (1:2.5) en de pH in KCl-extract (1:2.5).

8.3.6 Zonering vanr beïnvloeding bodem-pH door verstuing

Fujita & Aggenbach (2015a & 2015b) hebben voor respectievelijk de actieve en gestabiliseerde stuifkuilen globaal zones met sterke en zwakke effecten van instuiving van zand op de basenrijkdom van de bodem onderscheiden. Omdat de criteria van beide studies niet gelijk waren, is voor deze studie met aangepaste, eenduidige criteria gewerkt voor alle acht stuifkuilen. Deze werden gebaseerd op basis op de in situ bodem-pH van de bodemtoplaag (0-5 cm). Er is gekozen voor deze variabele omdat zij op alle meetpunten van de transecten is gemeten. Een meetpunt werd als '**sterk beïnvloed**' beschouwd als de zuurgraad wordt gebufferd door kalk en dit werd toegekend in geval de pH > 7.5 is. Aanvoer van stuifzand heeft dan gezorgd voor de aanwezigheid van een kalkhoudende toplaag. Een meetpunt is '**zwak beïnvloed**' als het meetpunt niet door kalk wordt gebufferd, maar wel nog een verhoogde pH heeft ten opzichte van de niet beïnvloede omgeving. Dit werd toegekend aan punten met $pH_{\min} + 2 < pH < 7.5$. De variabele pH_{\min} is voor elke stuifkuil een specifieke 'achtergrond'-waarde voor de toplaag van niet of zeer gering beïnvloede, oude bodems en is gelijk aan de laagst gemeten pH waarde aan de buitenranden van het meetnet. In de zwak beïnvloede zone wordt de pH niet meer (sterk) gebufferd door kalk, maar heeft aanvoer van kalkhoudend zand wel geleid tot een verhoging van de bodem pH in de toplaag.

Op diverse kaarten van de stuifkuilen wordt de zonering van sterke en zwakke beïnvloeding van de bodem-pH door verstuiving weergegeven.

8.3.7 Bodembemonstering

De lagen van het minerale profiel werden bemonsterd (diepte t.o.v. bovenkant van het minerale profiel) op de volgende wijze:

- afzonderlijke monsters (geen mengmonsters) van locaties in het NO/O-transect van actieve stuifkuilen: 2 tot 3 diepten in de bovenste 15 cm waarbij de diepte werd afgestemd op het humusprofiel en kalkrijkdom (homogene bodemhorizont, homogeen voor kalkklasse);
- mengmonsters van 4 locaties in de uitstufzone van gestabiliseerde stuifkuilen met diepten 0-5, 5-10, 10-15, 40-50 cm;
- afzonderlijke monsters (geen mengmonsters) van gestabiliseerde stuifkuilen op 4 locaties met diepten van 0-5, 5-10, 10-15, 30-35, 45-50, 115-120 cm;
- afzonderlijke monsters (geen mengmonsters) van locaties in het NO/O-transect van gestabiliseerde stuifkuilen: diepten 0-5, 5-10, 10-15, 115-120 cm.

Er werden aparte monsters genomen voor chemische analyse en aparte volumemonsters met een steekring (diameter 6.7 cm) voor bepaling van de droge bulkdichtheid.

8.3.8 Bodemchemische analyses

Bepalingen

De volgende bepalingen zijn uitgevoerd

- alle monsters: bulkdichtheid op basis van het drooggewicht bij 65°C gedroogde volumemonsters;
- alle monsters: pH_H2O in gedemineraliseerd water en pH_KCl in een 1M KCl-extract; beide in een verhouding van 10 g veldvochtig monster en 25 ml vloeistof.
- monsters NO/O-transect actieve stuifkuilen: organisch-stofgehalte op basis van thermogravimetrie (gewichtsverlies na 4 uur gloeien bij 550°C t.o.v. bij 105°C gedroogd monster);
- alle monsters: meting van Ca-totaal met een handheld XRF-apparaat in monsters gemalen met een kogelmaler; deze metingen zijn gecorrigeerd met behulp van een calibratie-monsterset met nauwkeurige labmetingen van Ca-totaal uit het geochemisch onderzoek van Stuyfzand et al. (2012); de metingen van Ca-totaal met de handheld XRF zijn middels regressie met Ca-totaal-lab gecorrigeerd;
- monsters NO/O-transect actieve stuifkuilen: uitwisselbaar calcium in een ongebufferd 0.2M SrCl₂-extract

Afgeleide variabelen

Kalkgehalte

Voor actieve stuifkuilen LD_1 t/m LD_9 (hier zijn ook Ca_{exch} en SOM gemeten):

$$\text{CaCO}_3 = 0.0001 * (100.08935/ 40.08) * (\text{Ca}_{\text{XRF}} - \text{Ca}_{\text{sil}} - \text{Ca}_{\text{exch}} - \text{Ca}_{\text{SOMinert}} * 0.01 * \text{SOM}) \quad [\% \text{ DG}]$$

negatieve uitkomsten zijn op waarde 0 % gezet

Vergelijking 8-1

voor stabiele stuifkuilen LD_16, LD_21, ME_2 en ME_8:

$$\text{CaCO}_3 = 0.0001 * (100.08935/ 40.08) * (\text{Ca}_{\text{XRF}} - \text{Ca}_{\text{sil}}) \quad [\% \text{ DG}]$$

negatieve uitkomsten worden op waarde 0 % gezet

Vergelijking 8-2

Waarin:

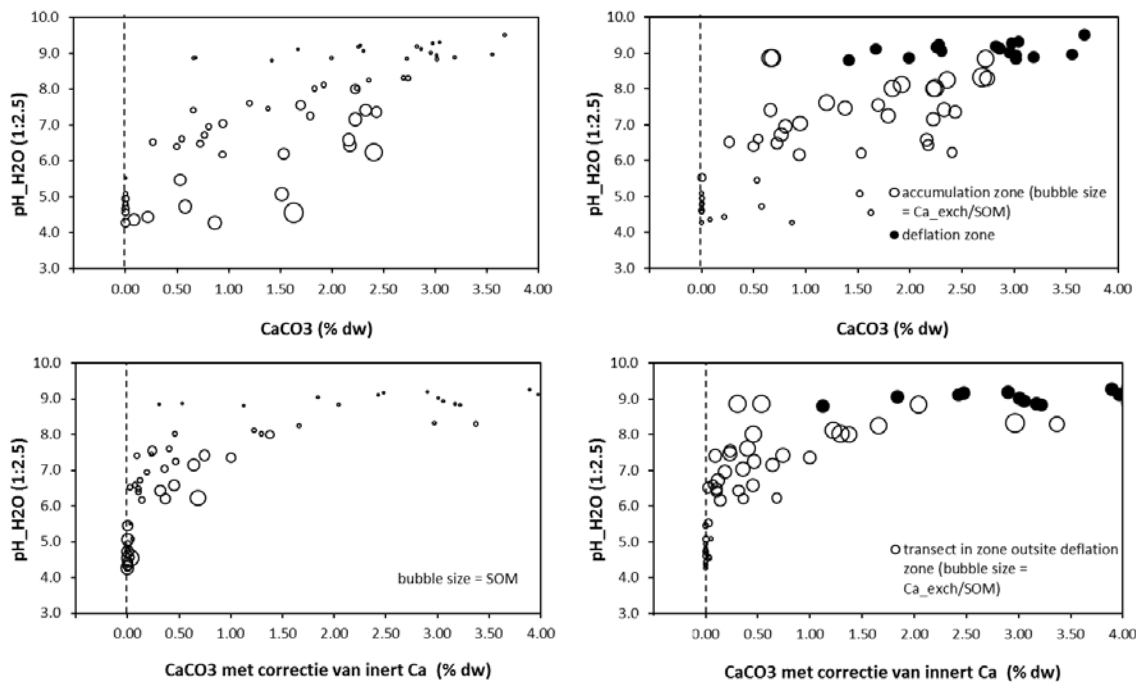
- Ca_{XRF} [mg/kg DG] is de gecorrigeerde meting van Ca-totaal met de handheld XRF
- Ca_{sil} [mg/kg DG] is Ca in silicaten met een vast gehalte van 1265 mg/kg DG = 39.55 mmol/kg DG
- Ca_{exch} [mg/kg DG] is Ca uitwisselbaar, gemeten in een $SrCl_2$ -extract
- $Ca_{SOMinert}$ [mg/kg DG] is waarde voor inert Ca in organische stof (niet uitwisselbaar in een zoutextract); het gehalte hiervan in organische stof is nog niet goed bekend en is nu voorlopig gezet op 32 g/kg SOM \approx 800 mmol/kg SOM;
- SOM is het organische stofgehalte [% DG]

Het gehalte Ca_{sil} is niet zelf gemeten in de monsters, maar hiervoor zijn metingen uit ander onderzoek gebruikt. Er is een gemiddeld gehalte gebruikt dat is gebaseerd op dichtbij gelegen metingen van het geochemische onderzoek van Stuyfzand et al. (2012) en een aantal metingen van Pieter Stuyfzand aan duinzand in het achterduin in de AWD (Paardenkerkhof) en Oude Duin afzettingen bij Monster.

Door verschil in meetpakketten voor de actieve en stabiele stuifkuilen verschilt de berekening van het kalkgehalte voor beide groepen. Omdat bij de actieve stuifkuilen ook uitwisselbaar Ca aan het kationenadsorbtiecomplex is gemeten, kan voor de berekening van het kalkgehalte Ca_{exch} worden afgetrokken van Ca_{XRF} . Deze correctie is vooral van invloed op monsters met een relatief hoog SOM-gehalte en een laag kalkgehalte. Verder bleek uit een meer gedetailleerde data-analyse dat enkele organisch stofrijke, zure monsters met een lage ratio van Ca_{exch}/SOM (dus weinig uitwisselbaar Ca) na correctie voor Ca_{sil} en Ca_{exch} tegen de verwachting in een hoog kalkgehalte hadden (Figuur 8-8, grafieken boven). Deze combinatie is geochemisch gezien zeer onwaarschijnlijk, te meer daar de veldopname van het kalkprofiel duidde op kalkarm substraat van de betreffende monsters. Dit patroon is een aanwijzing voor de aanwezigheid van een geringe fractie sterk gebonden calcium in de organische-stof. Deze fractie kon niet geëxtraheerd worden met een zoutextract (lage waarde van Ca_{exch} in het $SrCl_2$ -extract). Iteratief is het kalkgehalte gecorrigeerd met de fractie $Ca_{SOMinert}$ conform Vergelijking 8-1. Bij een waarde van 32 g/kg SOM DG schoven afwijkende monsters naar de range waarin de meeste niet afwijkende monsters liggen (schuiven naar links in de grafiek), zonder dat kalkrijke, humeuze monsters met een hoge pH sterk veranderen in kalkgehalte (Figuur 8-8, grafiek onder). Over betreffende sterk gebonden Ca-fractie is weinig bekend in duinbodems en kwantificering daarvan vergt nader onderzoek. Vragen daarbij zijn hoe variabel is het inerte Ca-gehalte van de organische stof en via welke route bindt het sterk aan de organische stof (primair door Ca-opname in de plant, of secundair door binding van minerale Ca aan organische stof tijdens de humificatie). Voor de balans van Ca in de bodemtoplaag tijdens de bodemsuccesie is deze fractie ook relevant omdat een deel van de fractie Ca die in de toplaag van jonge bodems in de kalk aanwezig is, niet uitspoelt, maar geïmmobiliseerd wordt in het humusprofiel.

Basenverzadiging

Voor de monsters van actieve stuifkuilen waarin uitwisselbare basen werden gemeten is de ratio van ($Ca_{exch} + Mg_{exch} + Na_{exch} + K_{exch}$) met het organische stofgehalte (BC/ SOM) berekend (in meq/kg SOM DG). Omdat het organische-stofgehalte in de zandige bodems hoofdzakelijk de kationuitwisselingscapaciteit (CEC) bepaalt, kan deze ratio als maat voor basenverzadiging worden gebruikt (in meq/kg droge stof). Goed gehumificeerde organische stof heeft een ratio van ca. 3000 meq/kg DS ((Appelo & Postma 2005; Blume et al. 2010; Van Wesemael 1992). Een waarde van > 2000 meq/kg komt overeen met een hoge basenverzadiging, een waarde van 1000-2000 meq/kg met een matige basenverzadiging en waarde van <1000 meq/kg met een lage basenverzadiging. Een kanttekening bij deze benadering is dat in jonge bodems het aandeel van relatief weinig gehumificeerde materiaal in de organische stof hoog kan zijn en dan een lagere CEC heeft. Als check wordt in Figuur 8-20 de relatie tussen de ratio BC/ SOM met de gemeten pH in extracten weergegeven. Deze relatie is zeer sterk wat erop duidt dat deze ratio in duinbodems een goede proxy-variabele is voor basenverzadiging. Tevens blijkt dat monsters met een hoge waarde van BC/ SOM op één na een waarde vertonen rond 3000 meq/kg SOM DG. Daarmee liggen de maximale waarden rond de genoemde grenswaarde voor de CEC van goed gehumificeerde organische stof.



Figuur 8-8: Berekende kalkgehalte in relatie tot gemeten pH-H₂O voor bodemonsters van actieve stuifkuilen. Boven zonder, onder met een correctie voor inert calcium in organische stof uitgaande van een vast gehalte inert calcium in de organische stof van 32 g/ kg SOM DG. Links geeft grootte van de open cirkels een maat voor het organische stofgehalte, rechts voor de ratio Ca_{exch}/SOM . Zwarte bollen zijn monsters uit de deflatiezone zonder metingen van Ca_{exch} .

8.3.9 Opname vegetatie en vegetatiestructuur

Volledige vegetatieopnamen werden gemaakt in plots van 1 bij 1 m op de meetlocaties in het NO/O-transect van alle stuifkuilen en op de vier meetlocaties in de uitstufzone van de gestabiliseerde stuifkuilen. De vegetatie-opnamen van de actieve stuifkuilen werden gemaakt in 2014 en die van de gestabiliseerde stuifkuilen in 2015. Voor vegetatiestructuur werden de bedekking van kaal zand, strooisel, moslaag, kruidlaag, struiklaag en boomlaag bepaald, en eveneens de hoogte van de kruidlaag, struiklaag en boomlaag. De bedekking van vaatplant-, mos- en korstmossen werd met de schaal van Londo opgenomen. De schaal van Londo werd getransformeerd naar procentuele bedekking. De soortensamenstelling werd geanalyseerd door plantensoorten (vaatplanten, mossen en korstmossen) in te delen in ecologische soortgroepen die relevant is voor de variatie van droge duingraslanden. Voor elke vegetatieopnamen zijn het aantal soorten en de cumulatieve bedekking per ecologische soortgroep berekend.

In meetpunten op 8 transecten rond de stuifkuilen en op de 4 meetlocaties in de uitstufzone van de gestabiliseerde stuifkuilen werd de vegetatiestructuur (bedekking van kaal zand, strooisel, moslaag, kruidlaag) en de bedekking van de regelmatig voorkomende mossen en enkele vaatplantsoorten opgenomen (Londo-schaal, zie boven). In de Luchterduinen is de opname uitgevoerd door Donny Pruijs (stagiaire bij Waternet) gedurende eind mei t/m eind september 2016 en in Meijendel door Tjomme van Maastricht (tijdelijk medewerker Dunea Duin & Water) gedurende eind juli t/m begin augustus 2016. In dit rapport worden alleen soorten besproken die gedurende de karterperiode nog goed traceerbaar waren. Een aantal pioniersoorten is hierdoor afgevallen.

8.4 Resultaten

8.4.1 Verstuivingshistorie

Op basis van interpretatie van series luchtfoto's is de eolische historie van de stuifkuilen geanalyseerd. Het verloop van het voorkomen van kaal zand is weergegeven in Figuur 8-9. Een overzicht van de verstuivingshistorie is weergegeven in Tabel 8-2.

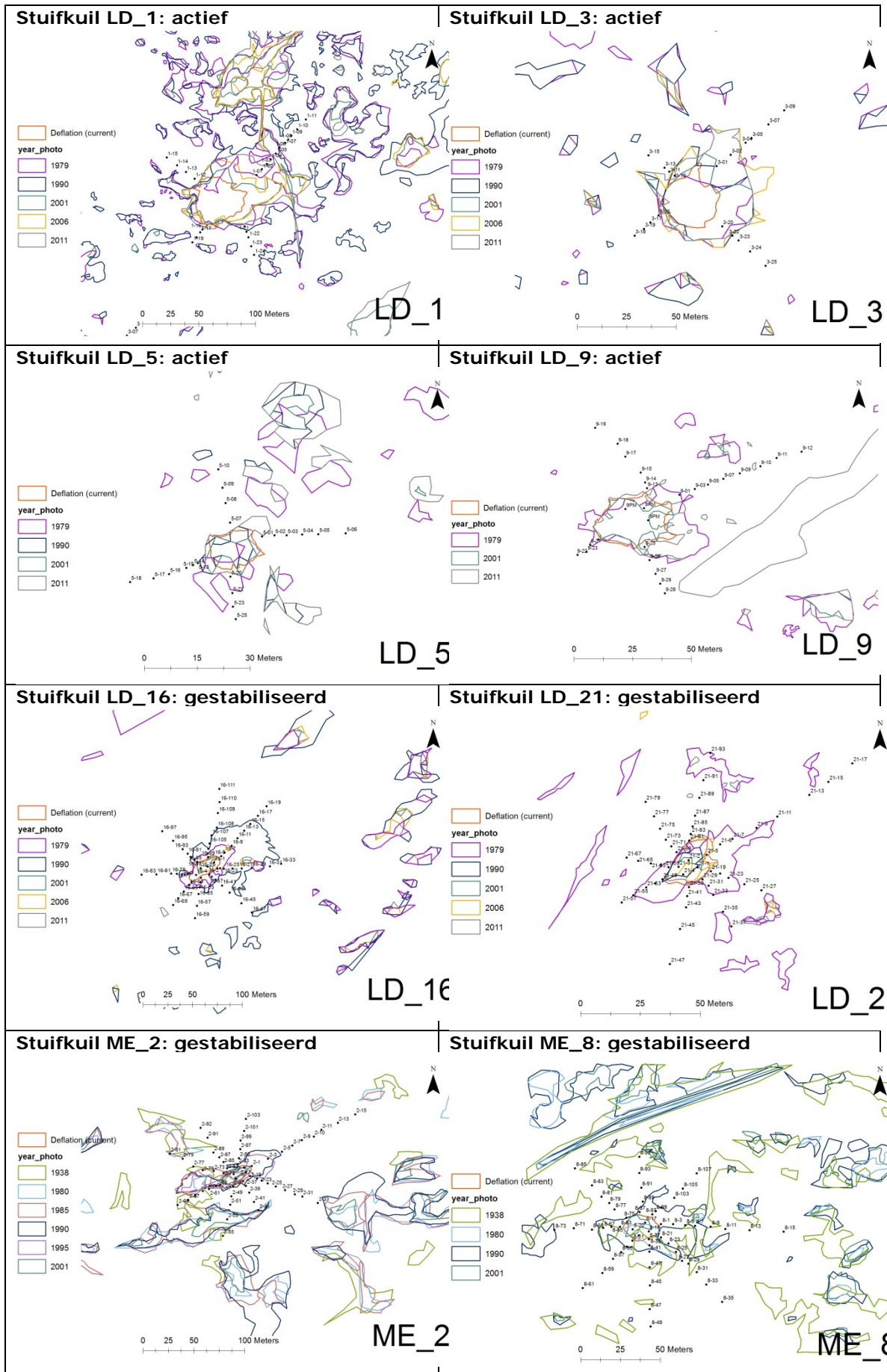
De nog steeds actieve stuifkuilen hebben een lange verstuivingsperiode die begonnen is vóór het jaar 1997. Opvallend is dat de accumulatiezones voor de verschillende jaren met luchtfoto's sterk in omvang variëren. Bij LD_1 reikte de instuifzone in 1990 het verst, was in 2001 geringer en breidde daarna weer sterk uit. Bij LD_3 was de accumulatiezone in 2006 en 2011 het grootst. Bij LD_5 reikte de instuifzone recent in 2011 het verst. Voor deze stuifkuil week het patroon van kaal zand in 1979 van de normaal gesproken aanwezige strooizone rond de deflatiezone. Mogelijk werd dit veroorzaakt door het lokaal afsterven van duingraslandvegetatie in het droge jaar 1976. Bij LD_9 was de accumulatiezone in 1979 het grootst en klein in 2001. Recent is de instuifzone iets groter geworden.

Bij de gestabiliseerde stuifkuilen vertoont de omvang van de instuifzone ook variatie. Bij LD_16 reikte de instuiving het verst in 1990 en bij LD_21 in 1979. Bij ME_2 was deze het grootst in 1990 en 1995 en bij ME_8 in 1990. Stuifkuil MD_2 ligt dicht op een stuifkuil aan de zuidkant. In 2015 is deze stuifkuil veel actiever geworden dan in 2001 waardoor een deel van de oude accumulatiezone van MD_2 recent wordt beïnvloedt door instuiving van zand uit de zuidelijke stuifkuil.

De analyse maakt duidelijk dat sterke uitstuiving en instuiving rond de deflatiezone zeer variabel is in de tijd in afhankelijkheid van het verloop van de weersomstandigheden en lokale verstuivingsgevoeligheid.

Tabel 8-2: Overzicht van de verstuivingshistorie van de stuifkuilen.

Gebied	Locatie code	Duinzone	Afstand tot de zee (m)	Hoogte rand deflatiezone (m NAP)	Oorzaak eolische dynamiek	Morfologie	Opper-vlakte deflatiezone (m2)	Opper-vlakte accumulatiezone (m2)	Status eolische dynamiek	Periode eolische dynamiek (jaartal)	Duur van eolische dynamiek (jaar)	Duur van stabilisatie (jaar)
Lucht erduinen	LD_1	binnenduין	3480	5	secundaire stuifkuil, blijft open door sterke betreding	schotel	1358	2947	actief	<1979-2016	> 35	0
Lucht erduinen	LD_3	binnenduין	3450	4.5	secundaire stuifkuil, blijft open door sterke betreding	schotel	577	2255	actief	<1979-2016	> 35	0
Lucht erduinen	LD_5	middenduין	2800	10	spontane stuifkuil	sleuf	119	291	actief	<1979-2016	> 35	0
Lucht erduinen	LD_9	middenduין	2400	10	spontane stuifkuil	sleuf	522	714	actief	<1979-2016	> 35	0
Lucht erduinen	LD_16	binnenduין	3950	9	spontane stuifkuil	sleuf	404	4268	stabiel sinds 14-25 j	<1979 t/m 1990	>11/22	14-25
Lucht erduinen	LD_21	binnenduין	2120	6.5	spontane stuifkuil	schotel	227	487	stabiel sinds ca. 25 j	<1979 t/m 1990	>11/22	14-25
Meijndel	MD_2	middenduין	1400	25	spontane stuifkuil	sleuf	356	1910	stabiel sinds 6-15 y	1980/1990 - 2001/2009	11-29	6-14
Meijndel	MD_8	binnenduין	2450	10.5	spontane stuifkuil	sleuf	261	1278	stabiel sinds 6-15 j	1962/1975 - 2001/2009	26-47	6-14



Figuur 8-9: De ontwikkeling van verspreiding van kaal zand in en rond stuifkuilen op basis luchtfoto-analyse.

8.4.2 Morfologie en landschappelijke positie stuifkuilen

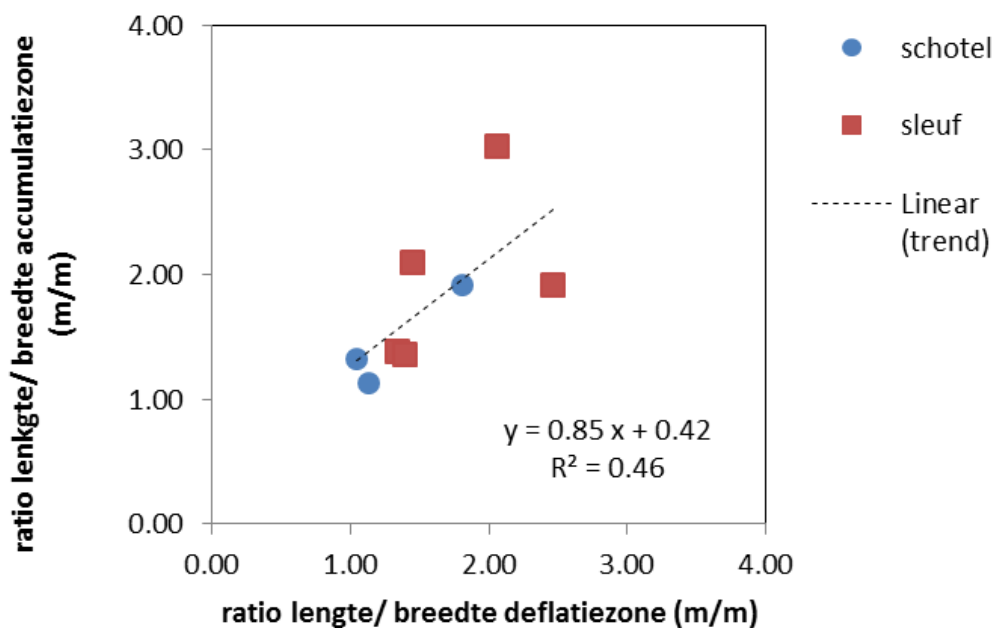
In Tabel 8-3 wordt een overzicht gegeven van de morfologische kenmerken en landschappelijke positie van de acht stuifkuilen. Als landschappelijke factoren zijn opgenomen de positie van de deflatiezone in het duinreliëf en de mate waarin opgaande begroeiing van struiken en bomen aanwezig is aan de loefzijde van de overheersende windrichting (=ZW). In Figuur 8-11 wordt de maaiveldhoogte (AHN) en een recente luchtfoto van de stuifkuilen weergegeven. De stuifkuilen vertonen een duidelijk onderscheid in de ratio van het hoogteverschil in de deflatiezone met de breedte van de deflatiezone. Drie stuifkuilen hebben een lage waarde voor deze ratio (0.04-0.07) en behoren daardoor tot het type '**schotel**'. Ze komen voor in een weinig geaccidenteerd duinvlakke (tweemaal) en aan de ZW-zijde van een laag duin (eenmaal). Ze hebben deels een gering hoogteverschil in de deflatiezone en deels relatief groot. De ratio lengte/breedte van de deflatiezone varieert van 1.04 tot 1.81. Er zijn vijf stuifkuilen met een lage ratio hoogteverschil/ breedte voor de deflatiezone (0.21-0.28) en die behoren tot het type '**sleuf**'. Deze liggen aan de ZW- of W-zijde van lage duinen of op de top van een duin (laag en hoog). De ratio lengte/breedte van de deflatiezone varieert van 1.33 tot 2.06 en de hoogteverschillen binnen de deflatiezone zijn relatief groot (2.6-4.1 m). De ratio van de oppervlakte de accumulatiezone/ deflatiezone (maat voor mate van ruimtelijke spreiding van zand t.o.v. de grootte van de deflatiezone) is voor beide morfologische typen sterk variabel, maar de hoogste waarden komen voor bij sleufvormige stuifkuilen in de hogere delen van duinlandschap (W/ZW-flanken van duinen, duintoppen) en met relatief weinig opgaande begroeiing van struiken en bomen aan de loefzijde van de overheersende windrichting. Sleufvormige stuifkuilen in een sterk aan de overheersende wind geëxposeerde landschappelijke positie lijken daarmee in potentie een grotere eolische invloed op de omgeving van de deflatiezone te kunnen uitoefenen.

De vorm van de begrenzing van de deflatiezone (Tabel 8-3) kan worden beschreven met de ratio van de lengtediameter en de breedtediameter. Deze varieert van 1.04 tot 2.06. De deflatiezone heeft daarmee een bijna cirkel- tot duidelijke ellipsvormige begrenzing. Deze ratio heeft voor de buitengrens van de accumulatiezone een range van 1.13 tot 3.03 en varieert daarmee ook van vorm van bijna een cirkelvormig tot een duidelijke ellips. De lengte/breedte ratio van de accumulatiezone is zwak gecorreleerd met die van de deflatiezone (Figuur 8-10). De ratio's verschillen voor schotel- en sleufvormige stuifkuilen niet duidelijk. Bij alle stuifkuilen met uitzondering van ME_8 ligt de accumulatie zone asymmetrisch rond de deflatiezone: een bredere zone aan de NO en NOO-zijde en een smallere zone aan de tegenoverliggende zijde. Aan de lijzijde van de overheersende windrichting strekt de accumulatiezone zich dus meestal verder uit. Bij stuifkuil ME_8 is de accumulatiezone aan de ZOO-zijde het breedst. Mogelijk is deze afwijkende geometrie van de accumulatiezone een gevolg van effecten op de luchtstroming van de diepe, gegraven drainagetrang die ten westen en noorden van de stuifkuil loopt.

Geconcludeerd kan worden dat de stuifkuilen variëren in morfologie en landschappelijke positie. De absolute omvang van de deflatie- en accumulatiezone en ook relatieve omvang van de accumulatie zone t.o.v. de deflatiezone is sterk variabel. Deze relatieve omvang van de accumulatiezone vertoont geen eenduidige relatie met afzonderlijke kenmerken voor morfologie kenmerken en landschappelijke positie. Wel gaat de combinatie van sleufvormige deflatiezones met een relatief hoge positie in het duinlandschap (op duinen) en relatief weinig opgaande begroeiing aan de loefzijde van de overheersende windrichting samen met een hoge ratio van de oppervlakte van de accumulatiezone met de oppervlakte van de deflatiezone. De expositie van de stuifkuil aan de overheersende windrichting is daarmee een bepalende factor voor de relatieve omvang van de accumulatiezone. Met ander woorden bij meer expositie aan de wind wordt het zand meer verspreid over de omgeving. De vorm van de begrenzing van de deflatie en accumulatiezone varieert van vrijwel cirkelvormig tot ellipsvormig. De vorm van de deflatiezone werkt daarbij matig door in de vorm van de buitengrens van de accumulatiezone. Bij de meeste stuifkuilen ligt de meeste oppervlakte van de accumulatiezone aan de lijzijde van de overheersende windrichting.

Tabel 8-3. Morfologische kenmerken van de acht stuifkuilen in de Luchterduinen en Meijendel.

Gebied	Locatie code	Morfologie	Positie in reliëf	Mate van opgaande begroeiing aan loefzijde (=ZW) van deflatiezone	Maaiveldhoogte deflatiezone (m+NAP)			Begrenzing deflatiezone			Begrenzing accumulatiezone			Ratio verschil min-max maaiveldhoogte/breedte deflatiezone (m/m)	Oppervlakte		
					minimum	maximum	verschil min-max	lengte (m)	breedte (m)	ratio lengte/breedte (m/m)	lengte (m)	breedte (m)	ratio lengte/breedte (m/m)		deflatiezone (m ²)	accumulatiezone (m ²)	ratio accumulatie/deflatie
Luchterduinen	LD_1	schotel	vlaakte	nauwe lijks	3.0	6.2	3.2	46.4	44.5	1.04	87.6	66.3	1.32	0.07	1358	2947	2.2
Luchterduinen	LD_3	schotel	vlaakte	nauwe lijks	3.4	5.2	1.8	32.3	28.5	1.13	63.1	55.8	1.13	0.06	577	2255	3.9
Luchterduinen	LD_5	sleuf	ZW-zijde laag duin	veel	9.7	12.3	2.6	15.5	10.7	1.45	33.6	16.0	2.10	0.24	119	291	2.4
Luchterduinen	LD_9	sleuf	ZW-zijde laag duin	veel	6.9	13.5	6.6	35.5	26.6	1.33	48.7	35.2	1.38	0.25	522	714	1.4
Luchterduinen	LD_16	sleuf	W-zijde laag duin	matig	6.7	9.6	2.9	36.0	14.6	2.47	102.4	53.4	1.92	0.20	404	4268	10.6
Luchterduinen	LD_21	schotel	ZW-zijde laag duin	veel	6.0	6.6	0.6	24.4	13.5	1.81	45.3	23.6	1.92	0.04	227	487	2.1
Meijendel	MD_2	sleuf	top hoogduin	nauwe lijks	23.4	27.5	4.1	29.9	14.5	2.06	100.5	33.2	3.03	0.28	356	1910	5.4
Meijendel	MD_8	sleuf	top laagduin	matig	10.2	13.8	3.6	23.4	16.8	1.39	52.7	38.7	1.36	0.21	261	1278	4.9

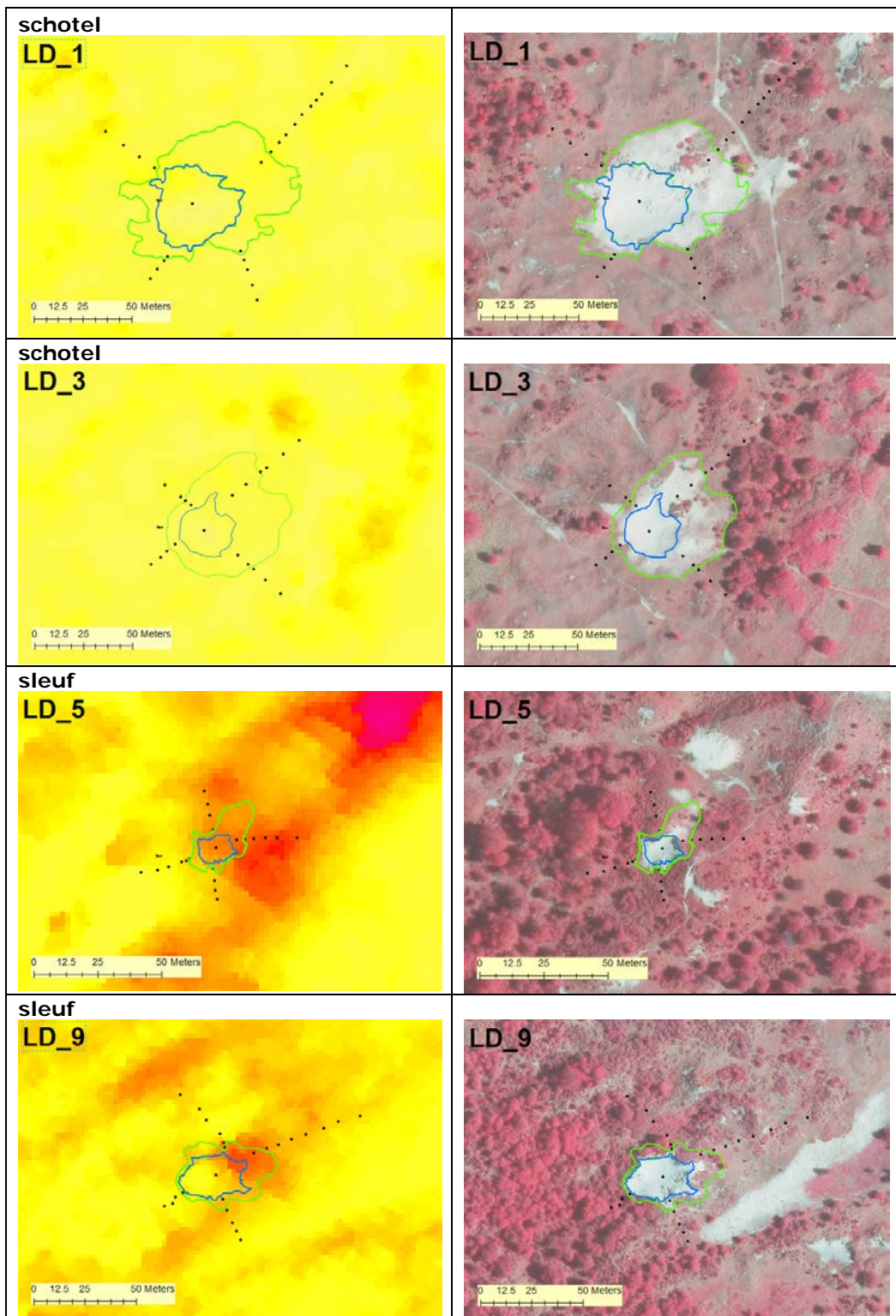


Figuur 8-10. Ratio voor lengte/ breedte van de begrenzing van de deflatiezone en en de buitengrens van de accumulatiezone.

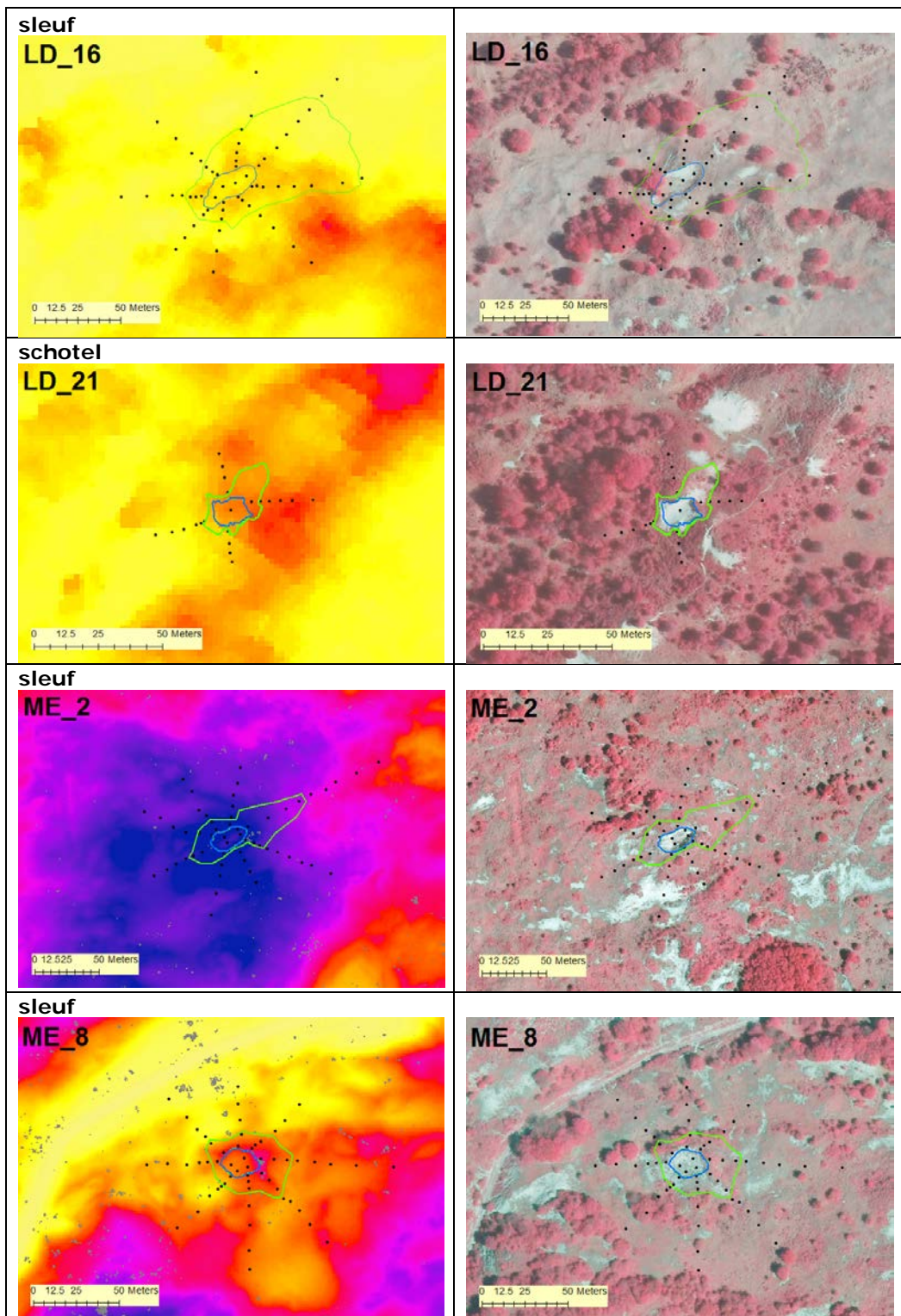
8.4.3 Zandbalansen

In Tabel 8-4 staan de resultaten van de zandbalansberekeningen. Ter controle van de betrouwbaarheid is de afwijking tussen het volume zand geërodeerd uit de deflatiezone (V_{acc}) en geaccumuleerd in de deflatiezone (V_{def}). De afwijking is berekend als $100 \cdot (V_{acc} - V_{def}) / (V_{def})$ [%]. Een positieve waarde geeft aan dat er in de accumulatiezone meer zand is geaccumuleerd dan is verdwenen uit de deflatiezone en vice versa.

Het verschil tussen het V_{def} en V_{acc} is voor de stuifkuilen LD_1, LD_5 en ME_2 gering. Bij stuifkuil LD_1 is $V_{acc} > V_{def}$ en bij de andere twee andersom. Stuifkuil LD_3 heeft een veel groter verschil (positief), terwijl stuifkuilen LD_9, LD_16, LD_21 en ME_8 een zeer groot verschil hebben (positief en negatief). Al met al hebben de meeste stuifkuilen een slechte zandbalans. Mogelijke oorzaken zijn: 1) de interpolatie van het oude maaiveld in de deflatiezone wijkt sterk af van het vroegere en onbekende maaiveld (kan positieve en negatieve afwijking geven), 2) het aantal meetpunten voor de diepteligging van de top van het oude maaiveld in de accumulatie zone was te gering voor een betrouwbare interpolatie van het oude maaiveld (kan positieve en negatieve afwijking geven), 3) verschillen in bulkdichtheid tussen uitgestoven zand uit de deflatiezone (dichte pakking) en ingestoven zand in de accumulatiezone (losse pakking) (geeft positieve afwijking), 4) een deel van het geërodeerde zand wordt afgezet buiten de vastgestelde accumulatiezone, omdat dit niet meer herkenbaar is in bodemprofielen (geeft negatieve afwijking), 5) voor V_{acc} wordt te veel gerekend omdat een nabij gelegen stuifkuil heeft bijgedragen aan instuiving (geldt in beperkte mate voor stuifkuil ME_2, had laatste jaren ook instuiving vanuit een nabij gelegen actieve stuifkuil).



Figuur 8-11. Geomorfologie van de stuifkuilen en landschappelijke positie van de acht stuifkuilen. Links: kaart met maaiveldhoogte (kleuren van laag naar hoog: geel-rood-paars-blauw), begrenzing van de deflatiezone (blauwe lijn) en de buitengrens van de accumulatiezone (groene lijn). Rechts met de recente false-colour luchtfoto.



Vervolg Figuur 8-11

Wegens de veelal grote afwijkingen kunnen de berekende zandvolumina hooguit globaal worden gebruikt voor een interpretatie. Omdat de ordegroottes van V_{def} en V_{acc} meestal voor elke stuifkuil vergelijkbaar zijn, is gekeken naar de relatie tussen het volume gesedimenteerde zand in de accumulatiezone met de oppervlakte van de deflatiezone en de verschillen tussen de ratio's voor zandvolume en oppervlakte van zones. Deze laatste ratio's komen overeen met de gemiddelde dikte van geërodeerd zand en geaccumuleerd zand. Stuifkuil ME_8 blijft daarbij buiten beschouwing wegens het zeer grote verschil van V_{def} en V_{acc} (meer dan factor 10). Het volume geaccumuleerd zand is vrij sterk gecorreleerd met de oppervlakte van de deflatiezone (Figuur 8-12; $r^2 = 0.83$). Dit stemt overeen met de verwachting: hoe groter de deflatiezone, des te meer zand naar de omgeving is getransporteerd. Een vierkante meter deflatiezone levert daarbij ca. 0.95 m^3 zand. De stuifkuilen LD_16 en ME_2 wijken sterk af met een hogere ratio V_{acc}/Opp_{def} (resp. 1.4 en $1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2$). Dit betreft twee sleufvormige stuifkuilen met een hoge ligging in het landschap en relatief weinig opgaande begroeiing aan de loefzijde van de overheersende windrichting (zie par. 8.4.2 en Figuur 8-11). De stuifkuilen LD_1 en LD_3 hebben een ratio V_{acc}/Opp_{def} van ca. $0.8 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Dit zijn schotelvormige stuifkuilen met een lage ligging in een duinvlakte met een korte vegetatie aan de loefzijde. De andere stuifkuilen (LD_5, LD_9 en LD_21) hebben een lage ratio voor V_{acc}/Opp_{def} (ca. $0.1-0.4 \text{ m}^3/\text{m}^2$). Wat betreft geomorfologie zijn deze stuifkuilen variabel, maar voor de landschappelijke positie hebben ze gemeenschappelijk dat ze veel opgaande begroeiing aan de loefzijde van de overheersende windrichting hebben. De stuifkuil LD_21 heeft juist de laagst ratio van V_{acc}/Opp_{def} . Dit kan ook samenhangen met een snelle stabilisatie van deze stuifkuil door een ondiepe freatische waterstand. De deflatiezone van deze kuil is ook in het diepste deel vochtig.

De ratio van V_{def}/O_{def} vertoont grote verschillen (ca. factor 3): ze is relatief laag voor de stuifkuilen LD_3, LD_5 en LD_21, en relatief hoog voor de stuifkuilen LD_1, LD_9 en ME_2 (Tabel 8-4). Deze verschillen vertonen geen relatie met de differentiatie in duinzone (midden-/achterduin), geomorfologie van de stuifkuil (deflatiezone schotel- of sleufvormig) en positie in duinrelief (hoogteligging stuifkuil, in vlakke/ flank duin/ topduin). Voor de ratio van V_{acc}/O_{acc} zijn de relatieve verschillen ook groot (ca. factor 9). Blijkbaar is de ruimtelijke verdeling van geaccumuleerd zand rond de stuifkuil ook sterk variabel. Deze ratio is voor de stuifkuilen LD_16 en LD_21 relatief laag en voor de stuifkuilen LD_1 en LD_9 relatief hoog. Ook deze ratio vertoont geen duidelijke relatie met de hiervoor genoemde omgevingsfactoren. De relatieve verschillen van V_{def}/O_{def} en die van V_{acc}/O_{acc} hebben een gering lineair verband ($r^2 = 0.52$, $p = 0.07$).

Het ruimtelijke patroon van de dikte van zandaccumulatie is als volgt (Figuur 8-13). Bij de meeste stuifkuilen (m.u.v. ME_8) wordt het meeste zand aan de NO/NOO-zijde van de deflatiezone afgezet. Dit is aan de lijzijde van de deflatiezone voor de overheersende windrichting (Figuur 8-4). Bij de actieve stuifkuilen komt de dikste accumulatie ook voor in een zone aan de lijzijde van deflatiezone voor de overheersende windrichting: voor stuifkuilen LD_1, LD_3, LD_5, LD_21 aan de NO-zijde van de deflatiezone en voor LD_9 de N- tot-O-zijde. Bij de andere stuifkuilen wijkt het patroon van de dikke accumulatie af. Bij de stuifkuilen LD_16 en ME_2 is zowel aan de ZWW-zijde als de NOO-zijde een dikke laag stuifzand afgezet. Bij stuifkuil ME_8 is aan drie zijden van de deflatiezone (NW, O, ZWW) de dikste laag afgezet. De stuifkuilen LD_16, ME_2 en ME_8 hebben de combinatie van een sleufvormige deflatiezone, een relatief hoge positie in het duinlandschap en relatief weinig opgaande begroeiing aan de loefzijde van de overheersende windrichting gemeenschappelijk. Deze patronen duiden erop dat bij een sterke expositie aan de overheersende ZW-wind het meeste zand niet alleen aan de lijzijde wordt afgezet. Bij een geringere windexpositie wordt juist het meeste zand alleen aan de lijzijde afgezet.

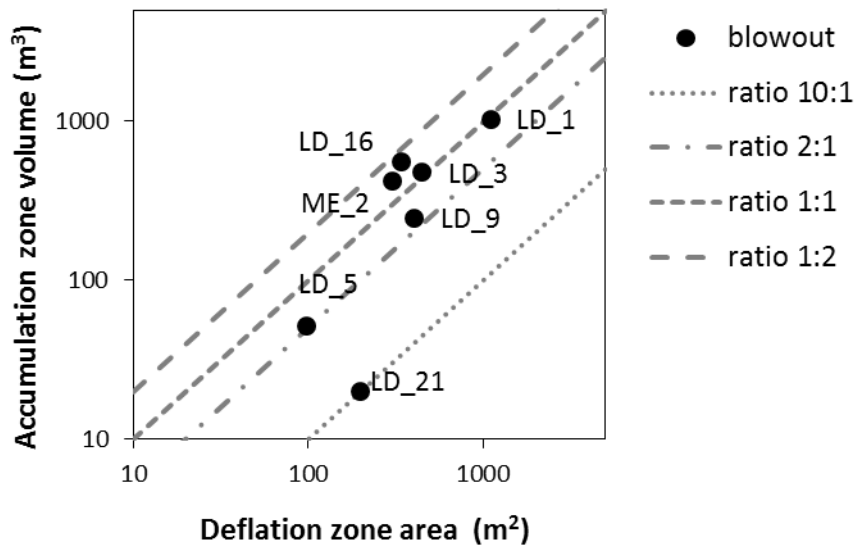
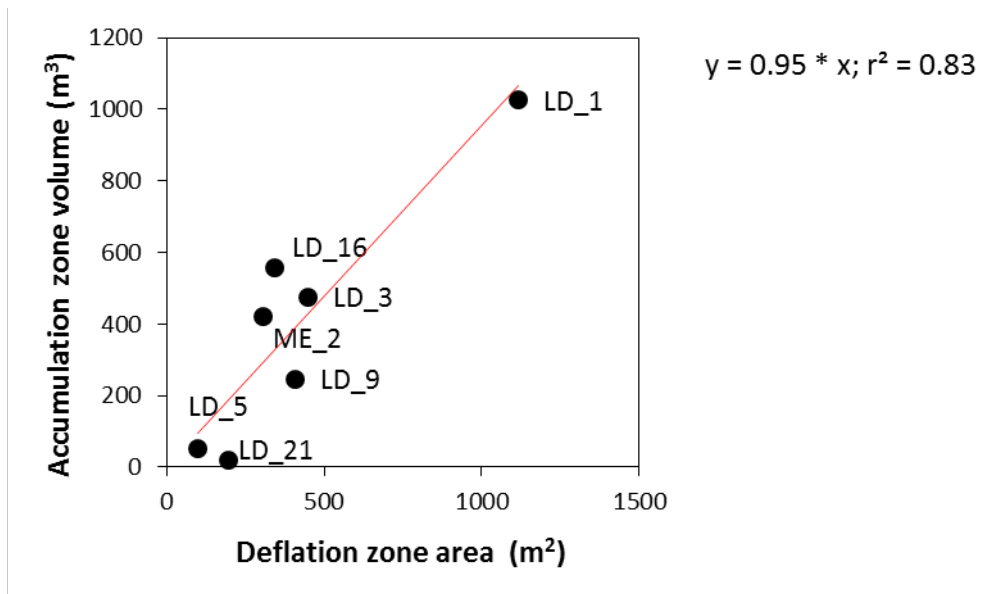
De volgende conclusies kunnen worden getrokken. Slechts in beperkte mate was het mogelijk om een betrouwbare zandbalans te reconstrueren. De ordegrootte van de zandbalans verschilt sterk voor de onderzochte stuifkuilen, zowel qua absolute waarde van de zandvolumes als qua ratio's van zandvolume en oppervlakten van de deflatie- en accumulatiezone. Daardoor is het wel mogelijk om de omvang van de zandbalans te relateren aan morfologische en landschappelijke kenmerken. De hoeveelheid gesedimenteerde zand in de accumulatiezone vertoont een positief lineair verband met de omvang van de oppervlakte van de deflatiezone. De ratio van het geaccumuleerde zandvolume met de oppervlakte van de deflatiezone is ook groter als de deflatiezone hoog in het landschap ligt en aan de loefzijde van de overheersende windrichting relatief weinig opgaande begroeiing voorkomt. Daarmee is de mate van expositie aan de overheersende windrichting (ZW) een sterk bepalende factor voor de diepte van uitstuiving in de deflatiezone en de hoeveelheid verstoven zand. De mate van expositie aan de overheersende windrichting werkt ook door in de verdeling van het volume stuifzand rond de

deflatiezone: bij zwakke expositie vooral aan de lizijde van de overheersende wind (NO-zijde) en bij een sterkere expositie aan de loef- en lizijde (ZW- en NO-zijde) of meerdere zijden.

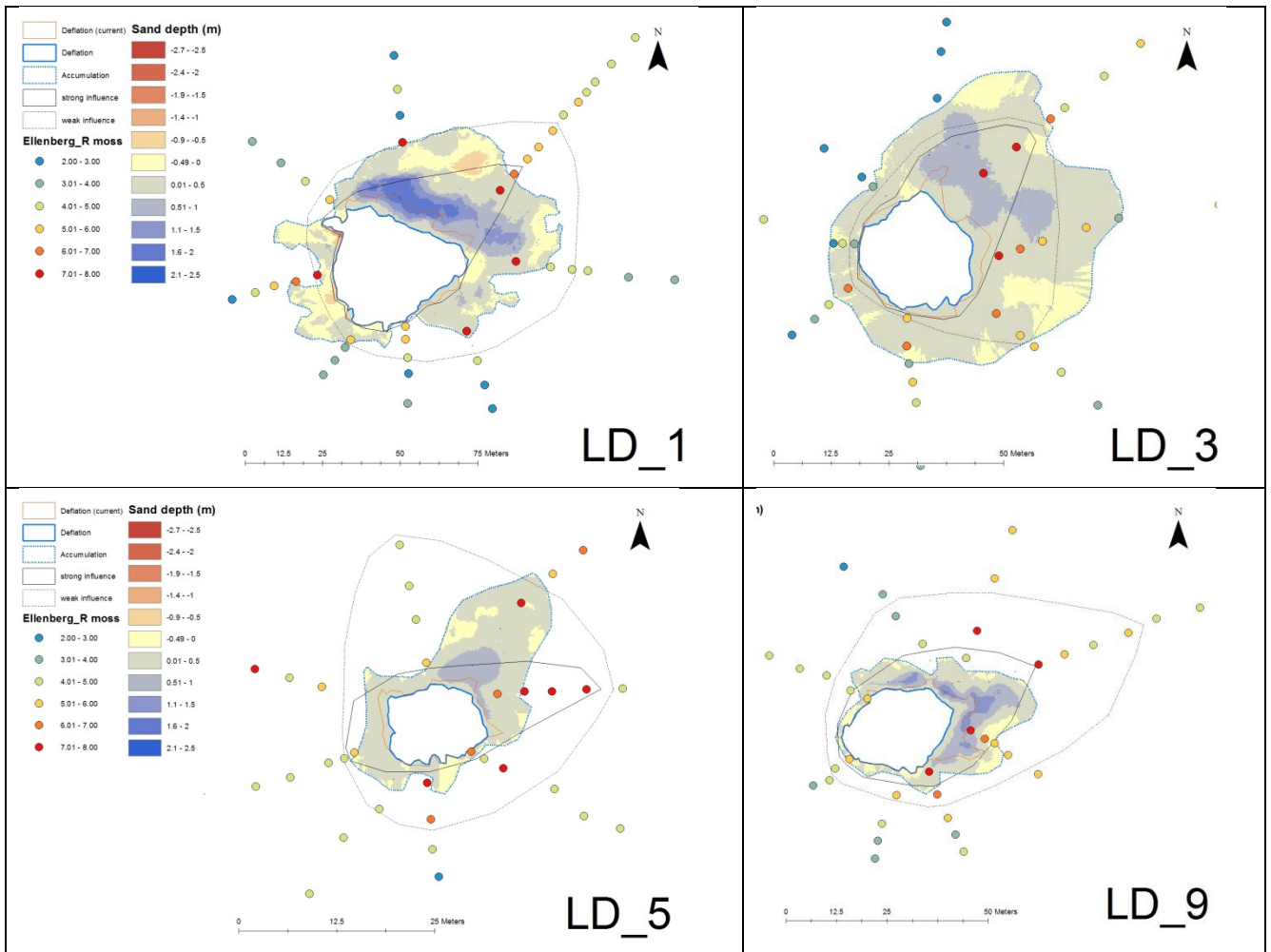
Tabel 8-4. Berekende waarden voor oppervlakten van de deflatie- en accumulatiezone, de hoeveelheid geërodeerd zand in de deflatiezone, de hoeveelheid gesedimenteerd zand in de accumulatiezone en afgeleide variabelen.

Variabele	Oppervlakten (m ²)				Zandbalans: volume			
	Deflatiezone		Accu- mulatie- zone	Ratio acc/ def zone	Deflatie- zone (m ³)	Accu- mulatie- zone (m ³)	Verschil acc-def zone (m ³)	Afwijking (%)
Zone/ variant	huidig	recon- structie						
Code variabele/ formule	O _{def}		O _{acc}	V _{acc} /V _{def}	V _{def}	V _{acc}	V _{acc} -V _{def}	100* (V _{acc} -V _{def})/ (V _{def})
LD_1	1358	1116	2947	2.17	1361	1025	-336	-25
LD_3	577	449	2255	3.90	332	476	144	43
LD_5	119	98	291	2.45	49	52	3	6
LD_9	522	406	714	1.37	458	246	-212	-46
LD_16	404	341	4268	10.56	268	556	288	107
LD_21	227	197	487	2.15	79	20	-59	-75
ME_2	356	305	1910	5.37	402	421	19	5
ME_8	261	116	1278	4.89	43	781	738	1716

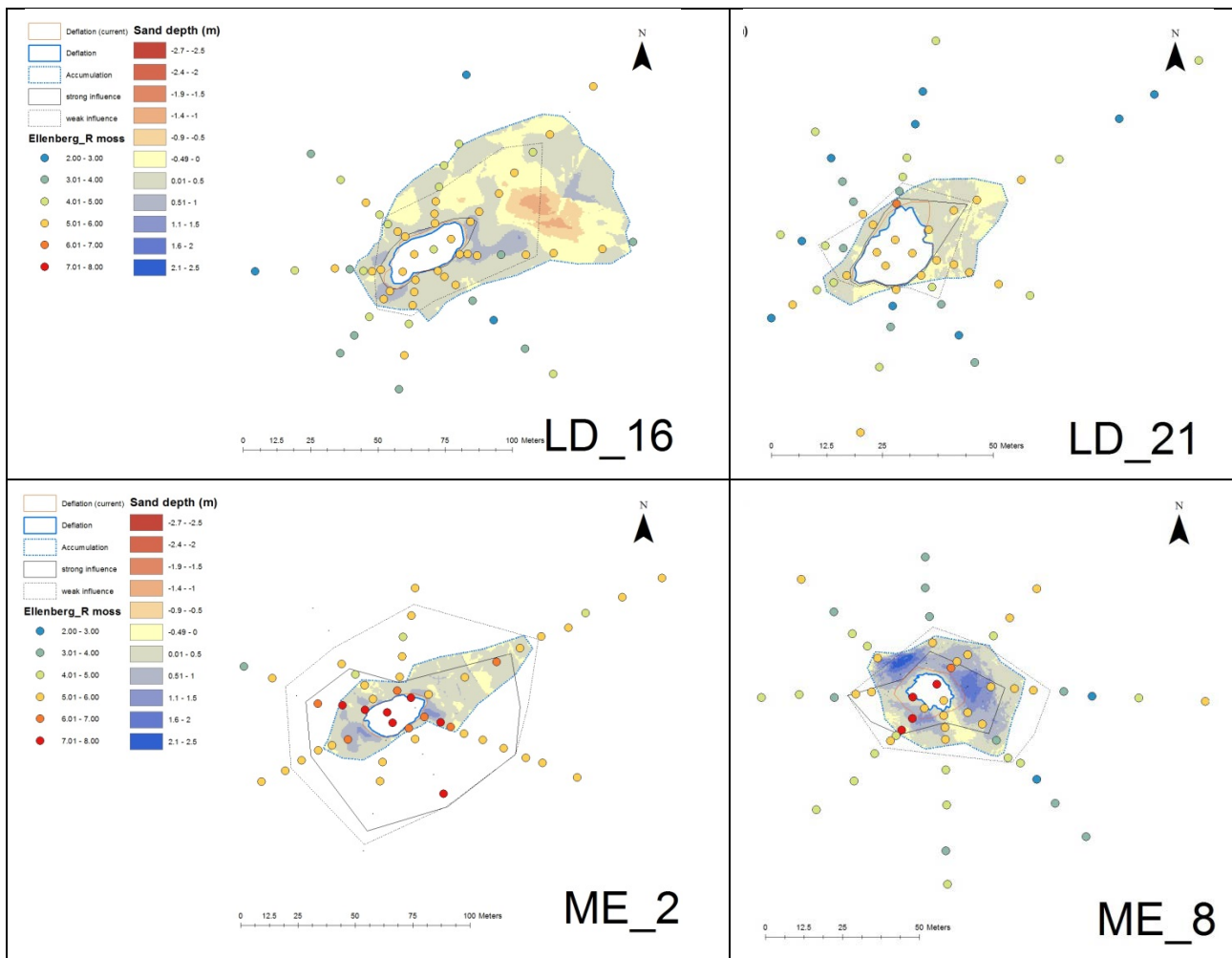
Variabele	Zandbalans: massa (10 ³ kg)		Ratio zandvolume/ oppervlakte (m)		
	Deflatie- zone	Accu- mulatie- zone	Accumulatie - deflatie- zone	Deflatie- zone	Accu- mulatie- zone
Code variabele/ formule			V _{acc} /O _{def}	V _{def} /O _{def}	V _{acc} /O _{acc}
LD_1	2120	1597	0.75	0.92	0.35
LD_3	517	742	0.82	1.06	0.21
LD_5	76	81	0.44	0.53	0.18
LD_9	714	383	0.47	0.61	0.34
LD_16	418	866	1.38	1.63	0.13
LD_21	123	31	0.09	0.10	0.04
ME_2	626	656	1.18	1.38	0.22
ME_8	67	1217			



Figuur 8-12. De relatie tussen oppervlakte van de deflatiezone en het volume gesedimenteerd zand in de deflatiezone van zeven stuifkuilen. Stuifkuil MD_8 wordt niet weergegeven wegens een zeer onbetrouwbare zandbalans. Boven met normale schalen voor de x- en y-as, onder met ¹⁰log-schalen. De stippellijnen geven ratio's voor de oppervlakte van de deflatiezone met het volume geaccumuleerd zand.



Figuur 8-13 (zie ook volgende pagina). Dikte van geaccumuleerd zand rond de deflatiezone (ingekleurde zones) met de Ellenberg-indicatiewaarden (R) van de gekarteerde mossen (gekleurde punten). Ellenberg R-waarden zijn berekend op basis van het voor de bedekking gewogen gemiddelde van de R-waarden van de soorten. Tevens is de begrenzing weergegeven van actuele deflatiezone (oranje lijn), de deflatiezone op basis GIS-analyse (blauwe lijn), de buitengrens van de accumulatiezone (gestreepte blauwe lijn) en de sterk en zwak beïnvloede zone met verhoogde pH door instuiving (resp. zwarte lijn en gestreepte lijn).



Vervolg figuur 8-13

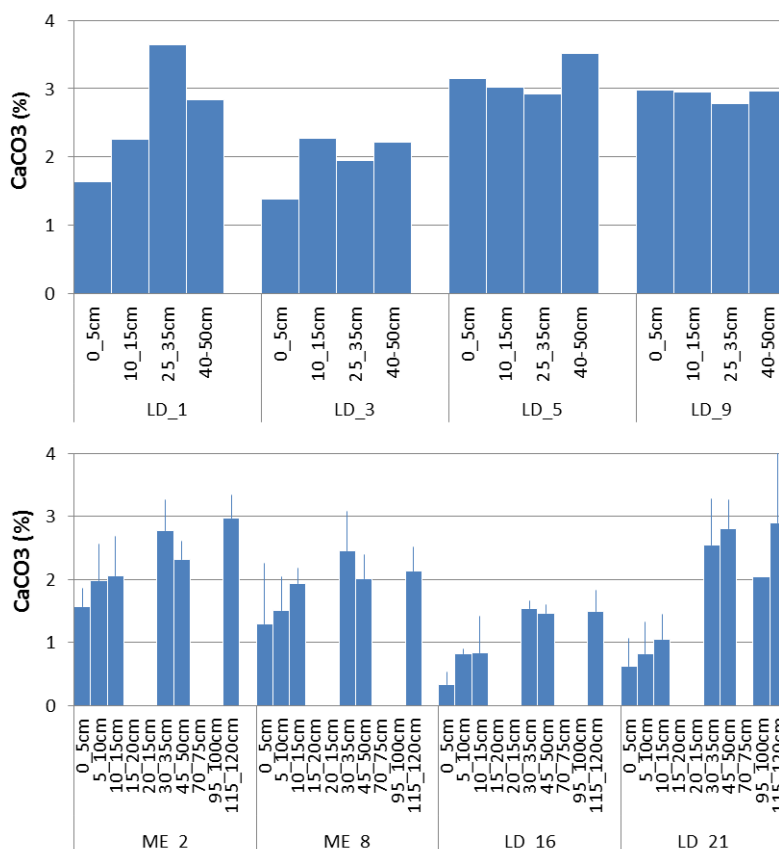
8.4.4 Patroon van kalkgehalte in deflatiezones

In Figuur 8-14 worden voor het diepteprofiel van de bodem in de deflatiezone de kalkgehalten gegeven. In Figuur 8-15 wordt een samenvatting gegeven voor het kalkgehalte in de bodemtoplaag (0-15 cm) en in de laag daaronder (25-50 cm). Voor het duinzand op 25-120 cm diepte hebben LD_1, LD_5, LD_9, ME_2 en LD_21 de hoogste kalkgehalten in de range van 2.5 tot 3.5 %. Deze gehalten liggen rond of dicht onder de primaire kalkgehalte van het duinzand in Mijndel en de Luchterduinen dat is gemeten in ander onderzoek (Stuyfzand et al, 2017). Stuifkuil LD_16 heeft het laagste waarde rond 1.5 % DG ene stuifkuil LD_3 zitten op ca. 2.0% DG. De waarde van deze twee laatste stuifkuilen is daarmee lager dan het primaire kalkgehalte in de Luchterduinen (Stuyfzand et al, 2017). Deze verschillen in kalkgehalte hebben slechts ten dele een samenhang met de landschapszoning. Lage gehalten in de Luchterduinen komen alleen voor in het achterduin (LD_3 en LD_16), maar er is ook één stuifkuil in deze zone met een hoog achtergrondgehalte (LD_1). In het middenduin van de Luchterduinen hebben de stuifkuilen een hoog achtergrondgehalte (LD_5 en LD_9). In Meijndel ligt de stuifkuil met een hoog achtergrondgehalte in het achterduin (ME_2) en die met een relatief laaggehalte in het middenduin.

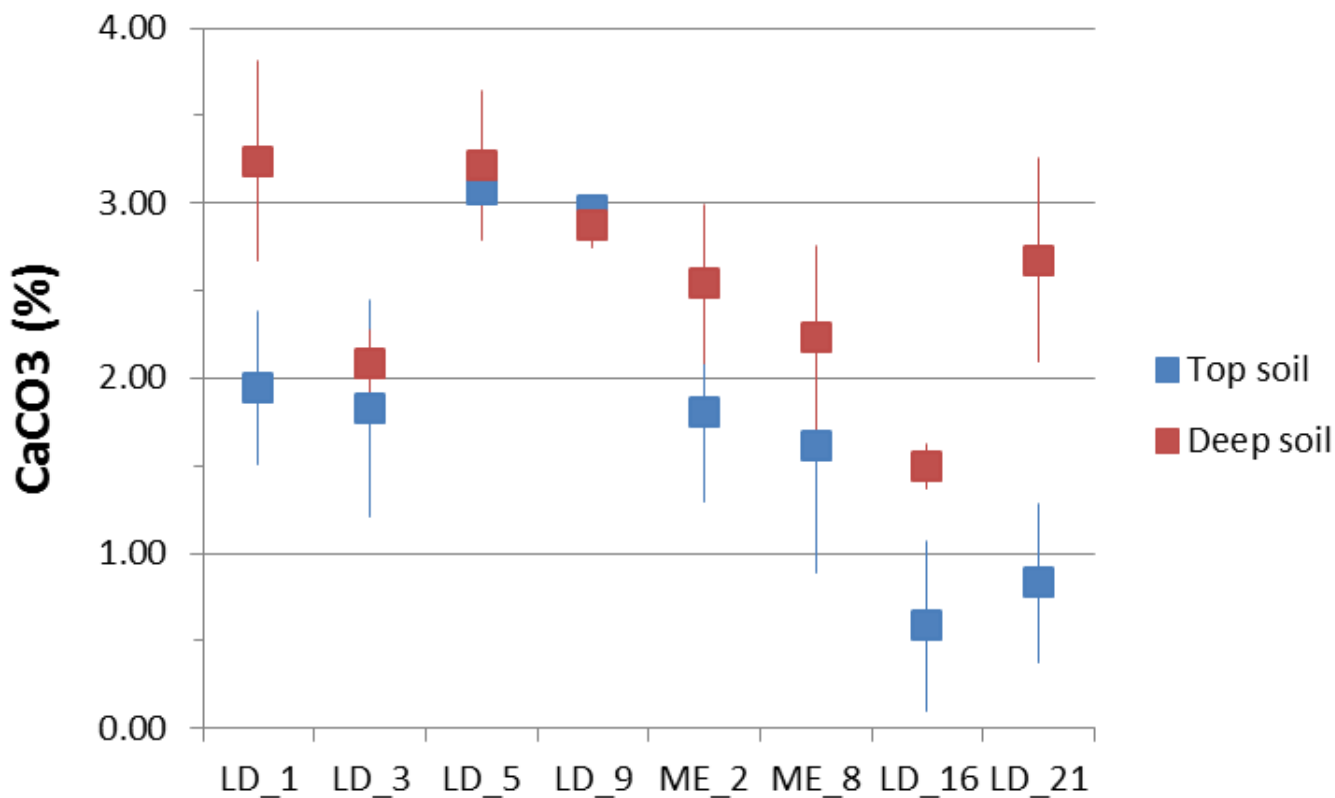
Het diepteprofiel van het kalkgehalte vertoont eveneens verschillen. De meeste stuifkuilen (zowel actief als gestabiliseerd) hebben in de toplaag een lager kalkgehalte. Dit is het geval voor de actieve stuifkuilen in het relatief diep ontkalkte achterduin van de Luchterduinen en in de vier gestabiliseerde stuifkuilen in zowel de Luchterduinen als Meijndel. Daarbij treden verschillen op in kalkgehalte tussen 0 en 15 cm diepte. Alleen bij de actieve stuifkuilen in het middenduin van de Luchterduinen (LD_5, LD_9) heeft het hele diepteprofiel een vergelijkbaar kalkgehalte. De sterkste stratificatie (ratio gehalte toplaag en gehalte diepere laag; zie Figuur 8-15) is aanwezig bij stuifkuil LD_21 en waar het achtergrondgehalte juist hoog is. De deflatiezone van deze stuifkuil heeft de meest productieve en een dichte vegetatie (veel Duinriet, Duindoorn) die zich hier snel onder invloed van capillaire opstijging van grondwater

heeft kunnen ontwikkelen (afgeleid uit luchtfotoserie). De hoge productiviteit kan hebben bijgedragen aan een snelle ontkalking. Bij de stuifkuilen LD_1 en ME_2 is de stratificatie sterk en bij die van LD_3 en ME_8 is die intermediair. Bij alle gestabiliseerde stuifkuilen is de bodem in de deflatiezone gestratificeerd qua kalkgehalte en geldt dat in sterkere mate voor stuifkuilen in een relatief diep ontkalkte omgeving. Bij de actieve stuifkuilen is alleen sprake van stratificatie in geval van een relatief diepe ontkalkingsdiepte van de omgeving (Figuur 8-15).

Door verschillen in achtergrondgehalte en mate van stratificatie zijn er grote verschillen aanwezig in het kalkgehalte van de bodemtoplaag (0-15 cm). Die van de actieve stuifkuilen LD_5 en LD_21 is het hoogst (ca. 2.9-3.2 % DG) en gelijk aan het achtergrondgehalte. De laagste gehalten treden op in de gestabiliseerde stuifkuilen LD_16 en LD_21 (resp. 0.6 en 0.8 % DG). De andere vier stuifkuilen (LD_1, LD_3, ME_2 en ME_8) zitten daar tussen in (ca. 1.6-2.0 % DG).



Figuur 8-14: Kalkgehalte op verschillende diepten onder maaiveld per stuifkuil. Voor stuifkuilen LD_1 t/m LD_9 is voor elke stuifkuil één mengmonster van vier locaties gemeten en voor de stuifkuilen LD_16, LD_21, ME_2 en ME_8 worden gemiddelden met standaarddeviatie gegeven van vier geanalyseerde monsters.



diepte	30	40	20	10	15		40	30
ontkalking	-	-	-	-	-	20	-	-
(cm -mv)	60	80	25	25	20		80	60

Figuur 8-15: Kalkgehalte (% DG) van de bodemtoplaag en diepere laag in de deflatiezone. Voor de bodemtoplaag zijn gemiddelde waarden gegeven van monsters genomen op 0-5 plus 10-15 cm diepte en voor de diepere laag zijn monsters genomen op 25-35 plus 40-50 cm diepte (stuifkuilen LD_1, LD_3, LD_5, LD_9) en 30-35 plus 45-50 cm diepte (stuifkuilen ME_2, ME_8, LD_16, D_21). Error bars geven de standaarddeviatie. Onderaan wordt de range gegeven van de ontkalkingsdiepte van de omgeving van de deflatiezone zonder de invloed van overstuiving.

8.4.5 Ruimtelijke patronen humusprofiel, kalkprofiel en zuurgraad bodem in stuifkuilen en omgeving

Op basis van de bodemprofielbeschrijvingen en de in situ pH metingen zijn kaarten gemaakt met het ruimtelijke patroon van de dikte van de Ah-horizont in de bodemtoplaag, de ontkalkingsdiepte, de gemiddelde pH op 0-10 cm en op 10-20 cm diepte van het minerale profiel (Figuur 8-16). De patronen hiervan worden besproken in relatie tot de ligging van de deflatiezone en accumulatiezone. Dit wordt gedaan voor de vier actieve en de vier gestabiliseerde stuifkuilen afzonderlijk.

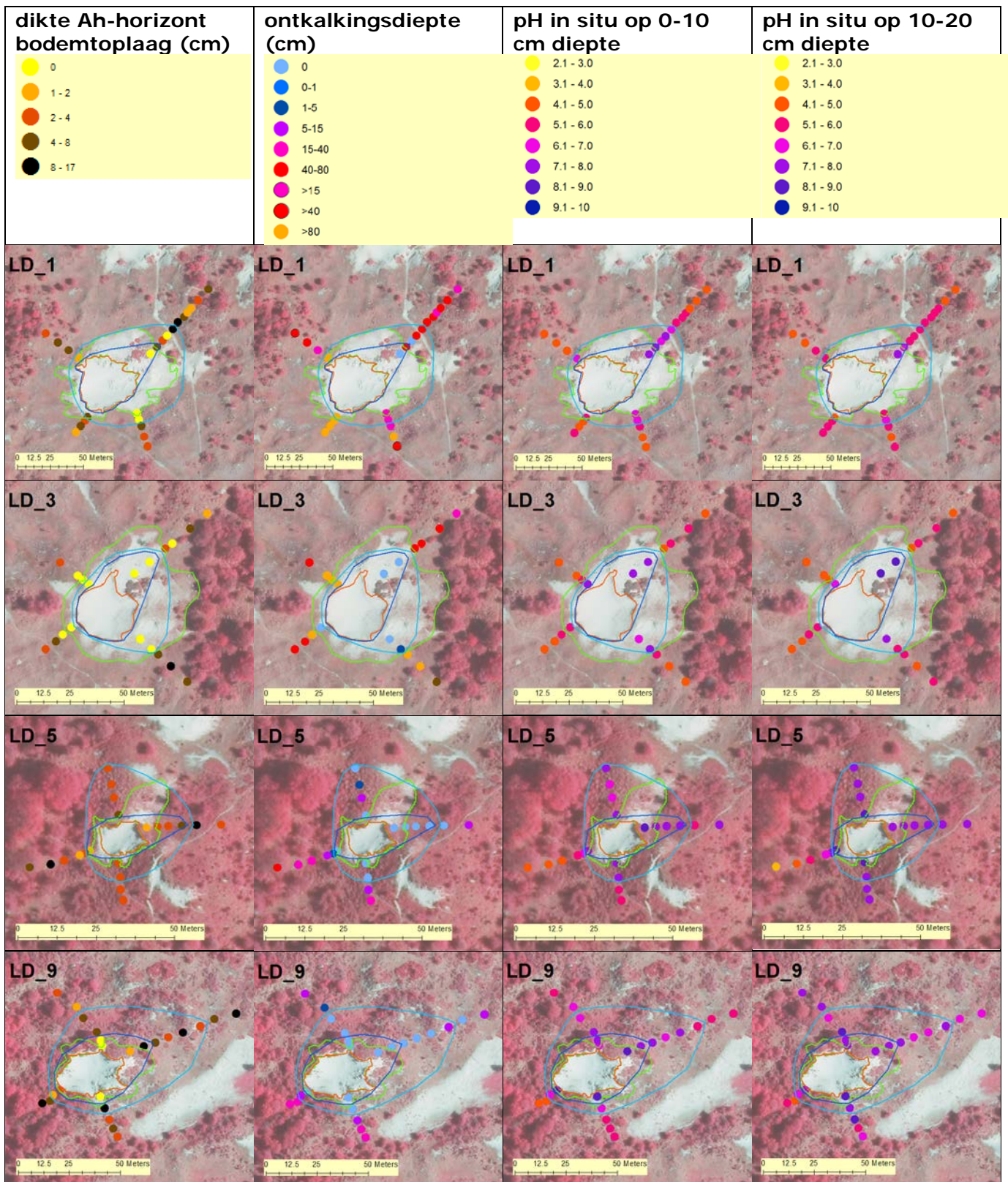
Actieve stuifkuilen (LD_1, LD_3, LD_5, LD_9)

Een Ah-horizont ontbreekt altijd in de deflatiezone omdat deze zone eolisch actief is (niet in kaarten weergegeven, maar bleek wel uit de gestoken bodemprofielen voor de bemonstering). In de accumulatiezone ontbreekt vaak een Ah-horizont of is deze dun (< 2-4 cm). Bij stuifkuil LD_5 zijn in deze zone alleen bodemprofielen met een dunne Ah-horizont aangetroffen. Dit komt omdat hier de buitengrens van de accumulatiezone wordt bepaald door recente intensievere verstuiving (zie bij *Verstuivingshistorie*) waarbij jonge bodems licht worden overstoven. Buiten de accumulatiezone komen meestal bodems met een Ah-C profiel in de toplaag en heeft de Ah-horizont een variabele dikte. Deels komen er ook bodems voor met een dikke Ah-horizont (5-17 cm). Heel af en toe komt er lokaal nog een bodem voor zonder Ah-laag.

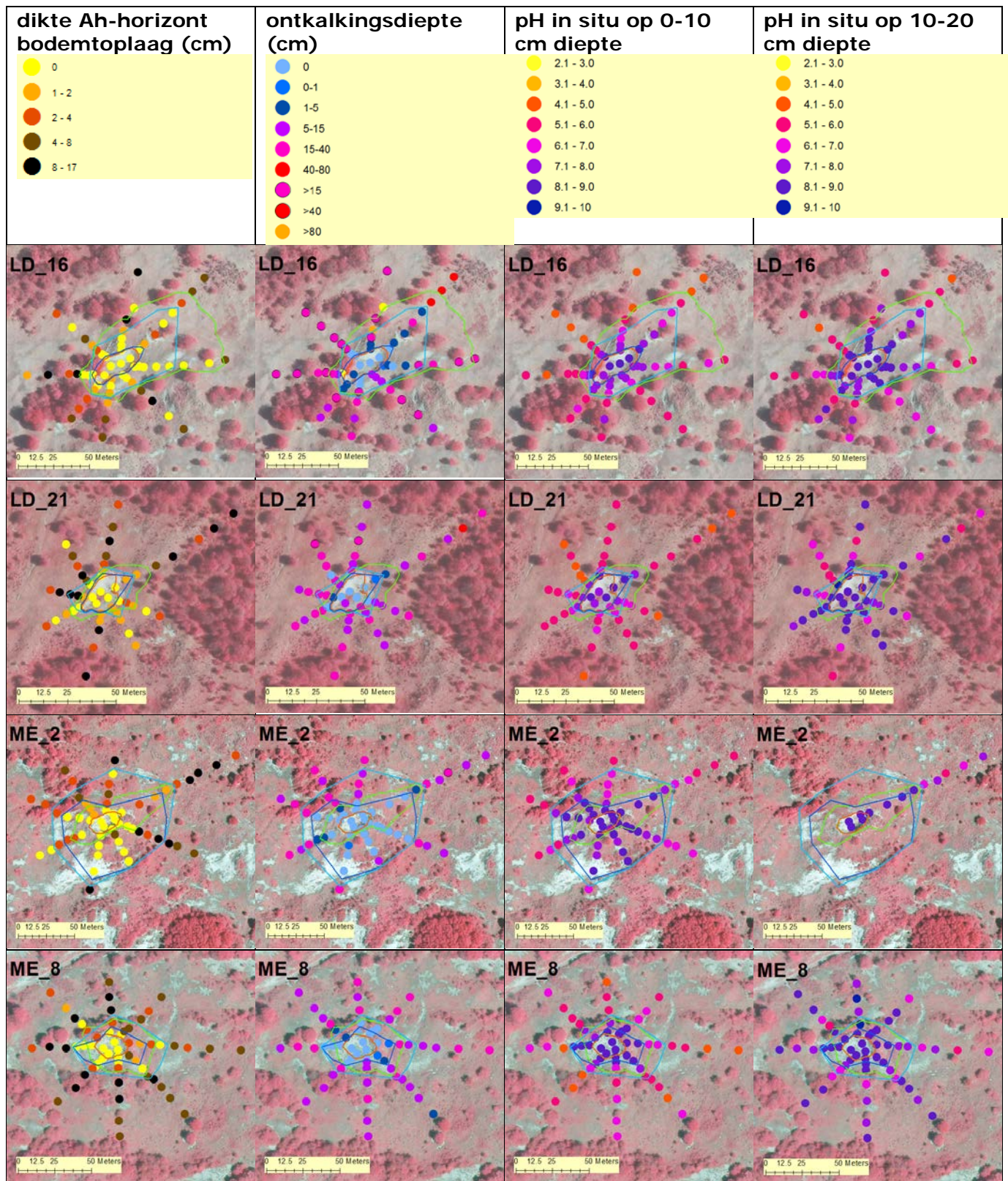
Wat betreft kalkprofiel vertonen de stuifkuilen verschillen. De stuifkuilen LD_1 en LD_3 hebben binnen de accumulatiezone een zeer ondiepe ontkalkingsdiepte (0-1 cm) en daarbuiten vaak diep ontkalkte bodems (40-80 > 80 cm). Bij deze stuifkuilen is een kalkhoudende bodem toplaag dus afhankelijk van relatief sterke instuiving van zand. Plaatselijk komen buiten de accumulatiezone minder diep ontkalkte bodems voor. Bij de stuifkuilen LD_5 en LD_9 komen bodems met een kalkrijke toplaag zowel binnen tot ver buiten de accumulatiezone voor. Buiten de accumulatiezone komt een bredere zone voor met bodems aan de O-zijde (LD_5) en NOO-zijde (LD_9). Verder verwijderd van de accumulatiezone zijn de bodems vaak ondiep (5-15, 15-40 cm) ontkalkt. Het patroon van de bodem-pH hangt sterk samen met de variatie in het kalkprofiel. Hoge pH's in de 0-10 cm laag (6.0-8.0) komen voor bij aanwezigheid van kalk. Het patroon hiervan komt overeen met het voorkomen van niet tot nauwelijks ontkalkte bodems (0-1 cm). Buiten de accumulatiezone van de stuifkuilen LD_1 en LD_3 is de pH op 0-10 en 10-20 cm diepte relatief laag (4.0-6.0). De laagste pH's treden dan op in de periferie van het meetnet, duidend op een geleidelijk afnemende gradiënt van de buitenzijde van de accumulatiezone naar buiten toe. De pH verschilt hier niet sterk voor beide bodemdiepten. Bij de stuifkuilen LD_5 en LD_9 is de bodem-pH buiten de accumulatiezone vaak hoger (5.0-8.0). In de periferie van het meetnet bedraagt de pH van de 0-10 cm laag vaak nog 5.0 tot 8.0 en slechts ten delen komen dan lagere waarden van 4.0 tot 5.0 voor. Deze lagere waarden zijn alleen aanwezig aan de ZZW-zijde. In de periferie van het meetnet zijn de pH's van de 10-20 cm laag vaak hoger (1 tot 2 eenheden) dan de 0-10 cm laag.

Gestabiliseerde stuifkuilen (LD_16, LD_21, ME_2, ME_8)

In de gestabiliseerde deflatiezone ontbreekt een Ah-horizont, bedraagt de ontkalkingsdiepte vrijwel altijd 0 cm en is de bodem-pH hoog (7.0-9.0). Binnen de accumulatiezone is de dikte van de Ah-laag variabel (0 tot meestal 4 cm) en is een Ah-laag soms afwezig. Buiten de accumulatiezone is de Ah-horizont meestal relatief dik (2-17 cm) en komen af en toe bodems zonder Ah-horizont voor. Binnen de accumulatiezone is het patroon van de ontkalkingsdiepte verschillend. Bij stuifkuil LD_16, die in het vrij diep ontkalkte achterduin ligt, heeft deze zone een variabele ontkalkingsdiepte van 0 tot 40-80 cm diepte. De stuifkuilen LD_21 en ME_8 die in het minder diep ontkalkte middenduin liggen, is deze zone 0 tot 15-40 cm diep ontkalkt. De accumulatiezone van stuifkuil ME_2 is het meest kalkrijk met een ontkalkingsdiepte van 0 tot 2-5 cm. Binnen de accumulatiezone van alle vier stuifkuilen neemt de ontkalkingsdiepte toe en daardoor neemt de bodem-pH af vanaf de rand met de deflatiezone naar buiten toe. Deze gradiënt is aan de NO- of O-zijde het langst gerekt. Bij stuifkuil LD_16 is in de bodemtoplaag van de accumulatiezone een grote pH-gradiënt van 8.0 naar 5.0 aanwezig. Bij de andere stuifkuilen loopt die van 9.0 tot 7.0/6.0. In de zone buiten de accumulatiezone is de bodem altijd oppervlakkig of dieper ontkalkt (5 cm). Bij stuifkuil LD 16 is daar de ontkalkingsdiepte het meest variabel met ook hoge waarde (>15 cm, 15-40, 40-80 cm) en bij de andere drie bedraagt die meestal 5-15 en 15-40 cm. Buiten de accumulatiezone is de pH van de 0-10 cm laag het laagst bij de stuifkuilen LD_16 en LD_21 (4.0-6.0), terwijl die bij stuifkuil ME_2 6.0 tot 7.0 bedraagt en bij stuifkuil ME_8 4.0 tot 8.0. Bij alle vier stuifkuilen is er buiten de accumulatiezone ook vaak sprake van een dalende pH richting periferie van het meetnet. Hier is de pH van de diepere bodemlaag (10-20 cm) vaak hoger dan de ondiepere. Deze verschillen zijn het grootst bij LD_21 en ME_8 (vaak 2 pH eenheden) en bij LD_16 geringer (vaak 1 pH-eenheid). Dit patroon hangt samen met genoemde verschillen in ontkalkingsdiepte (sterkste stratificatie voor pH bij ondiepe ontkalking).



Figuur 8-16: Kaarten van dikte van de Ah-horizont, ontcalcingsdiepte, pH in situ op 0-10 cm diepte en op 10-20 cm diepte. Tevens zijn de begrenzingen weergegeven van actuele deflatiezone (oranje lijn), de buitengrens van de accumulatiezone (groene lijn) en de sterk en zwak beïnvloede zone met verhoogde pH door instuiving (resp. donkerblauwe lijn en lichtblauwe lijn). De achtergrond betreft luchtfoto's uit 2011 (stuifkuilen LD_x) en 2009 (stuifkuilen ME_x).



Vervolg Figuur 8-16

8.4.6 Zonering van pH-beïnvloeding door verstuing in relatie tot de accumulatiezone

Voor elke stuifkuil zijn zones met sterke en zwakke beïnvloeding met verhoogde pH van de bodemtoplaag als gevolg van instuiving van kalkhoudend zand onderscheiden. Een meetpunt wordt als '**sterk beïnvloed**' beschouwd als de zuurgraad wordt gebufferd door kalk, hetgeen is toegekend als $pH > 7.5$. Aanvoer van stuifzand heeft dan gezorgd voor de aanwezigheid van een kalkhoudende toplaag. Een meetpunt is '**zwak beïnvloed**' als het meetpunt niet door kalk wordt gebufferd, maar wel nog een verhoogde pH heeft ten opzichte van de niet beïnvloede omgeving. Dit is toegekend aan punten met $pH_{\min} + 2 < pH < 7.5$. pH_{\min} is voor elke stuifkuil een specifieke 'achtergrond'-waarde voor de toplaag van niet beïnvloede, oude bodems en is gelijk aan de laagst gemeten pH waarde aan de buitenranden van het meetnet. In Figuur 8-17 worden voor elke stuifkuil de pH-beïnvloedingszones weergegeven samen met de in situ pH van de 0-2.5 cm toplaag (kaarten links) waarop de zonering van de pH-beïnvloeding is gebaseerd en ook samen met de Ellenberg-indicaties voor de zuurgraad van de gekarteerde mossorten (kaarten rechts).

Ter controle van de pH-beïnvloedingszones worden deze vergeleken met het patroon van de Ellenberg-indicatiewaarde (R). Hoe hoger de waarde hoe hoger de pH die geïndiceerd wordt. De Ellenberg indicaties zijn gebaseerd op een voor bedekking gewogen gemiddelde van de gekarteerde mossorten (zie voor soorten Tabel 8-8). De vergelijking levert op:

- in de sterk beïnvloede zone komt vaak een R-waarde van 6 tot 8 voor en deels ook 5 tot 6;
- in de zwak beïnvloede zone heeft R vaak een waarde van 5 tot 6 en deels (vaak dicht tegen de grens van de vorige zone) een waarde 6 tot 8;
- De 'niet' beïnvloede zone heeft vaak een R-waarde van 2 tot 5 en soms hoger.

Al met al zijn de pH beïnvloedingszones redelijk gecorreleerd met het patroon van Ellenberg-indicaties. Indicaties voor een hoge pH strekken zich echter iets verder uit dan de sterk beïnvloede zone. Dit duidt erop dat in werkelijkheid de invloed van kalkhoudend stuifzand zich verder uitstrekt dan de buitenrand van de vastgestelde zwakke pH-beïnvloedingszone.

Hieronder vergelijken we de vastgestelde zonering voor pH-beïnvloeding met de ligging van de accumulatiezone.

Actieve stuifkuilen (LD_1, LD_3, LD_5, LD_9)

Bij de actieve stuifkuilen valt het volgende op. De stuifkuilen in het achterduin van de Luchterduinen (LD_1 en LD_3) hebben een sterk beïnvloede zone die (vrijwel) geheel valt binnen de accumulatiezone. Daar is slechts een beperkt deel van de accumulatiezone sterk beïnvloed. Bij LD_1 is de zwak beïnvloede zone iets ruimer dan de accumulatiezone en bij LD_3 valt die er binnen. Deze patronen gaan samen met een relatief laag kalkgehalte van de toplaag in de deflatiezone (Figuur 8-15).

Bij de twee stuifkuilen in het middelduin (LD_5 en LD_9) valt een aanzienlijk deel van de sterk beïnvloede zone buiten de accumulatiezone of overlapt deze grotendeels. De zwak beïnvloede zone strekt zich veel verder uit dan de accumulatiezone. Deze patronen gaan samen met een hoog kalkgehalte van de toplaag in de deflatiezone (Figuur 8-15). Bij deze 'kalkrijke' stuifkuilen wordt de basenrijkdom van de bodem dus ook ver buiten de zone met traceerbare instuiving (op basis de bodemprofielen en op luchtfoto's) verhoogd. Opvallend bij stuifkuil LD_5 is dat de sterk beïnvloede zone qua oriëntatie t.o.v. de deflatiezone afwijkt van die van de accumulatiezone. Dit kan een artefact zijn van het feit dat achteraf gezien de richting van de vier transecten voor het bodemonderzoek ongunstig is gekozen (geen transect aan de zijde waar de meeste instuiving is opgetreden) en het bodemprofielonderzoek voor deze stuifkuil in vier transecten heeft plaatsgevonden.

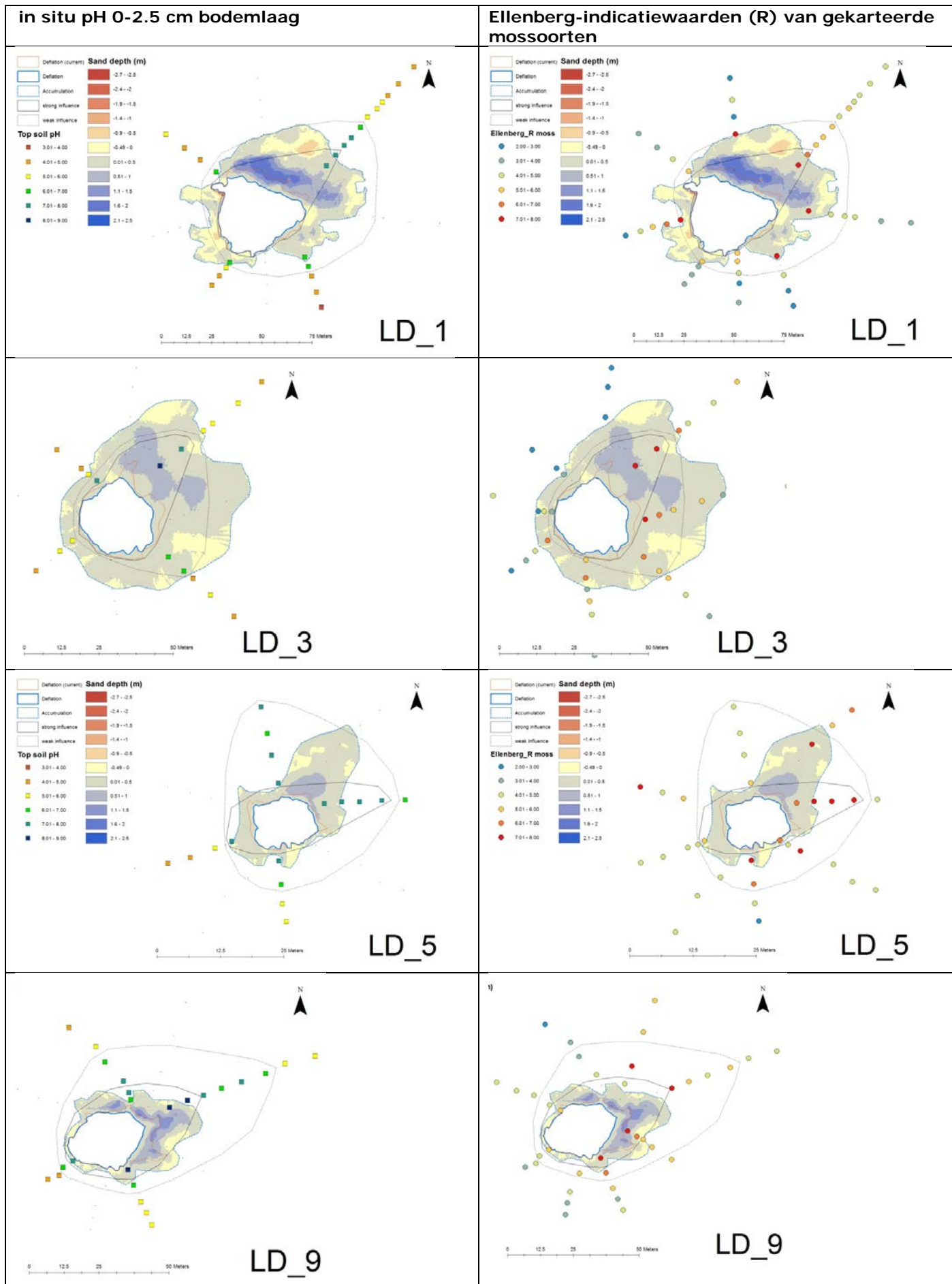
Gestabiliseerde stuifkuilen (LD_16, LD_21, ME_2, ME_8)

De gestabiliseerde stuifkuilen vertonen ook een gevarieerd beeld in de samenhang tussen de beïnvloedingszones met de accumulatiezone. Bij stuifkuil ME_2 valt de accumulatiezone grotendeels binnen de zone met sterke beïnvloeding en strekt de sterke beïnvloedingszone zich ook ver uit aan de zuidzijde. De zone met zwakke beïnvloeding is alleen aan de west en noordzijde ruimer dan de sterke beïnvloedingszone. Het voorkomen van een grote zone met $pH > 7.5$ aan de zuidzijde van de accumulatiezone wordt (mede) veroorzaakt door recente instuiving vanuit een zuidelijk gelegen stuifkuil. Bij stuifkuil ME_8 valt de sterke beïnvloedingszone grotendeels binnen de accumulatiezone met een aanzienlijk overlap. De zwakke beïnvloedingszone is iets ruimer dan de accumulatiezone. Bij beide stuifkuilen gaat het

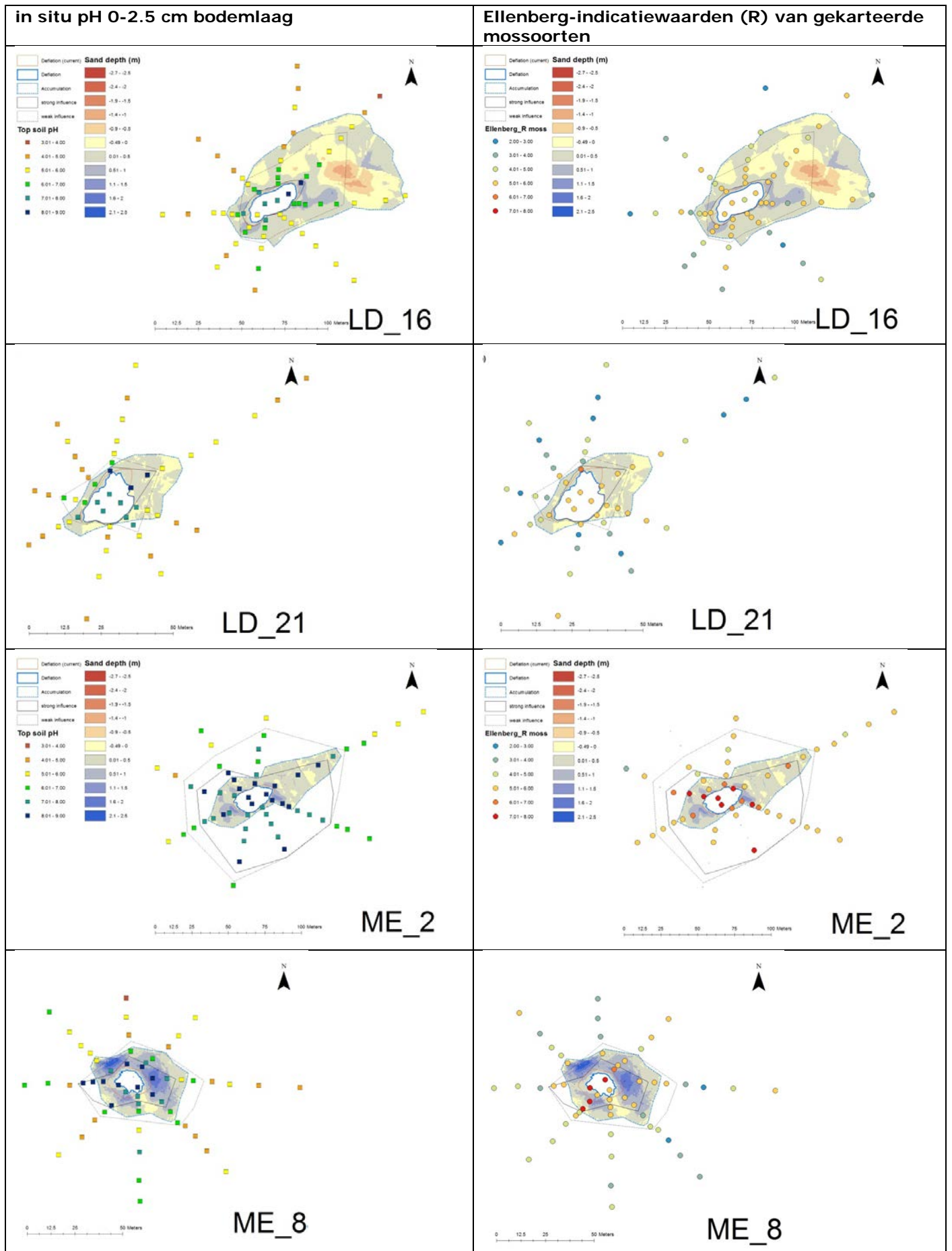
grote overlap van de sterke beïnvloedingszone met de accumulatiezone samen met een relatief hoog kalkgehalte van de toplaag in de deflatiezone (Figuur 8-15).

Bij de twee andere stuifkuilen vormt de zone met sterke beïnvloeding een smalle zone rond de deflatiezone. Zij beslaat slechts een gering deel van de accumulatiezone. De zwak beïnvloede zone is ook gering en valt bij stuifkuil LD_16 geheel binnen de accumulatiezone en bij stuifkuil LD_21 deels binnen en deels er buiten. Bij beide stuifkuilen heeft een aanzienlijk deel van de accumulatiezone geen overlap met de beïnvloedingszones. Deze patronen zijn gecorreleerd met de laagste kalkgehalten die in de toplaag van de deflatiezone zijn gemeten (Figuur 8-15).

Figuur 8-17 (zie volgende 2 pagina's): Links: vergelijking van de zonering van accumulatiezone met die van de zonering van pH-beïnvloeding door instuiving. Rechts: vergelijking van de zonering van pH-beïnvloeding met de Ellenberg-indicatie voor zuurgraad (R) berekend op basis van de gekarteerde mossen. Weergegeven zijn de begrenzing van de actuele deflatiezone (doorgetrokken blauwe lijn), de buitengrens van de accumulatiezone (gestippelde blauwe lijn) en de sterk en zwak beïnvloede zone met verhoogde pH door instuiving (resp. doorgetrokken en gestippelde zwarte lijn). Gekleurde cirkel is de gemiddelde pH van de 0-2.5 cm toplaag van het minerale profiel. De kleurschakering geeft de dikte van de gesedimenteerde zandlaag in de accumulatiezone aan.



Figuur 8-17: zie voor onderschrift p. 213



Vervolg Figuur 8-17: zie voor onderschrift p. 213

8.4.7 Kalkprofielen in de NO/O-transecten

In de transecten ten noordoosten/ oosten van de deflatiezone is op verschillende diepte in de bodem het kalkgehalte gemeten. In Figuur 8-18 worden de diepteprofielen van het kalkgehalte per stuifkuil weergegeven samen met het diepteprofielen in de deflatiezone.

Actieve stuifkuilen (LD_1, LD_3, LD_5, LD_9)

Opvallend is dat op de meeste locaties van de stuifkuilen LD_1 en LD_3 op een diepte van ca. 5-15 cm geen kalk aanwezig is, terwijl bij de twee andere stuifkuilen dat wel het geval is. Dit heeft te maken met het verschil in ontkalkingsdiepte van de oude bodems (LD_1 en LD_3 diep ontkalkt; LD_5 en LD_9 oppervlakkig ontkalkt). Bij de stuifkuilen LD_1 en LD_3 bevat de hele toplaag van 0-15 cm alleen kalk op de meetlocatie dichtbij de deflatiezone waar relatief veel stuifzand is geaccumuleerd. Op locatie 2 van stuifkuil LD_1 is daarbij ook sprake van een invers diepteprofiel (bovenin is het kalkgehalte hoger dan onderin) en op locatie 5 en 9 komt ook een enkele cm's dikke, kalkhoudende toplaag op een ontcalcete bodem voor. De inverse diepteprofielen van deze stuifkuil hangen samen met afzetting van kalkhoudend stuifzand op een ontcalcete bodem tot op minstens 64 m afstand van de deflatiezone. Bij stuifkuilen LD_5 en LD_9 heeft de ca. 5-10 cm laag vaak een lager kalkgehalte dan de onderliggende ca. 10-15 cm laag en de bovenliggende ca. 0-5 cm laag. Deze gelaagdheid van het kalkgehalte hangt samen met de instuiving van kalkrijk zand op een oude bodem waarvan het kalkgehalte van de toplaag was afgenomen door ontcalceting (resp. tot een afstand van de deflatiezone van minstens 27 en 6 m).

Bij stuifkuil LD_3 valt de enige locatie met kalkhoudend zand in de toplaag samen met de accumulatiezone. Bij de andere drie stuifkuilen valt op dat de meetlocaties met een hoger kalkgehalte in de ca. 0-5 cm laag t.o.v. de ca.5-10 cm laag voorkomen buiten de accumulatiezone zoals die op basis van bodemprofiel en luchtfoto's is vastgesteld (geen meetpunten voor kalkgehalte in deze zone). Dit betekent dat de strooizone van kalkrijk zand zich een stuk verder uitstrekt dan de vastgestelde accumulatiezone. Voor LD_1, LD_5, LD_9 is instuiving van kalkrijk zand dan opgetreden tot resp. 64-83 m, minstens 27 m en minstens 60 m afstand van de deflatiezone.

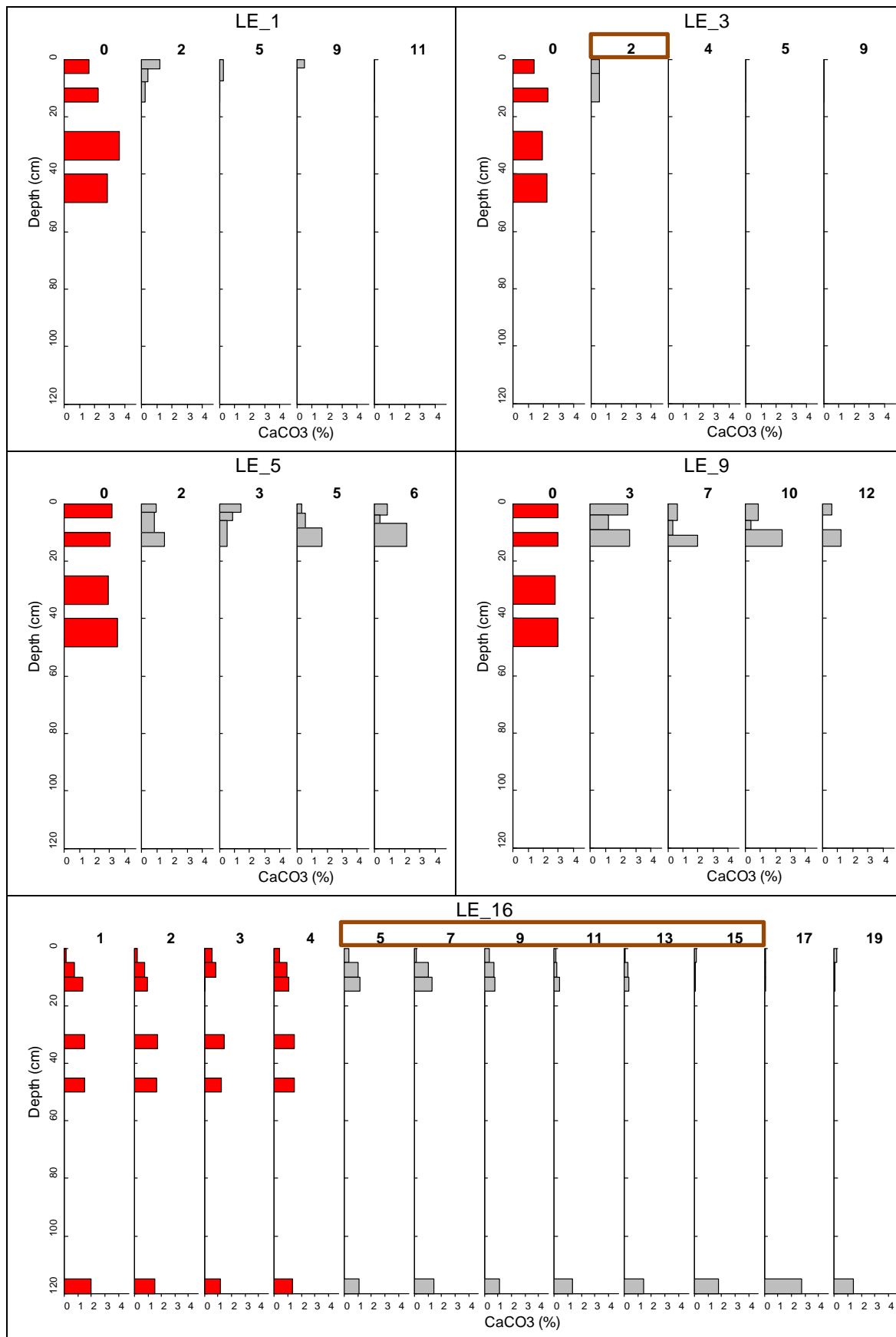
Gestabiliseerde stuifkuilen (LD_16, LD_21, ME_2, ME_8)

Het algemene patroon is dat het duinzand op een diepte van 115-120 cm overal kalkrijk is en dat het gemiddelde kalkgehalte hier vergelijkbaar is met het kalkgehalte op vergelijkbare diepte in de deflatiezones. Het kalkgehalte op deze diepte vertoont enige variatie. Verder geldt voor alle stuifkuilen dat de meetlocaties dichtbij de deflatiezone op 0-15 cm diepte hogere kalkgehaltes hebben dan de meetlocaties die daar verder van zijn verwijderd. Deze hogere kalkgehaltes treden op tot 32-41, 14-25, 46-47 en 9-17 m afstand van de deflatiezone voor respectievelijk stuifkuilen LD_16, LD_21, ME_2, ME_8. De locaties met hoge gehalten vallen bij stuifkuilen LD_21 en ME_2 geheel samen met de accumulatiezone en voor stuifkuil ME_8 grotendeels. Bij LD_16 en ME_8 bestrijken de meetlocaties met hoge kalkgehalte in de 0-15 cm laag (locaties 5, 6, 9) maar een deel van de accumulatiezone en hebben de andere locaties (11, 13, 15 bij LD_16; 5 bij ME_8) een relatief lage kalkgehalte. Grosso modo vertoont het patroon van het kalkgehalte in de bodemlaagtoplaag voor gestabiliseerde stuifkuilen een veel sterkere samenhang met de ligging van de accumulatiezone dan de meeste actieve stuifkuilen. Dit kan te maken hebben dat bij de actieve stuifkuilen in een zone waar wel instuiving heeft plaatsgevonden, maar deze instuiving niet als gesedimenteerde laag herkenbaar is, relatief hoge kalkgehalte in de toplaag zijn gemeten. Bij de stabiliseerde stuifkuilen is het mogelijk dat zone ook aanwezig was, maar dat de kalk na stabilisatie is opgelost.

In de zone met verhoogd kalkgehalte door instuiving in de bodemlaag op 0-15 cm treden verschillen op in kalkgehalte. Bij stuifkuilen LD_16, ME_2 en ME_8 is het kalkgehalte van de 0-5 cm laag vaak lager dan die van de 5-10 cm laag. De verschillen in kalkgehalte voor deze twee lagen zijn groter bij grotere afstand tot de deflatiezone. Bij stuifkuilen LD_16 en ME_8 is het kalkgehalte van de 10-15 cm laag ook weer vaak hoger dan die van de 5-10 cm laag. Bij stuifkuil ME_2 is het gehalte in de 5-10 cm laag meestal juist hoger dan de onderliggende 10-15 cm laag. Dit laatste is een gevolg van overstuiving van een ontcalcete bodem met kalkrijk zand.

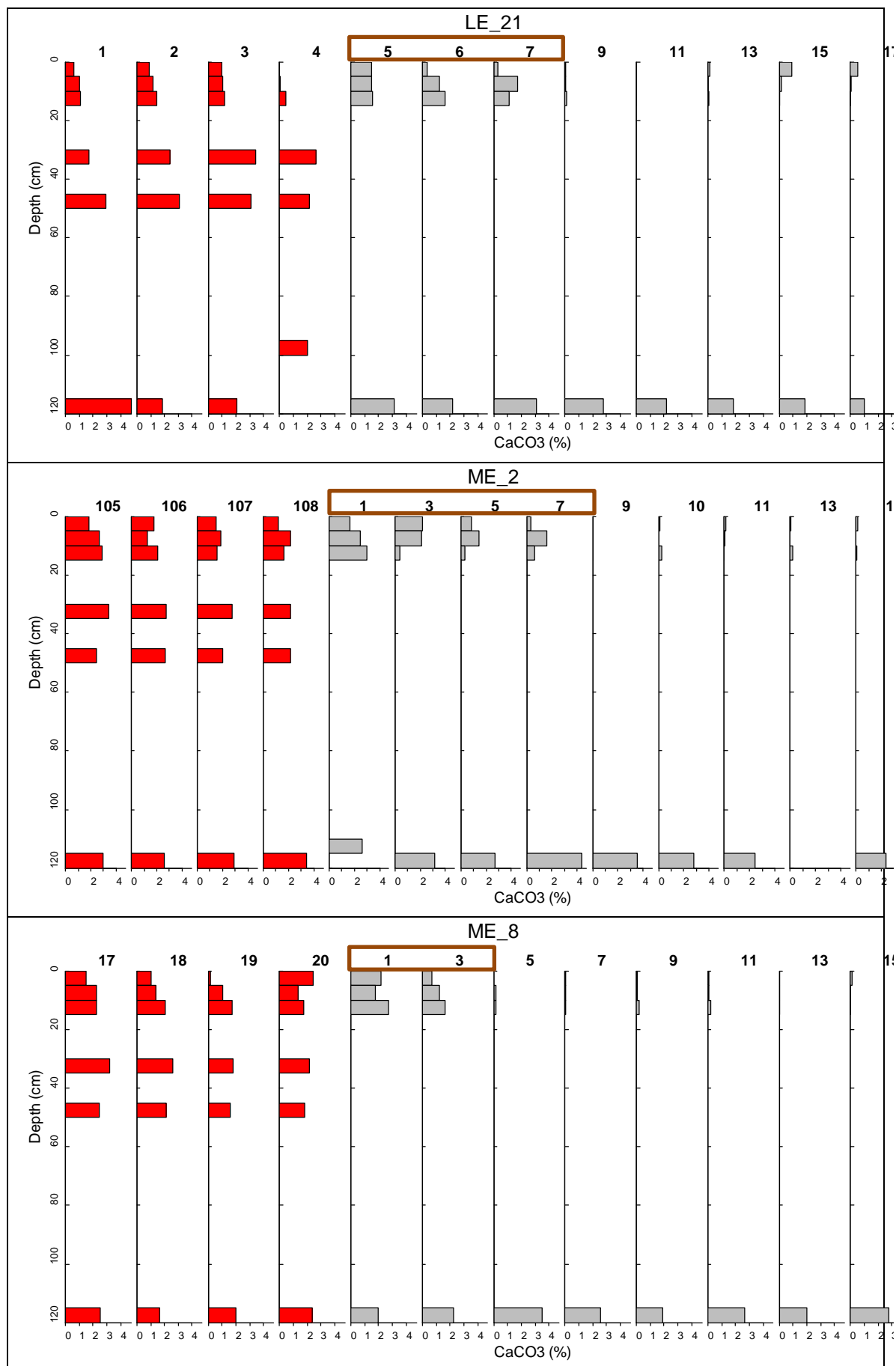
Buiten de accumulatiezone zijn de kalkgehalten in de bodemlaag op 0-15 cm diepte laag (<0.3 % DG voor de meeste locaties. Deze bodems kunnen daarom betiteld worden als kalkarm. Het patroon bij stuifkuil LD_21 wijkt echter af. Hier komt in de 0-15 cm laag wel kalkhoudend zand voor buiten de accumulatiezone. Dit is het geval aan het uiteinde van het transect, dus verwijderd van de deflatiezone (locaties 13, 15, 17). Deze locaties hebben een zure, sterk organische Ah-horizont waar een grote fractie calcium sterk gebonden is in de organische stof (zie par. 8.3.8, *Berekening kalkgehalte*). Bij de berekening van het kalkgehalte vanuit Ca-totaal metingen kon voor deze fractie niet worden gecorrigeerd. Daardoor is het mogelijk dat er

aanwezigheid van kalk wordt berekend terwijl dit er in werkelijkheid niet zo is. De lage bodem-pH duidt op afwezigheid van kalk.



Figuur 8-18: Diepteprofielen voor kalk in de bodem van de transecten ten NO of O van de deflatiezone (plots met grijze staven). De nummers boven elke plot geven de code van de meetlocatie binnen de stuifkuil. Tevens wordt het kalkprofiel in de deflatiezone weergegeven (plots met rode staven). Het bruine kader geeft het voorkomen in de vastgestelde

accumulatiezone. Als de accumulatiezone niet wordt aangegeven bij een stuifkuil dan lagen er in deze zone geen meetpunten waar het kalkgehalte is gemeten.



Vervolg Figuur 8-18

8.4.8 Relaties van bodem-pH met basenrijkdom

Generieke relatie bodem-pH en kalkgehalte

In Figuur 8-19 wordt de relatie tussen de pH_{H2O} en het kalkgehalte weergegeven. Deze relatie wordt afzonderlijk voor de actieve en stabiele stuifkuilen weergegeven. Het kalkgehalte van de actieve stuifkuilen is berekend met **Vergelijking 8-1** uit het gemeten totaal Ca-gehalte en houdt daarbij rekening met uitwisselbaar calcium (Ca_{exch}) en calcium dat sterk in de organische stof ($Ca_{SOMinert}$) is gebonden. Het kalkgehalte van de gestabiliseerde stuifkuilen is berekend met **Vergelijking 8-2**. In deze berekening wordt niet gecorrigeerd voor Ca_{exch} en $Ca_{SOMinert}$, omdat Ca_{exch} en het organisch-stofgehalte (SOM-gehalte) hier niet gemeten zijn (zie voor toelichting p. 192). Bij de actieve stuifkuilen zijn in Figuur 8-19 ook de relatieve verschillen van het SOM-gehalte en de ratio Ca_{exch}/SOM afleesbaar. De ratio Ca_{exch}/SOM wordt gebruikt als maat voor de basenverzadiging. De relatie van de pH met het kalkgehalte is als volgt.

Bij de actieve stuifkuilen hebben de kalkloze bodems ($CaCO_3 = 0\%$) een relatief lage, maar ook variabele pH (meestal 4.2-5.5, outlier van 6.5). Bij de stabiele stuifkuilen bedraagt de pH range van kalkloze bodems meestal 3.9-6.2 (twee outliers van 6.8 en 8.3). Bij alle stuifkuilen loopt de pH op bij een toenemend kalkgehalte en vlakt af op een hoog niveau vanaf een kalkgehalte van 1.0-1.5 % DG. Bij de gestabiliseerde stuifkuilen is bij een kalkgehalte > 0 tot 0.5 % DG nog een grote pH-range aanwezig. Bij de actieve stuifkuilen is dat veel minder het geval. Dit verschil heeft vermoedelijk ermee te maken met dat bij de actieve stuifkuilen voor de berekening van het kalkgehalte is gecorrigeerd voor Ca_{exch} en $Ca_{SOMinert}$. Bij de actieve stuifkuilen is het kalkgehalte in de deflatiezone relatief hoog en ligt de pH hoger dan op de locaties in het transect met een vergelijkbare kalkrange. Bij de gestabiliseerde stuifkuilen komen kalkloze tot kalkrijke monsters voor in de deflatiezone en overlappen die van de monsters uit de transecten. Bij de metingen van de actieve stuifkuilen is te zien dat monsters met een hoog kalkgehalte arm zijn aan SOM. SOM-rijkere monsters hebben in het algemeen een iets lagere pH dan SOM-arme monsters met een vergelijkbaar kalkgehalte. Kalkloze monsters hebben meestal een relatief hoog SOM-gehalte. De ratio Ca_{exch}/SOM is bij kalkgehalte > 1.5 % relatief hoog. Bij lagere kalkgehalten is deze ratio gecorreleerd met de pH wat erop duidt dat in de kalkrange 0 tot 1.5 % zuurbuffering door kationuitwisseling een rol speelt. In Figuur 8-20 wordt ook geïllustreerd dat er een sterke exponentiële relatie is tussen bodem pH en de ratio Ca_{exch}/SOM voor een groot bereik van de bodem pH (pH-H₂O 5.0-8.0; pH-KCl 4.0-7.5).

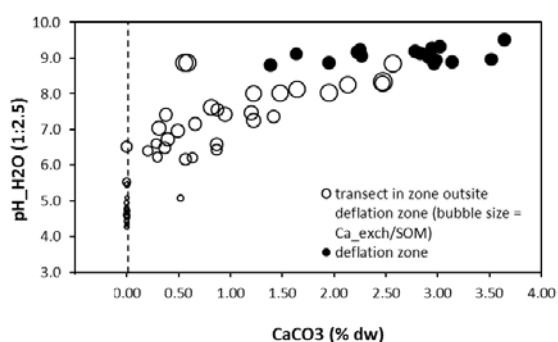
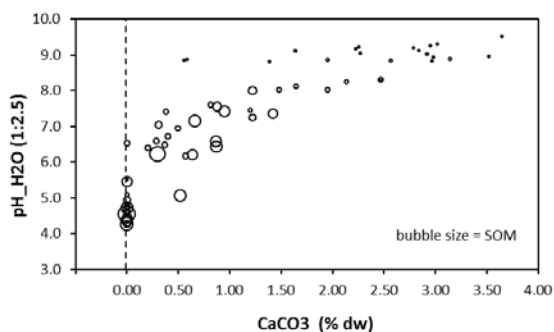
Generieke relatie uitwisselbare kationen en bodem pH

Naast kalkbuffering is in bodems met een relatief hoge kationuitwisselcapaciteit (CEC) ook de buffering door kationuitwisseling van belang. In bodems van duinzand draagt organische stof het sterkst bij aan de CEC. Hoe hoger het organisch stofgehalte, hoe hoger de CEC. Buffering van de zuurgraad vindt bij kationuitwisseling plaats door uitwisseling van basische kationen (Ca, Mg, Na, K) tegen de (potentieel) zure kationen (H, Al, Fe, Mn en NH₄). Het aandeel basische kationen aan het kationenadsorptiecomplex is sterk gerelateerd aan de pH die de hoeveelheid geadsorbeerde zure kationen dicteert. In de bodemtoplaag van de zone rond de actieve stuifkuilen waar in de NO/O-transecten de uitwisselbare kationen zijn gemeten, zijn de volgende patronen van uitwisselbare kationen aanwezig in relatie tot de bodem pH.

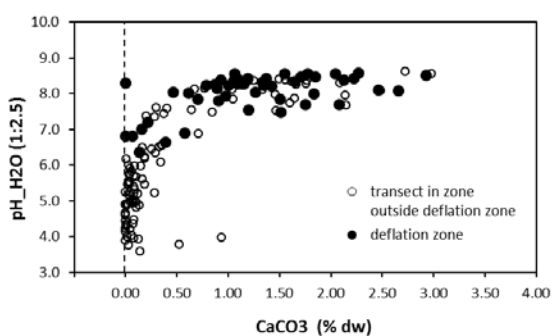
Over het hele meetbereik van pH-H₂O (4-8) is Ca_{exch} het belangrijkste uitwisselbare basische kation (Tabel 8-5). Zelfs in het pH-H₂O bereik van 4 tot 5 is dit nog het geval. Na Ca_{exch} is Mg_{exch} het meest belangrijk uitwisselbare basische kation. De andere uitwisselbare metalen en NH₄_{exch} dragen weinig bij. Wanneer naar de verhouding van de uitwisselbare kationen wordt gekeken verandert het beeld enigszins. De verhouding is berekend op basis van alle bepaalde uitwisselbare kationen (Tabel 8-6). Hier zat geen bepaling van H_{exch} bij dat onder zuurdere omstandigheden een hoge bezetting heeft op het adsorptiecomplex. Bij alle pH-klassen is Ca_{exch} het belangrijkste uitwisselbare metaal. Mg_{exch} is voor de pH-buffering in bodems met een pH-H₂O 5-8 kwantitatief belangrijk (zie ook Figuur 8-20, grafiek rechtsonder). In de zuurdere pH-klassen neemt verder het aandeel van Al_{exch} duidelijk toe. Al_{exch} heeft hogere waarden (> 1 meq/kg) bij pH < 6.0 in het extract. Onder deze zuurdere omstandigheden is het gemeten Al_{exch} mogelijk een artefact van oplossing van gipsiet in het monster (afhankelijk van de bepalingsmethode; Stuyfzand 2015). De andere uitwisselbare metalen zijn wat betreft aandeel minder belangrijk. Van uitwisselbaar Fe, Na en K neemt het aandeel zwak toe in de zuurdere klassen. Fe_{exch} bereikt daarbij het hoogste aandeel in de pH-H₂O klasse 4-5. Na_{exch} , K_{exch} en Mn_{exch} hebben een optimum in pH klasse 5-6. Het zeer geringe aandeel van NH₄_{exch} is terug te voeren op de snelle nitrificatie die in zowel relatief basische als zure duingraslandbodems optreedt (Kooijman et al. 2014).

In Figuur 8-20 (grafieken boven) wordt de relatie weergegeven van pH-H₂O en pH-KCl met de ratio van Ca_{exch}+Mg_{exch}+Na_{exch}+K_{exch} met het organische stofgehalte (BC/ SOM). Deze ratio wordt gebruikt als proxi-variabele voor de basenverzadiging van het adsorptiecomplex. Beide pH-variabelen hebben een sterke relatie met BC/ SOM. Bij een toenemende waarde van BC/ SOM is de pH hoger en deze toename vlt af bij hoge waarden van BC/ SOM. De hogere range van BC/ SOM ligt rond de 3000 meq/kg SOM DG en dat is in het bereik van de CEC van goed gehumificeerd organische materiaal. In het basenrijke bereik (BC/ SOM > 2300 meq/kg SOM) zijn de bodems relatief arm aan SOM. Bij lagere waarde van BC/ SOM is het SOM gehalte variabel en komen ook monsters voor met een hoog SOM-gehalte (Figuur 8-20; grafieken in tweede rij).

Actieve stuifkuilen



Gestabiliseerde stuifkuilen



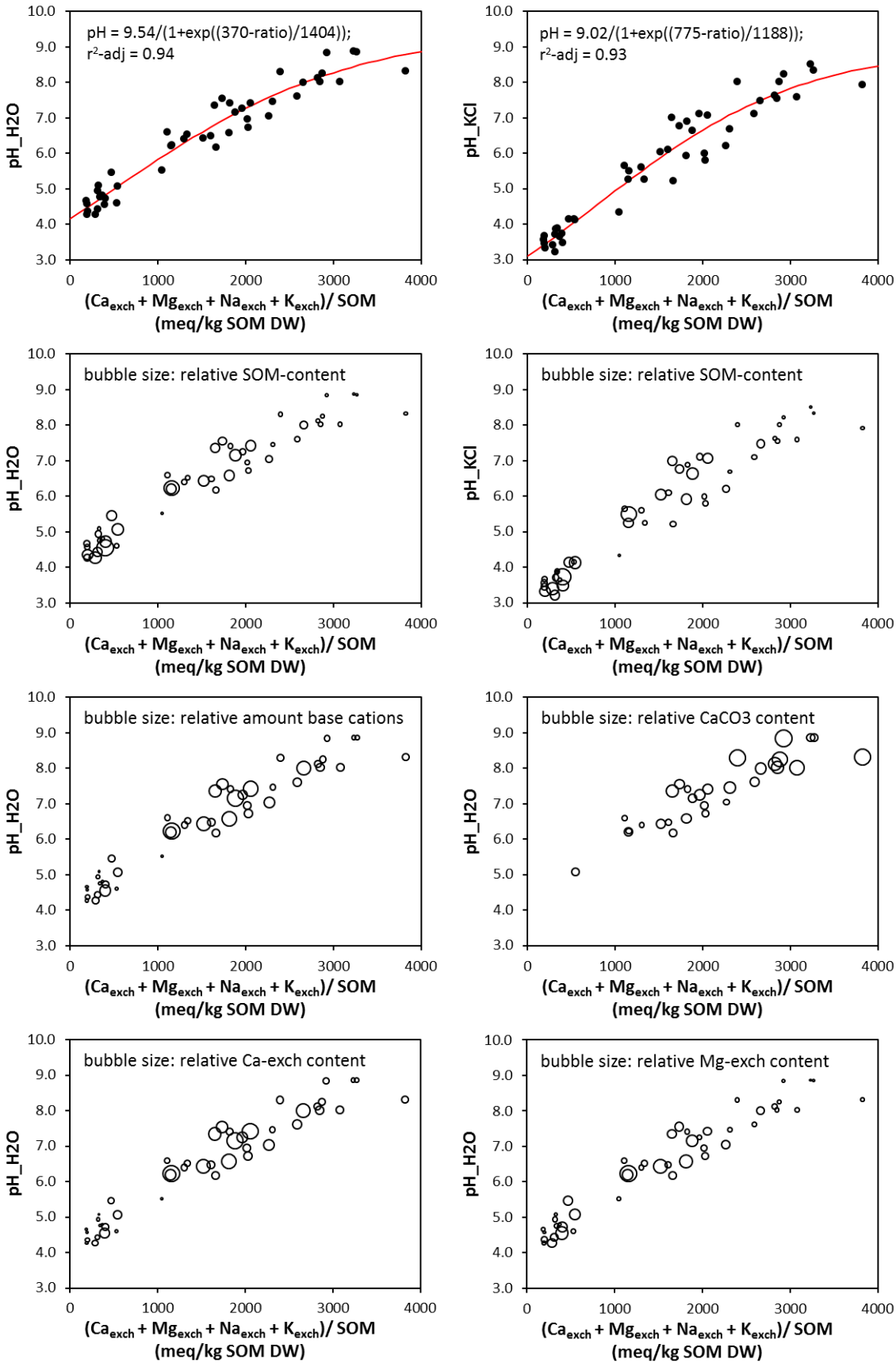
Figuur 8-19: Kalkgehalte in relatie tot gemeten pH-H₂O voor bodemonsters van actieve (links) stuifkuilen en stabiele stuifkuilen (rechts). In de grafiek linksboven is de grootte van de open cirkels een maat voor het organische stofgehalte, in de grafiek linksonder voor de ratio (Ca_{exch} + Mg_{exch} + Na_{exch} + K_{exch})/ SOM. Zwarte bollen zijn punten in de deflatiezone zonder metingen van deze ratio.

Tabel 8-5: Gemiddelde gehalten van uitwisselbare kationen in de bodemtoplaag (0-15 cm) van de NO/O-transecten van de vier actieve stuifkuilen per pH-H₂O klasse.

pH-H ₂ O klasse	kationen (m.u.v. H-exch)	Ca-exch + Mg-exch + Na-exch + K-exch	ratio (Ca-exch + Mg-exch + Na-exch + K-exch)/ SOM	Ca-exch	Mg-exch	Na-exch	K-exch	Fe-exch	Mn-exch	Al-exch	NH ₄ -exch
	meq.kg DW	meq.kg DW	meq/ kg DW	meq/ kg DW	meq/ kg DW	meq/ kg DW	meq/ kg DW	meq/ kg DW	meq/ kg DW	meq/ kg DW	meq/ kg DW
4.0-5.0	27.6	19.6	310	13.45	4.59	0.75	0.76	0.55	0.32	6.95	0.21
5.0-6.0	27.8	24.2	597	16.51	6.01	0.73	0.97	0.19	0.85	2.50	0.00
6.0-7.0	73.9	72.4	1519	61.22	9.63	0.57	0.96	0.02	1.16	0.15	0.21
7.0-8.0	88.9	87.5	2032	79.34	6.07	0.86	1.23	0.04	1.11	0.02	0.19
8.0-9.0	40.6	40.0	2994	37.27	1.90	0.22	0.60	0.01	0.48	0.03	0.05

Tabel 8-6: Aandeel van uitwisselbare kationen in de totale som van de uitwisselbare kationen exclusief H-exch per klasse van pH-H2O.

pH-H2O klasse	aandeel in som Ca-exch + Mg-exch + Na-exch + K-exch + Fe-exch + Mn-exch + Al-exch + NH4-exch								som kationen (m.u.v. H- exch)
	Ca-exch	Mg-exch	Na-exch	K-exch	Fe-exch	Mn-exch	Al-exch	NH4-exch	
	% eq/eq	% eq/eq	% eq/eq	% eq/eq	% eq/eq	% eq/eq	% eq/eq	% eq/eq	
4.0-5.0	39.8	14.8	3.3	2.6	3.2	0.8	35.2	0.4	100.0
5.0-6.0	46.0	19.5	4.0	3.9	1.6	4.0	21.0	0.0	100.0
6.0-7.0	82.6	12.5	1.1	1.3	0.1	1.7	0.5	0.2	100.0
7.0-8.0	88.6	7.1	1.1	1.5	0.1	1.5	0.0	0.1	100.0
8.0-9.0	90.9	4.5	0.8	2.0	0.1	1.5	0.2	0.0	100.0



Figuur 8-20: De relatie tussen de ratio $(Ca_{exch} + Mg_{exch} + Na_{exch} + K_{exch}) / SOM$ en de pH in waterextract (links) en in KCl-extract (rechts) in bodemonsters van de NO/O-transecten in de actieve stuifkuilen. Grafieken boven: rode lijnen zijn logistische regressielijnen. Grafieken daaronder: grootte van de cirkels geven verschillen van genoemde variabele weer.

8.4.9 Vegetatiestructuur en de verspreiding van gekarteerde plantensoorten in en rond stuifkuilen

In deze paragraaf wordt het patroon van vegetatiestructuurvariabelen en gekarteerde mos- en plantensoorten in de plots van het meetnet (gekarteerd in 2016) geanalyseerd in relatie tot de vastgestelde eolische zonering (deflatiezone, accumulatiezone en de zone daarbuiten) en voor de zonering van de beïnvloeding van de pH van de bodemtoplaag door (voormalige) instuiving (sterke beïnvloed, zwakke beïnvloed, 'niet' beïnvloed). In Tabel 8-8 wordt voor elke stuifkuil en zone een overzicht gegeven van de gemiddelde bedekking van de vegetatiestructuurvariabelen, alsmede de presentie van soorten en de gemiddelde bedekking bij voorkomen van soorten. In Figuur 8-21 wordt voor elke stuifkuil het ruimtelijke patroon van de vegetatiestructuur weergegeven en in Bijlage 3 wordt het verspreidingspatroon van een aantal mossoorten weergegeven. De patronen worden besproken voor de vier actieve en de vier gestabiliseerde stuifkuilen. Omdat bij de actieve stuifkuilen nauwelijks begroeiing voorkomt in de deflatiezone zijn hier geen vegetatiestructuur noch soorten opgenomen (zeer hoge bedekking kaal zand). Aan verschillen in de bedekking van struiken en bomen die meestal (zeer) laag is wordt verder geen aandacht geschonken, omdat deze te maken heeft met een beperkt aantal plots die beschaduwd worden door lokale struik- of boomgroepen. De patronen van plantensoorten worden mede besproken in relatie tot de ecologische soortgroep waartoe ze behoren (zie Tabel 8-7).

Actieve stuifkuilen (LD_1, LD_3, LD_5, LD_9) in relatie tot eolische zones (accumulatiezone en zone daar buiten)

De accumulatiezones van de actieve stuifkuilen hebben gemiddeld ca. 50 % kaal zand en een relatief lage bedekking van mossen en kruiden. De bedekking van strooisel is meestal (zeer) laag. Bij alle stuifkuilen heeft de zone buiten de accumulatiezone juist een (zeer) lage bedekking kaal zand en een matig hoge tot hoge mosbedekking en vrij lage bedekking met kruiden. De bedekking van de kruid- en moslaag is hoger dan die in de accumulatiezone. De bedekking van de strooisellaag is zeer laag.

Het patroon van soorten is als volgt. *Tortula ruralis* (soortgroep droge pioniervegetatie, voedselarm en basenrijk) komt regelmatig voor in de accumulatiezone met een lage bedekking. *Racomitrium canescens* (soortgroep droge pioniervegetatie, voedselarm en matig basenrijk) komt in een deel van de stuifkuilen voor met een lage presentie en met de hoogste presentie in de accumulatiezone van stuifkuil LD_9. *Polytrichum piliferum*, een soort van droge pioniervegetatie (voedselarm en basenarm), komt alleen voor in de accumulatiezone en de zone daarbuiten van de relatief kalkarme stuifkuilen LD_1 en LD_3. Twee soorten van droog duingrasland (voedselarm en basenrijk; *Galium verum* en *Homalothecium lutescens*) komen vaker voor in beide zones van de kalkrijkere stuifkuilen LD_5 en LD_9. Het mos *Homalothecium lutescens* bereikt daarbij de hoogste bedekking in de zone buiten de accumulatiezone. *Senecio jacobaea* komt vaker voor bij de kalkrijkere stuifkuilen dan bij de kalkarme. Opvallend is dat *Viola curtisii* die ook behoort tot de soortgroep droog duingrasland (voedselarm en basenrijk), de hoogste presentie heeft in beide zones van de kalkarmere stuifkuil LD_3. De algemene mossoorten (*Hypnum cupressiforme* v. *lacunosum*, *Hypnum cupressiforme* v. *jutlandicum* en *Pseudoscleropodium purum*) van voedselarme duingraslanden hebben vaak een hogere presentie en bedekking in de zone buiten de accumulatiezone. *Hypnum cupressiforme* v. *lacunosum* en *Pseudoscleropodium purum* komen ook regelmatig voor in de accumulatiezone, terwijl *Hypnum cupressiforme* v. *jutlandicum* daar niet of weinig voorkomt. Van de soortgroep droog duingrasland (voedselarm en basenarm) komen *Campylopus introflexus*, *Polytrichum juniperinum* en *Rumex acetosella* alleen of vaker voor in beide zones van de relatief kalkarme stuifkuilen LD_1 en LD_3. In de zone buiten de accumulatiezone is de presentie van deze soorten en ook van *Dicranum scoparium* hoger t.o.v. de kalkrijkere stuifkuilen LD_5 en LD_9. Opvallend is dat *Dicranum scoparium* in de accumulatiezone juist beperkt is tot een kalkrijkere stuifkuil.

Actieve stuifkuilen (LD_1, LD_3, LD_5, LD_9) in relatie tot zonering van beïnvloeding bodem-pH (sterke invloed, zwakke invloed, 'geen' invloed)

De sterk beïnvloede zone heeft een relatief hoge bedekking van kaal zand, een lage bedekking van kruiden en lage tot matig hoge bedekking van mossen. In de zwak beïnvloede zone is de bedekking van kaal zand voor de meeste stuifkuilen lager en die van de kruiden hoger dan in de sterk beïnvloede zone. In de 'niet' beïnvloede zone is de bedekking van de kruidlaag vaak (iets) hoger dan in de andere twee zones en is de bedekking van kaal zand zeer laag. In deze zone is de mosbedekking bij drie stuifkuilen hoog en bij stuifkuil LD_5 matig hoog.

Tortula ruralis (soortgroep droge pioniervegetatie, voedselarm en basenrijk) komt vooral voor in de sterk en zwak beïnvloede zone. Opvallend is de hogere presentie in de kalkarme stuifkuilen LD_1 en LD_3 en daar komt de soort ook nog met een lage presentie voor in de 'niet' beïnvloede zone. *Racomitrium canescens* (soortgroep droge pioniervegetatie, voedselarm en matig basenrijk) komt in een deel van de stuifkuilen voor met een relatief lage presentie zonder een duidelijk patroon van zonering (bij LD_9 wel hoogste presentie in sterk beïnvloede zone). *Polytrichum piliferum*, een soort van droge pioniervegetatie, voedselarm en basenarm, komt alleen met een lage presentie voor in de zwak en 'niet' beïnvloede zone van de relatief kalkarme stuifkuilen. *Galium verum* (droog duingrasland voedselarm basenrijk) komt regelmatig voor in al de drie zones van de kalkrijke stuifkuilen LD_5 en LD_9, terwijl het in deze zones van andere stuifkuilen sporadisch of niet voorkomt. Van dezelfde soortgroep komen *Homalothecium lutescens* en *Senecio jacobaea* vaker voor in alle zones van de kalkrijke stuifkuilen. *Homalothecium lutescens* komt daarbij vaker en met een hogere bedekking voor in de sterk en zwak beïnvloede zone en *Senecio jacobaea* vaker in de zwak beïnvloede zone. Opvallend is dat de basenminnende soort *Viola curtisii* in alle zones een hogere presentie heeft in de relatief kalkarme stuifkuilen. De algemenere mossoorten (*Hypnum cupressiforme* v. *lacunosum*, *Hypnum cupressiforme* v. *jutlandicum* en *Pseudoscleropodium purum*) van voedselarme duingraslanden hebben vaak voor de stuifkuilen LD_3, LD_5 en LD_9 een hogere presentie in de zwak en 'niet' beïnvloede zone. De bedekking is niet duidelijk differentiërend voor de zones. De zuurminnende mossoorten *Campylopus introflexus*, *Dicranum scoparium* en *Polytrichum juniperinum* hebben een hogere bedekking in de 'niet' beïnvloede zone en de zuurminnende Schapenzuring heeft een hogere presentie in dezelfde zone. Deze vier soorten komen weinig voor in de sterk beïnvloede zone. *Campylopus introflexus*, *Polytrichum juniperinum* en Schapenzuring komen in de zwak beïnvloede zone vaker voor in de relatief kalkarme stuifkuilen.

Gestabiliseerde stuifkuilen (LD_16, LD_21, ME_2, ME_8) in relatie tot eolische zones (accumulatiezone en zone daar buiten)

In de gestabiliseerde deflatiezone is de bedekking van kaal zand matig tot hoog en zijn de bedekkingen van de mossen en kruiden relatief laag. In de accumulatiezone is de bedekking kaal zand lager en die van de mossen hoger dan in de deflatiezone. Voor de bedekking van de kruiden is dat alleen het geval bij stuifkuil ME_8. In de zone buiten de accumulatiezone bedekken de mossen evenveel als in de accumulatiezone en is die van de kruiden hoger. Kaal zand komt hier nauwelijks meer voor. Opvallend is de hogere bedekking van de kruiden in alle zones in de stuifkuilen in Meijndel ten opzichte van die in de Luchterduinen (effect van hoge graasdruk damherten in de Luchterduinen?).

In de deflatiezone groeien in drie stuifkuilen pioniersoorten: *Tortula ruralis* van basenrijke bodem en *Racomitrium canescens* van matig basenrijke bodem. Daarnaast komen er ook soorten voor van duingraslanden waaronder ook soorten van basenrijke omstandigheden. Genoemde pioniersoorten komen ook met een lage tot matige frequentie voor in de accumulatiezone en met een lage presentie in de zone daarbuiten. *Tortula ruralis* komt daar alleen voor in de stuifkuilen ME_2 en ME_8 en *Racomitrium canescens* vooral in de stuifkuilen LD16 en LD_21. *Galium verum* en *Senecio jacobaea* (droog duingrasland voedselarm basenrijk) komen in de accumulatiezone en de zone daarbuiten met een matige tot hoge presentie voor. In deze zones groeit *Viola curtisii* met een lage presentie in een deel van de stuifkuilen. De moslaag wordt in de accumulatiezone en de zone daarbuiten overheerst door *Hypnum cupressiforme* v. *lacunosum* en *Pseudoscleropodium purum*. *Hypnum cupressiforme* v. *jutlandicum* komt veel voor in de buitenste zone van stuifkuil LD_21. Soorten van droog duingrasland (voedselarm en basenarm) komen alleen voor in de accumulatiezone en daarbuiten. Van deze soorten komen hier *Dicranum scoparium* en *Rumex acetosella* in alle stuifkuilen regelmatig voor.

Gestabiliseerde stuifkuilen (LD_16, LD_21, ME_2, ME_8) in relatie tot zonering beïnvloeding bodem-pH (sterke invloed, zwakke invloed, 'niet' invloed)

De sterk beïnvloede zone heeft een relatief hoge bedekking van kaal zand, een lage tot matige bedekking van kruiden en mossen. In de accumulatie zone is de bedekking kaal zand laag en die van de mossen hoger. In de zone daarbuiten is de bedekking kaal zand zeer laag, die van de mossen hetzelfde als in de vorige zone en bedekken de kruiden meer. Van de pioniersoorten komt *Tortula ruralis* frequenter en deels ook met een hogere bedekking voor in de sterk beïnvloede zone van stuifkuilen ME_2 en ME_8. *Racomitrium canescens* komt regelmatig voor in de sterk en zwak beïnvloede zone van de stuifkuilen LD16 en LD_21. Diverse basenminnende soorten van duingraslanden komen in alle drie zones met een matige tot hoge presentie voor. *Viola curtisii* echter alleen in de zwak en 'niet' beïnvloede zone. De presentie van *Galium verum* is in de 'niet' beïnvloede zone iets lager dan in de zwak beïnvloede zone. *Hypnum cupressiforme* v. *lacunosum* heeft bij de meeste stuifkuilen in de sterk en zwak beïnvloede zone een hogere

bedekking dan in de 'niet' beïnvloede zone. *Pseudoscleropodium purum* komt vooral voor in de twee zuurdere zones. Bij de zuurminnende duingraslandsoorten *Dicranum scoparium* en *Rumex acetosella* neemt de presentie toe van sterk naar 'niet' beïnvloede zone.

Conclusies

De vegetatiestructuur vertoont voor zowel de actieve als stabiele stuifkuilen een duidelijke samenhang met de eolische zonerings. In de deflatiezone en accumulatiezone is het aandeel kaal zand hoog en dat neemt af richting periferie van de stuifkuilen. De bedekking van mossen en kruiden wordt daarentegen belangrijker. De vegetatiestructuur van de gestabiliseerde stuifkuilen verschilt als volgt van de actieve stuifkuilen: in de deflatiezone minder kaal zand en meer vegetatie van mossen en kruiden, in de accumulatiezone minder kaal zand en een duidelijk hogere mosbedekking, in de zone daarbuiten deels een lagere mosbedekking en deels hogere kruidenbedekking. De successie van de vegetatie is dus bij de gestabiliseerde stuifkuilen verder gevorderd. De eolische zonerings werkt wegens de effecten op vegetatiestructuur ook sterk door in de zonerings van pioniersoorten (meer in de accumulatiezone en ook in de gestabiliseerde deflatiezones). De vegetatiegradiënt is voor de eolische zonerings en de zonerings van pH-beïnvloedingszones gelijk gericht met basenminnende soorten, die meer aanwezig zijn in de zones dichtbij de stuifkuil en de zuurminnende soorten juist meer in de buitenste zones. De deflatiezones van de gestabiliseerde kuilen bevatten daarbij ook al soorten van basenrijke duingraslanden. De verschillen in kalkrijkdom van de deflatiezones van de stuifkuilen lijkt slechts een beperkt effect te hebben op de zonerings van soorten en uit zich alleen duidelijk in het voorkomen van enkele zuurminnende pionier- en duingraslandsoorten in de accumulatiezone en zone daar buiten van de relatief de kalkarme stuifkuilen LD_1, LD_3 en LD_16.

Tabel 8-7: Indeling ecologische plantensoortgroepen voor de gekarteerde soorten.

Ecologische plantensoortgroep	Ecological plant species group
1: droge pioniervegetatie voedselarm basenrijk	1: dry pioneer vegetation nutrient-poor base-rich
2a: droge pioniervegetatie voedselarm matig basenrijk	2: dry pioneer vegetation nutrient-poor moderate base-rich
2b: droge pioniervegetatie voedselarm basenarm	2b: dry pioneer vegetation nutrient-poor base-poor
3: droog duingrasland voedselarm	3: dry dune grassland nutrient-poor
4: droog duingrasland voedselarm basenrijk	4: dry dune grassland nutrient-poor base-rich
5: droog duingrasland voedselarm basenarm	5: dry dune grassland nutrient-poor base-poor

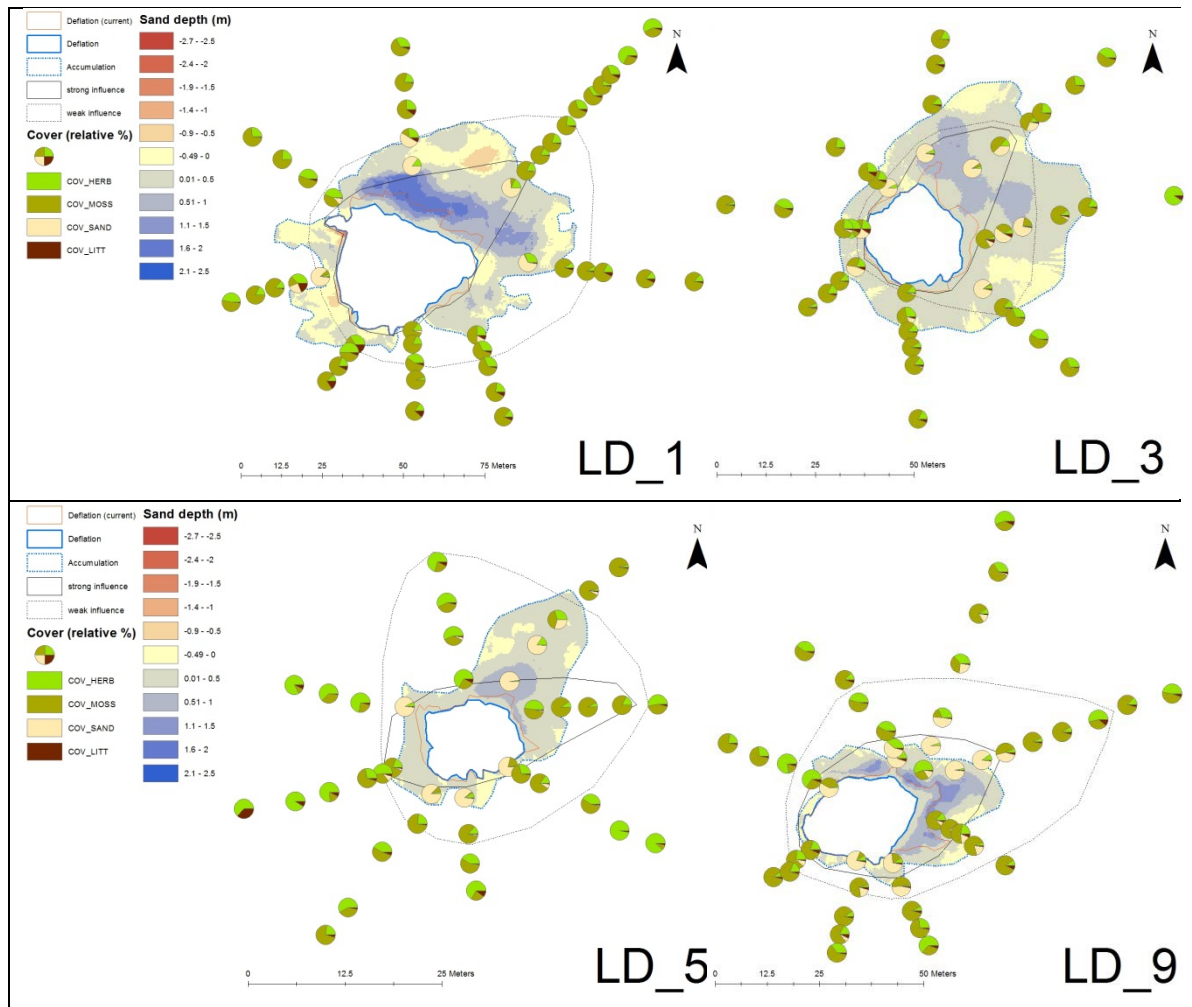
Tabel 8-8. (volgende pagina). Vegetatiestructuur en het voorkomen van mos- en plantensoorten in plots van het meetnet in de eolische zones en zones voor beïnvloeding van de pH van de bodemtoplaag door instuiving. Getallen voor vegetatiestructuurvariabelen geven de gemiddelde bedekking (%). Getallen voor het voorkomen van mos- en plantensoorten geven eerst de frequentie van voorkomen (%) en daarachter tussenhaakjes de gemiddelde bedekking als een soort aanwezig is. Soorten zijn ingedeeld naar ecologische soortgroep (zie voor legenda Tabel 8-7).

Zonatie voor beïnvloeding pH door instuiving

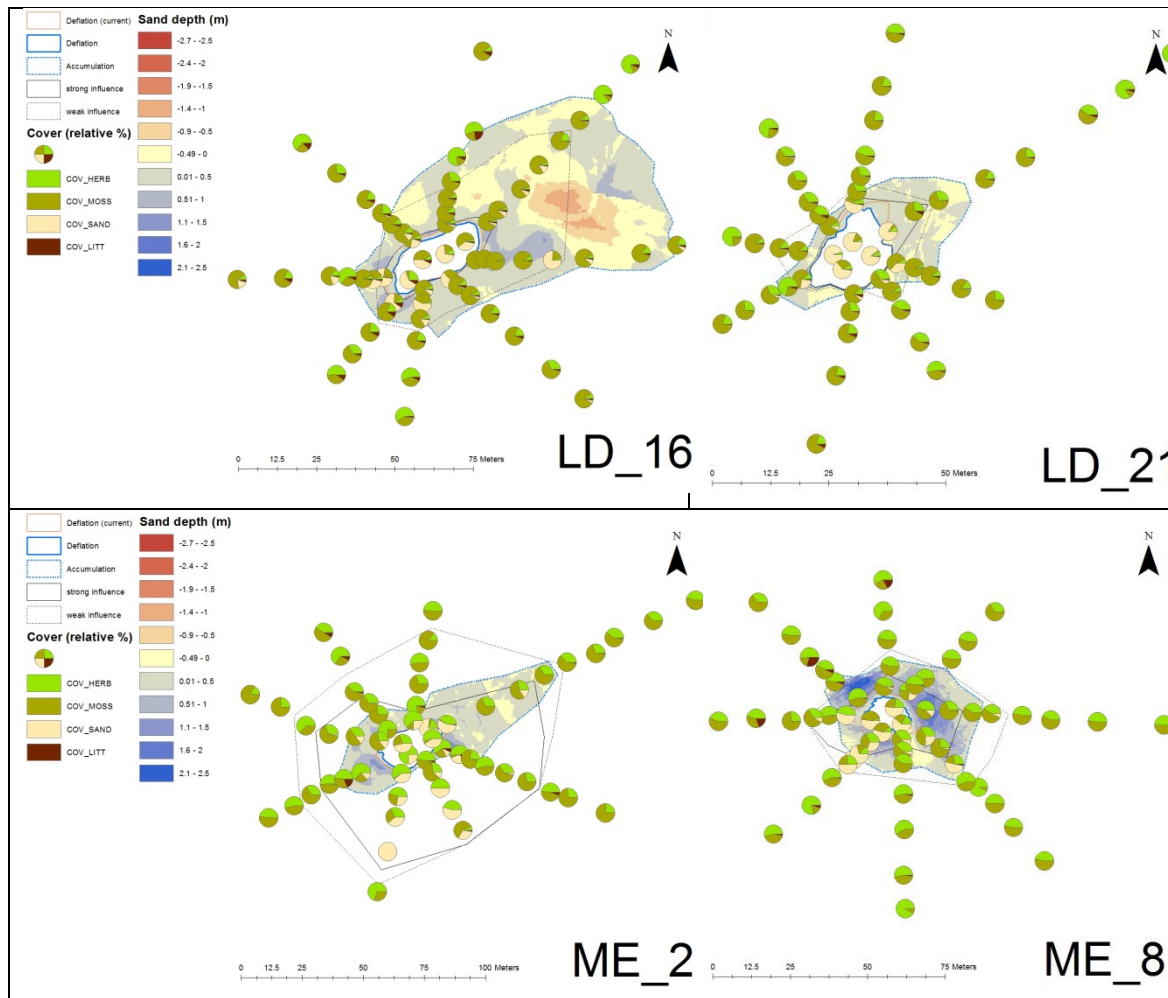
Zonatie beïnvloeding pH (S = sterk; W = zwak; N = zeer zwak/ niet)		Soort																																	
Soort	Ecologische activiteit: Ac = actief; St = stabiel	S		S		S		S		S		S		W		W		W		W		N		N		N		N							
		LD_1 Ac	LD_1 St	LD_3 Ac	LD_3 St	LD_5 Ac	LD_5 St	LD_9 Ac	LD_9 St	LD_16 Ac	LD_16 St	LD_21 Ac	LD_21 St	ME_2 Ac	ME_2 St	ME_8 Ac	ME_8 St	LD_1 Ac	LD_1 St	LD_3 Ac	LD_3 St	LD_5 Ac	LD_5 St	LD_9 Ac	LD_9 St	LD_16 Ac	LD_16 St	ME_2 Ac	ME_2 St	ME_8 Ac	ME_8 St				
1	<i>Tortulia ruralis</i> = <i>Syntrichia ruralis</i>	100(5)	67(29)	25(16)	25(10)	0	0	43(24)	33(6)	50(10)	75(14)	23(24)	15(1)	0	0	27(3)	7(1)	14(6)	10(13)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
2a	<i>Racomitrium canescens</i>	0	0	33(21)	33(20)	100(29)	0	25(8)	7(1)	0	15(21)	44(30)	63(32)	0	13(14)	0	13(14)	0	3(8)	5(80)	0	23(50)	11(23)	0	4(90)	0	0	0	0	0	0				
2b	<i>Polytrichum piliferum</i>	0	0	0	0	0	0	4(1)	8(1)	7(1)	13(2)	0	0	0	27(7)	7(20)	10(1)	14(1)	0	0	4(8)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
4	<i>Brachythecium albicans</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	7(1)	0	8(1)	0	0	0	0	0	7(14)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
4	<i>Galium verum</i>	100(2)	0	38(1)	67(1)	33(1)	0	79(5)	67(6)	21(1)	0	38(1)	54(1)	74(1)	50(1)	100(7)	93(11)	17(1)	0	47(1)	50(1)	42(1)	23(1)	85(4)	65(8)	0	0	0	0	0	0	0			
4	<i>Homalothecium lutescens</i>	0	0	50(68)	0	0	0	50(1)	0	0	15(21)	15(35)	0	0	0	3(1)	21(3)	0	3(1)	21(3)	0	12(5)	17(2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
4	<i>Senecio jacobaea</i>	0	0	75(1)	67(1)	33(1)	0	86(9)	58(1)	29(1)	38(1)	62(1)	30(1)	25(1)	82(4)	73(5)	17(1)	3(1)	47(1)	40(1)	31(1)	26(1)	85(8)	77(5)	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	<i>Viola curtisii</i>	100(1)	0	25(1)	17(1)	0	0	0	0	86(1)	25(1)	0	8(1)	15(1)	0	9(1)	0	48(1)	10(1)	0	5(1)	4(1)	9(1)	8(4)	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	<i>Hypnum cupressiforme</i> v. <i>lacunosum</i>	50(90)	0	25(41)	17(16)	67(70)	0	82(46)	67(47)	50(68)	63(38)	31(11)	62(47)	74(55)	88(26)	82(52)	80(40)	55(19)	41(38)	21(24)	55(28)	42(33)	71(28)	77(66)	69(23)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	<i>Hypnum cupressiforme</i> v. <i>jurtandicum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15(35)	11(14)	50(13)	0	7(50)	17(50)	21(7)	5(8)	55(13)	12(40)	83(18)	0	12(17)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3	<i>Pseudoscleropodium purum</i>	50(2)	0	63(14)	33(28)	0	0	8(1)	0	50(24)	25(7)	46(42)	46(34)	30(26)	38(20)	18(70)	40(27)	69(37)	62(29)	89(27)	95(32)	54(22)	71(15)	8(13)	42(47)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	<i>Campylopus introflexus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50(6)	0	11(1)	0	18(3)	7(2)	14(21)	21(37)	0	5(20)	12(5)	3(2)	15(21)	8(4)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	<i>Dicranum scoparium</i>	0	0	13(1)	8(13)	33(20)	0	7(30)	33(1)	43(6)	0	38(8)	23(16)	33(28)	50(26)	45(7)	47(10)	59(25)	55(33)	26(18)	45(29)	54(25)	69(18)	54(11)	77(31)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	<i>Polytrichum juniperinum</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	50(1)	13(13)	0	0	0	0	0	0	13(11)	72(19)	0	5(1)	31(25)	0	19(3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	<i>Rumex acetosella</i>	0	33(1)	13(1)	0	0	0	11(1)	58(4)	50(1)	50(1)	0	15(1)	37(1)	75(1)	55(1)	73(4)	86(1)	90(1)	21(1)	65(1)	58(1)	83(1)	85(6)	73(4)	0	0	0	0	0	0	0	0		

Zonatie eolische

Zonatie eolisch (D = deflatiezone; A = accumulatiezone; O = buiten accumulatiezone)		Soort																																											
Soort	Ecologische activiteit: Ac = actief; St = stabiel	D		D		D		D		D		D		A		A		A		A		O		O		O		O																	
		LD_16 St	LD_16 St	LD_21 St	LD_21 St	ME_2 St	ME_2 St	ME_8 St	ME_8 St	LD_1 Ac	LD_1 St	LD_3 Ac	LD_3 St	LD_5 Ac	LD_5 St	LD_9 Ac	LD_9 St	LD_16 Ac	LD_16 St	ME_2 Ac	ME_2 St	ME_8 Ac	ME_8 St	LD_1 Ac	LD_1 St	LD_3 Ac	LD_3 St	LD_5 Ac	LD_5 St	LD_9 Ac	LD_9 St	LD_16 Ac	LD_16 St	ME_2 Ac	ME_2 St	ME_8 Ac	ME_8 St								
11	bedekking kruiden/ cover herbs (%)	4	4	4	4	4	4	5	16	7	9	33	11	15	19	47	53	33	27	45	29	37	33	53	68	34	12	9	38	17	37	19	41	74	55	49	61	81	81	46	58	59	62	64	62
55	bedekking mossen/ cover moss (%)	5	2	0.3	0.0	15	4	1	3	4	2	4	1	6	4	4	2	4	1	6	4	4	7	3	2	4	5	2	0.3	0.0	15	4	1	3	4	2	4	1	6	4	4	7	3	2	4
100(31)	bedekking strooisel/ cover litter (%)	0.0	0.0	5	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	4	8	0.0	0.0	8	7	0.6	0.1	14	3	0.3	2	8	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		



Figuur 8-21. (ook op volgend epagina) Patronen van vegetatiestructuur in en rond de stuifkuilen in 2016. Per meetpunt wordt de bedekking van kaal zand, mossen, kruiden en strooisel weergegeven. Omdat de som van de bedekkingen van deze vier structuurvariabelen meer dan 100% kan zijn, geven de taartdiagrammen de relatieve bedekking van elke laag aan. Tevens is de begrenzing weergegeven van actuele deflatiezone (rode lijn), de deflatiezone gereconstrueerd met GIS (doorgetrokken blauwe lijn), de buitengrens van de accumulatiezone (gestippelde blauwe lijn) en de sterk en zwak beïnvloede zone met verhoogde pH door instuiving (resp. doorgetrokken en gestippelde zwarte lijnen). In de accumulatie zone wordt met een kleurverloop de dikte van het gesedimenteerde zand weergegeven.



Vervolg Figuur 8-21

8.4.10 Gradiënten van de vegetatie in het NO/O-transect

In deze paragraaf wordt de totale soortensamenstelling van de vegetatie-opnamen in de NO/O-transecten (alle stuifkuilen) en in de deflatiezone (gestabiliseerde stuifkuilen) besproken. Hiervoor wordt gekeken naar de patronen van het aantal soorten en de cumulatieve bedekking per ecologische plantensoortengroep. In Tabel 8-9 is per soortgroep de frequentie en de gemiddelde bedekking (indien voorkomend) van de soorten in de hele opnamenset gegeven. Daarmee kan een indruk worden verkregen van de mate waarin soorten voorkomen en wat de soortensamenstelling is van de soortgroepen. In Figuur 8-23 wordt voor elke stuifkuil de verdeling van de cumulatieve bedekking van de soorten per ecologische soortgroep weergegeven en in Figuur 8-24 het aantal soorten per ecologische soortgroep.

Vegetatie structuur (Figuur 8-22)

De deflatiezone van actieve stuifkuilen heeft altijd een hoge bedekking van kaal zand en weinig bedekking van mossen en vaatplanten. Bij gestabiliseerde stuifkuilen is in de deflatiezone de mosbedekking variabel (laag tot matig hoog) en de bedekking van vaatplanten laag. In de zone buiten de deflatiezone is het patroon als volgt. De meeste plots, behalve die vlak bij de deflatiezone lagen hebben een gesloten vegetatie (cumulatieve bedekking van vaatplanten-, mossen- en struiken+bomen 100% of meer). Bij de stuifkuilen LD_3, LD_5, LD_9 en ME_2 komt een scherpe gradiënt voor van mosarme naar mosrijke vegetatie met toenemende afstand van de deflatiezone. Bij stuifkuil LD_1, LD_16, LD_21 en ME_8 is deze gradiënt meer geleidelijk. De kruidlaag bedraagt maximaal 50%. Dichtbij de deflatiezone heeft de kruidlaag een lage bedekking, die meestal met toenemende afstand van de deflatiezone hoger wordt. Deze toename wordt in sterke mate veroorzaakt door de bedekking van de soorten *Agrostis capillaris*/ *Agrostis capillaris*+*vinealis*, *Calamagrostis epigejos*, *Festuca rubra*, *Festuca filiformis* en *Luzula campestris*. Bij de stuifkuilen LD_5 en LD_9 neemt met toenemende afstand van de deflatiezone de gezamenlijke bedekking van de kruidlaag en die van lage struiken (*Rosa pimpinellifolia* en *Salix repens*) toe.

Totale soortenaantal

Het totale soortenaantal (Figuur 8-24) vertoont bij alle actieve stuifkuilen de hoogste waarden (15-20) halverwege het transect (van 10-30 m tot 20-50 m). Bij de gestabiliseerde stuifkuilen is dat niet het geval en is het soortenaantal het hoogst in een bredere zone (30 tot 80 m) grenzend aan de deflatiezone. Alleen in een zeer smalle zone (enkele meters) bij de deflatiezone van enkele van de gestabiliseerde stuifkuilen (LD_21, ME_2) is het aantal soorten gering. Aan deze patronen dragen vooral de aantallen van de drie soortgroepen van droog duingrasland (3, 4, 5) bij. Bij alle actieve stuifkuilen en gestabiliseerde stuifkuilen LD_21 en ME_2 is het aantal soorten dichtbij de deflatiezone lager dan bij het transect-uiteinde dat daarvan ver verwijderd is.

Patroon van ecologische soortgroepen in actieve stuifkuilen (LD_1, LD_3, LD_5, LD_9)

Bedekking van soortgroepen (Figuur 8-23)

De soortgroep droge pioniervegetatie voedselarm basenrijk is in geringe mate vertegenwoordigd en komt alleen in een zone dichtbij de deflatiezone van stuifkuil LD_1 enigszins bedekkend voor. Bij stuifkuilen LD_1 en LD_3 waarvan de toplaag van de deflatiezone een relatief laag kalkgehalte heeft, hebben soorten van droog duingrasland voedselarm vaak een hoog aandeel in de vegetatie. De tweede soortgroep die hier nog substantieel bedekt, is die van droog duingrasland voedselarm basenrijk dichtbij de deflatiezone een hoge bedekking en verder weg een lagere bedekking. Vanaf ca. 10 m van de deflatiezone vormen soorten van droog duingrasland voedselarm de dominante groep. Bij stuifkuil LD_9 hebben verder soorten van basenrijke droge zomen en ruigten+ struweel en bos een beperkt aandeel in de vegetatie. Bij stuifkuilen LD_1, LD_3 en LD_9 hebben soorten van voedselrijk grasland een relatief hoge bedekking in de zone die het verst verwijderd van de deflatiezone.

Soortenaantal van soortgroepen (Figuur 8-24)

Wat betreft soortenaantal pakt de verdeling over de soortgroepen deels anders uit dan die van de bedekking. Soorten van droge pioniervegetatie voedselarm basenrijk en van droge pioniervegetatie voedselarm matig basenrijk komen in het hele transect van alle vier stuifkuilen voor. Hetzelfde geldt ook grotendeels voor soorten droog duingrasland voedselarm basenrijk. Deze groep is bovendien beter vertegenwoordigd in de 'kalkrijke' stuifkuilen LD_5 en LD_9. Bij de 'kalkarme' stuifkuilen LD_1 en LD_3 is het aantal soorten van droog duingrasland voedselarm basenrijk hoger en het hoogst in het middendeel van de transecten. Soorten van droog duingrasland voedselarm vormen qua aantal vaak een belangrijke groep zonder een eenduidig verloop binnen de transecten. De soortgroep droge zomen en ruigten basenrijk + struweel en bos heeft in de kalkrijkere stuifkuilen vaak een hoger aantal dan in de kalkarme stuifkuilen. Bij de kalkarme stuifkuilen komt deze groep vooral verwijderd van de deflatiezone voor.

Patroon van ecologische soortgroepen in gestabiliseerde stuifkuilen (LD_16, LD_21, ME_2, ME_8)

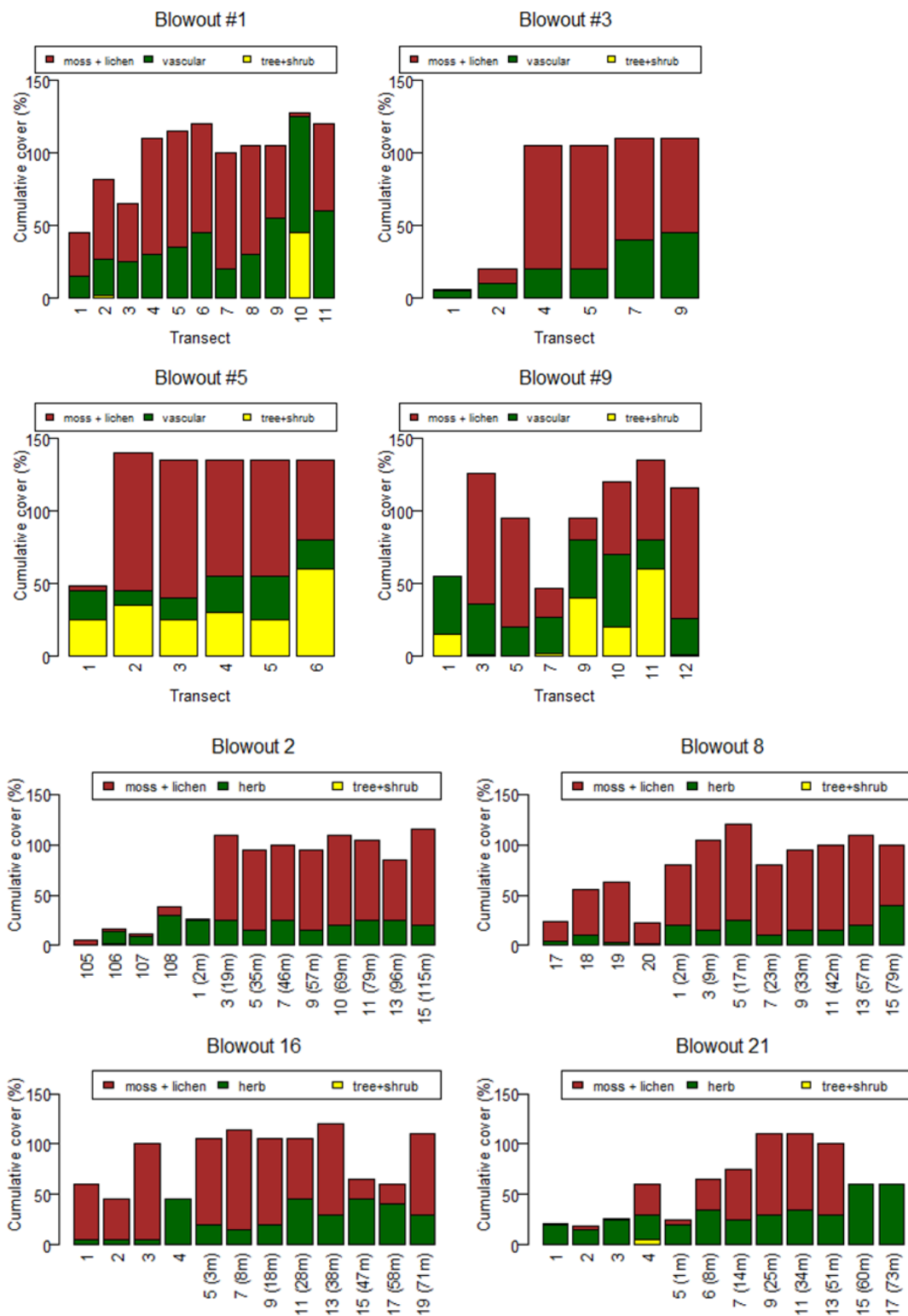
Bedekking van soortgroepen (Figuur 8-23)

De soortgroep droge pioniervegetatie voedselarm basenrijk komt alleen in de gestabiliseerde deflatiezone van stuifkuil ME_8 met een hogere bedekking voor. Verder heeft deze groep een lage bedekking in de deflatiezones van de andere drie stuifkuilen en komt alleen in een zone dichtbij de deflatiezone van stuifkuil LD_21 enigszins bedekkend voor. De soortgroep van droge pioniervegetatie voedselarm matig basenrijk, die alleen bestaat uit *Racomitrium canescens*, heeft meestal een zeer lage bedekking en lokaal in het transect van stuifkuil ME_8 een hoge. In de deflatiezone zijn wat betreft bedekking belangrijke soortgroepen: droog duingrasland voedselarm basenrijk en droog duingrasland voedselarm basenrijk. In de transecten buiten de deflatiezone is vaak laatstgenoemde soortgroep belangrijk. In de stuifkuilen ME_2 en ME_8 dichtbij de deflatiezone is ook de soortgroep droog duingrasland voedselarm basenrijk belangrijk. Bij drie van de vier stuifkuilen heeft de soortgroep droog duingrasland voedselarm basenrijk een groot aandeel in de vegetatie. Bij stuifkuil LD_21 worden dan juist soorten van mesofiel grasland matig voedselrijk belangrijk. Soorten van voedselrijk grasland komen met relatief lage bedekking voor zonder een duidelijk patroon in de vegetatiegradiënt van de transecten.

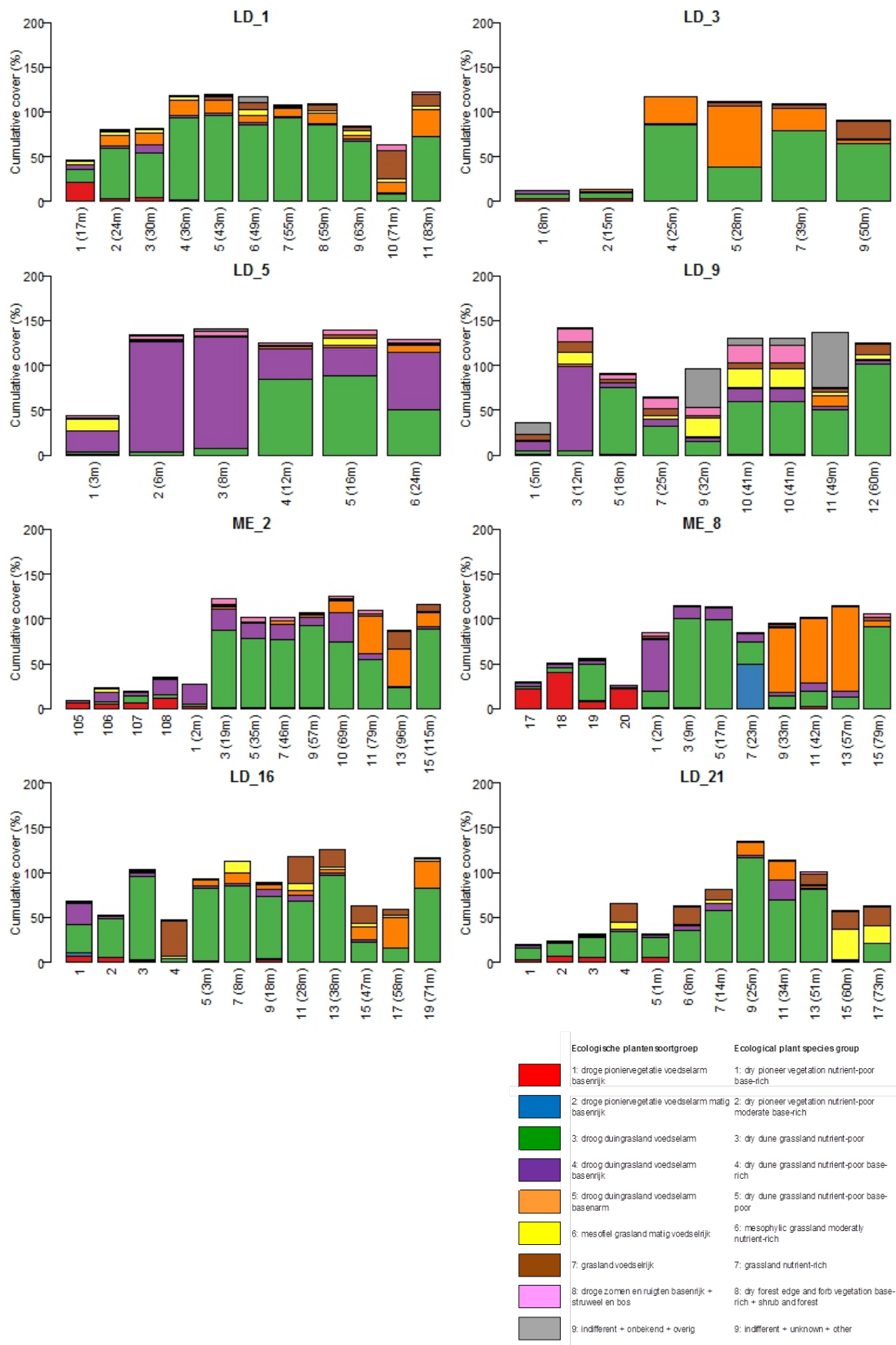
Soortenaantal van soortgroepen (Figuur 8-24)

Net als bij de actieve stuifkuilen geeft ook bij de stabiliseerde stuifkuilen de verdeling van het soortenaantal per ecologische soortgroep een afwijkend beeld t.o.v. die van de bedekking. Zichtbaar is dat soorten van zowel droge pioniervegetatie voedselarm basenrijk als van droge pioniervegetatie voedselarm matig basenrijk overal in de deflatiezone en het transect

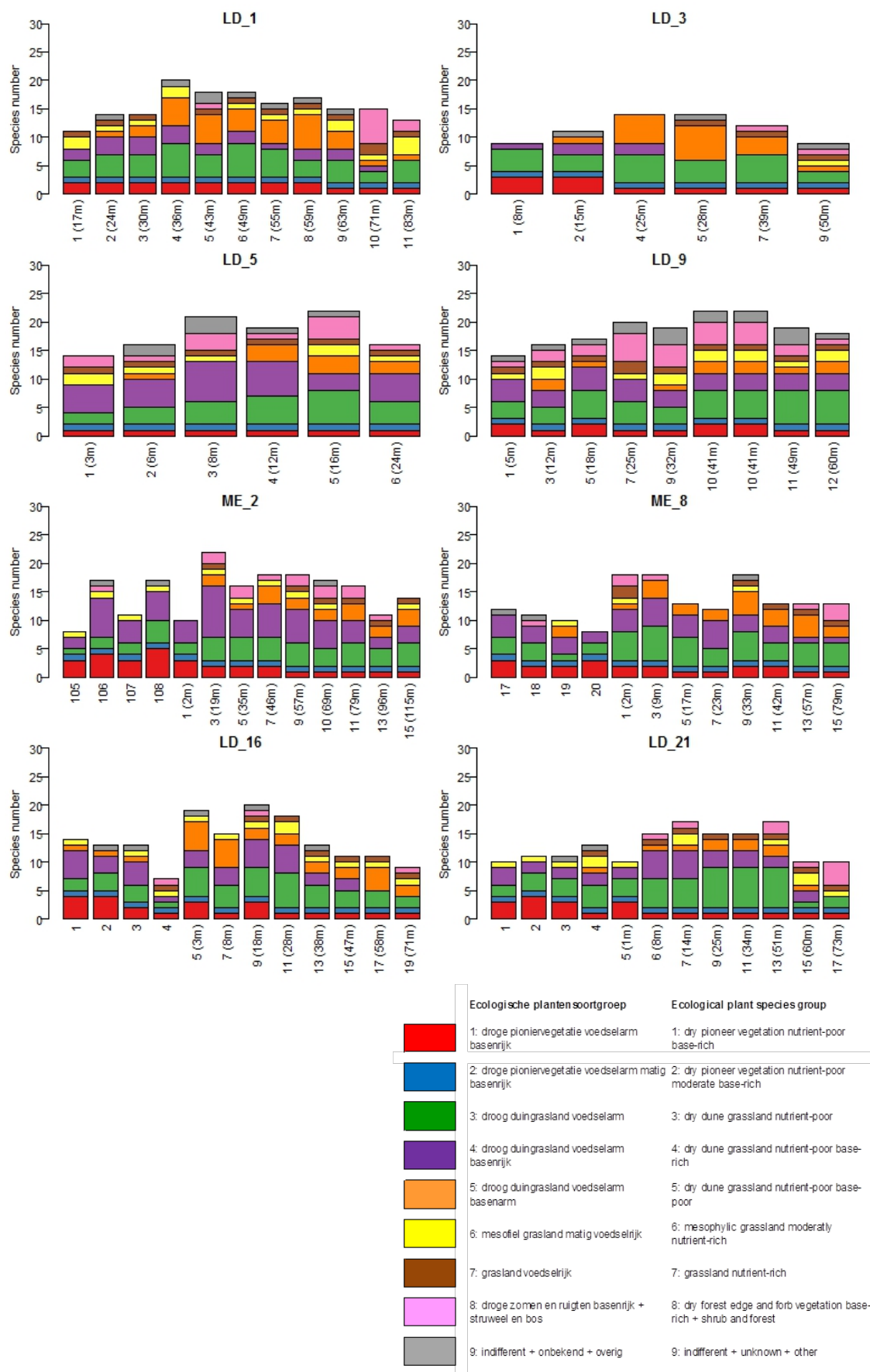
voorkomen. Het soortenaantal van de eerste groep is het hoogst in de deflatiezone en in de een smalle zone grenzend aan de deflatiezone. In alle stuifkuilen is de soortgroep droog duingrasland voedselarm basenrijk belangrijk in de deflatiezones en bredere zone daaraan grenzend. Verder weg neemt het aantal af. Bij stuifkuil ME_2 (kalkrijke deflatiezone) heeft deze groep tot ca. 80 m van de deflatiezone nog een hoog aantal. Bij stuifkuil LD_16 (relatief kalkarme deflatiezone) komt deze groep aan de buitenkant van de stuifkuil niet meer voor. Soorten van droog duingrasland voedselarm basenarm komen sporadisch voor in de deflatiezones en met hogere aantallen in het hele transect. Alleen bij stuifkuil LD_16 vertoont deze groep in het transect een gradiënt van een relatief hoog aantal naar laag van de rand met de deflatiezone naar de buitenkant. Soorten van mesofiel grasland matig voedselrijk komen vaak met kleine aantallen voor in de deflatiezone en het transect.



Figuur 8-22. De bedekking van mossen, vaatplanten en bomen+kruiden in de vegetatie-opnamen van het NO/O-transect van de acht stuifkuilen. Voor de plots in het NO/O-transect wordt tussen haakjes de afstand weergegeven van de plots tot de grens van de deflatiezone.



Figuur 8-23. De cumulatieve bedekking van soorten voor ecologische plantensoortgroepen in de vegetatie-opnamen van het NO/O-transect van de acht stuifkuilen. Voor de stabiliseerde stuifkuilen (LD_16, LD_21, ME_2, ME_8) worden ook de vier plots in de deflatiezone links in de grafiek weergegeven. Voor de plots in het NO/O-transect wordt tussen haakjes de afstand weergegeven van de plots tot de grens van de deflatiezone.



Figuur 8-24. De verdeling van het aantal soorten over ecologische plantensoortgroepen in het NO/O-transect van actieve en stabiele stuifkuilen. Voor de stabiliseerde stuifkuilen (LD_16, LD_21, ME_2, ME_8) worden ook de vier plots in de deflatiezone links in de grafiek weergegeven. Voor de plots in het NO/O-transect wordt tussen haakjes de afstand weergegeven van de plots tot de grens van de deflatiezone.

Tabel 8-9. Frequentie en de gemiddelde bedekking van plantensoorten per soortgroep voor alle vegetatieopnamen in de acht stuifkuilen. De gemiddelde bedekking is berekend voor de opnamen waarin de soort voorkomt.

Soort		frequentie (%)	gemiddelde bedekking (%)
1: droge pioniervegetatie voedselarm basenrijk			
Cerastium semidecandrum	kruid	39.5	1.3
Tortula ruralis	mos	27.2	6.8
Phleum arenarium	kruid	16.0	1.0
Myosotis ramosissima	kruid	6.2	0.8
Saxifraga tridactylites	kruid	4.9	0.8
Ditrichum flexicaule	mos	2.5	1.5
Sedum acre	kruid	2.5	1.0
Bryoerythrophyllum recurvirostre	mos	1.2	1.0
Didymodon vinealis	mos	1.2	1.0
Erophila verna	kruid	1.2	1.0
2: droge pioniervegetatie voedselarm matig basenrijk			
Racomitrium canescens	mos	7.4	9.8
3: droog duingrasland voedselarm			
Carex arenaria	kruid	82.7	3.2
Hypnum cupressiforme v. lacunos	mos	63.0	35.1
Luzula campestris	kruid	58.0	4.0
Pseudoscleropodium purum	mos	43.2	25.9
Festuca filiformis	kruid	37.0	3.5
Corynephorus canescens	kruid	29.6	4.6
Hypochaeris radicata	kruid	27.2	1.8
Poa pratensis	kruid	13.6	1.0
Hypnum cupressiforme s.l. specie	mos	9.9	49.0
Hieracium umbellatum	kruid	8.6	2.4
Hypnum jutlandicum	mos	3.7	5.0
Phleum pratense	kruid	2.5	1.5
4: droog duingrasland voedselarm basenrijk			
Galium verum	kruid	49.4	1.9
Senecio jacobaea	kruid	35.8	3.0
Erodium lebelii	kruid	27.2	1.1
Viola curtisii	kruid	22.2	0.9
Galium mollugo	kruid	21.0	1.5
Cladonia furcata	korstm	18.5	2.4
Helictotrichon pubescens	kruid	14.8	3.3
Koeleria macrantha	kruid	13.6	1.3
Leontodon saxatilis	kruid	12.3	0.9
Vicia lathyroides	kruid	12.3	0.9
Veronica arvensis	kruid	11.1	0.8
Plagiomnium affine	mos	8.6	7.8
Homalothecium lutescens	mos	7.4	45.5
Rosa pimpinellifolia	kruid	7.4	33.3
Ceratodon purpureus	mos	6.2	4.8
Ononis repens s. repens	kruid	6.2	8.8
Polygonatum odoratum	kruid	6.2	3.3
Taraxacum celticum	kruid	6.2	1.2
Brachythecium albicans	mos	3.7	1.3
Hieracium pilosella	kruid	3.7	1.7
Taraxacum laevigatum	kruid	2.5	0.8
Thymus pulegioides	kruid	2.5	0.8
Cerastium arvense	kruid	1.2	1.0
Cladonia rangiformis	korstm	1.2	1.0
Erodium cicutarium	kruid	1.2	1.0
Erodium cicutarium s. dunense	kruid	1.2	4.0
Fragaria vesca	kruid	1.2	2.0
Gentiana cruciata	kruid	1.2	2.0
Geranium molle	kruid	1.2	0.5
Picris hieracioides	kruid	1.2	0.5
Satureja acinos	kruid	1.2	1.0
Taraxacum officinale s.l.	kruid	1.2	0.5
5: droog duingrasland voedselarm basenarm			
Dicranum scoparium	mos	45.7	11.6
Rumex acetosella	kruid	32.1	1.0
Agrostis capillaris+vinealis	kruid	28.4	9.6
Agrostis capillaris	kruid	16.0	3.2
Cladonia foliacea	korstm	14.8	1.0
Polytrichum juniperinum	mos	11.1	7.8
Cladonia ciliata	korstm	7.4	1.4
Aira praecox	kruid	6.2	0.7
Agrostis vinealis	kruid	3.7	1.0

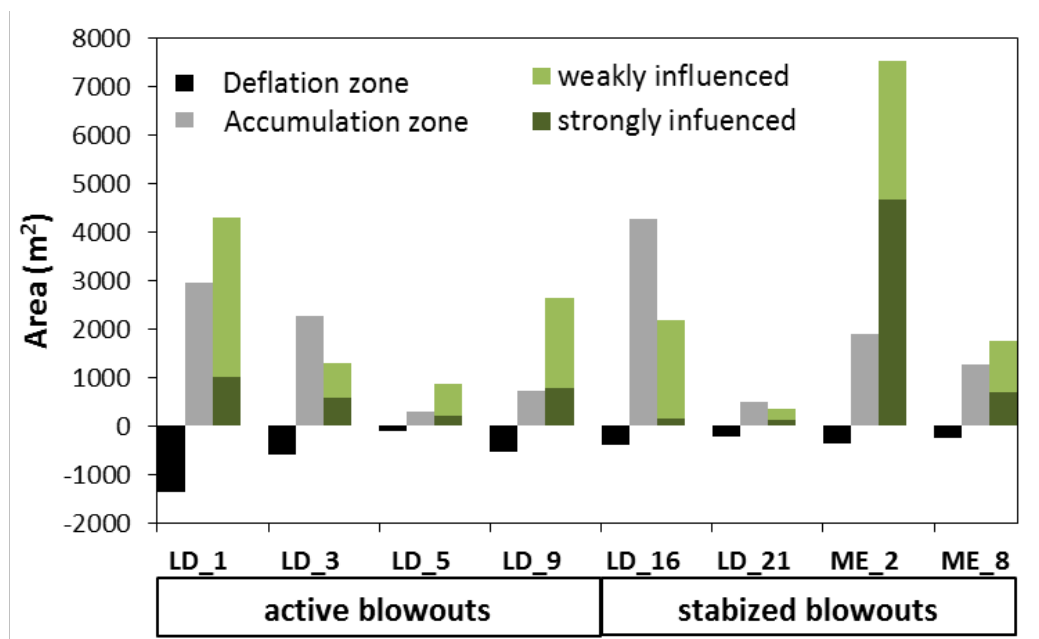
Soort		frequentie (%)	gemiddelde bedekking (%)
Campylopus introflexus	mos	3.7	2.7
Cladina portentosa	korstm	3.7	0.8
Teesdalia nudicaulis	kruid	3.7	0.5
Cladina arbuscula	korstm	1.2	1.0
Cladonia ramulosa	korstm	1.2	1.0
6: mesofiel grasland matig voedselrijk			
Festuca rubra	kruid	60.5	3.7
Holcus lanatus	kruid	24.7	4.1
Crepis capillaris	kruid	3.7	0.7
Plagiomnium medium	mos	1.2	1.0
7: grasland voedselrijk			
Calamagrostis epigejos	kruid	65.4	8.2
Brachythecium rutabulum	mos	3.7	0.8
Cerastium fontanum	kruid	1.2	0.5
heischraalgrasland			
Veronica officinalis	kruid	12.3	1.4
Polygala vulgaris	kruid	6.2	0.8
Danthonia decumbens	kruid	3.7	1.2
Viola canina	kruid	1.2	0.5
droge pionier- en akkervegetatie voedselrijk			
Ammophila arenaria	kruid	6.2	1.7
Senecio sylvaticus	kruid	4.9	0.9
Fallopia convolvulus	kruid	1.2	0.5
Senecio viscosus	kruid	1.2	0.5
Vicia sativa	kruid	1.2	0.5
vochtige ruigte voedselrijk			
Urtica dioica	kruid	2.5	1.0
droge zomen en ruigten basenrijk			
Rubus caesius	kruid	27.2	4.0
Cynoglossum officinale	kruid	8.6	0.9
Asparagus officinalis s. prostratus	kruid	1.2	0.5
struweel en bos basenarm			
Teucrium scorodonia	kruid	17.3	1.1
Prunus serotina	kruid	2.5	0.5
Holcus mollis	kruid	1.2	2.0
struweel en bos basenrijk			
Glechoma hederacea	kruid	18.5	1.5
Eurhynchium praelongum	mos	6.2	1.2
Ligustrum vulgare	kruid	4.9	1.1
Viola hirta	kruid	4.9	0.5
Hippophae rhamnoides	kruid	3.7	6.7
Crataegus monogyna	struik	2.5	0.5
Euonymus europaeus	kruid	1.2	1.0
Moehringia trinervia	kruid	1.2	2.0
Plagiomnium undulatum	mos	1.2	1.0
indifferent			
Salix repens	kruid	11.1	13.7

8.4.11 Ruimtelijke effecten van verstuing in relatie tot oppervlakte en kalkgehalte van deflatiezone

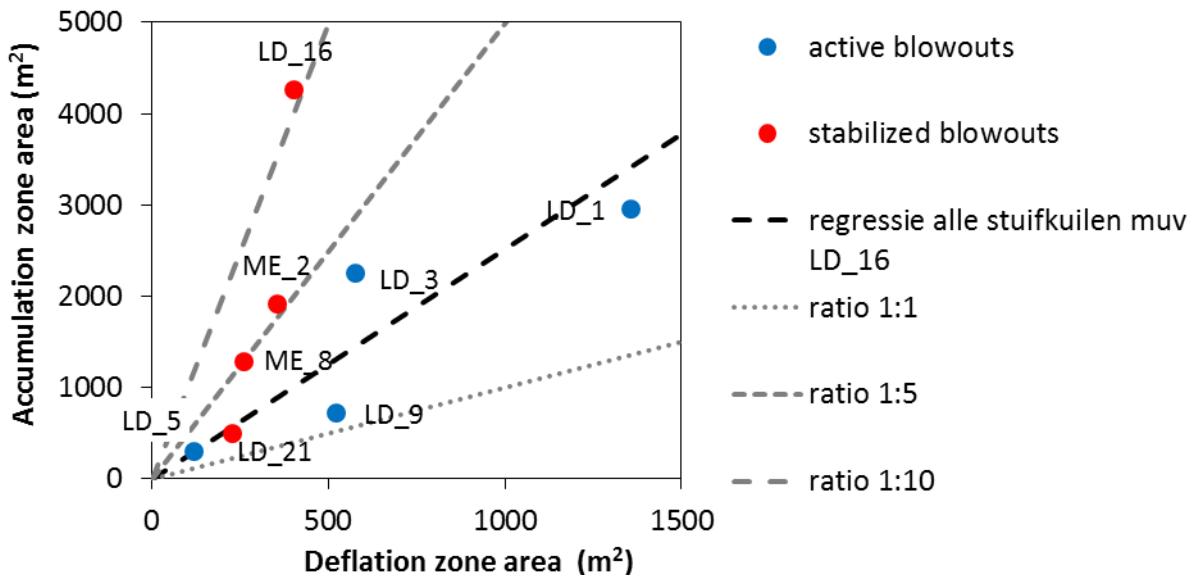
In deze paragraaf worden de omvang van ruimtelijke effecten van verstuing in de acht onderzochte stuifkuilen nader bekeken. De nadruk ligt daarbij op de effecten van instuiving op de omgeving van de deflatiezone en daarbij wordt geanalyseerd in hoeverre de oppervlakte van de deflatiezone en het kalkgehalte van het duinzand in de deflatiezone doorwerken in de ruimtelijke omvang van die effecten.

Relatie oppervlakte deflatiezone en accumulatiezone

In Figuur 8-25 wordt een samenvatting gegeven van de oppervlakten van de deflatiezone, de accumulatiezone en de pH-beïnvloedingszones (sterk en zwak) door opgetreden instuiving van zand. Allereerst valt op dat de stuifkuilen grote verschillen vertonen in de oppervlakte van de deflatiezone. Vooral bij de vier actieve stuifkuilen zijn er grote verschillen van één orde grootte (119-1358 m²). Bij de gestabiliseerde stuifkuilen vertonen de oppervlakten een geringe range (227-404 m²) en zijn de relatieve verschillen geringer (ca. factor 2). De omvang van de accumulatiezone vertoont ook een grote variatie. Deze bestrijkt echter bij de gestabiliseerde stuifkuilen een veel grotere range (487-4268 m²) dan bij de actieve stuifkuilen (291-2947 m²). Voor beide groepen stuifkuilen beslaan deze ranges ca. één orde grootte. Voor zowel de actieve als de gestabiliseerde stuifkuilen is er slechts een zwakke lineaire relatie tussen de oppervlakte van de deflatiezone en accumulatiezone (r^2 resp. 0.34 en 0.22). Bij de gestabiliseerde stuifkuilen heeft stuifkuil LD_16 een zeer hoge, afwijkende oppervlakteratio van accumulatiezone/deflatiezone (10.6). Een lineaire regressie van de oppervlakte van de accumulatiezone (x) met die van de deflatiezone (y) is sterk wanneer stuifkuil LD_16 buitenbeschouwing wordt gelaten ($x = 2.5 * y$; $r^2 = 0.72$). De relatie van een grotere accumulatiezone bij een toenemende omvang van de deflatiezone met een ca. 2.5x grotere accumulatiezone dan de deflatiezone lijkt dus voor de meeste stuifkuilen in het midden- en achterduin op te gaan.



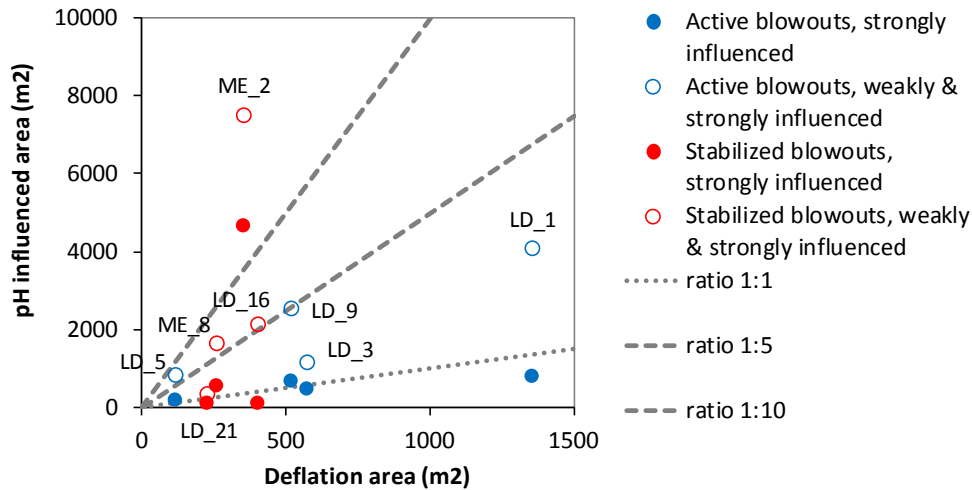
Figuur 8-25. Oppervlakte van de accumulatiezone, deflatiezone, de zones waar de pH sterk en zwak beïnvloed is door opgetreden instuiving van zand, voor de acht stuifkuilen.



Figuur 8-26. Relatie tussen oppervlakte van de deflatiezone en accumulatiezone voor de acht stuifkuilen.

Relatie oppervlakte deflatiezone en pH-beïnvloedingszones

De oppervlakte van de zone waarin de pH door verstuiwing is verhoogd, is net als de oppervlakte van de accumulatiezone zeer variabel (Figuur 8-25). De sterk beïnvloede zone heeft een zeer brede range van 68-4619 m². De gehele beïnvloede zone (sterk+zwak) beslaat een ook grote range van 316-7480 m². Stuifkuil ME_2 heeft de hoogste waarde voor beide zones. Bij drie van de vier actieve stuifkuilen is de sterk+zwak beïnvloede zone groter dan de accumulatiezone. De actieve stuifkuil LD_3 wijkt daarvan af. Bij twee gestabiliseerde stuifkuilen is de sterk+zwak beïnvloede zone juist kleiner dan de accumulatiezone. De gestabiliseerde stuifkuilen ME_2 en ME_8 wijken daar weer van af met een grotere beïnvloede zone dan de accumulatiezone. De verhouding van de sterk beïnvloede zone met de accumulatiezone is voor zowel actieve als gestabiliseerde stuifkuilen variabel. In Figuur 8-27 wordt de relatie weergegeven tussen enerzijds de oppervlakte van de deflatiezone en anderzijds de oppervlakte van de sterk en de sterk+zwak beïnvloede zone. Voor de meeste stuifkuilen is er een lineaire relatie aanwezig. Stuifkuil ME_2 wijkt daar echter sterk van af met zeer hoge ratio's (voor sterk beïnvloed 13 m²/m² en voor sterk+zwak beïnvloed 21 m²/m²). Een lineaire regressie voor de andere zeven stuifkuilen geeft een hellingscoëfficiënt van 0.6 m²/m² voor de sterk beïnvloede zone en 3.3 m²/m² voor de sterk+zwak beïnvloede zone (zie voor regressievergelijkingen Figuur 8-27).



regressie alle stuifkuilen m.u.v. ME_2: $\text{opp}_{\text{SrIn}} = 0.62 * \text{opp}_{\text{Defl}}$; $r^2 = 0.62$

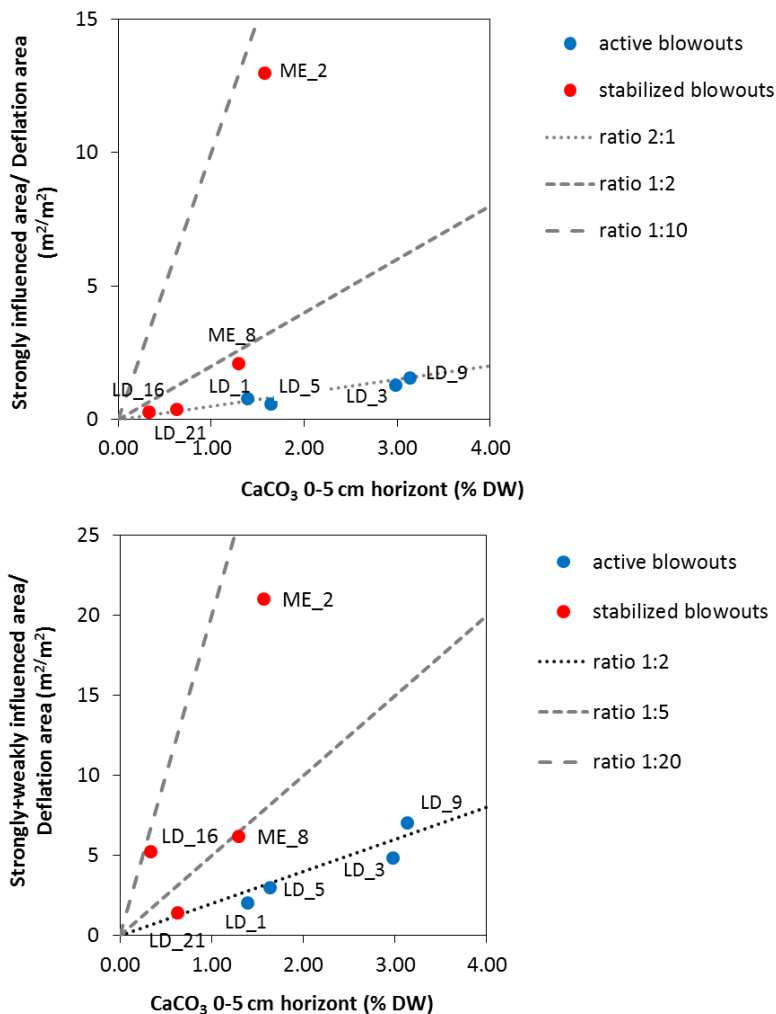
regressie alle stuifkuilen m.u.v. ME_2: $\text{opp}_{\text{St+ZwIn}} = 3.26 * \text{opp}_{\text{Defl}}$; $r^2 = 0.79$

Figuur 8-27: Relatie tussen oppervlakte van de deflatiezone en de oppervlakte van de zones waarin de zuurgraad sterk en sterk+zwak is verhoogd door instuiving van zand. Regressielijnen zijn voor alle stuifkuilen met uitzondering van uitbijter stuifkuil ME_2.

Relatie oppervlakte deflatiezone, kalkgehalte deflatiezone en oppervlakte pH-beïnvloedingszones

Het kalkgehalte van het verstoven zand uit een stuifkuil kan van invloed zijn op de omvang van de zone buiten de deflatiezone waarvan de bodemzuurgraad wordt verhoogd. De hypothese is dat hoe kalkrijker het zand is hoe meer oppervlakte beïnvloed wordt. Omdat de oppervlakte van de deflatiezone ook positieve invloed heeft op de oppervlakte van de beïnvloedingszone (zie boven) kijken we naar de relatie tussen de actuele kalkrijkdom van de deflatiezone en de ratio van de oppervlakte beïnvloedingszone/ oppervlakte deflatiezone. De ratio is berekend voor de zone met sterke beïnvloeding en voor de zone met sterke+zwakke beïnvloeding (resp. $\text{opp}_{\text{StIn}}/\text{opp}_{\text{Defl}}$ en $\text{opp}_{\text{St+ZwIn}}/\text{opp}_{\text{Defl}}$). Voor het kalkgehalte van het zand in de deflatiezone zijn de metingen van de 0-5 cm toplaag gebruikt ($\text{CaCO}_{30-5\text{cm}}$), omdat deze laag grote verschillen vertoont tussen de stuifkuilen (zie Figuur 8-14). In Figuur 8-28 staan de resultaten.

Op het eerste gezicht lijkt er geen sterk verband te zijn voor de sterk beïnvloede zone en de sterk+zwak beïnvloede zone. Voor de sterk beïnvloede zone hebben de stuifkuilen ME_2 en ME_8 een afwijkende positie t.o.v. de andere zes stuifkuilen door hoge waarden voor $\text{opp}_{\text{SrIn}}/\text{opp}_{\text{Defl}}$. De zes overige stuifkuilen, die uit actieve en gestabiliseerde stuifkuilen bestaan, hebben wel een sterke positieve correlatie van $\text{opp}_{\text{SrIn}}/\text{opp}_{\text{Defl}}$ met het kalkgehalte ($\text{opp}_{\text{StIn}}/\text{opp}_{\text{Defl}} = 0.47 * \text{CaCO}_{30-5\text{cm}}$; $r_{\text{adj}}^2 = 0.94$). Voor de sterk+zwak beïnvloede zone heeft stuifkuil ME_2 ook weer een sterk afwijkende positie en in mindere mate LD_16 en ME_8. Alleen de vier actieve stuifkuilen vertonen een duidelijke relatie van $\text{opp}_{\text{St+ZwIn}}/\text{opp}_{\text{Defl}}$ met het kalkgehalte ($\text{opp}_{\text{St+ZwIn}}/\text{opp}_{\text{Defl}} = 1.9 * \text{CaCO}_{30-5\text{cm}}$; $r_{\text{adj}}^2 = 0.80$). Voor de gestabiliseerde stuifkuilen is er slechts een zwakke lineaire relatie voor de sterk+zwak beïnvloede zone ($\text{opp}_{\text{St+ZwIn}}/\text{opp}_{\text{Defl}} = 9.4 * \text{CaCO}_{30-5\text{cm}}$; $r_{\text{adj}}^2 = 0.47$).



Figuur 8-28: Relatie tussen het kalkgehalte van de toplaag (0-5 cm) in de deflatiezone en de verhouding van de oppervlakte van deflatiezone en de oppervlakte waarin de basenrijkdom sterk (bovenste grafieken) en sterk+zwak (onderste grafiek) is verhoogd door instuiving van zand.

Stuifkuilen met een (extreem) groot effect op de omgeving nader bekeken

In bovenstaande analyse vertoonden drie stuifkuilen (LD₁₆, ME₂, ME₈), allen met een gestabiliseerde deflatiezone, een afwijkende positie in de relaties die de andere stuifkuilen vertoonden. Hieronder wordt ingegaan op mogelijke oorzaken.

De stuifkuilen LD₁₆, ME₂ en ME₈ worden gekenmerkt door een hoge oppervlakteratio van accumulatie- en deflatiezone. Ze hebben alle een sleufvormige deflatiezone op de top van een duin (ME₂ en ME₈) of aan de loefzijde voor de overheersende ZW-windrichting van een duin (LD₁₆). Tevens hebben deze stuifkuilen aan de loefzijde van de overheersende windrichting nauwelijks of relatief weinig opgaande begroeiing van bomen en struiken staan (Figuur 8-11). Twee andere sleufvormige stuifkuilen aan de loefzijde van een laag duin hebben juist een lagere ratio van de oppervlakte accumulatiezone en deflatiezone (LD₅ en LD₉; Figuur 8-11). Opvallend is dat deze twee stuifkuilen veel opgaande begroeiing hebben aan de ZW-zijde van de deflatiezone. Dit kan de snelheden van W- en ZW-winden flink verlagen.

Door hun afwijkende landschappelijke positie zijn de deflatiezones van de stuifkuilen LD₁₆, ME₂ en ME₈ dus meer geëxposeerd aan hoge windsnelheden. Hierdoor konden ze vermoedelijk het zand dat uit de deflatiezone werd geërodeerd, wijder verspreiden dan de andere stuifkuilen. De wijdere verspreiding werkt dan ook door op een hoge ratio van sterk beïnvloede zone/ deflatiezone (ME₂) en een hoge ratio van sterk+zwak beïnvloede zone/ deflatiezone (LD₁₆, ME₂, ME₈). Het meest extreem hierin is stuifkuil ME₂. Deze stuifkuil onderscheidt zich in landschappelijke positie van de andere twee door de ligging op de top van een hoog duin en het vrijwel ontbreken van bomen en struiken aan de ZW-zijde. De andere

twee stuifkuilen liggen op de flank van een laag duin (zie Tabel 8-3) en hebben meer opgaande begroeiing aan de ZW-zijde. Aan de brede beïnvloedingszone aan de NOO-zijde van de deflatiezone van stuifkuil ME_2 kan ook het sterk aflopende maaiveld vanaf deflatiezone in NOO-richting hebben bijgedragen. Opvallend bij stuifkuil ME_2 is ook dat op grote afstand van de deflatiezone de pH van de bodemtoplaag in de oppervlakkig ontkalkte bodem minder laag is dan in geval van andere stuifkuilen met vergelijkbare ontkalkingsdiepte (zie par. 8.4.8 en 8.4.9 **Error! Reference source not found.**). Dit patroon kan er ook op duiden dat de werkelijke pH-beïnvloeding van stuifkuil ME_2 veel verder reikt dan kon worden vastgesteld (> 115 m aan de NO zijde; het NO-transect kon niet langer zijn wegens het naderen van de invloedsfeer van een NO-gelegen stuifkuil). Overigens kunnen oppervlakten van de pH-beïnvloedingszones bij stuifkuil ME_2 ook deels overschat zijn door recente activatie van een stuifkuil aan de zuidzijde (zie par. 8.4.1). De accumulatiezone van deze nieuwe stuifkuil grenst en overlapt met die van stuifkuil ME_2. Dit zorgt zeker voor overschatting van de oppervlakte van de sterk beïnvloede zone voor pH. Een goede expositie van de deflatiezone aan de overheersende windrichting lijkt vooral belangrijk te zijn voor de relatieve omvang van de gehele pH-beïnvloede zone die bij alle drie stuifkuilen groot is.

Conclusie

Geconcludeerd wordt dat naast de positieve doorwerking van de oppervlakte van de deflatiezone en de kalkrijdom van de deflatiezone, ook de windexpositie een bepalende factor is voor de oppervlakte waarin stuifzand wordt afgezet en de pH van de bodemtoplaag wordt verhoogd in de omgeving rond de deflatiezone. Voor stuifkuilen in het midden- en achterduin met een relatief geringe windexpositie dankzij lage ligging in het duinlandschap of beschutting door opgaande begroeiing aan de loefzijde van de overheersende windrichting, kunnen kwantitatieve, lineaire relaties worden vastgesteld voor de invloed van de oppervlakte en het kalkgehalte van deflatiezone op de oppervlakte van de accumulatiezone en het pH-beïnvloedingsgebied. Voor deze kwantitatieve relaties kan geen onderscheid worden gemaakt tussen de actieve en gestabiliseerde stuifkuilen, omdat binnen de groep van vier gestabiliseerde stuifkuilen drie stuifkuilen voorkomen waarvan de invloed op de omgeving groot is door een sterke expositie aande overheersende windrichting. Daardoor wijken deze drie gestabiliseerde stuifkuilen in de omvang van hun invloedsfeer sterk af van de overige.

8.4.12 Modelleren van stuifkuil geometrie en kalkuitstrooiing in de tijd

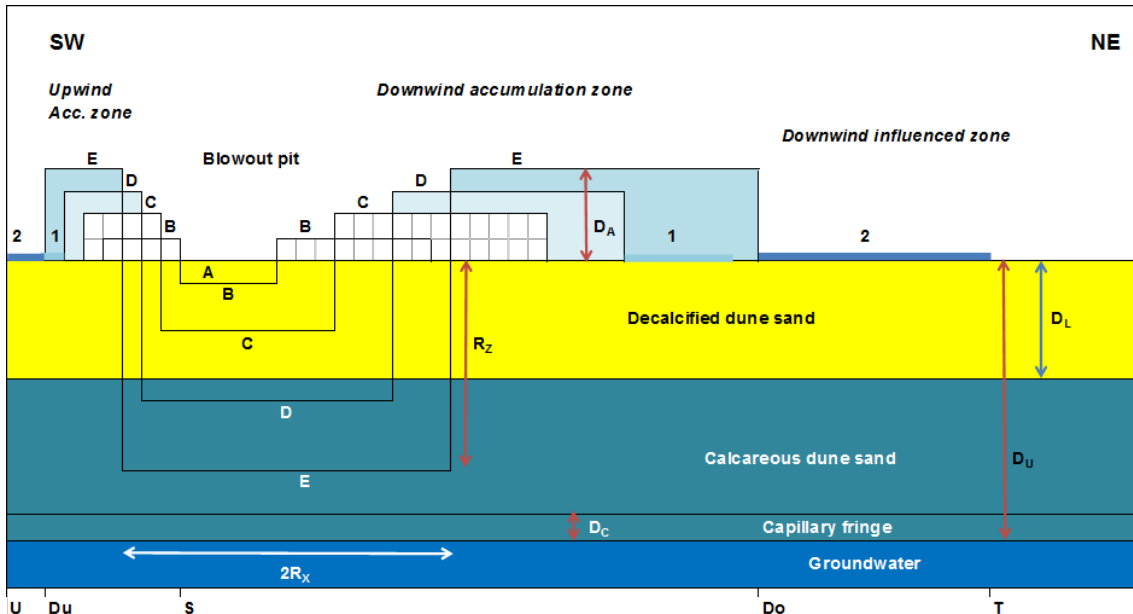
Een belangrijke vraag is hoe de ontwikkeling verloopt van de kalkaanrijking in de strooizone rond stuifkuilen. Eerst moet de stuifkuil voldoende diep zijn om de ontkalkte bodemlaag te passeren, pas daarna stuift er kalkhoudend zand uit, en wanneer de stuifkuil stabiliseert houdt de aanrijking op en begint de fase van overwegende uitloging (Figuur 8-29). Om dit proces beter te doorgronden is een 'vingeroefening' gedaan met een zelf ontwikkeld, eenvoudig rekenmodel. Dit biedt tevens aanknopingspunten om met eenvoudige geometrische variabelen van de deflatiezone voorspellingen te doen over de geometrie van de accumulatiezone en pH-beïnvloedingszone.

Schematisatie van een stuifkuil

De weergegeven ontwikkeling van een stuifkuil in Figuur 8-29 is sterk geschematiseerd en niet op schaal getekend, waarbij de dikte van de zandaccumulatie uniform verondersteld is (wat in werkelijkheid anders is, doorgaans benedenwinds afnemend). Bovendien is de situatie in horizontaal terrein neergezet, wat vaak niet het geval is (dan is scheefstelling nodig, deels benedenwinds oplopend, maar kan ook aflopend zijn). Verondersteld is ook, dat de stuifkuil de volcapillaire zoom boven de grondwaterspiegel niet bereikt, want vanaf die diepte is verdere benedenwaartse groei niet mogelijk.

Schematisatie van processen en groei

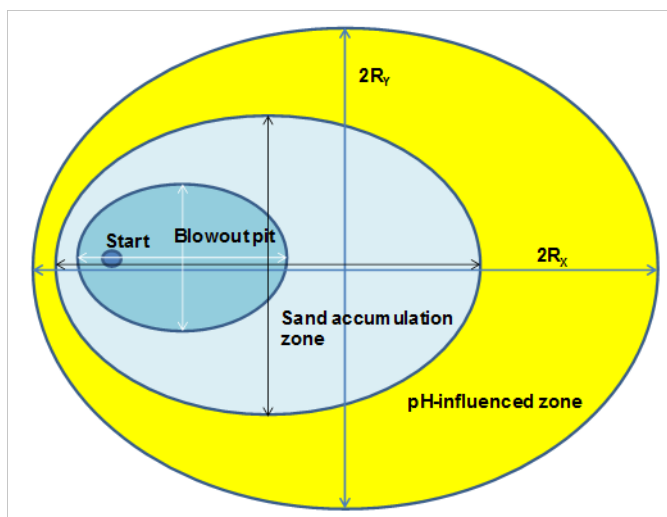
We veronderstellen dat een stuifkuil, de zandaccumulatiezone en pH-beïnvloede zone een ellips vorm hebben, de stuifkuil zelfs een ellipsoïdale vorm (een kwadratisch oppervlak met drie loodrechte symmetrieassen), de groei van deze drie vlakken in alle richtingen proportioneel verloopt (vorm blijft gehandhaafd), en de zandbalans voor stuifkuil en accumulatiezone sluitend is. In dat geval kunnen we berekenen wanneer de fase aanbreekt dat er kalkhoudend zand van onder de ontkalkte horizont wordt uitgestrooid, uitgaande van morfologische karakteristieken van de bestudeerde stuifkuilen in de Luchterduinen en Meijndel (Tabel 8-10).



Figuur 8-29. Sterk geschematiseerde ontwikkeling van een stuifkuil met zandaccumulatiezones en invloedzone (1 behorende bij fase D; 2 behorende bij fase E) waar de pH verhoogd wordt maar het maaiveld nauwelijks/niet. De figuur is niet op schaal. **A-E** = maaiveldsontwikkeling in de tijd. 1,2 = benedenwindse invloedzone horend bij resp. D en E. **DA, DC, DG, DL** = gemiddelde dikte geaccumuleerd zand, vol-capillaire zoom, ontkalkte zone en onverzadigde zone; **2R_x, R_z** = 2 en 1 maal straal ellipsoïde in resp. X en Z richting; **Do, Du** = terminaalpunt zandaccumulatiezone resp. beneden- en bovenwinds; **S** = startpunt groei stuifkuil; **T, U** = terminaal punt invloedzone behorende bij fase E, resp. beneden- en bovenwinds.

Tabel 8-10. Enkele kenmerken van de 8 onderzochte stuifkuilen op basis van waarnemingen. Het berekende zandvolume (V_{out} = uit deflatiezone) en berekende stralen van de buitengrenzen van de accumulatiezone komen redelijk overeen met de meetwaarden. Voor definitie R_x, R_y, R_z en D_a zie Figuur 8-29 en Figuur 8-30.

Blowout #	Type	Site	Measured surfaces			Measured Ellipsoidal Blowout			Measured		Calculated
			A-out	A-acc	A-pH	R _x	R _y	R _z	V-out	V-acc	V-out (half ellipse)
			m ²	m ²	m ²	m	m	m	m ³	m ³	m ³
LD_1	saucer, active	LD	1358	2947	4063	23.2	22.3	1.6	1361	1025	1730
LD_3	saucer, active	LD	577	2255	1155	16.2	14.3	0.9	332	476	434
LD_5	trough, active	LD	119	291	833	7.8	5.4	1.3	49	52	113
LD_9	trough, active	LD	522	714	2533	17.8	13.3	1.5	458	246	742
LD_16	trough, stabil.	LD	404	4268	2105	18.0	7.3	1.5	268	556	399
LD_21	saucer, stabil.	LD	227	487	316	12.2	6.8	0.3	79	20	52
ME_2	trough, stabil.	MD	356	1910	7480	15.0	7.3	2.1	402	421	465
ME_8	saucer, stabil.	MD	261	1278	1615	11.7	8.4	1.8	43	781	371
Average	active		644	1552	2146	16.2	10.8	1.3	550	450	755
Average	stabilized		312	1986	2879	14.2	7.4	1.4	198	445	322
Blowout #	Type	Site	Measured Outer Accumulation zone			Calculated Outer Accumulation zone			Calculated Outer Zone of weak influence		
			A _x	A _y	D _a	R _x	R _y	D _a	R _x	R _y	D _a
						m	m	m	m	m	m
LD_1	saucer, ac	LD	43.8	33.2	0.35	37.8	36.3	0.59	52.7	50.5	0.01
LD_3	saucer, ac	LD	31.6	27.9	0.21	32.0	28.2	0.19	37.9	33.5	0.01
LD_5	trough, ac	LD	16.8	8.0	0.18	13.7	9.5	0.39	23.9	16.5	0.01
LD_9	trough, ac	LD	24.4	17.6	0.34	22.9	17.2	1.04	40.0	30.0	0.01
LD_16	trough, st	LD	51.2	26.7	0.13	60.6	24.6	0.09	72.9	29.6	0.01
LD_21	saucer, st	LD	22.7	11.8	0.04	20.3	11.2	0.11	24.3	13.5	0.01
ME_2	trough, st	MD	50.3	16.6	0.22	38.6	18.7	0.24	80.0	38.8	0.01
ME_8	saucer, st	MD	26.4	19.4	0.61	26.1	18.8	0.29	37.4	26.9	0.01
Average	active		29.1	21.7	0.27	26.6	22.8	0.6	38.6	32.6	0.01
Average	stabilized		37.6	18.6	0.25	36.4	18.3	0.2	53.7	27.2	0.01



Figuur 8-30. Sterk geschematiseerde zonering rond een stuifkuil met zandaccumulatiezone en pH-beïnvloede zone, en het startpunt van groei, in bovenaanzicht. Figuur is niet op schaal. $2R_x$, $2R_y$ = 2 maal straal ellipsvormig gebied in resp. X en Y richting; S = startpunt groei stuifkuil.

Het volume aan uitgeworpen zand (V_{out}) kan als volgt geschat worden, onder aanname van een in het platte vlak half doorgesneden ellipsoidaal lichaam en bekende halve as-lengtes van de kuil:

$$V_{OUT} = \frac{2}{3} \pi R_x R_y R_z$$

Vergelijking 8-3

Voor de typisch schotelvormige stuifkuilen geldt $R_y = 0.80 R_x$, en voor typisch sleufvormige stuifkuilen geldt $R_y = 0.61 R_x$. De met Vergelijking 8-3 berekende V_{OUT} -waarden sluiten goed aan bij de meetwaarden (Tabel 8-10).

Als we mogen aannemen dat de zandbalans ongeveer klopt, dan geldt:

$$V_{ACC} = V_{OUT} n_{ACC} / n_{BL} = V_{OUT} \rho_{B,BL} / \rho_{B,ACC}$$

Vergelijking 8-4

waarin: n_{ACC} , n_{BL} = porositeit van resp. geaccumuleerd zand en zand uit de stuifkuil [-]; $\rho_{B,BL}$, $\rho_{B,ACC}$ = bulk dichtheid van resp. zand uit de stuifkuil en geaccumuleerd zand [kg/L].

De factor n_{ACC} / n_{BL} of $\rho_{B,BL} / \rho_{B,ACC}$ zou gemiddeld ~ 1.15 kunnen bedragen (b.v. $\rho_{B,BL} = 1.5$ en $\rho_{B,ACC} = 1.3$); het is in ieder geval een significant getal. Als de accumulatiezone begroeid raakt neemt deze factor verder toe. Uit de meetgegevens in Tabel 8-10 volgt dat de zandbalans soms goed en soms slecht is. Daarvoor zijn meetproblemen en andere complicaties grotendeels verantwoordelijk (zie par. 8.4.3), maar een deel van het structurele verschil is nu verklaard.

Uit de metingen aan oppervlakken van stuifkuil (A-out), zandaccumulatiegebied (A-acc) en pH-beïnvloed gebied (A-pH; Tabel 1.1) volgt, dat de halve lengtes van het zandaccumulatiegebied ($R_{x,A}$) en pH-beïnvloede gebied ($R_{x,pH}$) als volgt te schatten zijn onder aanname dat het stuifkuiloppervlak qua vorm vergroot wordt:

$$R_{x,A} = \sqrt{\{(A_{OUT} + A_{ACC}) / (\pi R_x / R_y)\}}$$

Vergelijking 8-5

$$R_{x,pH} = \sqrt{\{(A_{OUT} + A_{ACC} + A_{pH}) / (\pi R_x / R_y)\}}$$

Vergelijking 8-6

Uit de metingen in Tabel 8-10 volgt dat voor de actieve stuifkuilen de berekende lengte- en breedte-as van het zandaccumulatiegebied en pH-beïnvloede gebied gemiddeld resp. 1.6 en 2.1 maal die van de deflatiezones bedragen, en hun oppervlakken resp. 2.4 en 6.4 maal. De gemiddelde dikte van de geaccumuleerde zandlaag (DA) kan als volgt worden geschat:

$$D_A = V_{OUT} / A_{ACC}$$

Vergelijking 8-7

Uit de data in Tabel 8-10 volgt dat voor de actieve stuifkuilen de berekende D_A 0.55 m bedraagt. Uit de metingen volgt echter dat het accumulatiepatroon geenszins homogeen is, maar gemiddeld de grootste dikte vertoont ongeveer halverwege. Sterk geschematiseerd tot een dikteverloop conform een gelijkbenige driehoek, krijgen we dan de grootste dikte halverwege tussen de buitengrens van de stuifkuil en de buitenrand van het zandaccumulatiegebied, met dikte $2D_A$. Dit kan mooier met b.v. een Gauss-kromme, maar dat vergt meer denk- en rekenwerk.

Omwille van de eenvoud en op basis van de kenmerken in Tabel 8-10 stellen we dat de onderzochte actieve stuifkuilen met gemiddeld ongeveer 1 m/jaar groeien langs de lengteas (ongeveer in ZW-NO richting), waarbij inbegrepen ook een geringe achterwaartse groei (met b.v. 0.1 m/jaar). Als dit gedurende 35 jaar (>35 volgens waarnemingen) plaatsvond, dan is in die tijd ook de kuildiepte van 1.0 m (R_z) bereikt, hetgeen neerkomt op ~2 cm/jaar verdieping.

Met een gemiddelde ontkalkingsdiepte op 0.36 m, moet er dus vanaf het 18^e levensjaar van de stuifkuil in toenemende mate kalkhoudend zand zijn uitgestoven. In toenemende mate, omdat de kalkgrens niet haarscherp is maar geleidelijk verloopt, zodat een toenemende diepte een toenemend kalkgehalte impliceert. De correlatie tussen ontkalkingsdiepte van de duinzone en de kalkrijkdom van de toplaag in de deflatiezone bevestigt dit. Daarnaast treedt menging op in de kuil, doordat de kuil tijdens voorwaartse en laterale groei ook ontkalkt zand en eerdere uitgestrooid zand aanvreet, terwijl bioturbatie en watererosie vooral langs de zijwanden voor verdere bijmenging zorgen. Deze menging kan ook bijdragen aan het gemeten diepteprofiel van het kalkgehalte (bovenin laag, dieper kalkrijk). Ook in de accumulatiezone treedt enige menging van ingestoven zand met de oude bodem op door bioturbatie en eolische processen, zodat de in Figuur 8-29 geschetste stratificatie iets vervaagt.

8.4.13 Ontkalking na stabilisatie van stuifkuil en accumulatiegebied

Zoals uit voorgaande resultaten duidelijk wordt, is het effect van een hogere basenrijkdom en pH van de bodemtoplaag in de deflatiezone en de zone met instuiving belangrijk voor de ecologische kwaliteit van duingraslanden. Bij stuifkuilen die stabiliseren is de vraag hoe lang dit positieve ecologische effect aanhoudt. Na stabilisatie van een deflatiezone en de zone met sterke instuiving, treedt door een combinatie van atmosferische depositie, begroeiing en algenmatten een fase van ontkalking in. Ook in de zone met geringe instuiving waar het stuifzand gemengd raakte met de toplaag van de oude bodem zal door atmosferische depositie en de vegetatie geproduceerd zuur zorgt voor kalkoplossing. In deze paragraaf wordt dit proces van ontkalking met enkele indicatieve berekeningen gekwantificeerd.

Ontkalking na stabilisatie van stuifkuil en accumulatiegebied

Na stabilisatie van een stuifkuil en het accumulatiegebied, door een combinatie van begroeiing en algenmatten, treedt de fase van ontkalking in. De gemiddelde ontkalkingssnelheid (v_{CaCO_3} ; m/j) en ontkalkingstijd (t_{DEC} ; jaar) kunnen als volgt geschat worden (gewijzigd naar Stuyfzand 1993, 2010):

$$v_{CaCO_3} = \frac{2.5 C_{aCO_3} R (1 - f_B)}{\rho_B C_{aCO_3}}$$

Vergelijking 8-8

met: $CaCO_3 = Ca_{TOT} - Ca_P - Ca_{Si} = Ca_{TOT} - 2.3$

Vergelijking 8-9

$$t_{DEC} = d / v_{CaCO_3}$$

Vergelijking 8-10

waarin:

Ca_{TOT} = Ca concentratie van bodemvocht of grondwater net onder de ontkalkende bodemlaag [mg/L];

$CaCO_3$, Ca_P , Ca_{Si} = Ca concentratie afkomstig van resp. kalkoplossing, bulk regenwater inclusief verdiscontering van evapoconcentratie, en silicaatverwerking [mg/L].

R = jaargemiddelde grondwateraanvulling [m/j];

f_B = bypass fractie infiltrerend regenwater, n.l. de fractie die een dunne kalkhoudende laag passeert zonder ermee te reageren [-];

ρ_B = bulk dichtheid ontkalkende bodemlaag [kg/L];

$CaCO_3$ = gemiddelde kalkgehalte ontkalkende bodemlaag [ppm].

In Vergelijking 8-9 verwaarlozen we effecten van Ca-recycling door planten en Ca-opname door kationuitwisseling, en stellen we Ca_p op 1.3 mg/L en Ca_{Si} op 0.16 mg $SiO_2/L = 1$ mg/L. Zonder in situ metingen moeten we het stellen met schattingen van R, f_B en Ca terwijl er wel metingen voorhanden zijn van p_B en $CaCO_3$.

Schatting van R en f_B

Op basis van uitvoerige waterbalansstudies o.a. met de megalysimeters van Castricum, kleinere lysimeters en literatuurstudie is onderstaande methode ontwikkeld om het jaartotaal van de grondwateraanvulling (R) te schatten op basis van het jaartotaal van de regenval (P) en de begroeiing (Stuyfzand 1993, 2016):

$$R_N = p_N \ln(P) - c_N$$

Vergelijking 8-11

waarin:

R_N = jaartotaal grondwateraanvulling onder vegetatietype N [m/j];

P = jaartotaal neerslag op open veld [m/j];

p_N, c_N = constanten voor vegetatietype N zoals gedefinieerd in Tabel 1.2 [-].

Tabel 8-11: Jaartotaal van de grondwateraanvulling (R) voor Nederlandse kustduinen als functie van open-veld neerslag (P) en begroeiing (N), in volgorde van toenemende (evapo)transpiratie (E). Naar Stuyfzand (2016).. Evapoconcentratie factor = factor waarmee de bodemvochtconcentratie toeneemt tgv evapotranspiratie. Invulling van P in m/j levert direct alle waarden van p, c, E/P, R, f_E en voor DUVELCHEM benodigde parameters (Stuyfzand 2010) op.

VEGETATION		Recharge			Evapoconc		
Type	Code	R = (p ln(P)-c)/1000			factor		
	Prec (P) m/a = 0.918	p	c	E/P	$f_E = P/R$		
Bare	1	750.0	4330	0.143	0.787	1.167	
Bare + some mosses/grasses	Lys 1	2	741.6	4338	0.215	0.721	1.273
Mosses	3	730.0	4360	0.324	0.620	1.480	
Poor dry dune veg, mix of mosses+grasses+bare	4	720.0	4370	0.410	0.542	1.694	
Dry shrubs (open), <50% mosses/grasses	5	710.0	4383	0.498	0.461	1.992	
Rich dry dune veg, Heather, Dry deciduous	Lys 2	6	702.4	4398	0.571	0.394	2.332
Dense shrubs, Wet tall grasses, Oaks	Lys 3	7	641.6	3977	0.565	0.400	2.296
Wet dune slack, Deciduous forest (wet)	8	600.0	3750	0.626	0.343	2.674	
Pines, dense dry	9	550.0	3500	0.725	0.252	3.640	
Pines	Lys 4	10	504.3	3251	0.793	0.190	4.839
Pines, wet and dense	11	475.0	3100	0.847	0.141	6.532	

Schatting van de factor f_B is moeilijker door gebrek aan studies hiernaar. Te verwachten valt, dat f_B toeneemt met een afname van de dikte van de kalkhoudende bovenlaag en met een toename van de bewortelingsdiepte van de begroeiing. Een eerste benadering zou kunnen zijn:

$$\text{Als } d < 0.5 \text{ m: } f_B = (0.5 - d)(1 + 0.5B), \quad \text{anders: } f_B = 0$$

Vergelijking 8-12

waarin:

d = diepte kalkgrens [m-MV];

B = bewortelingsdiepte [m-MV].

Schatting van Ca_{CO_3}

De voor ontkalking relevante Ca_{CO_3} concentratie kan berekend worden met het analytische model DUVELCHEM.xlsx (Stuyfzand 2010). We gaan er daarbij vanuit dat de ontkalking vanaf maaiveld en in de onverzadigde zone geschiedt (dus in een open systeem), en er geen andere processen spelen dan kalkoplossing, een geringe oplossing van silicaatmineralen, evapoconcentratie, atmosferische depositie van sterke zuren en zeezoutdepositie.

Als we verder uitgaan van kalkevenwicht, een atmosferische depositie gelijk aan die van het jaar 2008 en zoals geldend voor relatief schone duinlocaties langs de kust van Noord- en Zuid-Holland, dan komen we uit op de volgende Ca_{CO_3} concentraties voor de in Tabel 1.2 gecodeerde en omschreven begroeiingstypen:

CaCO₃ = 25.8 mg/L voor type 1 (kaal), 38.2 mg/L voor type 2 (kaal + enkele mossen en grassen), 42.6 mg/L voor type 3 (mossen), en 52.9 mg/L voor type 4 (schrale droge duinvegetatie, bestaande uit een mix van mosses, hogere grassen en weinig kaal zand).

Voorbeelden van uitloogtijden

In Tabel 1.3 zijn voor 10 scenario's de uitloogsnelheden en –tijden berekend met behulp van **DUVELCHEM.xlsx** plus de *Vergelijking 8-8* t/m *Vergelijking 8-12*.

Voor de begroeiingstypen zijn alleen de schrale typen 1-4 gekozen, en voor de dikte van de aan het oppervlakte liggende, kalkhoudende zandlaag 0.001 tot 2 m. Dan blijken de uitloogtijden 0.2-0.4 jaar te bedragen voor extreem dunnen lagen (1 mm dik), ca. 3 jaar voor zeer dunne lagen (0.01 m) tot bijna een millennium voor een 1 m dikke zandlaag met 4% kalk (ongeveer het gemiddelde kalkgehalte van onverweerd jong duinzand).

Tabel 8-12. Berekende uitloogsnelheid (vCaCO₃) en uitloogtijd (t_{DEC}) van een kalkhoudende zandlaag met dikte d, kalkgehalte CaCO₃, bulk dichtheid (ρ_B) onder verschillende vegetatietypen, voor in totaal 10 verschillende scenario's.

Gele cellen = invoer; licht groene cellen = lookup via vegetatietype in DUVELCHEM.xlsx; witte cellen = resultaten van berekening met Vergelijking 8-8 t/m Vergelijking 8-12.

Scenario #	d m	CaCO ₃ % d.w.	ρ _B kg/L	Veg.type #	B m-LS	R m/a	Ca _{CO3} mg/L	f _B	v _{CaCO3} m/a	t _{DEC} year
1	0.001	0.5	0.90	1	0.0	0.79	25.8	0.50	0.0057	0.2
2	0.001	1.0	0.90	1	0.0	0.79	25.8	0.50	0.0028	0.4
3	0.01	1.0	1.00	1	0.0	0.79	25.8	0.49	0.0026	3.8
4	0.01	1.0	1.00	2	0.1	0.72	35.9	0.51	0.0031	3.2
5	0.01	1.0	1.00	3	0.1	0.62	42.6	0.51	0.0032	3.1
6	0.01	1.0	1.00	4	0.4	0.54	52.9	0.59	0.0029	3.4
7	0.03	2.0	1.20	3	0.1	0.62	42.6	0.49	0.0014	21.5
8	0.10	2.0	1.30	3	0.1	0.62	42.6	0.42	0.0015	67.9
9	1.0	2.0	1.56	3	0.1	0.62	42.6	0.00	0.0021	471.3
10	1.0	4.0	1.59	3	0.1	0.62	42.6	0.00	0.0010	963.2

8.5 Discussie en conclusies

8.5.1 Factoren die de geometrie en zandbalans van stuifkuilen bepalen

De onderzochte stuifkuilen variëren in morfologie (schotel- en sleufvormig) en landschappelijke positie (in duinvlakte, NW/W-flanken van lage duinen, top van lage en hoge duinen). Sleufvormige stuifkuilen komen alleen voor op de ZW/W-flanken of op de top van duinen. Schotelvormigen kunnen zowel in duinvlakten als op ZW/W flanken van duinen voorkomen. De absolute omvang van de deflatie- en accumulatiezone en ook relatieve omvang van de accumulatie zone t.o.v. de deflatiezone zijn sterk variabel zonder dat daarbij sprake is van een eenduidige relatie met afzonderlijke kenmerken voor morfologie van de stuifkuilen en landschappelijke positie. Wel gaat de combinatie van sleufvormige deflatiezones met een relatief hoge positie in het duinlandschap (op de top van lage en hoge duinen) en relatief weinig opgaande begroeiing aan de loefzijde van de overheersende windrichting (NW) samen met een hoge ratio van de oppervlakte van de accumulatiezone met de oppervlakte van de deflatiezone. De expositie van de stuifkuil aan de overheersende windrichting is daarmee een bepalende factor voor de relatieve omvang van de accumulatiezone. Met ander woorden bij meer windexpositie wordt het zand meer verspreid over de omgeving. De vorm van de begrenzing van de deflatie- en accumulatiezone varieert van vrijwel cirkelvormig tot ellipsvormig. De vorm van de deflatiezone werkt daarbij matig door in de vorm van de buitengrens van de accumulatiezone. Bij de meeste stuifkuilen ligt de meeste oppervlakte van de accumulatiezone aan de NO-zijde, dus de lijzijde van de overheersende windrichting. Voor de onderzochte stuifkuilen konden geen morfologische of landschappelijke factoren worden gekoppeld aan het nog wel en niet actief zijn van de stuifkuil. Tegen de verwachting in waren de stuifkuilen met de beste expositie op de overheersende windrichting allen gestabiliseerd. Mogelijk is dit een artefact door de selectie van de onderzochte stuifkuilen.

De ruimtelijke invloed van uitstuiving van de deflatiezone op de omgeving is van drie factoren afhankelijk.

Ten eerste werkt de omvang van de deflatiezone door op de hoeveelheid zand in de accumulatiezone, de oppervlakte van de accumulatiezone (is zone waarin ingestoven zand nog traceerbaar is in het bodemprofiel) en de oppervlakte van de zone waarin de basenrijkdom en pH worden beïnvloed (hoger dan die van het duingebied zonder of met zeer geringe invloed van instuiving). Voor de meeste stuifkuilen in het midden- en achterduin zijn de volgende kwantitatieve relaties gemiddeld aanwezig, 1 m² deflatiezone geeft ca. **0.95 m³** ingestoven zand in de accumulatiezone, de oppervlakte van de accumulatiezone is ca. **2.5 maal** zo groot als de deflatiezone. De oppervlakte van de sterk pH-beïnvloede zone (pH bodemtoplaag >7.5, kalkgebufferd) heeft ca. **0.6 maal** de omvang van de deflatiezone en de sterk+zwak pH-beïnvloede zone (pH bodemtoplaag 2 eenheden hoger dan de laagste pH aan de periferie van de stuifkuilen) is ca. **3.3 maal** zo groot als de deflatiezone. Grosse modo is de sterk+zwak pH-beïnvloede zone dus groter dan de accumulatiezone. Deze ratio's gelden voor stuifkuilen waar de windexpositie van de stuifkuil niet hoog is (ligging in vlak duingebied, beschutting van opgaande begroeiing aan de ZW-zijde).

Ten tweede zorgt de combinatie van een (relatief) hoge positie van de deflatiezone in het duinlandschap, ZW/W-expositie van de deflatiezone en een hoog aandeel korte vegetatie aan de ZW-zijde van de deflatiezone voor een grotere relatieve omvang van de zandbalans, de accumulatiezone en de zone waarin de pH is verhoogd als gevolg van instuiving t.o.v. de deflatiezone.

Een derde factor werkt door op de relatieve omvang van de pH-beïnvloedingszones. De ratio van de oppervlakten sterk pH-beïnvloede zone/ deflatiezone is groter naar mate de kalkrijkdom van de bodemtoplaag (0-5 cm) in de deflatiezone hoger is. Voor stuifkuilen die niet sterk zijn geëxposeerd aan de overheersende windrichting kunnen de oppervlakten van de pH-beïnvloedingszones worden berekend op basis van de oppervlakte en het kalkgehalte in de bodemtoplaag van de deflatiezone (opp_{Defl} en $CaCO_{30-5cm}$):

voor de sterk beïnvloede zone

$$opp_{StIn} = 0.5 * opp_{Defl} * CaCO_{30-5cm}$$

voor de sterk+zwak beïnvloede zone:

$$opp_{St+ZwIn} = 1.9 * opp_{Defl} * CaCO_{30-5cm}$$

$CaCO_{30-5cm}$ in % DG

In geval van sterke tot extreme windexpositie gelden deze relaties niet en zal de constante in beide vergelijkingen veel hoger zijn. Met de acht stuifkuilen die onderzocht zijn was het niet mogelijk om bovenstaande relaties te differentiëren naar actieve en gestabiliseerde stuifkuilen. Een bijsluiter voor bovengenoemde kwantitatieve relaties is dat ze zijn gebaseerd op stuifkuilen met een relatief lange periode van eolische activiteit (meestal >15 of >35 jaar) met een positie in het midden- en achterduin en dus ver verwijderd van zee (1400-3500 m). De relaties kunnen anders liggen voor stuifkuilen met een korte periode van eolische activiteit (oppervlakte met effect op de omgeving geringer) en stuifkuilen dicht bij zee onder invloed van sterkere windwerking (oppervlakte met effect op de omgeving groter). Verder gelden bovengenoemde relaties alleen voor geïsoleerde stuifkuilen waar de effecten op de omgeving niet overlappen met die van een andere stuifkuil.

8.5.2 Invloed van achtergrondkalkgehalte en ontkalkingsdiepte van het duinlandschap op het kalkgehalte van deflatiezones

Het kalkgehalte van het duinzand op enige diepte (30 tot 120 cm) in de deflatiezones van de acht onderzochte stuifkuilen varieert enigszins (1.5-3.5 % DG). De bodemtoplaag van deflatiezones is nog variabel in kalkgehalte (0.6-3.1 % DG) dan het achtergrondkalkgehalte. De deflatiezones in een relatief diep ontkalkte duinzones, kunnen in de deflatiezone een sterke gestratificeerde bodem voor kalk hebben (bovenin lager kalkgehalte dan dieper) dan in ondiep ontkalkte duinzones. Reden hiervoor is dat bij de onderzochte stuifkuilen in dieper ontkalkte duinzones de deflatiezone zowel kalkarm zand van boven de ontkalkingsgrens aansnijdt als kalkrijk zand van daar onder. In geval van dieper ontkalkte duinzones kan daardoor het aandeel van kalkarm zand t.o.v. het kalkrijke zand relatief hoog zijn. Door zandbeweging binnen de deflatiezone a.g.v. windwerking, watererosie en het afstorten van steilranden treedt ook menging op van kalkrijk en kalkarm zand. Deze processen zorgen in de actieve stuifkuilen voor

het optreden van kalkstratificatie in de bovenste 2-3 decimeters van de bodem. Bij stuifkuilen in minder diep ontkalkt duin is geen of een relatief geringe stratificatie aanwezig in de bodem van de deflatiezone. Naast het achtergrondgehalte is dus ook de ontkalkingsdiepte van de duinzone van invloed op de het kalkgehalte van zand dat uitstuift vanuit de deflatiezone. De diepte van de stuifkuil ten opzichte van de ontkalkingsdiepte zal daarbij ook van belang zijn. Een ondiepe deflatiezone zal een hogere verhouding hebben van kalkarm/ kalkrijk zand dan een diepere stuifkuil. Verder kan een deflatiezone pas kalkhoudend zand gaan verstuiwen als de deflatiezone de niet ontkalkte zandlaag heeft bereikt. Jonge stuifkuilen in een duinlandschap met ontkalkte bodems zullen daarom pas naar een bepaalde periode kalkhoudend zand gaan verspreiden.

8.5.3 Effecten van instuiving op humusprofiel en basenrijkdom

Algemene patronen

Bij alle acht stuifkuilen vertoont het ruimtelijke patroon van het humusprofiel, ontkalkingsdiepte en bodem-pH een sterke samenhang met het verstuiwingspatroon. In de deflatiezones van actieve en gestabiliseerde stuifkuilen zijn bodems met een C-profiel aanwezig. In de accumulatiezone zijn alleen dicht bij de deflatiezone humusarme bodems met een C-profiel aanwezig. Bij actieve stuifkuilen is deze zone breder (5-20 m aan NO/O-zijde) dan bij gestabiliseerde stuifkuilen (0 tot ca. 10 m aan de NO/O-zijde). Verder weg van de deflatiezone komen in de accumulatiezone vooral bodems met een Ah-C profiel voor en slechts in geringe mate, zeer lokaal zonder Ah-horizont. Bodems met een relatief dikke Ah-horizont zijn vooral aanwezig buiten de accumulatiezone. In de omgeving van de deflatiezone is in zowel de actieve als de gestabiliseerde stuifkuilen duidelijk sprake van pH-beïnvloeding van de bodemtoplaag door ingestoven, kalkhoudend zand. Rond de deflatiezone is van dichtbij naar verder verwijderd een duidelijk aflopende gradiënt in kalkgehalte en pH van de bodemtoplaag aanwezig. Deze patronen vertonen ook een sterke samenhang met het patroon van zuurgraad-indicatie door de mosvegetatie. De kalkrijkdom van het zand dat wordt verstoven uit de deflatiezone werkt door in het kalk- en pH-patroon van de bodemtoplaag van zowel de accumulatiezone, als een zone grenzend aan de buitenkant van hiervan. De accumulatiezone was in dit onderzoek vastgesteld op basis van bodemprofielen (duidelijke indicatie van instuiving op basis van humusarmere laag boven op humushoudende laag) en analyse van luchtfotoreeksen (zoneringskaal zand). Het feit dat er buiten de accumulatiezone nog een aflopende gradiënt in basenrijkdom aanwezig is bij toenemende afstand tot de deflatiezone duidt op invloed van relatief zwakke instuiving van kalkhoudend zand buiten de vastgestelde accumulatiezone. Deze pH-beïnvloeding buiten de onderscheiden accumulatiezone strekt zich aan de NO/O-zijde 20 tot 50 m uit. Blijkbaar raakt het ingestoven zand hier relatief snel gemengd met de Ah-laag van de oude bodem en kan daardoor in het profiel niet meer visueel worden getraceerd.

Effect van kalkgehalte deflatiezone

De toestand van de basenrijkdom in de accumulatiezone en in de zone daarbuiten hangt af van het kalkgehalte in de topplaat van de stuifkuil en of een stuifkuil wel of niet actief is.

Bij actieve stuifkuilen is de bodemtoplaag in de accumulatiezone kalkhoudend en heeft deze een hoge pH. In de zone buiten de accumulatiezone wordt de aanwezigheid van kalkrijke bodems sterk bepaald door het kalkgehalte van de topplaat van de deflatiezone. Stuifkuilen die zand met een kalkgehalte van ca. 3. % verspreiden, hebben logischerwijze een zone met een bredere (aan de NO/O-zijde ca. 30 tot > 60 m) zone met een kalkhoudende, relatief basische topplaat. Bij stuifkuilen met een minder kalkrijke topplaat (ca. 0.6-1.5 %) in de deflatiezone is de bodem buiten de accumulatiezone vaak niet kalkhoudend in de topplaat en heeft daardoor ook een lagere pH. Buiten de accumulatiezone van actieve stuifkuilen is altijd met toenemende afstand van de deflatiezone een afnemende pH-gradiënt aanwezig in de bodemtopplaat. Bij stuifkuilen met een kalkrijke deflatiezone overlapt de sterk pH-beïnvloede zone (pH > 7.5, kalkbuffering) zeer goed met de accumulatiezone en kan deze zelfs groter zijn dan de accumulatiezone. Tevens strekt de zone met zwakke pH-beïnvloeding (bodemtopplaat 2 pH eenheden hoger dan laagste pH in de periferie van de stuifkuil) zich veel verder uit dan de accumulatiezone. Bij stuifkuilen met een minder kalkrijke deflatiezone is de accumulatiezone slechts voor een klein deel sterk pH-beïnvloed en is de zwakke pH-beïnvloedingszone kleiner dan of nauwelijks groter dan de accumulatiezone.

Bij gestabiliseerde stuifkuilen is de bodemtopplaat in de deflatiezone doorgaans kalkhoudend en heeft een hoge pH. Binnen de accumulatiezone is een variabele ontkalkingsdiepte aanwezig. Een relatief hoog kalkgehalte van de bodemtopplaat is alleen aanwezig in een zone het dichtst bij de deflatiezone. Deze zone is breder bij een hoge kalkrijkdom van de bodemtopplaat van de deflatiezone. Instuiving in het verleden gaat op grotere afstand van de deflatiezone binnen de

accumulatiezone dus niet altijd samen met hoge kalkgehalten en een zeer hoge bodem-pH. De stabiliseerde stuifkuilen vertonen hierdoor binnen de accumulatiezone een groter bereik voor de pH van de bodemtoplaag dan de actieve stuifkuilen waar de pH-gradiënt gering is. De pH-gradiënt binnen de accumulatiezone van gestabiliseerde stuifkuilen is gecorreleerd met de ontkalkingsdiepte van de duinzone en de kalkrijkdom van het zand in de top laag van de deflatiezone. Hoe dieper de duinzone is ontkalkt en hoe lager het kalkgehalte in de deflatiezone des te lager de pH in de periferie van de accumulatiezone. Buiten de accumulatiezone van de gestabiliseerde stuifkuilen heeft een geringe instuiving niet geleid tot een kalkhoudende bodemtoplaag, maar is wel vaak een aflopende pH-gradiënt aanwezig bij toenemende afstand van de deflatiezone. Een gradiënt van relatief geringe instuiving in het verleden heeft blijkbaar nog steeds effect op de actuele pH-gradiënt in de bodemtoplaag. De pH vertoont hier een soortgelijke samenhang met de ontkalkingsdiepte en kalkrijkdom van het verstoven zand als in de accumulatiezone.

Effect van sterke windwerking

Bij een gestabiliseerde stuifkuil in Meijndel, die sterke expositie heeft aan de overheersende NW-wind door het nagenoeg ontbreken van opgaande begroeiing en een positie van de deflatiezone op een hoog duin, lijkt de invloed van zwakke instuiving zich aan de lizijde ver uitstrekt (> 115 m vanaf de rand deflatiezone). Hier zijn namelijk geen zeer lage pH's gemeten in de bodemtoplaag op locaties verwijderd van de deflatiezone terwijl de bodem wel enkele decimeters diep is ontkalkt.

Effect van ontkalkingsdiepte duinzone

Bij een ligging in dieper ontkalkt duingebied komen in de periferie van het beïnvloedingsgebied lagere pH's (tot 4.0) dan bij een ligging in minder diep ontkalkt duingebied (meestal tot 5.0 en soms tot 4.0). In de delen die verder verwijderd zijn van de deflatiezones en weinig of niet door instuiving zijn beïnvloed hebben een relatief sterke verticale gradiënt van de pH in de bodem (oplopend met de diepte in de bovenste decimeters van de bodem). Deze gradiënten zijn steiler in de oppervlakkig ontkalkte bodems en geringer in dieper ontkalkte bodems. Dit getuigt van een verbreding van de ontkalkingszone bij voortgaande ontkalking.

Effect van eolisch actief of gestabiliseerd

De vier onderzochte gestabiliseerde stuifkuilen zijn ca. 10 tot 20 jaar geleden gestabiliseerd. De ruimtelijke patronen van kalk en vooral pH in de instuifzone rond de deflatiezone duiden erop dat de vroegere instuiving nog steeds een groot effect heeft op de bodem. In de zwakke instuifzone buiten de vastgestelde accumulatiezone is weliswaar de kalk verdwenen, maar is nog steeds duidelijk sprake van een zone met een hogere pH van de bodem top laag t.o.v. van de periferie van de stuifkuil. Een kanttekening hierbij is wel dat drie van de vier gestabiliseerde stuifkuilen door een gunstige expositie aan de overheersende windrichting relatief veel uitstuiting hebben gehad en een sterke ruimtelijke spreiding van het stuifzand. De uitgevoerde indicatieve berekeningen van ontkalkingsnelheden geven ook aan dat op een tijdschaal van enkele decennia nog steeds basenrijke omstandigheden aanwezig kunnen zijn. Zo duurt de ontkalking van een bodemlaag met 2 % kalk van 3 tot 10 cm respectievelijk ca. 2 tot 7 decennia. Het genoemd kalkgehalte is een realistische waarde voor stuifkuilen met een kalkrijke deflatiezone.

8.5.4 Effect van verstuiving op de vegetatie

Ruimtelijk patroon van de vegetatiestructuur en soortenrijkdom

De deflatiezones van actieve stuifkuilen hebben geen of nauwelijks een vegetatie van mossen en vaatplanten. In de begroeide deflatiezones van gestabiliseerde stuifkuilen is de bedekking van vaatplanten gering, waardoor er goede lichtcondities heersen voor lage soorten (lage vaatplanten, mossen en korstmossen). Hier is een matig soortenrijke duingraslandvegetatie aanwezig, waarvan de soortenrijkdom iets hoger of vergelijkbaar is met de soortenrijkdom van de duingraslanden ver verwijderd van de deflatiezone. In de zone buiten de deflatiezone resulteerde de instuiving alleen dichtbij de deflatiezone in een pioniersituatie met veel kaal zand en een geringe vegetatiebedekking. Bij actieve stuifkuilen is deze zone breder dan bij de gestabiliseerde stuifkuilen. Verder verwijderd van de deflatiezone is een mosrijke vegetatie aanwezig waarin bij de meeste stuifkuilen de bedekking van de kruidlaag en/of lage struiken met toenemende afstand vanaf de rand van de deflatiezone toeneemt. In de zone buiten de accumulatiezone hebben mossen nog steeds een groot aandeel in de vegetatie. Dit betekent dat er een gradiënt aanwezig is van 1) een smalle zone met een pioniersituatie, 2) een bredere zone met gesloten duingrasland met een goede lichtbeschikbaarheid aan het grondoppervlak,

overgaand in 3) een zone met een vegetatie met relatief veel kruid en/of lage struiken waarin licht een beperkende factor is voor lage planten (lage vaatplanten, mossen en korstmossen). De totale soortenrijkdom van de vegetatie hangt met deze gradiënt samen: 1) een relatief lage soortenrijkdom in de zone dichtbij de deflatiezone waar sterke stress door droogtetekorten (geen Ah laag) en door begraving t.g.v. relatief sterke instuiving met zand, 2) de hoogste soortenrijkdom in de zone op enige afstand van de deflatiezone met invloed van (voormalige) zwakke instuiving op een oude bodem met een Ah-C profiel, en 3) weer een relatief lage soortenrijkdom ver verwijderd van de deflatiezone met een oude bodem zonder of met zeer geringe invloed van instuiving. Deze patronen van soortenrijkdom worden sterk bepaald door verschillen in het aantal soorten van gesloten duingraslanden. De invloed van instuiving werkt dus sterk door de soortenrijkdom van duingraslanden. Op de eerste plaats bij relatief sterke instuiving op directe wijze als stressfactor (humusarme bodem, droogte en begraving onder stuifzand). Ten tweede bij geringe instuiving faciliterend voor laag productieve soorten door een lagere bedekking van de grasachtige en lage struiksoorten. Op welke wijze de geringe instuiving op oude bodems een lagere bedekking van vaatplanten veroorzaakt, is onduidelijk. Mogelijke mechanismen zijn: 1) de instuiving leidt tot een geringere beschikbaarheid van een of meerdere nutriënten en daarmee tot een geringere productiviteit en 2) de instuiving leidt tot een betere voedselkwaliteit van de boven en ondergrondse biomassa voor grazers en plantparasieten waardoor de aanwezige bovengrondse biomassa beperkt wordt. Bij de eerste hypothese kan aanvoer van kalkhoudend zand een rol spelen in de binding van anorganisch fosfaat en daarmee in de beschikbaarheid voor de vegetatie. De hogere N-gehalten van de bovengrondse vegetatie die gemeten is in accumulatiezones (zie H 9 en 10) ondersteunt de tweede hypothesen

Instuiving en ruimtelijke patronen in de soortensamenstelling van duingraslanden

Het aantal pioniersoorten onder droge, voedselarme, basenrijke en matig basenrijke omstandigheden wordt niet bepaald door de kalkrijkdom van de deflatiezone en ook niet door de ontkalkingsdiepte van de duinzone waarin de stuifkuilen liggen. Het aantal basenminnende pioniersoorten is relatief hoog in de deflatiezone en het deel van de accumulatiezone dichtbij de deflatiezone van de stabiliseerde stuifkuilen. Tegen de verwachting in, is voor een hoge soortenrijkdom van pioniersoorten juist stabilisatie nodig (10-20 jaar geleden bij de onderzochte stuifkuilen). Stabilisatie die kortgeleden heeft plaatsgevonden, zorgt voor relatief humusarme bodems met een nog zeer open vegetatiestructuur waarin nog veel licht beschikbaar is voor lage soorten en tegelijkertijd begraving van de planten door sterke instuiving niet meer optreedt. De meest algemene soort van deze groep, de mossoort *Tortula ruralis*, komt echter wel frequenter voor rond de deflatiezones van actieve stuifkuilen.

De patronen van duingraslandsoorten van voedselarme, basenrijke omstandigheden zijn in de deflatiezone van gestabiliseerde stuifkuilen indifferent voor de kalkrijkdom van de deflatiezone. Deze zone heeft door de aanwezigheid van kalk in de toplaag altijd een hoge pH en daardoor komen er relatief veel basenminnende duingraslandsoorten voor. Voor de zone buiten de deflatiezone heeft het kalkgehalte van de bodemtoplaag in de deflatiezone wel een duidelijk effect op de patronen van zowel voedselarme basenrijke als voedselarme basenarme soorten in actieve en stabiele stuifkuilen. De soortgroep van voedselarme, basenrijke duingraslanden heeft hier een groot aantal soorten en een relatief hoge cumulatieve bedekking in geval van een kalkrijke deflatiezone. Deze soorten profiteren dus vooral bij instuiving van kalkrijk zand. Een hoge bedekking wordt veroorzaakt door *Rosa pimpinellifolia* en/of *Homalothecium lutescens*. In geval van een relatief kalkarme deflatiezone is het soortenaantal van deze soortgroep juist gering tot matig hoog en is de cumulatieve bedekking laag. Een wel of niet gestabiliseerde deflatiezone maakt daarbij weinig uit. Bij stuifkuilen in ondiep ontcalcite duinzones (5-15 cm) is het aantal basenminnende duingraslandsoorten ook nog vrij hoog in delen ver verwijderd van de deflatiezone, in diep ontcalcite duinzones ontbreken ze daar.

In de deflatiezone van gestabiliseerde stuifkuilen komen meer soorten van basenarme duingraslanden voor in geval van een relatief kalkarme toplaag, dan in geval van een kalkrijke toplaag. Het aantal soorten is dan echter gering. In de zone daarbuiten heeft deze soortgroep het grootste aantal bij actieve stuifkuilen met een relatief kalkarme deflatiezone. Bij actieve stuifkuilen met een kalkrijke deflatiezone komen ze vooral verder verwijderd van de deflatiezone voor. Bij gestabiliseerde stuifkuilen komen ze van dichtbij tot ver weg van de deflatiezone voor. Opvallend is dat bij zowel de actieve als gestabiliseerde stuifkuilen met een relatief kalkarme deflatiezone deze soortgroep richting periferie van de stuifkuilen een afnemend soortenaantal vertoont. Bij de actieve stuifkuilen is het soortenaantal van deze soortgroep hoog buiten de accumulatiezone maar juist laag in de periferie. Dit wijst erop dat zulke soorten van basenarme omstandigheden, net als de basenminnende duingraslandsoorten ook profijt kunnen hebben van instuiving van kalkhoudend zand. Mogelijk is dat door een onderdrukkend effect van de instuiving op de bedekking van vaatplanten waardoor nog gunstige lichtcondities aanwezig zijn (zie boven). Tegelijk kunnen stuifkuilen met een kalkarme

deflatiezone in de periferie een hoge cumulatieve bedekking hebben van basenarme duingraslandsoorten die daar wel nog groeien (*Agrostis capillaris*/ *Agrostis capillaris*+*vinealis* en of *Dicranum scoparium*).

Samenvattend, buiten de deflatiezone is de invloed van instuivend zand op de vegetatie van gesloten duingraslanden sterk afhankelijk van de kalkrijkdom van het stuifzand en daarnaast is ook de ontkalkingsdiepte van de duinzone van invloed. De soortenrijkdom van voedselarme basenrijke pioniersoorten wordt pas hoog na stabilisatie.

Doorwerking van verstuivingsinvloed en successie in gestabiliseerde stuifkuilen

De vier onderzochte stuifkuilen zijn ca. 10 tot 20 jaar geleden gestabiliseerd. Op de tijdschaal van successie van duingraslanden startend op humusarme zandbodems is dat nog een vrij korte stabilisatieduur, omdat oudere, humusrijke en soortenrijke stadia van duingraslanden zich pas na 20-40 jaar ontwikkelen (Aggenbach et al 2013). De vegetatiestructuur van de gestabiliseerde stuifkuilen verschilt als volgt van de actieve stuifkuilen: in de deflatiezone is minder kaal zand en meer vegetatie van mossen en kruiden, in de accumulatiezone minder kaal zand en een duidelijk hogere mosbedekking, in de zone daarbuiten deels een lagere mosbedekking en deels hogere kruidenbedekking. De successie van de vegetatie is dus bij de gestabiliseerde stuifkuilen verder gevorderd: in de deflatiezone jong en nog open duingrasland, in de accumulatiezone vooral een gesloten duingrasland en in de zone daarbuiten neemt in de gesloten begroeiing het belang van de kruidlaag toe. Opvallend is dat de gestabiliseerde stuifkuilen in de accumulatiezone een groter aantal van basenminnende pioniersoorten van voedselarme omstandigheden hebben dan de actieve stuifkuilen. Deze soortgroep profiteert dus pas sterk van kleinschalige verstuiving nadat enige tijd geleden stabilisatie is opgetreden, waarbij de directe stress van begraving onder stuifzand stopt, maar wel nog een zeer open vegetatiestructuur met zeer goede lichtcondities aanwezig is. Bij gestabiliseerde stuifkuilen zijn de patronen van het aantal duingraslandsoorten van basenrijke en basenarme omstandigheden in de omgeving van de deflatiezones in grote lijn vergelijkbaar met die van actieve stuifkuilen. Dit geeft aan dat de vroegere instuiving van kalkhoudend zand bij de gestabiliseerde stuifkuilen na 1 tot 2 decennia nog steeds een sterke weerslag heeft op de kwaliteit van de gesloten duingraslandvegetatie. Gezien de kalk en pH gradiënten rond gestabiliseerde deflatiezones speelt het effect op de basenhuishouding hierin een grote rol. De aanwezigheid van basenminnende duingraslandsoorten stemt overeen met de ontkalkingsduur die berekend is voor enkele cm's dikke stuiflagen (zie boven). Enkele centimeters ingestoven zand uit zulke stuifkuilen kan daarbij zorgen voor duingrasland met basenminnende soorten gedurende enkele decennia. In geval van kalkrijke deflatiezones en accumulatiezones met een dikke laag ingestoven kalkrijk zand stabiliseren zal de levensduur van duingraslanden ook minstens in de orde van decennia liggen. De lange termijn ontwikkeling van duingraslanden rond gestabiliseerde stuifkuilen beter in beeld worden gebracht met scenarioberekeningen met behulp van morfodynamische en geochemische modellering. Aanzetten daarvoor zijn beschreven in paragraaf 8.4.12 en 8.4.13.

9 Patronen van bodem en vegetatie van vijf eolisch actieve en stabiele gebieden in kalkrijke en kalkarme duinen

Annemieke Kooijman

9.1 Samenvatting

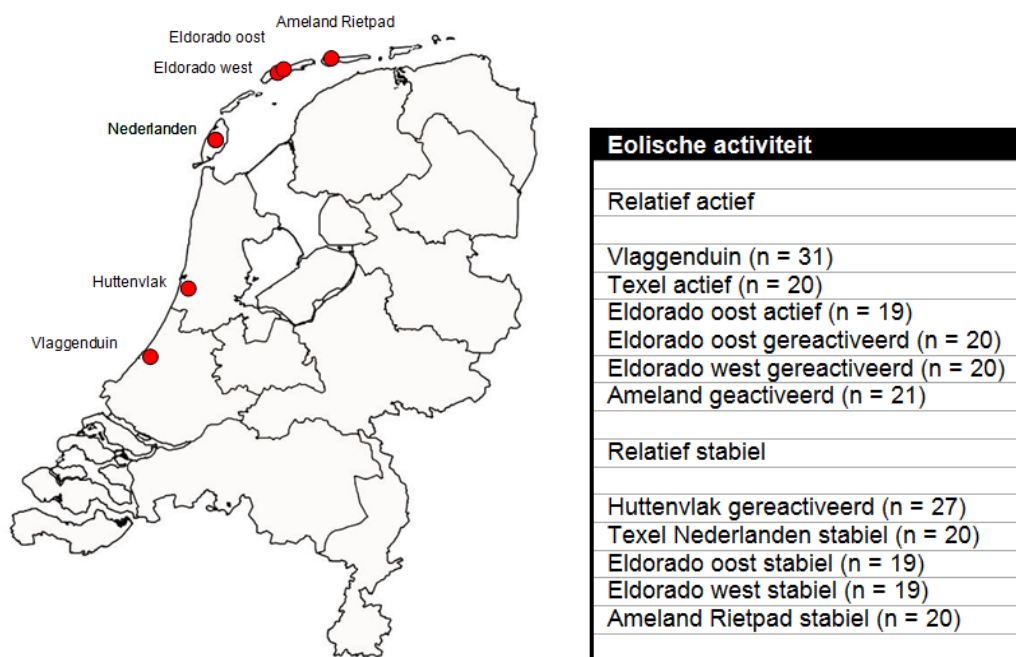
In dit hoofdstuk is een analyse gemaakt van de verschillen in bodem en vegetatie tussen vijf eolisch actieve en stabiele gebieden in kalkrijke en vooral kalkarme duinen. Een hogere eolische activiteit leidt in zowel kalkrijke als kalkarme gebieden tot meer kaal zand, een hogere pH, minder koolstof in de bovengrond, en een lagere C:N ratio van de bodem. Een hogere eolische activiteit leidt ook tot minder bovengrondse biomassa van de vegetatie en een lagere bedekking van hoge grasachtigen. Ook het N-gehalte van de vegetatie is gemiddeld hoger in de meer actieve gebieden, hoewel niet overal en zonder een duidelijke relatie met kaal zand of pH. Ook neemt het aantal pioniersoorten, korstmossen en doelsoorten toe, vooral als gevolg van de hogere pH. Verrassend genoeg werd de hoogste diversiteit in de vegetatie niet gevonden in kalkrijke, maar in kalkarme duinen die steeds eolisch actief zijn gebleven. De piek in het totaal aantal plantensoorten lag rond pH 6, met een iets hogere waarde voor pionier- en doelsoorten (pH 6.5), en een iets lagere voor korstmossen (pH 5.5).

De (re)activatie van stuifkuilen rond 1991 in Huttenvlak, Eldorado oost, Eldorado west en Ameland heeft geleid tot hogere eolische activiteit, maar alle stuifkuilen zijn daarna grotendeels gestabiliseerd, het snelst in Eldorado. In alle ge(re)activeerde stuifkuilen is nog kaal zand aanwezig. De pH van de bovengrond is in 25 jaar weliswaar afgenomen vergeleken met de beginsituatie, maar in de stuifkuil zelf nog steeds significant hoger dan in de meer stabiele omgeving. In de accumulatiezones is de pH nog steeds relatief hoog in Huttenvlak, Ameland en Eldorado oost, maar in Eldorado west zijn de pH waarden gezakt tot 4.4, waarschijnlijk als gevolg van de (her)groei van Kraaiheide, die enige overstuiving prima kan weerstaan. Het aantal pioniersoorten en doelsoorten is 25 jaar na (re)activatie significant hoger, en nam toe van vijf en vier in de meer stabiele zones naar negen en zeven in de deflatiezones. Reactivatie van stuifkuilen lijkt in veel duingebieden een zinvolle maatregel om meer dynamiek in het systeem te brengen, zelfs als ze relatief snel weer stabiliseren. Dit is vooral belangrijk in het Waddendistrict, waar de spontane mobilisatie van stuifkuilen een probleem is door de ongunstige ligging t.o.v. de WZW wind, relatief lage maximumhoogte en de gevoeligheid voor de nog steeds te hoge N-depositie.

9.2 Inleiding en vraagstelling

Dit deel van het onderzoek naar kleinschalige dynamiek bestaat uit drie onderdelen, die bijdragen aan de beantwoording van deelvragen D1, D2 en D3 over de verschillen tussen relatief actieve en stabiele gebieden, hoe lang er nog effecten meetbaar zijn nadat de eolische activiteit is gestopt, en van welke factoren dit afhangt. In het eerste deel worden relatief actieve en stabiele stuifkuilen in verschillende gebieden met elkaar vergeleken (Figuur 9-1). Deze gebieden liggen in de kalkrijke duinen (Vlaggenduin versus Huttenvlak), duinen met intermediair kalkgehalte (Texel) en kalkarme duinen (Terschelling en Ameland). De vraag bij dit deel van het onderzoek is: wat zijn de verschillen tussen relatief actieve en stabiele stuifkuilen wat betreft samenstelling van de bodem en de vegetatie? In het tweede deel wordt de relatie tussen bodem en vegetatie over de gradient in kalkrijkdom nader uitgewerkt. De vraag bij dit deel van het onderzoek is: wat is belangrijker: kaal zand of een hoge pH? In het derde deel is

een analyse gemaakt van de lange-termijneffecten in en rond stuifkuilen die rond 1991 ge(re)activeerd zijn, maar daarna vrij snel weer zijn gestabiliseerd: Huttenvlak, Eldorado oost, Eldorado west en Ameland (van Boxel et al. 1997; Kooijman et al. 2005). De vraag bij dit deel van het onderzoek is: zijn er 25 jaar na (re)activatie nog effecten zichtbaar op vegetatie en bodem in en rond de stuifkuilen?



Figuur 9-1. Verschillende onderzoekslocaties met relatief actieve en stabiele deelgebieden, inclusief het aantal monsterpunten.

9.3 Methoden

9.3.1 Studiegebieden

De keuze van de studiegebieden in dit deelonderzoek is vooral gebaseerd op de beschikbaarheid van proeflocaties waar rond 1991 reactivatie of activatie van verstuiving heeft plaatsgevonden (van der Meulen et al. 1996; van Boxel 1997; Kooijman et al. 2005). Deze ge(re)activeerde gebieden zijn, indien aanwezig, vergeleken met gestabiliseerde gebieden met een vergelijkbare geomorfologische opbouw.

In het kalkrijke Huttenvlak zijn de stuifkuilen gereactiveerd in 1991 in het kader van het onderzoek naar Effectgerichte maatregelen (EGM) in open droge duinen (van der Meulen et al. 1996, Kooijman et al. 2005). Voor dit gebied kon een vergelijkbare gestabiliseerde situatie echter niet binnen het terrein gevonden worden, omdat destijds alle stuifkuilen zijn gereactiveerd, en er in andere delen van het gebied grootschalig is geplagd. Ook wordt het gebied sinds 1991 begraasd met ponies en hooglanders, en is in de afgelopen tien jaar de grondwaterstand omhoog gegaan als gevolg van verminderde drinkwaterwinning. Om het Huttenvlak toch ergens mee te kunnen vergelijken is gekozen voor een veel actiever gebied in de kalkrijke duinen, mede omdat de stuifkuilen na reactivatie vrij snel weer gestabiliseerd zijn. Het gebied Vlaggenduin ligt op een vergelijkbare afstand van ca 1.5 km van zee, en de stuifkuilen breiden zich hier sinds 2000 sterk uit. Wel zijn er gegevens over pH van de bodem en N-gehalte van de vegetatie in het Huttenvlak uit het verleden.

Op het kalkarme Terschelling is in Eldorado in 1991 een serie stuifkuilen gereactiveerd, eveneens in het kader van EGM. Ook deze stuifkuilen zijn binnen een paar jaar grotendeels gestabiliseerd, mede als gevolg van de sterke vergrassing. Sinds 2006 wordt het gebied begraasd door paarden en galloway-runderen, die in korte tijd veel van de vergrassing hebben opgeruimd. In het huidige onderzoek zijn twee gereactiveerde stuifkuilen bemonsterd in het westen en oosten van het gebied. Deze zijn vergeleken met ernaastgelegen voormalige

stuifkuilen die in 1991 al gestabiliseerd waren. Daarnaast is in Eldorado oost een stuifkuil bemonsterd die in 1991 nog actief was, en nog steeds enige verstuivingsactiviteit laat zien. Ook zijn er gegevens over pH van de bodem en N-gehalte van de vegetatie uit het verleden. Op het kalkarme Ameland is een stuifkuil bemonsterd die is ontstaan na het maken van een kerf in de voormalige zeereep bij het Rietpad in het westen van het eiland door Rijkswaterstaat in 1992 (van Boxel 1997). Deze is vergeleken met een ernaastgelegen stuifkuil die in die tijd al gestabiliseerd was, en een vergelijkbare vorm heeft. Het gebied is grotendeels sterk vergrast met Zandzegge, maar er zijn verder geen beheersmaatregelen genomen.

In de Nederlanden op Texel zijn geen (re)activatiemaatregelen uitgevoerd. Dit gebied is in het onderzoek meegenomen omdat het altijd relatief actief is gebleven, en zowel eolisch actieve als gestabiliseerde stuifkuilen heeft. Ook is het gebied als proeflocatie gebruikt in het faunaonderzoek. Dit gebied wordt verder niet beheerd.

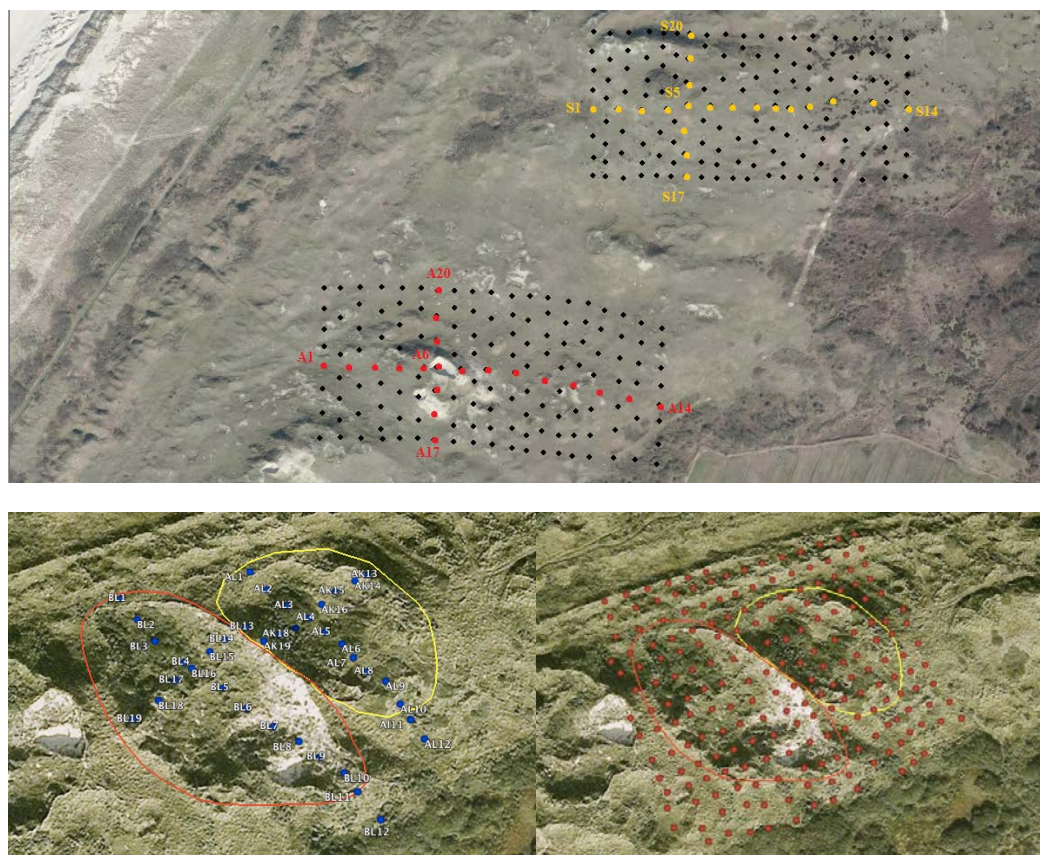
9.3.2 Transectstudies en gridpuntkaartjes

In alle elf deelgebieden zijn in de periode mei-juni transectstudies uitgevoerd volgens min of meer dezelfde opzet, met lange transecten in de lengterichting van de stuifkuil en korte transecten loodrecht hierop (Figuur 9-2). In Vlaggenduin en Huttenvlak zijn steeds twee stuifkuilen bemonsterd, en in de andere gebieden een stuifkuil in zowel een relatief actief als een relatief stabiel deel van het gebied. In totaal zijn in ieder deelgebied 19-31 punten bemonsterd, waarbij de onderlinge afstand van de monsterpunten varieerde afhankelijk van de vorm en grootte van de stuifkuil. De monsterpunten zijn verdeeld over verschillende geomorfologische eenheden in de stuifkuil: deflatiezone, accumulatiezone, rand van de stuifkuil en stabiele delen. De monsterpunten zijn ingemeten met een Trimble Yuma Mobile ArcGIS GPS.

In Eldorado oost en west zijn in de gereactiveerde stuifkuilen vrijwel geen stabiele zones bemonsterd, omdat de stuifkuilen erg groot waren, en de laatste punten van het lange transect onderaan de storthelling lagen. Wel zijn zoals aangegeven deze gereactiveerde stuifkuilen vergeleken met een stabiele kuil ernaast. In ieder van de 235 monsterpunten is de soortensamenstelling van de vegetatie bepaald in een proefvlak van 2 x 2 m, met een schatting van de bedekking van iedere soort in procenten. Ook is de bedekking van kaal zand, moslaag, kruidlaag en struiklaag geschat. Aan de hand van de soortensamenstelling zijn verschillende vegetatieparameters opgesteld: het aantal soorten en/of bedekking van vaatplanten, mossen, korstmossen, pioniersoorten, kleine grassen, hoge grassen, kruiden en zogenaamde doelsoorten, die wenselijk geacht worden voor het open duinlandschap. In ieder monsterpunt is de bovengrondse biomassa bemonsterd in proefvlakken van 25 x 25 cm voor de chemische analyse van het C- en N-gehalte. In negen van de elf deelgebieden is ook de bovengrondse biomassa van de vaatplanten bepaald. In ieder proefvlak is verder een beschrijving van de bodem gemaakt aan de hand van een boring tot 120 cm diepte. Hierbij zijn dikte en diepte van verschillende horizonten gemeten. In de kalkrijke gebieden Vlaggenduin en Huttenvlak is ook de ontkalkingsdiepte bepaald met de bruistest met 0.2 M HCl. In alle proefvlakken is de bovenste vijf cm van de bodem bemonsterd met 100 cm³ pF ringen voor de analyse van de pH en het C- en N-gehalte. In het laboratorium is de bulkdichtheid van de bodem bepaald na droging en weging. De pH van de bodem is gemeten in gedemineraliseerd water, met een schudverhouding van 1:2.5. Ook is het kalkgehalte van de kalkrijke bodems bepaald met behulp van 4M HCl, waarbij alle kalk oplost. Het organisch stofgehalte is voor de kalkrijke bodems bepaald met de gloeiverliesmethode bij 375 °C, waarbij wel de organische stof verbrandt, maar niet de anorganische C die aanwezig is in kalk. Verder zijn van alle bodem- en vegetatiemonsters de C- en N-gehalten bepaald met een CNS-analysator.

In ieder van de elf deelgebieden is een gridpuntanalyse gemaakt van 100-150 punten rond de transecten met de monsterpunten in en rond de stuifkuil, om een inschatting te maken van de invloed van verstuiving op een ruimtelijke schaal. De onderlinge afstand van de gridpunten varieerde afhankelijk van de grootte van het gebied. De gridpunten zijn ingemeten met een Trimble Yuma Mobile ArcGIS GPS. In ieder gridpunt is de dikte van de Ah gemeten, alsmede de dikte van eventuele overstuivingslagen. In ieder gridpunt is ook een schatting gemaakt van de bedekking van kaal zand, moslaag, kruidlaag en struiklaag. Daarnaast is met behulp van lineaire regressie voor ieder gridpunt een schatting gemaakt van de pH, op basis van de gemeten relatie tussen pH en de hoeveelheid kaal zand in de monsterpunten. Voor de monsterpunten in Eldorado oost en west is de regressievergelijking behalve op de hoeveelheid kaal zand, die een positieve invloed heeft op de pH, ook gebaseerd op de bedekking van kraaiheide, die een negatieve invloed heeft. De dikte van de Ah kon helaas niet gebruikt worden voor de schatting van de hoeveelheid koolstof in de bodem, omdat deze te variabel was, en zowel relatief dik kon zijn met een laag organische stofgehalte in gebieden met veel overstuiving (meegroeiende bodems), als relatief dun met een hoog organische stofgehalte in

stabiële gebieden met een begroeiing van bijvoorbeeld Kraaihede. De gridpuntmetingen zijn met behulp van interpolatietechnieken gebruikt om kaartjes te maken van de hoeveelheid kaal zand, de dikte van de Ah en de pH.



Figuur 9-2. Voorbeeld van monsterpunten (gekleurd in transecten) en gridpunten voor de analyse van bodem en vegetatie van stabiële en actieve of gereactiveerde stuifkuilen. Boven: de Nederlanden op Texel; onder: Eldorado oost op Terschelling.

9.3.3 Luchtofoanalyse ge(re)activeerde gebieden

Voor de rond 1991-1992 in het kader van EGM gereactiveerde gebieden is een luchtfotoanalyse uitgevoerd van de ontwikkelingen van de stuifkuilen in de loop van de tijd. Voor Huttenvlak is de luchtfotoanalyse gebaseerd op false colour foto's van de jaren 1996, 2000, 2003, 2009, 2013 en 2015. Voor Eldorado bestond de serie uit luchtfoto's van 1979, 1995, 1997, 2000 en 2014. Hetzelfde is door een MSc-student gedaan voor de geactiveerde stuifkuil op Ameland, maar dit is nog niet afgerond. Wel is al duidelijk dat het gebied ca 25% kaal zand of zeer actief oppervlak bevatte in 1996, een paar jaar na de activatie in 1992. In 2000 was dit nog steeds 25%, maar daarna nam de eolische activiteit gestaag af tot 15% in 2005, 7.5% in 2010 en 2% in 2015. Ter vergelijking zijn ook het referentiegebied Vlaggenduin (sterk actief) en de gestabiliseerde kuilen in Eldorado en Ameland in de analyses meegenomen. Voor Vlaggenduin zijn luchtfoto's van 1990, 1995, 2000, 2010, 2012 en 2015 gebruikt. De luchtfoto's zijn handmatig geïnterpreteerd, en bewerkt in ArcGIS.

9.3.4 Statistische analyse

De verschillen in samenstelling van de bodem en de vegetatie tussen relatief actieve en stabiële stuifkuilen zijn getoetst met een tweewegvariantieanalyse, met de vijf gebieden (Vlaggenduin/Huttenvlak, Texel, Eldorado oost, Eldorado west en Ameland) en eolische activiteit (actief en stabiel) als onafhankelijke factoren (Cody & Smith 1987). Voor deze analyse zijn Vlaggenduin (sterk actief) en Huttenvlak (gereactiveerd maar gestabiliseerd) beschouwd als behorende tot hetzelfde kalkrijke 'gebied'. Voor de andere gebieden (Texel, Eldorado oost, Eldorado west en Ameland) was binnen het gebied steeds een actief en een gestabiliseerd deelgebied aanwezig. Wel zijn voor Eldorado oost de gereactiveerde en nog steeds actieve stuifkuil samengevoegd binnen de eolisch actieve klasse. De tweewegvariantieanalyse is

toegepast op alle transectdata, zonder onderscheid te maken tussen verschillende geomorfologische eenheden, omdat de transecten binnen ieder gebied van vergelijkbare opzet waren. Om de mogelijke invloed van de hoeveelheid kaal zand en pH op de ontwikkeling van bodem en vegetatie nader te toetsen, zijn lineaire en tweede orde-regressieanalyses uitgevoerd (Cody & Smith 1987).

Om de veranderingen in bodem en vegetatie 25 jaar na (re)activatie van de stuifkuilen te analyseren, zijn verschillende zones in de transecten (deflatiezone, accumulatiezone, rand van de stuifkuil en meer stabiele delen) in de huidige situatie vergeleken met bodem- en vegetatiegegevens van de initiële situatie uit het verleden, voor zover aanwezig (Kooijman et al. 2005). Voor Eldorado zijn in de huidige stuifkuilen onvoldoende stabiele zones bemonsterd, en is de dataset aangevuld met vijf monsters uit het meest stabiele deel van de gestabiliseerde stuifkuil ernaast. De analyse is uitgevoerd met een tweewegvariantieanalyse, met gebied (Huttenvlak, Eldorado oost, Eldorado west en Ameland) en situatie binnen een gebied (initiele situatie, de huidige deflatiezone, de huidige accumulatiezone, de huidige rand van de stuifkuil en de huidige stabiele delen) als onafhankelijke factoren. De verschillen tussen verschillende situaties zijn voor ieder gebied apart getoetst met de posthoc LSmeans-test.

9.4 Verschillen tussen actieve en stabiele gebieden

De verschillen tussen de vijf gebieden zijn significant voor alle bodemparameters en bovengrondse biomassa en N-gehalte van de vegetatie (Tabel 9-1). De verschillen tussen hoge en lage eolische activiteit zijn significant voor alle bodemparameters behalve de dikte van de Ah. De dikte van de Ah was erg variabel, en kon bij hoge eolische activiteit zowel dun als relatief dik zijn, door het meegroeien van de bodem met lichte overstuiving. Wel vertonen alle bodemparameters behalve de bulkdichtheid een interactie met gebied, wat wil zeggen dat de effecten van eolische activiteit per gebied verschillen.

Tabel 9-1: Statistische analyse van verschillen in bodem en vegetatie tussen gebieden (Huttenvlak/Vlaggenduin, Texel, Eldorado oost, Eldorado west en Ameland) en in eolische activiteit (relatief actief of relatief stabiel). Significante verschillen zijn weergegeven met hun overschrijdskans; ns = niet significant ($p > 0.05$).

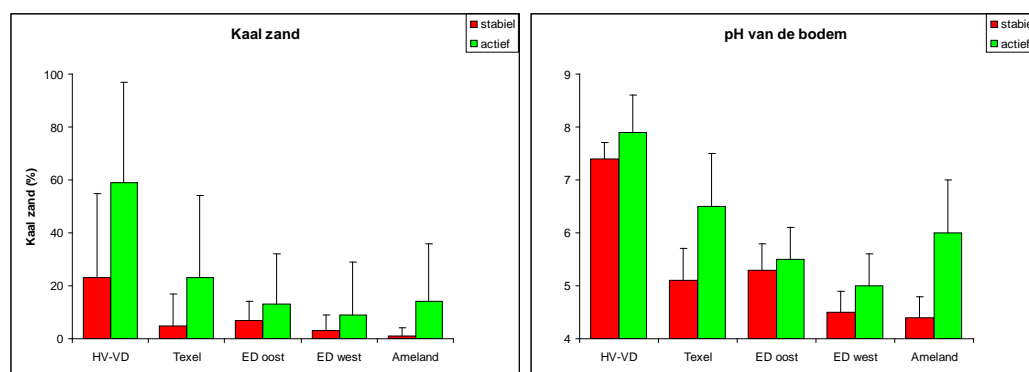
	Gebied	Eolische activiteit	Gebied*activiteit
Kaal zand (%)	0.0001	0.0001	0.0001
Bulkdichtheid bodem (g cm^{-3})	0.0001	0.0001	ns
pH bodem	0.0001	0.0001	0.0001
C-gehalte bodem (%)	0.0001	0.0001	0.0001
C-voorraad bodem (kg m^{-2})	0.0001	0.0001	0.0002
N-gehalte bodem (%)	0.0001	0.0001	0.0001
C: N ratio bodem (g g^{-1})	0.0001	0.0001	0.019
Dikte Ah (cm)	0.004	ns	0.0001
Bovengrondse biomassa (g m^{-2})	0.0001	0.006	0.009
N-gehalte vegetatie (mg g^{-1})	0.0001	0.0001	0.0001

9.4.1 Kaal zand en pH van de bodem

De bedekking met kaal zand is hoger in eolisch meer actieve gebieden, maar verschilt ook per gebied (Figuur 9-3), en is binnen een gebied afhankelijk van de positie in en rond de stuifkuil (Figuur 9-4). De hoogste waarden zijn voor Vlaggenduin, waar de stuifkuilen zich op dit moment sterk uitbreiden. In dit gebied bestaan de transecten voor gemiddeld 60% uit kaal zand, wat min of meer overeenkomt met de hoeveelheid in het gridpuntkaartje (Figuur 9-5). In de gereactiveerde, maar later weer gestabiliseerde stuifkuilen in Huttenvlak is de bedekking van kaal zand in de transecten met gemiddeld 23% van het oppervlak significant lager dan in Vlaggenduin, maar vergelijkbaar met het actieve deel van Texel. Ook dit wordt ondersteund door de gridpuntkaartjes. In het stabiele deel van Texel is echter gemiddeld slechts

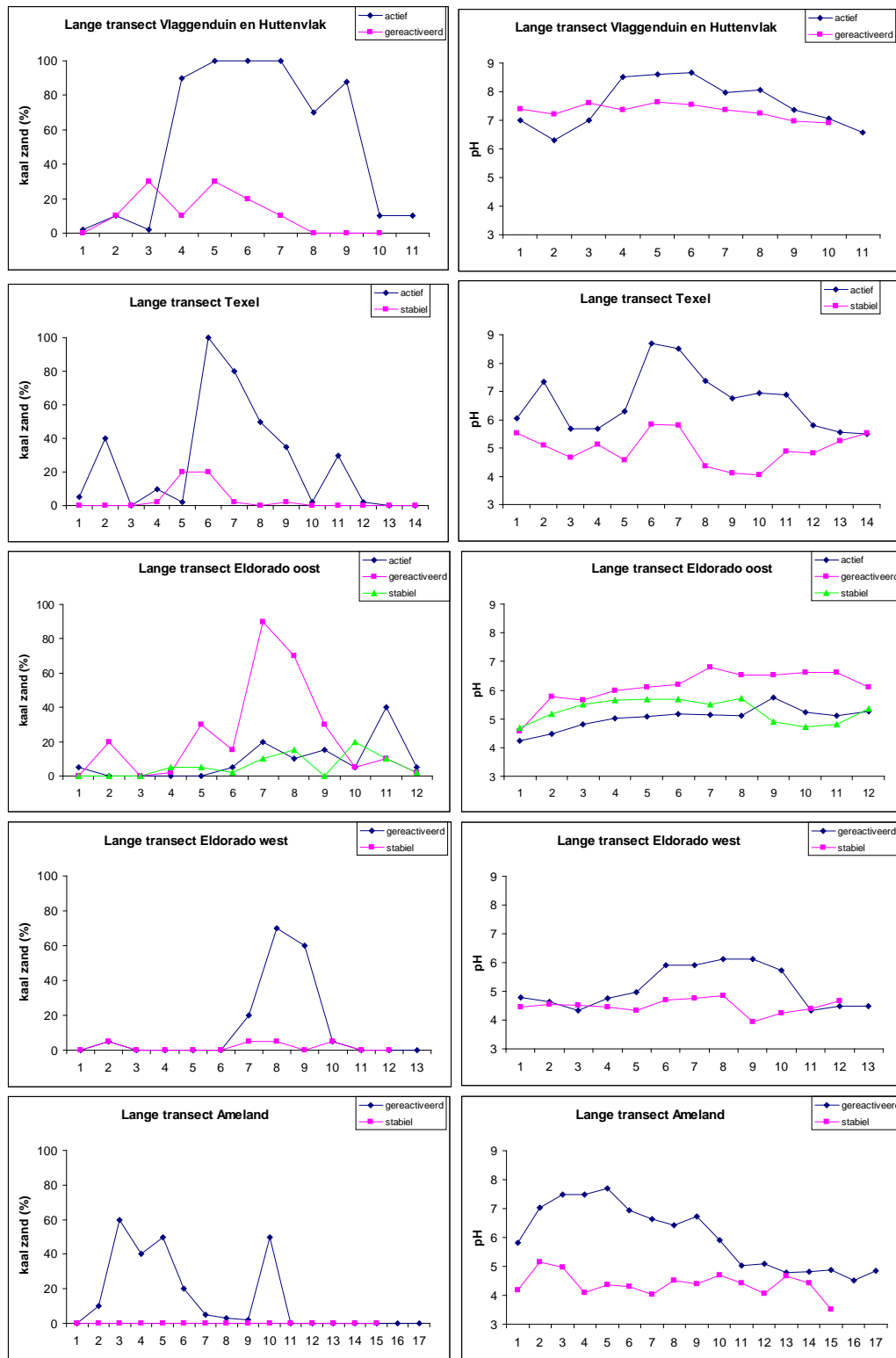
5 % kaal zand aanwezig. In de stabiele delen van Terschelling en Ameland is de bedekking met kaal zand nog lager, behalve in Eldorado oost, waar door vertrapping door runderen en paarden op de steile hellingen relatief veel kaal zand aanwezig is. In de nog actieve of ge(re)activeerde stuifkuilen is de bedekking met kaal zand weer hoger, met in de transecten gemiddelde waarden van 10% in de nog actieve stuifkuil van Eldorado oost, 17% in de gereactiveerde stuifkuil van Eldorado oost, 9% in de gereactiveerde stuifkuil van Eldorado west, en 14% in de geactiveerde stuifkuil van Ameland. Deze patronen komen min of meer overeen met de gridpuntkaartjes, behalve in de zuidoosthoek van de nog actieve stuifkuil van Eldorado oost. Hier is de hoeveelheid kaal zand onderaan de storthelling extra hoog door plagwerkzaamheden in de aangrenzende duinvallei.

De pH van de bodem wordt in de eerste plaats bepaald door de kalkrijkdom van het gebied (Figuur 9-3 en Figuur 9-4). Zo ligt de pH in grote delen van het gebied rond de 7.5 in Vlaggenduin, 7 in Huttenvlak, 5.5 op Texel, 5 in Eldorado oost en 4.5 in Eldorado west en Ameland (Figuur 9-6). De maximum pH verschilt veel minder tussen gebieden, en ligt rond de 8 in de meeste gebieden. De maximum pH bedraagt 8.7 in zowel Vlaggenduin als Texel, maar is ook 8.1 in Huttenvlak en 7.7 op Ameland. Alleen in Eldorado oost en west is de huidige maximum pH vrij laag, met waarden van respectievelijk 6.8 en 6.1. Dit is lager dan in 1995, toen de maximumwaarden in dit gebied opliepen tot 8.6 (Kooijman et al. 2005).

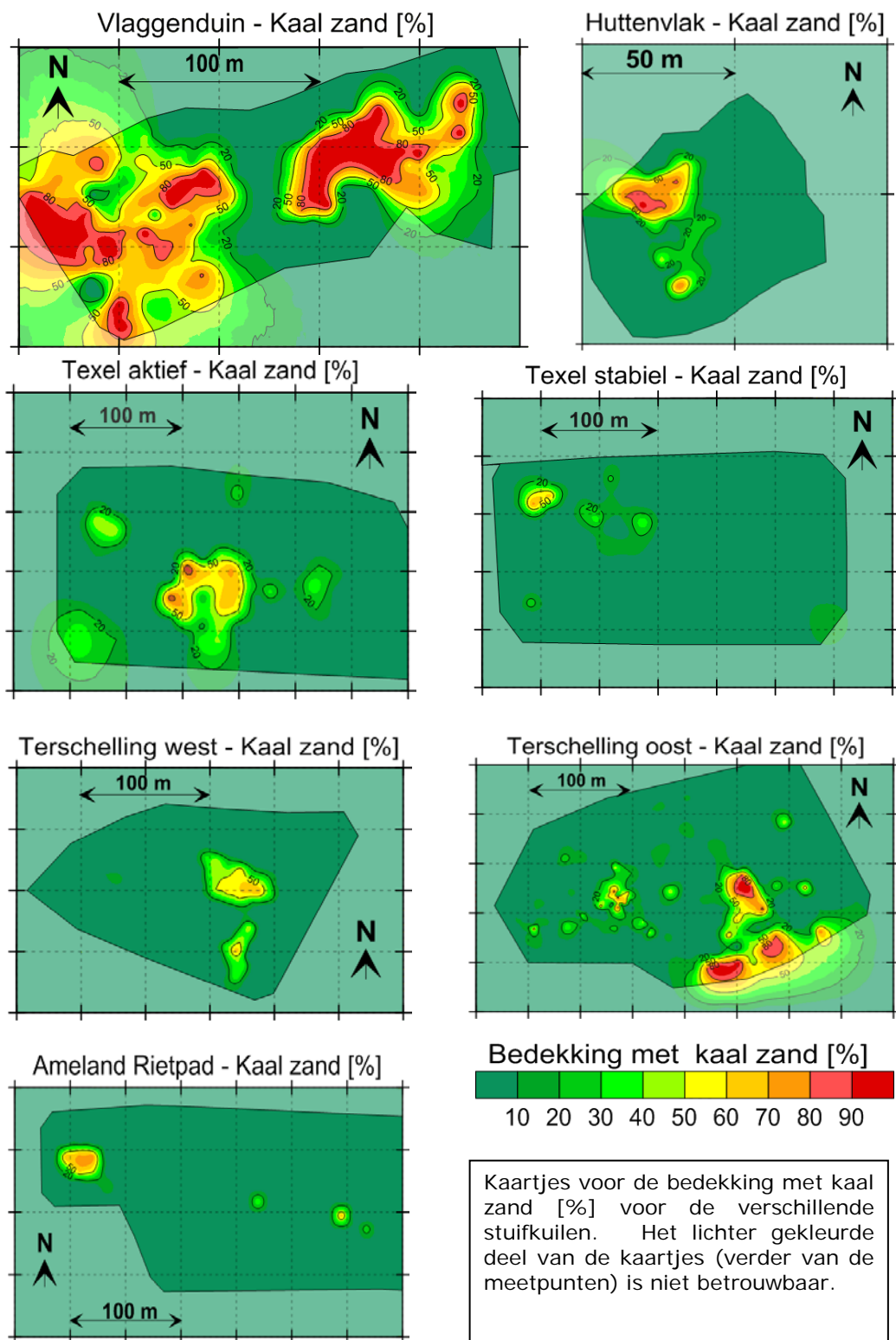


Figuur 9-3. De hoeveelheid kaal zand en de pH van de bodem in relatief actieve en stabiele transecten in vijf duingebieden. HV-VD = Huttenvlak/Vlaggenduin, ED = Eldorado. De waarden zijn gemiddelden + standaarddeviaties (n = 19-31).

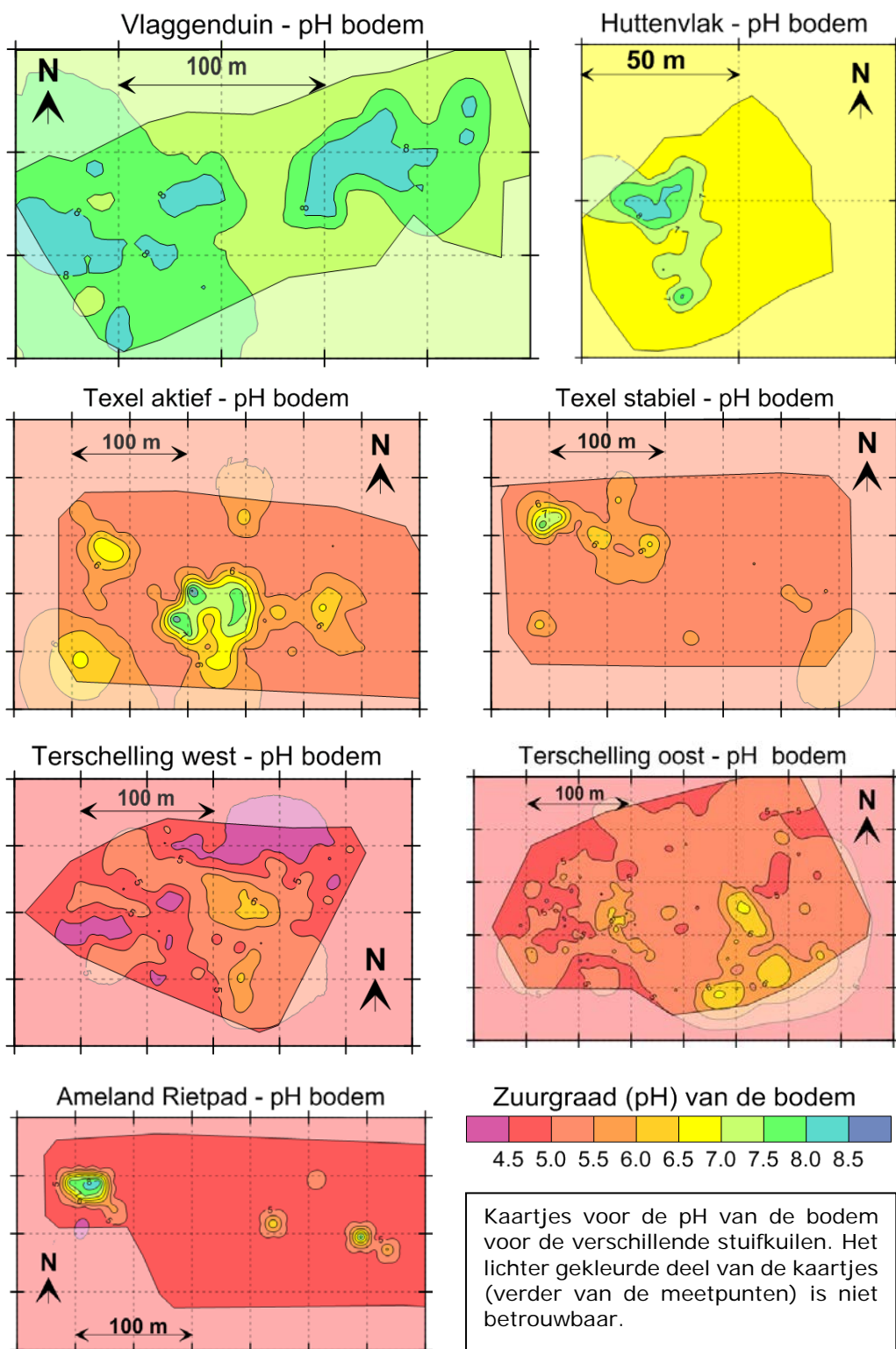
Verstuiving heeft dan ook een duidelijk effect op de pH, naast de kalkrijkdom van het moedermateriaal. Er is een significante correlatie tussen kaal zand en de pH ($R^2 = 0.51$), en binnen de transecten is er duidelijk verschil tussen monsterpunten met veel kaal zand en meer gestabiliseerde punten. Gemiddeld is de pH in eolisch actieve gebieden 0.7 pH-eenheden hoger dan in meer stabiele delen, hoewel het verschil ook groter kan zijn, met name op de Waddeneilanden. In de kalkrijke duinen is een verhoging van de pH van 7.4 (Huttenvlak) naar 7.9 (Vlaggenduin) wellicht minder belangrijk, omdat de bodem al kalkrijk is, en ook dan stevig wordt gebufferd door de oplossing van kalk. Wel zorgt verstuiving ervoor dat de bodem ook kalkrijk blijft. In de kalkarme duinen van de Waddeneilanden vindt buffering van de pH echter plaats door uitwisseling van basische kationen als Ca^{2+} aan het adsorptiecomplex. Dit buffermechanisme is veel gevoeliger voor verzuring, en het is belangrijk dat dit van tijd tot tijd wordt opgeladen door verstuiving. In de stabiele gebieden varieerde de gemiddelde pH van 4.4 op Ameland, 4.5 in Eldorado west en 5.1 op Texel tot 5.3 in de gestabiliseerde stuifkuil van Eldorado oost. In de transecten door de nog steeds actieve stuifkuil van Texel was de pH toegenomen 6.5. In de actief gebleven stuifkuil van Eldorado oost was de gemiddelde pH met 5.1 echter niet veel hoger dan in de stabiele gebieden, mogelijk omdat de verstuivingsactiviteit niet heel sterk meer is. In de ge(re)activeerde gebieden van Terschelling en Ameland was de gemiddelde pH ook 25 jaar na de ingreep hoger dan in de stabiele gebieden, met een toename van 4.4 naar 5.0 in Eldorado west, van 5.3 naar 5.9 in Eldorado oost, en van 4.4 naar 6.0 in Ameland.



Figuur 9-4. De hoeveelheid kaal zand en de pH van de bodem (0-5 cm) in de lange transecten van de verschillende stuifkuilgebieden.



Figuur 9-5. De ruimtelijke verdeling van kaal zand aan de oppervlakte in verschillende stuifkuilgebieden. In Vlaggenduin breiden de stuifkuilen zich nu uit. In Huttenvlak zijn de stuifkuilen gereactiveerd in 1991, maar al snel daarna gestabiliseerd. In Texel zijn de stuifkuilen nog steeds actief en is geen beheer toegepast. In Terschelling (Eldorado) west ligt de in 1991 gereactiveerde stuifkuil aan de oostkant van het kaartje, en de stabiele kuil aan de westkant. In Terschelling (Eldorado) oost ligt de stabiele kuil het meest in het oosten van het kaartje, de actief gebleven kuil in het midden en de in 1991 gereactiveerde kuil in het westen. Op Ameland ligt de in 1992 geactiveerde kuil in het westen van het kaartje, en de stabiele in het oosten.

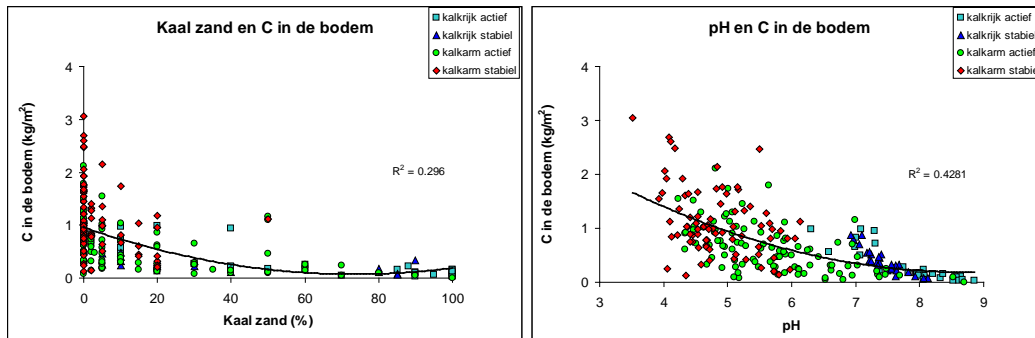


Figuur 9-6. De ruimtelijke verdeling van de pH van de bodem (0-5 cm) in verschillende stuifkuilgebieden. In Vlaggenduin breiden de stuifkuilen zich nu uit. In Huttenvlak zijn de stuifkuilen gereactiveerd in 1991, maar al snel daarna gestabiliseerd. In Texel zijn de stuifkuilen nog steeds actief en is geen beheer toegepast. In Terschelling (Eldordao) west ligt de in 1991 gereactiveerde stuifkuil aan de oostkant van het kaartje, en de stabiele kuil aan de westkant. In Terschelling (Eldorado) oost ligt de stabiele kuil het meest in het oosten van het kaartje, de actief gebleven kuil in het midden en de in 1991 gereactiveerde kuil in het westen. Op Ameland ligt de in 1992 geactiveerde kuil in het westen van het kaartje, en de stabiele in het oosten.

9.4.2 Koolstof en stikstof

De hoeveelheid koolstof in de bodem wordt significant beïnvloed door de hoeveelheid kaal zand (Figuur 9-7). De hoeveelheid koolstof in de bovenste 5 cm van de bodem nam dan ook significant toe van eolisch actieve naar stabiele gebieden (Figuur 9-8 en Figuur 9-9), en is gemiddeld bijna twee keer zo hoog. Dit patroon is voor een deel terug te zien in de ruimtelijke verdeling van de dikte van de Ah, die lager is in de buurt van eolisch actieve delen van het gebied (Figuur 9-10).

Figuur 9-7. Relaties tussen kaal zand (links) en pH (rechts) met de hoeveelheid C in de bovenste 5 cm van de bodem (kg m^{-2}). Beide correlaties zijn significant ($p < 0.05$).

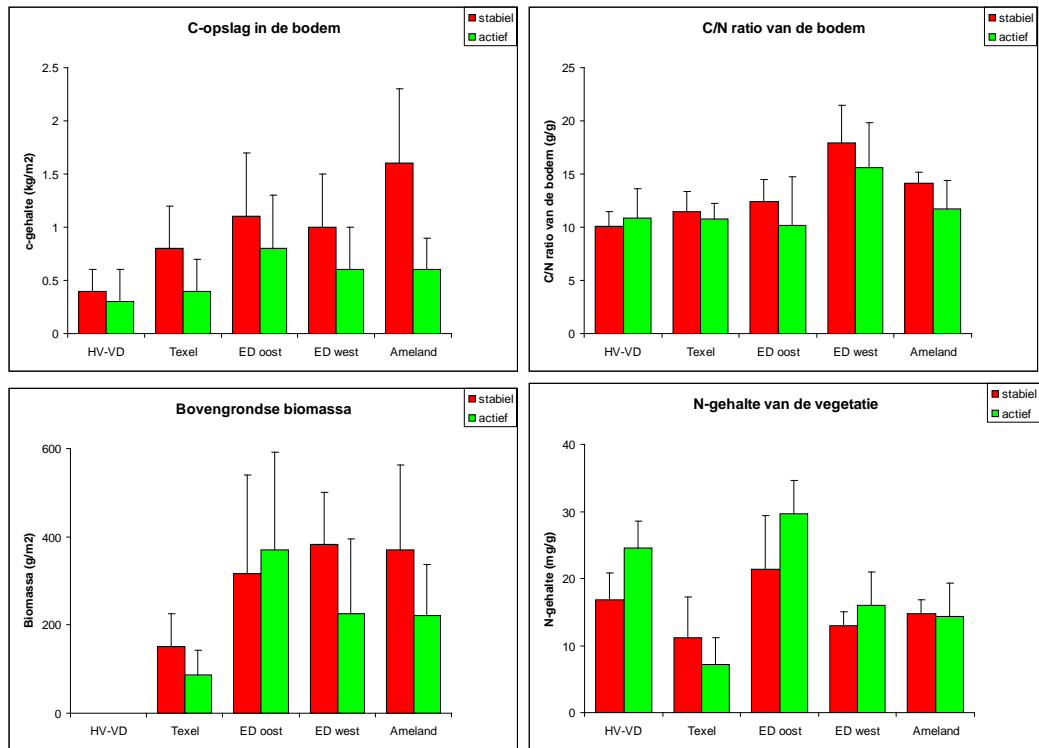


Behalve met kaal zand is er een significant verband met pH. De hoeveelheid koolstof in de bovenste 5 cm van de bodem was significant lager in kalkrijke dan kalkarme locaties, vooral in de relatief stabiele gebieden. Het verschil kan kleiner zijn als ook de diepere lagen in beschouwing worden genomen, maar die zijn niet gemeten. In Aggenbach et al. (2017) bereikten zowel kalkrijke als kalkarme bodems op den duur na stabilisatie een C-voorraad van 2.1 kg m^{-2} in de bovenste 15 cm. Het verschil in C-gehalte van de bovengrond hangt waarschijnlijk voor een groot deel samen met de afbraaksnelheid, die hoger is in kalkrijke dan kalkarme duinen (Kooijman en Besse 2002). Ook kan verschil in ouderdom van de gebieden een rol spelen. In het relatief 'stabiele' gebied in de kalkrijke duinen (Huttenvlak) zijn de stuifkuilen in 1991 gereactiveerd, wat de bodem destijds heeft verjongd, terwijl de stabiele delen in de kalkarme duinen al langere tijd stabiel zijn, en in Eldorado oost en west al in 1979 niet meer actief.

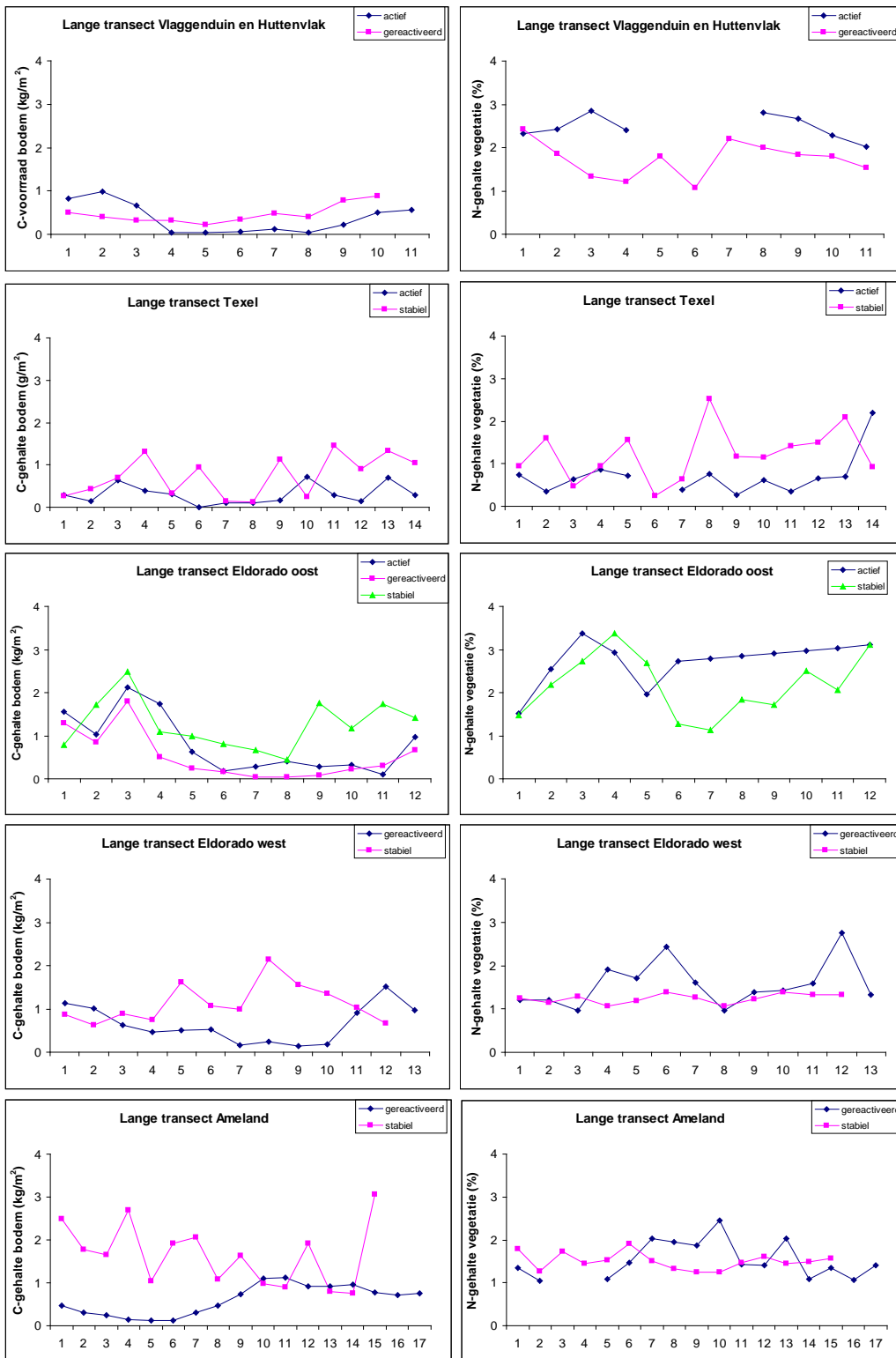
Ook de C:N ratio van de bodem wordt significant beïnvloed door verstuiwing, met name in de kalkarme gebieden. De waarden waren lager in eolisch actieve dan in gestabiliseerde gebieden. De C:N ratio van de bodem was vooral hoog in Eldorado west, waarschijnlijk als gevolg van de dominantie van Kraaiheide.

De bovengrondse biomassa is alleen op de Waddeneilanden gemeten en was significant hoger in eolisch actieve gebieden, hoewel dit niet geldt voor Eldorado oost. Hoewel de monsters wel allemaal in min of meer dezelfde periode zijn genomen, was de bovengrondse biomassa op Texel erg laag, mogelijk als gevolg van het koude voorjaar in 2017. In Eldorado west en Ameland was de biomassa in de stabiele gebieden relatief hoog als gevolg van de dominantie van Kraaiheide of Zandzegge.

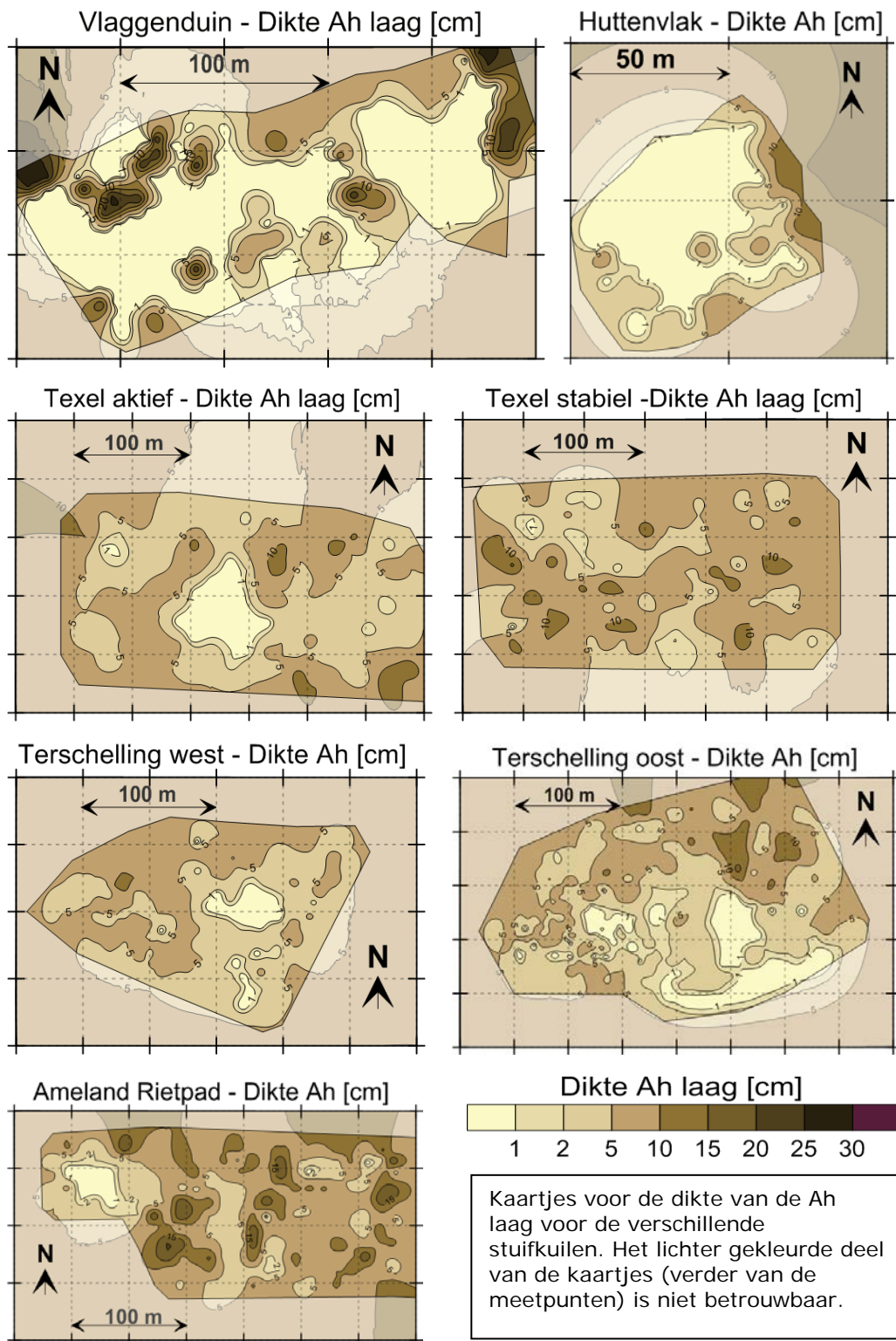
Het N-gehalte van de vegetatie was over het geheel genomen ook significant hoger in eolisch actieve gebieden, vooral in Vlaggenduin en op Terschelling. Er is echter geen verband tussen het N-gehalte van de vegetatie en de hoeveelheid kaal zand ($R^2 = 0.00$) of de pH van de bodem ($R^2 = 0.01$). Op Texel is het N-gehalte van de vegetatie juist lager in het meer actieve deel van het gebied, en sowieso relatief laag, met een gemiddelde waarde van 7.2 en 11.2 mg g^{-1} voor respectievelijk de actieve en stabiele gebieden. De lage N-gehalten van Texel komen tot op zekere hoogte overeen met de waarden voor initiële verstuiwingsvegetaties gemeten in 1995, van 11.2 mg g^{-1} voor Huttenvlak en 9.1 mg g^{-1} voor Eldorado (Kooijman et al. 2005), en zou kunnen wijzen op N-limitatie als gevolg van de hoge verstuiwingsactiviteit. In het eolisch meest actieve gebied zijn de N-gehalten van de vegetatie met 24.5 mg g^{-1} echter hoger dan in de meeste andere gebieden.



Figuur 9-8: Organische stof en nutriënten in bodem en vegetatie in relatief actieve en stabiele transecten in vijf duingebieden. HV-VD = Huttenvlak/Vlaggenduin, ED = Eldorado. De waarden zijn gemiddelden + standaarddeviaties (n = 19-31).



Figuur 9-9: De hoeveelheid C in de bodem (kg m^{-2} in de bovenste 5 cm) en het N-gehalte van de bovengrondse vegetatie (%) in de lange transecten van de verschillende stuifkuilgebieden. Bij ontbrekende waarden was er geen vegetatie aanwezig, maar alleen kaal zand.



Figuur 9-10. De ruimtelijke verdeling van de dikte van de Ah (cm) in verschillende stuifkuilgebieden. In Vlaggenduin breiden de stuifkuilen zich nu uit. In Huttenvlak zijn de stuifkuilen gereactiveerd in 1991, maar al snel daarna gestabiliseerd. In Texel zijn de stuifkuilen nog steeds actief en is geen beheer toegepast. In Terschelling (Eldordao) west ligt de in 1991 gereactiveerde stuifkuil aan de oostkant van het kaartje, en de stabiele kuil aan de westkant. In Terschelling (Eldorado) oost ligt de stabiele kuil het meest in het oosten van het kaartje, de actief gebleven kuil in het midden en de in 1991 gereactiveerde kuil in het westen. Op Ameland ligt de in 1992 geactiveerde kuil in het westen van het kaartje, en de stabiele in het oosten.

9.4.3 Soortensamenstelling van de vegetatie

De invloed van verstuiving op bodemeigenschappen als de bedekking met kaal zand, de pH en de C-voorraad in de bovengrond werkt ten dele door in de soortensamenstelling van de vegetatie. Alle vegetatieparameters werden significant beïnvloed door verschillen tussen gebieden, behalve de bedekking van de moslaag (Tabel 9-2). Verhoogde eolische activiteit is vooral van invloed op de totale bedekking en de bedekking van de kruidlaag als geheel en hoge grassen afzonderlijk. Ook de bedekking met doelsoorten werd beïnvloed door verstuiving, alsmede het aantal doelsoorten, pioniersoorten en korstmossen. Wel vertonen vrijwel alle vegetatieparameters een interactie met gebied, wat wil zeggen dat verhoogde eolische activiteit in het ene gebied anders uitpakt dan in het andere.

Tabel 9-2. Statistische analyse van verschillen in vegetatie tussen gebieden (Vlaggenduin/Huttenvlak, Texel, Eldorado oost, Eldorado west en Ameland) en in eolische activiteit (relatief actief of relatief stabiel). Significante verschillen zijn weergegeven met hun overschrijdskans; ns = niet significant ($p > 0.05$).

	Gebied	Eolische activiteit	Gebied*activiteit
Totale bedekking (%)	0.0001	0.0001	0.005
Bedekking struiklaag (%)	0.0001	ns	0.0001
Bedekking kruidlaag (%)	0.0001	0.0001	0.0001
Bedekking kleine grassen (%)	0.0001	ns	0.023
Bedekking hoge grasachtigen (%)	0.0001	0.0001	0.0001
Bedekking kruiden (%)	0.0001	ns	ns
Bedekking mossen (%)	ns	ns	0.0001
Bedekking korstmossen (%)	0.0001	ns	ns
Bedekking pioniersoorten (%)	0.0001	ns	0.0001
Bedekking doelsoorten (%)	0.0003	0.009	ns
Totaal aantal plantensoorten	0.0001	ns	0.005
Aantal vaatplanten	0.0001	ns	0.002
Aantal mossoorten	0.0001	ns	ns
Aantal korstmossen	0.0001	0.047	ns
Aantal pioniersoorten	0.0001	0.004	0.002
Aantal doelsoorten	0.0001	0.006	0.005

Bedekking van verschillende lagen

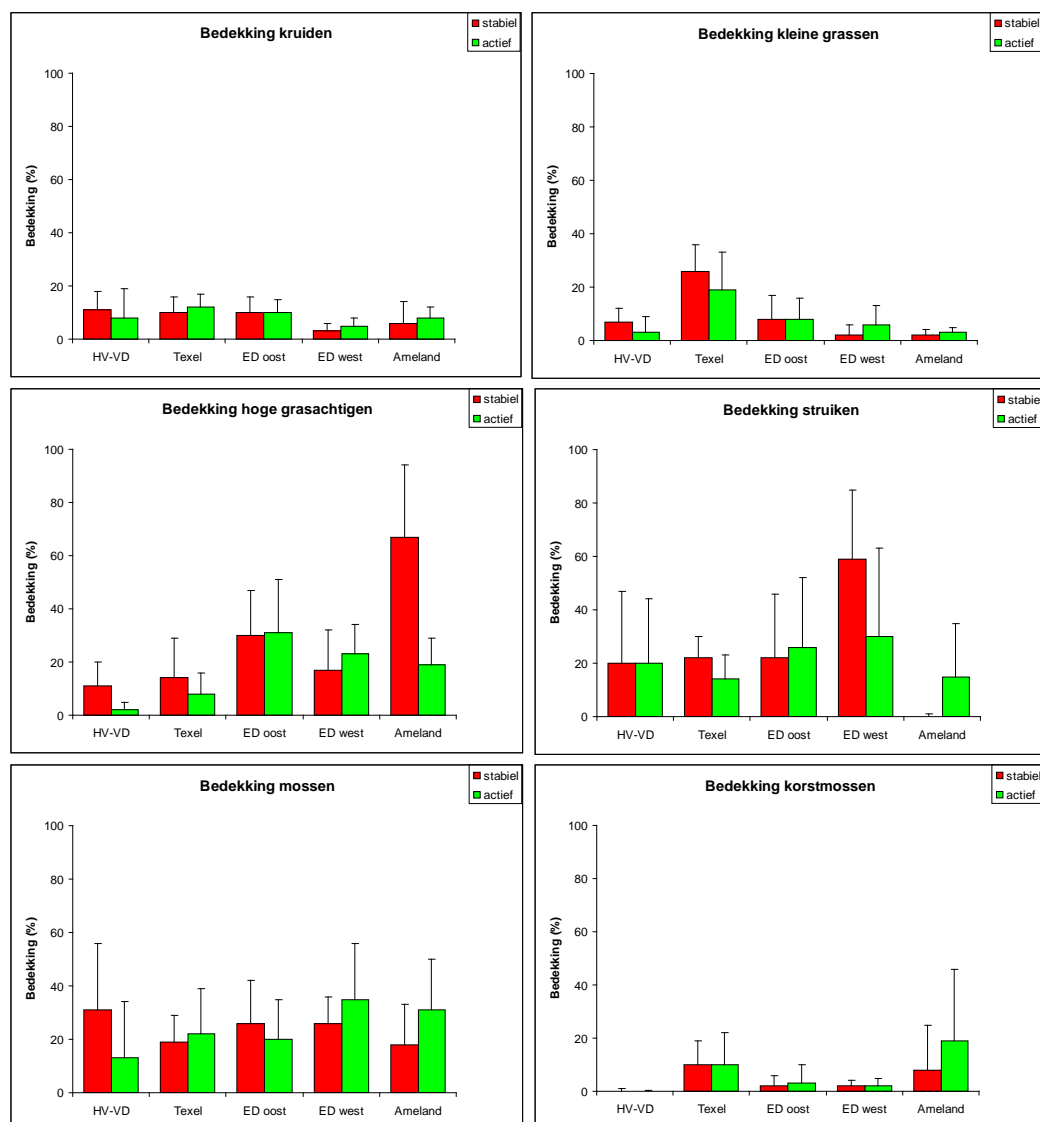
De bedekking van de kruidlaag als geheel was significant lager in Vlaggenduin/Huttenvlak en Eldorado west deels als gevolg van de hoge verstuivingsactiviteit dan wel dominantie van Kraaiheide, die tot de struiken behoort. Ook had de kruidlaag een hogere bedekking in de meer stabiele gebieden. Binnen de kruidlaag was de bedekking van kruiden en kleine grassen alleen verschillend tussen gebieden (Figuur 9-11). De kruidenbedekking was relatief laag in Eldorado west als gevolg van de dominantie van Kraaiheide, en de bedekking van kleine grassen relatief hoog op Texel door het veelvuldig voorkomen van Buntgras en Schapengras (Tabel 9-3). Hoge grasachtigen, waaronder Zandzegge waren vooral dominant in Eldorado oost en op Ameland, en in het laatste gebied vooral in de stabiele, zwaar vergraste delen van het gebied. In het geactiveerde deel van het gebied was Zandzegge veel minder dominant.

De bedekking van de moslaag vertoonde geen algemene verschillen tussen gebieden of eolische activiteit, maar wel een interactie tussen beide factoren. De bedekking van de moslaag nam significant af met verstuiving in Vlaggenduin door de grote hoeveelheid stuivend zand, maar nam toe in de actieve delen van Eldorado west en Ameland. De bedekking van de korstmossen verschilde alleen tussen gebieden, en was significant hoger op Texel en Ameland.

Tabel 9-3. Soortensamenstelling van de vaatplantenvegetatie in Huttenvlak (Hut), Vlaggeduin (Vlag), texel (Tx), Eldorado oost (Eo), Eldorado west (Ew) en Ameland (Am), in relatief stabiele (S) en actieve (A) delen van het gebied. Eo A1 = actief gebleven stuifkuil in Eldorado oost; Eo A2 = gereactiveerde stuifkuil in Eldorado oost. De in een bepaald gebied aanwezige soorten zijn weergegeven met hun frequentie (%). Doelsoorten zijn aangegeven met *. Weinig voorkomende of niet-karakteristieke soorten zijn weggelaten.

	Hut S	Vlag A	Tx S	Tx A	Eo S	Eo A1	Eo A2	Ew S	Ew A	Am S	Am A
	n = 27	n = 31	n = 20	n = 20	n = 19	n = 19	n = 20	n = 19	n = 20	n = 20	n = 21
Vaatplanten											
<i>Festuca rubra</i>	89	32	70	55	-	16	30	5	5	85	71
<i>Koeleria macrantha*</i>	85	10	-	-	-	-	-	-	-	-	19
<i>Cerastium semidecandrum*</i>	74	61	30	60	32	68	60	11	35	5	33
<i>Jacobea vulgaris</i>	70	19	70	65	84	74	60	5	15	-	14
<i>Carex arenaria</i>	67	52	80	80	100	95	90	100	100	100	95
<i>Calamagrostis epigejos</i>	67	10	45	45	53	47	20	84	70	80	52
<i>Galium verum*</i>	63	32	70	85	-	-	-	-	-	40	48
<i>Ammophila arenaria</i>	63	-	40	40	74	79	90	95	90	80	90
<i>Taraxacum officinalis</i>	44	16	55	65	32	63	50	11	20	-	29
<i>Luzula campestris</i>	41	23	95	90	84	84	65	68	75	55	43
<i>Hypochaeris radicata</i>	41	3	95	70	58	79	90	74	90	15	57
<i>Hippophae rhamnoides</i>	41	45	25	25	42	47	60	-	25	5	33
<i>Viola curtisii*</i>	41	10	-	15	37	68	50	5	40	5	10
<i>Phleum arenarium*</i>	41	39	-	15	-	-	10	-	-	-	-
<i>Rubus caesius</i>	37	42	20	10	-	-	-	-	-	-	5
<i>Holcus lanatus</i>	37	-	15	15	84	68	80	42	50	5	14
<i>Veronica arvensis*</i>	33	10	-	-	37	21	10	-	-	-	5
<i>Erodium lebelii*</i>	30	39	-	5	-	-	-	-	-	-	14
<i>Vicia sativa*</i>	22	-	60	55	63	42	40	-	5	-	-
<i>Myosotis ramossissima*</i>	19	32	20	40	63	68	70	11	10	-	24
<i>Geranium molle</i>	15	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Erophila verna*</i>	11	3	10	30	-	-	-	-	-	-	-
<i>Agrostis capillaris</i>	11	-	10	-	-	-	-	-	-	15	10
<i>Veronica officinalis*</i>	7	-	85	70	58	53	55	16	35	75	71
<i>Sedum acre*</i>	7	-	15	25	5	11	5	-	-	-	14
<i>Anchusa officinalis</i>	7	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ononis repens*</i>	7	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Saxifraga tridactylitis*</i>	7	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-
<i>Festuca ovina</i>	4	6	100	75	5	-	-	-	-	-	10
<i>Rumex acetosella</i>	4	3	15	35	32	42	40	42	45	45	57
<i>Sonchus maritimus</i>	4	-	10	20	-	-	5	5	5	-	24
<i>Salix repens</i>	4	3	-	-	37	26	5	-	20	10	19
<i>Silene nutans*</i>	4	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Thymus pulegioides*</i>	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Rosa pimpinellifolia</i>	-	42	100	90	-	-	-	-	-	-	-
<i>Empetrum nigrum</i>	-	-	40	15	16	37	30	89	55	-	-
<i>Carlina vulgaris*</i>	-	-	35	35	-	-	-	-	-	-	-
<i>Viola canina*</i>	-	-	30	35	-	-	-	-	-	-	-
<i>Aira praecox*</i>	-	6	25	30	32	68	45	47	45	20	38
<i>Corynephorus canescens*</i>	-	23	20	60	37	53	50	11	40	5	24
<i>Polypodium vulgare</i>	-	3	10	30	42	58	40	84	60	-	5
<i>Cardamine hirsuta*</i>	-	3	10	35	37	42	30	5	20	-	5
<i>Polygala vulgaris*</i>	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-	-
<i>Jasione montana*</i>	-	-	5	30	21	58	40	11	30	-	-
<i>Euphrasia stricta*</i>	-	-	5	10	-	-	-	-	-	-	-
<i>Leontodon saxatilis*</i>	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-	38
<i>Pyrola rotundifolia</i>	-	-	-	-	-	-	5	-	5	-	-

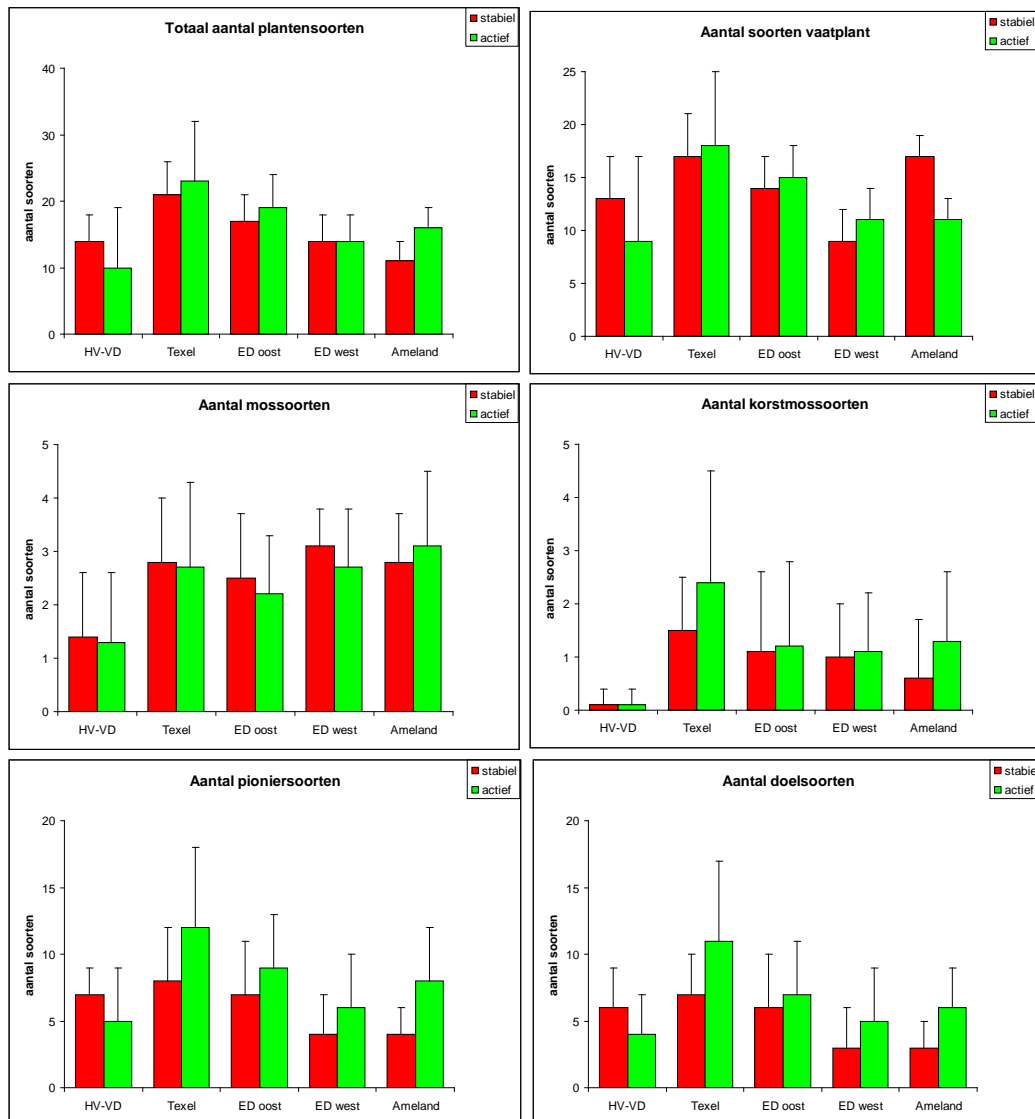
Figuur 9-11. Bedekking van de vegetatie in relatief actieve en stabiele transecten in vijf duingebieden. HV-VD = Huttenvlak/Vlaggenduin, ED = Eldorado. De waarden zijn gemiddelden + standaarddeviaties (n = 19-31).



Aantallen plantensoorten

Het gemiddeld aantal plantensoorten en het aantal vaatplanten verschilde wel tussen gebieden, maar werd niet beïnvloed door verstuiwing (Tabel 9-2, Figuur 9-12). Dit komt ten dele doordat monsterpunten met veel zand vaak weinig plantensoorten bevatten, wat de positieve uitwerking op de pioniervegetatie kan compenseren (Figuur 9-13). Het aantal planten en vaatplanten was significant hoger op Texel en in Eldorado oost. Ook het aantal soorten mos en korstmos verschilde per gebied. Het aantal mossen en korstmossen was significant lager in Vlaggeduin en Huttenvlak, en het aantal korstmossen hoger op Texel. Het aantal korstmossen werd ook significant beïnvloed door verstuiwing, met hogere waarden voor actieve gebieden, vooral op Texel en Ameland. Vooral *Cladonia foliacea* en *C. ciliata* profiteerden van lichte overstuiving (Tabel 9-4).

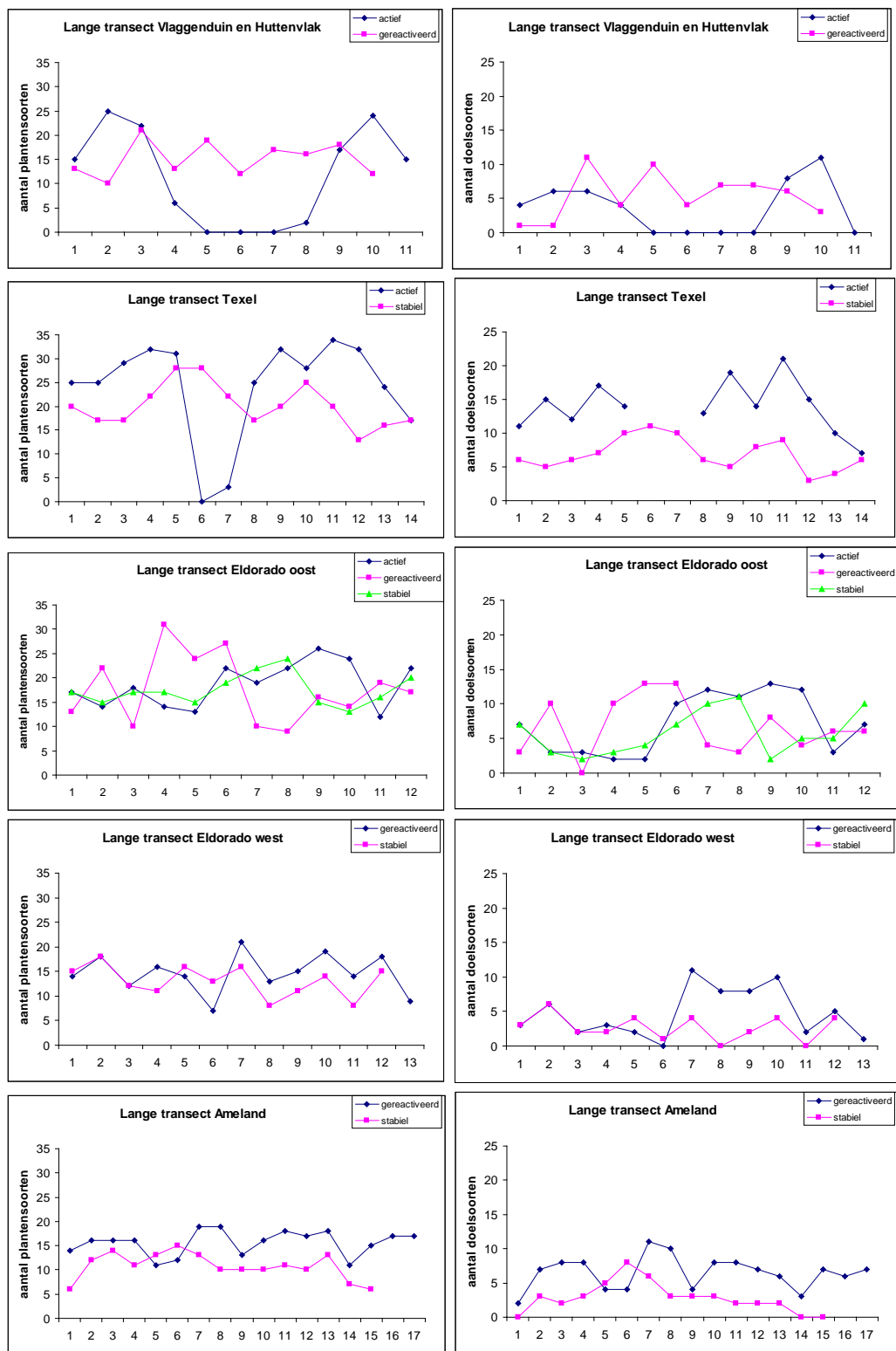
Figuur 9-12. Aantal plantensoorten in verschillende groepen in relatief actieve en stabiele transecten in vijf duingebieden. HV-VD = Huttenvlak/Vlaggenduin, ED = Eldorado. De waarden zijn gemiddelden + standaarddeviaties (n = 19-31).



Pioniersoorten en doelsoorten

Het aantal pioniersoorten verschilde tussen de gebieden, maar werd ook beïnvloed door eolische activiteit (Tabel 9-2). Het aantal pioniersoorten was significant hoger op Texel dan in de andere gebieden, en nam behalve in Vlaggenduin toe in de meer actieve delen van het gebied (Figuur 9-12 en Figuur 9-13). In Vlaggenduin is de grote hoeveelheid stuivend zand een beperkende factor. Ook het aantal doelsoorten, dat bestaat uit pioniersoorten m.u.v. soorten als Helm en Zandzegge en duingraslandsoorten als Ossetong en Grote Tijn, is hoger op Texel dan in de andere gebieden (Tabel 9-3). Het aantal doelsoorten wordt positief beïnvloed door verstuiving, behalve wanneer de activiteit te groot is, zoals in Vlaggenduin.

Figuur 9-13. Het totaal aantal plantensoorten en het aantal doelsoorten in de lange transecten van de verschillende stuifkuilgebieden.



Tabel 9-4. Soortensamenstelling van de mos- en korstmosvegetatie in Huttenvlak (Hut), Vlaggeduin (Vlag), Texel (Tx), Eldorado oost (Eo), Eldorado west (Ew) en Ameland (Am), in relatief stabiele (S) en actieve (A) delen van het gebied. Eo A1 = actief gebleven stuifkuil in Eldorado oost; Eo A2 = gereactiveerde stuifkuil in Eldorado oost. De in een bepaald gebied aanwezige soorten zijn weergegeven met hun frequentie (%). Doelsoorten zijn aangegeven met *. Weinig voorkomende of niet-karakteristieke soorten zijn weggelaten.

	Hut S	Vlag A	Tx S	Tx A	Eo S	Eo A1	Eo A2	Ew S	Ew A	Am S	Am A
	n = 27	n = 31	n = 20	n = 20	n = 19	n = 19	n = 20	n = 19	n = 20	n = 20	n = 21
Mossen en korstmossen											
<i>Hypnum cupressiforme</i>	70	32	100	75	74	84	80	100	80	75	86
<i>Syntrichia ruraliformis*</i>	26	45	10	30	-	-	15	-	-	-	43
<i>Tortella flavescens*</i>	15	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cladonia foliacea*</i>	11	-	25	50	26	47	25	11	30	-	19
<i>Ceratodon purpureus</i>	4	-	15	10	5	16	15	-	5	-	29
<i>Pseudoscleropodium purum</i>	4	6	10	10	21	16	5	11	5	55	24
<i>Brachythecium albicans</i>	4	3	-	-	-	-	-	-	-	-	14
<i>Camptothecium lutescens*</i>	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Ditrichum flexicaule</i>	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Dicranium scoparium</i>	-	3	100	55	74	68	50	89	75	95	52
<i>Cladina portentosa*</i>	-	-	65	35	11	5	5	53	35	35	33
<i>Cladina ciliata*</i>	-	-	35	60	32	53	25	16	10	10	19
<i>Campylopus introflexus</i>	-	-	25	25	11	16	5	32	35	5	5
<i>Cladonia fimbriatula*</i>	-	-	15	20	16	26	10	16	10	-	14
<i>Cladonia furcata*</i>	-	10	10	50	11	11	5	5	10	10	43
<i>Rhytidiadelphus triquetrus*</i>	-	-	10	5	-	-	-	-	-	-	10
<i>Polytrichum juniperinum</i>	-	-	5	40	16	5	5	-	10	10	10
<i>Hypnum jutlandicum</i>	-	-	5	10	11	11	15	74	50	10	5
<i>Peltigera sp.</i>	-	-	-	5	11	11	5	-	10	-	-
<i>Cetraria aculeata*</i>	-	-	-	5	-	5	5	-	-	-	-
<i>Cladonia uncialis*</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-
<i>Hylocomium splendens*</i>	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Racomitrium canescens*</i>	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-
<i>Rhytidiadelphus squarrosus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	29

9.4.4 Relaties tussen soortensamenstelling en abiotische factoren

Verstuiving zorgt voor een substantiële verhoging van de hoeveelheid kaal zand en de pH, en voor een verlaging van de hoeveelheid koolstof en de C:N ratio in de bovengrond. Ook neemt de vaatplantenbiomassa af en het N-gehalte hiervan toe, hoewel hierbij soortafhankelijke verschillen ook een rol spelen. Het gemiddeld aantal plantensoorten in een proefvlak en de bedekking met hoge grassen neemt echter af door verstuiving, omdat gebieden met veel kaal zand weinig soorten bevatten. Verstuiving leidt echter wel tot verhoging van het aantal pioniersoorten, doelsoorten en korstmossen. Ook neemt de bedekking met korstmossen toe

De verschillen in bedekking en soortensamenstelling van de vegetatie tussen de stuifkuilgebieden hangen samen met de genoemde verschillen in kaal zand, pH en de C-voorraad in de bovengrond, hoewel de variatie groot is (Tabel 9-5). Voor de bovengrondse biomassa, de bedekking aan kleine grassen, kruiden en korstmossen en het aantal mossen is de pH de belangrijkste factor, die tot 21% van de variantie kan verklaren.

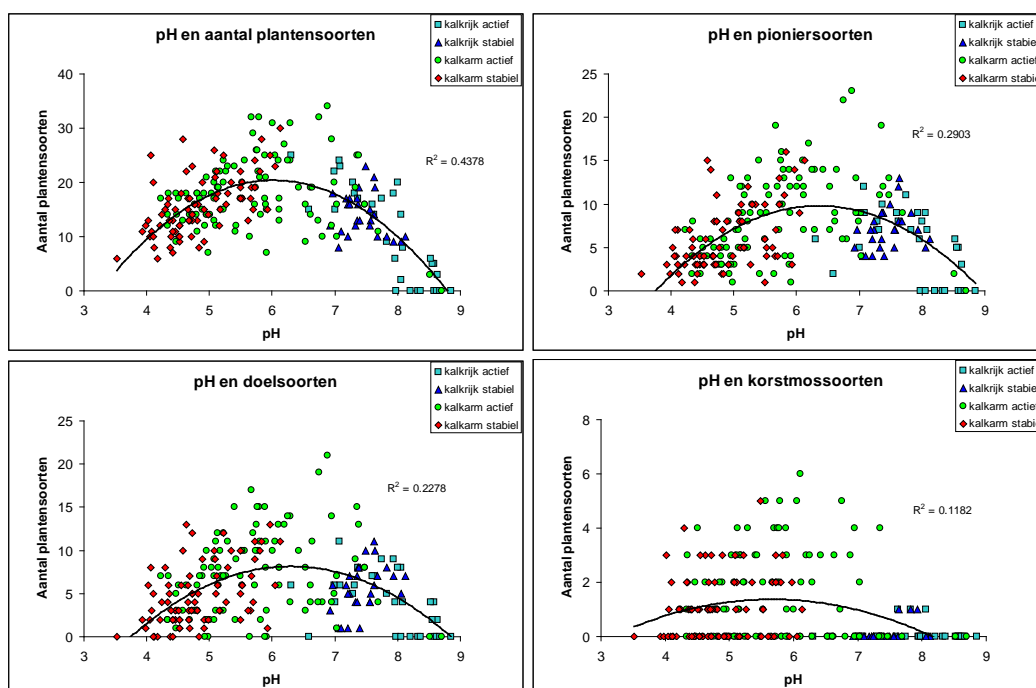
Kaal zand was met name belangrijk voor de bedekking van struiklaag, kruidlaag, moslaag, pioniersoorten en doelsoorten en het totaal aantal plantensoorten en vaatplanten, die tot 24% van de variantie kon verklaren. Voor het totaal aantal soorten was er geen lineair verband met pH, maar wel een optimumcurve (Figuur 9-14). Het optimum ligt rond pH 6, en verrassend genoeg zijn de kalkarme gebieden met verhoogde eolische activiteit hiervoor belangrijker dan de kalkrijke gebieden. De piek in soortenaantal bij pH 6 is deels het gevolg van (te) hoge eolische activiteit in kalkrijke gebieden. Een overmaat aan verstuiving kan leiden tot afname van de biodiversiteit in gebieden met goed ontwikkelde Grijze duinen. Dit wordt behalve in Vlaggeduin bijvoorbeeld ook gezien in het zuidwesten van de Amsterdamse Waterleidingduinen, waar gesloten, soortenrijke duingraslanden min of meer worden opgerold (Mark van Til, mondelinge mededeling). Dit hoeft geen probleem te zijn, maar het vergt wel weer een stabilisatiefase voordat deze overstoven Grijze duinen zich weer kunnen ontwikkelen tot soortenrijke duingraslanden. Daarnaast speelt bij pH 6 het voorkomen van pioniersoorten van zwakker-gebufferde bodem zoals Zandblauwtje een rol, die in kalkrijke duinen niet voorkomen.

De hoeveelheid koolstof in de bovengrond was de belangrijkste factor voor de bedekking met hoge grasachtigen, en voor het aantal korstmossen, pioniersoorten en doelsoorten. Net als voor het totaal aantal plantensoorten was er voor het aantal korstmossen, pioniersoorten en doelsoorten geen significant lineair verband met pH, maar wel een optimumcurve (Figuur 9-14). Voor pioniersoorten en doelsoorten lag de piek rond pH 6.5, en voor korstmossen rond pH 5.5.

Tabel 9-5: Stapsgewijze multiële lineaire regressie met kaal zand, pH en C-voorraad in de bovengrond (kg m⁻²) als onafhankelijke variabelen. Weergegeven zijn de partiele R² waarden voor iedere variabele en de totale R², een maat voor de verklaarde variantie.

	Kaal zand	pH in bovengrond	C in bovengrond	Total R ²
Bovengrondse biomassa (g m ⁻²)	-	0.13	-	0.13
N-gehalte vaatplanten (mg g ⁻¹)	-	-	-	-
Bedekking struiklaag (%)	0.09	-	0.01	0.10
Bedekking kruidlaag (%)	0.24	0.03	-	0.27
Bedekking kleine grassen (%)	0.05	0.08	-	0.13
Bedekking hoge grasachtigen (%)	-	0.03	0.20	0.23
Bedekking kruiden (%)	0.06	0.13	-	0.19
Bedekking mossen (%)	0.21	0.05	0.01	0.27
Bedekking korstmossen (%)	-	0.06	0.01	0.07
Bedekking pioniersoorten (%)	0.07	0.04	-	0.11
Bedekking doelsoorten (%)	0.05	-	0.02	0.07
Totaal aantal plantensoorten	0.18	-	0.09	0.27
Aantal vaatplanten	0.13	0.01	0.11	0.25
Aantal mossoorten	0.03	0.21	0.01	0.25
Aantal korstmossen	0.01	0.05	0.09	0.15
Aantal pioniersoorten	0.04	-	0.11	0.15
Aantal doelsoorten	0.06	-	0.09	0.15

Verrassend genoeg kwam de grootste diversiteit niet voor in de kalkrijke duinen, maar in eolisch actieve kalkarme duinen, zoals in de Nederlanden op Texel. Hier bevatten de proefvlakken gemiddeld 23 plantensoorten in actieve en 21 in gestabiliseerde delen, wat hoger is dan in het zuidwestelijke deel van de Amsterdamse Waterleidingduinen, waar in de kalkrijke delen gemiddeld maximaal 20 soorten voorkwamen, en in de kalkarme delen gemiddeld maximaal 17 (Aggenbach et al. 2017). De hoge aantallen soorten, doelsoorten, pioniersoorten en korstmossen, komen op Texel met name in het eolisch actieve deelgebied voor. Hier zijn de stuifkuilen de laatste decennia steeds enigszins actief gebleven (Figuur 9-15). Het kale of sterk actieve oppervlak bedroeg ca 15% in 1996, 25% in 2000, 15% in 2005, 35% in 2010 en 25% in 2015. De reden voor de constante eolische activiteit is waarschijnlijk de relatief gunstige ligging. De expositie is met WNW gunstiger t.o.v. de nettotransportrichting (WZW) dan op de andere Waddeneilanden, die meer een N-NNW expositie hebben. Ook ligt het gebied met 350 m afstand tot de duinvoet relatief dicht bij zee, wat de verstuivingsactiviteit versterkt. Daarnaast ligt de grote stuifkuil met 20 m boven NAP niet alleen hoog in het landschap, maar ook boven de zeereep. Ook zijn er over de periode 1996-2016 steeds relatief veel konijnen geweest.

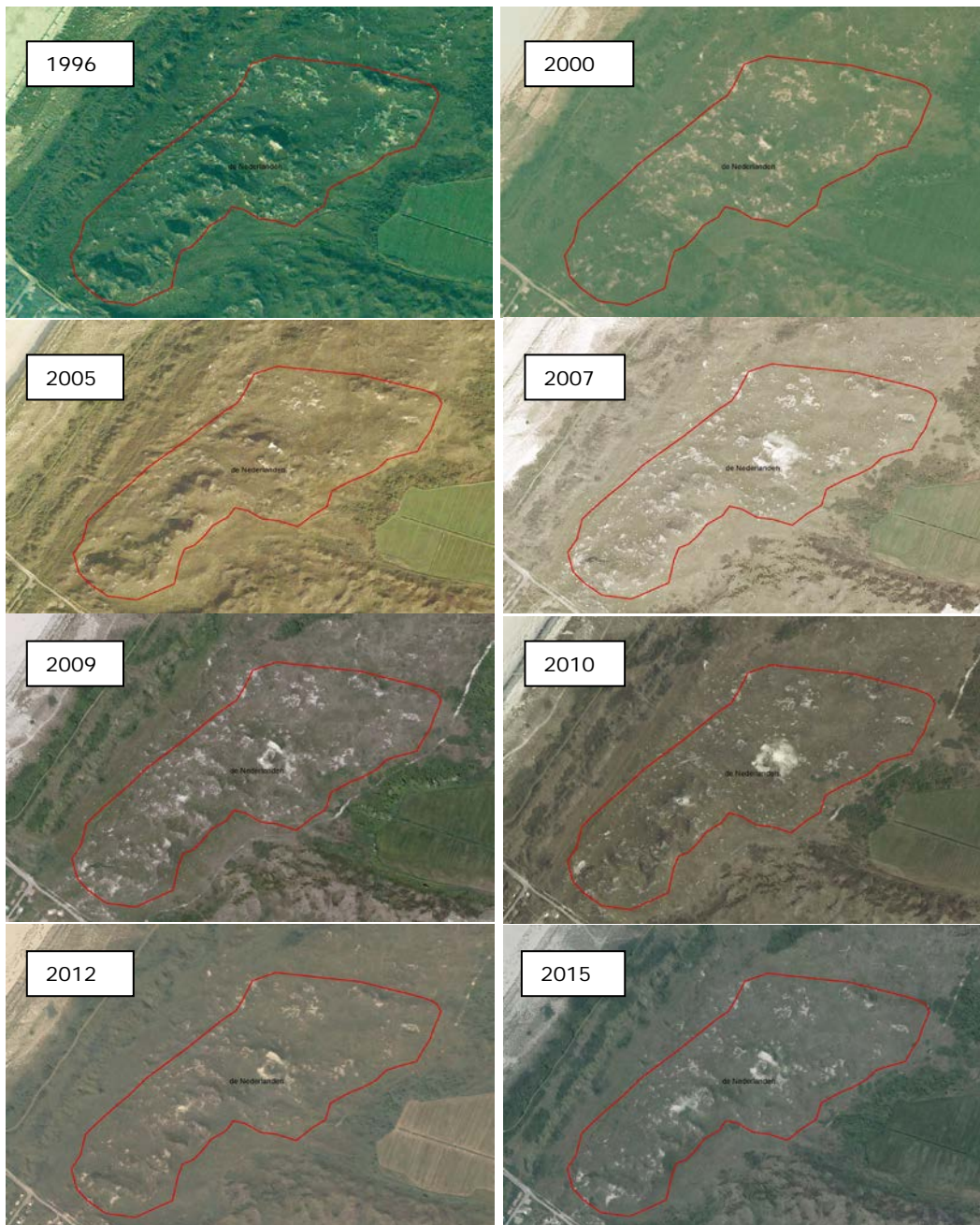


Figuur 9-14: Correlatie tussen pH en totaal aantal plantensoorten, pioniersoorten, doelsoorten en korstmossen. Alle correlaties zijn significant.

Door de min of meer permanente eolische activiteit is de pH van de bodem in het actieve deel van het gebied met gemiddelde waarden van 6.5 significant hoger dan in het stabiele deel met pH 5.1. Door de regelmatige overstuiving blijven ook het organische stofgehalte en de voorraad N in de bodem laag, waardoor de vegetatie N-gelimiteerd blijft, wat te zien is aan de lage N-gehalten van de vegetatie. Hierdoor is er ruimte voor zowel pioniersoorten van kalkhoudend kaal zand, als korstmossen en mossen die een meer gestabiliseerde bodem en iets lagere pH nodig hebben.

In de kalkrijke duinen kan regelmatige overstuiving ook goed uitpakken, zoals op de huidige groeiplaatsen in het Vlaggenduin met Liggend Bergvlas (*Thesium humifusum*; van Haperen et al. 2014). Deze soort komt in Nederland alleen in het Vlaggenduin voor, en lijkt gekoppeld aan oude, humusrijke en kalkrijke duingraslandbodems met regelmatig lichte overstuiving. Liggend Bergvlas wordt echter bedreigd door de sterke spontane uitbreiding van de verstuiving. Op andere plekken in het Vlaggenduin is de soort al onder een dikke laag zand verdwenen.

In het Waddendistrict is de eolische activiteit in veel gebieden veel lager dan in de vastelandsduinen van het Renodunaal district, en duidelijk afgenomen in de periode 1996-2015, vooral op plaatsen met een minder gunstige ligging t.o.v. de WZW wind, op grotere afstand van zee en met een lagere maximumhoogte. Hier is de kans op spontaan herstel van de eolische activiteit veel kleiner. Hier biedt reactivatie van stuifkuilen wellicht een goede kans.



Figuur 9-15: Selectie van luchtfoto's van verschillende jaren voor De Nederlanden op Texel. Het actieve transect ligt in het centrum van de foto langs de grote stuifkuil, en het stabiele transect aan de noordrand van de foto. Te zien is de grote fluctuatie in stuifkuilactiviteit en pioniervegetaties in het actieve gebied. De grote stuifkuil was zeer actief in 2007 en 2010, en de oppervlakte aan pioniervegetatie relatief hoog in 2000, 2007, 2009 en 2015.

9.5 Effecten van (re)activatie na 25 jaar

In dit deel van het onderzoek wordt de ontwikkeling van de stuifkuilen die in 1991 in het kader van EGM in Huttenvlak en Eldorado zijn gereactiveerd nader bekeken. Daarnaast is in 1992 door Rijkswaterstaat op Ameland een kerf in de voormalige zeereep aan de noordwestkant gemaakt, die zich tot een stuifkuil heeft ontwikkeld. De vraag bij dit deel van het onderzoek is hoe de stuifkuilen zich hebben ontwikkeld, maar vooral: wat heeft de reactivatie na 25 jaar opgeleverd?

9.5.1 Luchtfotointerpretatie ge(re)activeerde gebieden

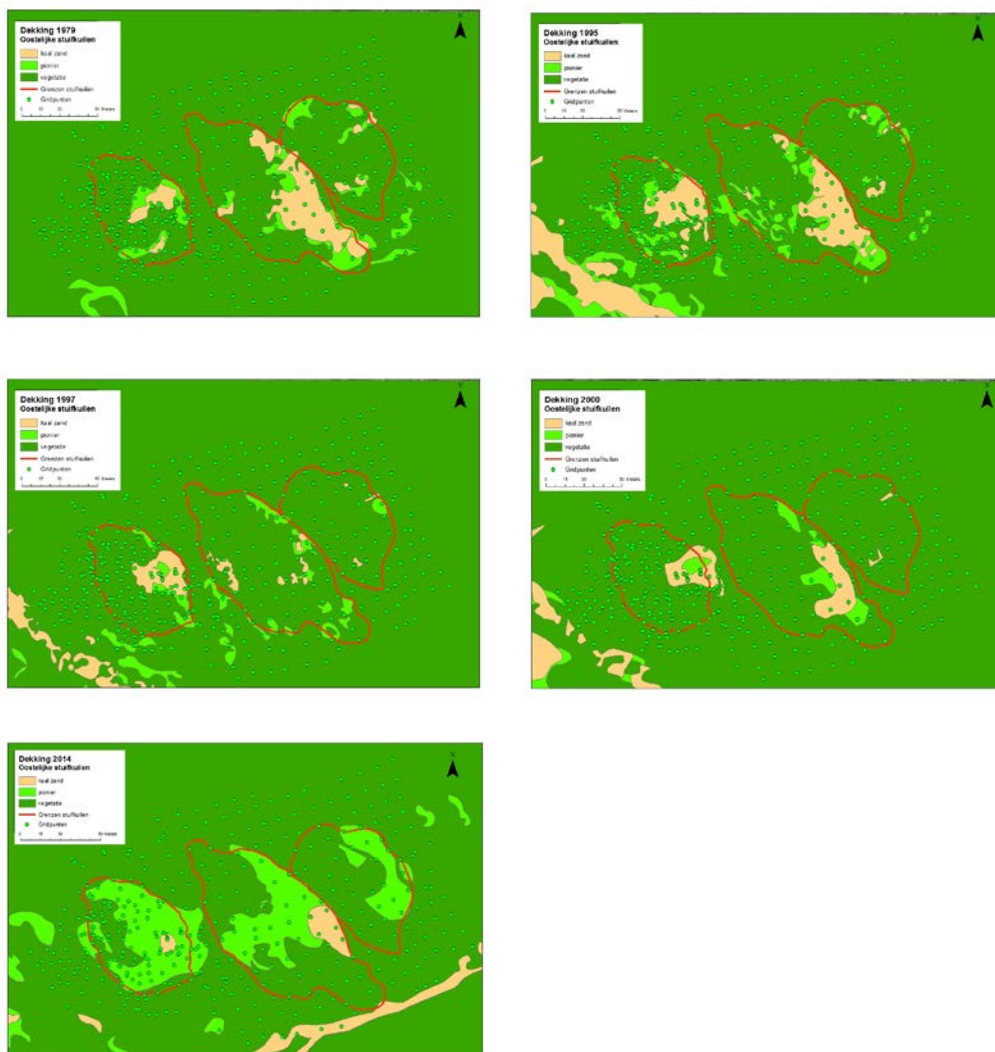
In dit hoofdstuk wordt een luchtfotointerpretatie besproken van de veranderingen in kaal zand en pioniervegetaties na de reactivatie van stuifkuilen in 1991 in Huttenvlak en Eldorado.

Het Huttenvlak bevindt zich in de kalkrijke duinen van ten zuiden van IJmuiden. Het gebied ligt met 1.5 km relatief ver van zee, en is met een maximumhoogte van 11 m relatief laag. De stuifkuilen in het gebied zijn actief geweest tot in de jaren zeventig van de vorige eeuw, gestabiliseerd in de jaren tachtig, en in 1991 weer gereactiveerd (van der Meulen et al. 1996). Voor Huttenvlak zijn goede luchtfoto's pas beschikbaar vanaf 1996, vijf jaar na de ingreep, maar de ontwikkeling van de stuifkuilen is tot 1998 nauwkeurig in het veld in kaart gebracht. In 1998 nam de oppervlakte van de stuifkuilen nog steeds toe, en in 1999 waren de stroozones rond de stuifkuilen in het glooiende deel van het terrein dikker dan in 1994 (Kooijman et al. 2005). In 1996 waren de stuifkuilen dus nog actief. Tussen 1996 en 2015 zijn de stuifkuilen echter geleidelijk dichtgegroeid en is de oppervlakte aan kaal zand netto fors afgenomen (Figuur 9-16). In 1996 bedroeg het oppervlak aan kaal zand in en rond de stuifkuilen nog 947 m², maar in 2015 nog maar 135 m². De afname begon tussen 1996 en 2000, hoewel er tussen 2003 en 2013 een tijdelijke toename aan kaal zand te zien was, net als in andere delen van de Hollandse kust. Ook de pioniervegetatie nam sterk af, van 3818 m² in 1996 naar 2275 m² in 2015.



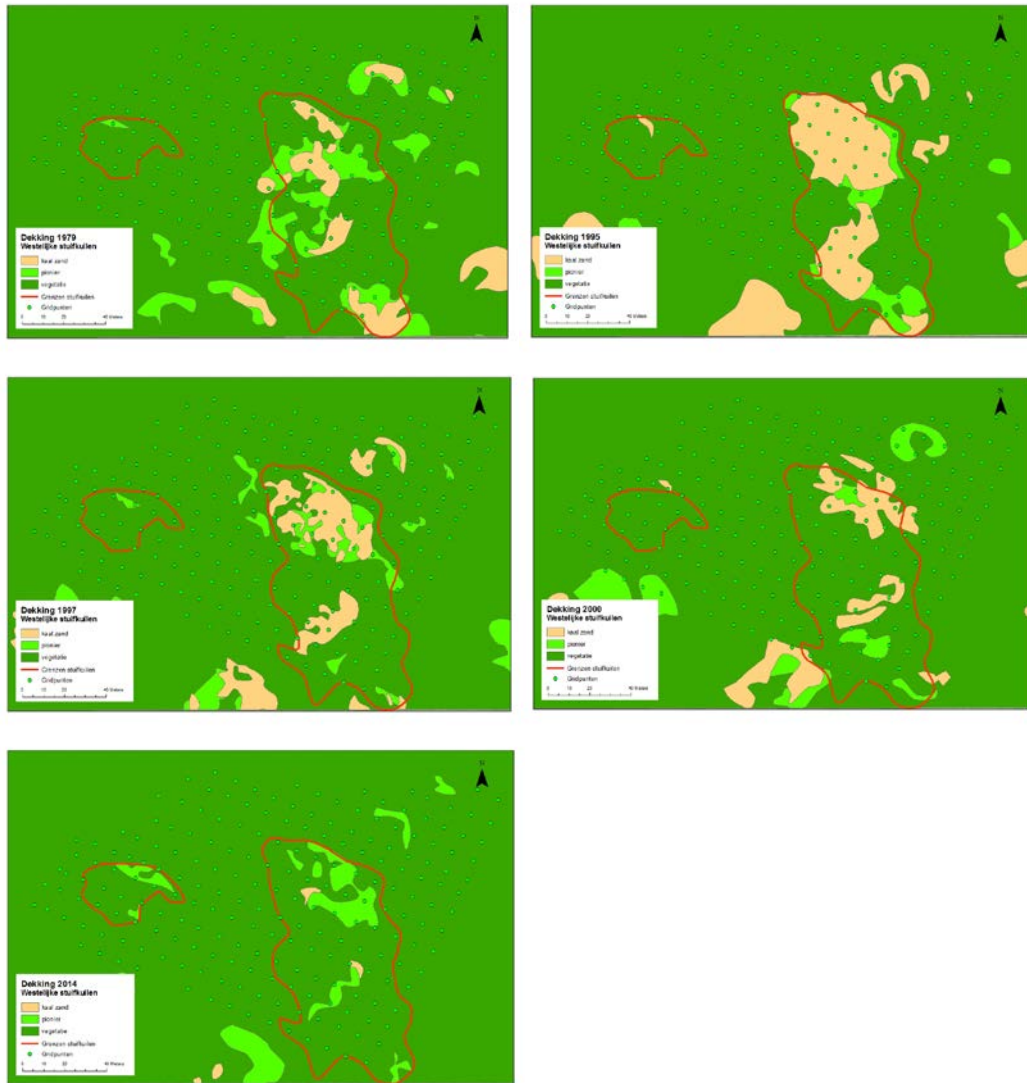
Figuur 9-16: De netto-veranderingen in kaal zand (links) en pioniervegetatie (rechts) tussen 1996 en 2015 in Huttenvlak, waar in 1991 stuifkuilen zijn gereactiveerd. Rood = voorheen kaal zand of pioniervegetatie; zachtgeel = nog steeds kaal zand of pioniervegetatie; groen = nu kaal zand of pioniervegetatie.

Eldorado is een stuifkuilgebied op Terschelling. Het is gelegen op gemiddeld ca 550 m afstand van de zee, en behoorde in 1881 nog tot de zeereep. Het gebied is na de verhelving van de Noordvaarder met het eiland gescheiden geraakt van de zee door de ontwikkeling van een nieuwe zeereep. Het gebied was tot 1945 sterk in verstuing, maar is tussen 1945 en 1990 geleidelijk gestabiliseerd. Tot 1980 is een stringent vastleggingsbeleid gevoerd. In 1991 zijn in het kader van EGM een aantal stuifkuilen gereactiveerd. De ontwikkelingen hiervan zijn gevolgd tot 1999 (van der Meulen et al. 1996; Kooijman et al. 2005). Verder is in 2006 een begrazingsbeheer ingevoerd met galloway runderen en paarden, om de vergrassing met Helm tegen te gaan. In 2016 zijn twee deelgebieden opnieuw onderzocht: Eldorado oost (kuil 11, 12 en 13), gelegen op ca 500 m van de duinvoet, en west (kuil 3), gelegen op ca 700 m van de duinvoet. In het hele gebied van Eldorado nam het kale en zeer actieve oppervlak af van ca 25% in 1996, 15% in 2000-2010 en 7.5% in 2015.



Figuur 9-17. Veranderingen in de bedekking met kaal zand en pioniervegetatie in Eldorado oost op Terschelling. De meest oostelijke kuil was al in 1979 gestabiliseerd, de middelste is steeds actief gebleven en de meest westelijke is in 1991 gereactiveerd.

In het deelgebied Eldorado oost is in 1991 de meest westelijke van de drie stuifkuilen (kuil 11) gereactiveerd (Figuur 9-17). De middelste kuil (kuil 12) was in 1991 nog steeds actief, en de meest oostelijke (kuil 13) was al in die tijd gestabiliseerd. In 1979 bedroeg het oppervlak aan kaal zand in dit deelgebied 3492 m², maar dit was in 1995 vrijwel verdubbeld tot 7027 m². In 2014 was de hoeveelheid kaal zand echter weer afgenomen tot 2988 m². In de luchtfotoïnterpretatie wordt duidelijk dat de stabiele oostelijke kuil al in 1979 gestabiliseerd en begroeid was, en de hoeveelheid kaal zand en pioniervegetatie zeer gering. Veranderingen in kaal zand zijn er in de stabiele kuil over de periode 1979-2008 nauwelijks geweest. Wel is tussen 2008 en 2014 de pioniervegetatie sterk toegenomen als gevolg van het opruimen van de vergrassing door de runderen en paarden. De in 1991 nog actieve kuil is tussen 1995 en 2014 geleidelijk gestabiliseerd, hoewel hier nog steeds een relatief actieve plek aanwezig is. Ook nam de hoeveelheid kaal zand in de actief gebleven kuil tijdelijk toe tussen 1997 en 2008. In de actief gebleven kuil is een toename te zien in de pioniervegetatie tussen 2008 en 2014, als gevolg van begrazing. De in 1991 gereactiveerde kuil is intussen ook grotendeels gestabiliseerd, met name na 2008. Ook hier is echter een toename van de pioniervegetatie te zien, deels als gevolg van de stabilisatie van kaal zand, en deels als gevolg van de begrazing.



Figuur 9-18: Veranderingen in kaal zand en pioniervegetatie in Terschelling Eldorado west. De westelijke kuil is al lange tijd stabiel, en de oostelijke in 1991 gereactiveerd.

Ook in Eldorado west was de stabiele kuil in het westen van het gebied al in 1979 gestabiliseerd (Figuur 9-18). Tussen 1979 en 1995 trad als gevolg van de reactivatie meer dan een verdubbeling op van de hoeveelheid kaal zand, van 1667 m² in 1979 naar 4787 m² in 1995. Kaal zand nam na de reactivatie echter sterk af, tot slechts 101 m² in 2014. De stabilisering van de gereactiveerde stuifkuilen in het westelijke gebied is daarmee sterker dan in Eldorado oost, mogelijk als gevolg van de grotere afstand tot de duinvoet. Ook was er geen tijdelijke toename van de hoeveelheid kaal zand tussen 1997 en 2008, zoals in de actief gebleven stuifkuil van Eldorado oost. Dit was mogelijk het gevolg van de begroeiing met Kraaiheide in de accumulatiezones, die de bodem sterk stabiliseert. De toename van de pioniervegetatie tussen 2008 en 2014 lijkt vooral het gevolg van voortgaande successie en het verdwijnen van kaal zand. In Eldorado west was geen toename te zien van pioniervegetatie als gevolg van de begrazing, mogelijk omdat de runderen en paarden in de Kraaiheidevegetaties niet vaak komen.

Voor het Rietpad op Ameland is geen luchtfotoïnterpretatie uitgevoerd. Wel is er een algemeen beeld van de afname aan kaal zand en zeer actief oppervlak. In 1996 en 2000 bedroeg dit oppervlak nog ca 25% van het geheel, maar in 2005 was dit teruggelopen tot 15%, terwijl er in 2010 en 2015 nog maar 7.5% respectievelijk 2% kaal zand over was. Ook hier stabiliseerde de stuifkuil dus na verloop van tijd. Wel geeft deze analyse aan dat de stabilisatie minder snel verliep als in Eldorado, waar de hoeveelheid kaal zand in het hele gebied al tussen 1996 en 2000 was teruggelopen van 25% naar 15%. De stabilisatie verliep mogelijk minder snel door een kortere afstand tot de duinvoet, die voor Ameland ca 400 m bedraagt, voor Eldorado oost ca 500 m en voor Eldorado west ca 700 m.

9.5.2 Effecten (re)activatie op bodem en vegetatie

Alle vier de ge(re)activeerde stuifkuilen zijn na 1991 gestabiliseerd geraakt, met een kleine opleving van de eolische activiteit in Huttenvlak na 2003 zoals ook elders langs de kust gebeurde. Ondanks deze stabilisatie zijn er na ca 25 jaar nog effecten van de (re)activering te zien in de bodem, met name in de hoeveelheid kaal zand, de pH en de C-voorraad in de bovengrond (Tabel 9-6 en Tabel 9-7).

De hoeveelheid kaal zand is niet significant verschillend tussen de vier gebieden, maar in de huidige situatie overall wel afgenomen in vergelijking met de initiële situatie na (re)activatie. Wel is de bedekking van kaal zand na ca 25 jaar in de deflatiezone binnen de stuifkuil nog steeds hoger dan in de stabiele zones, met name voor Huttenvlak en Ameland. De hoeveelheid kaal zand in de voormalige accumulatiezone is echter alleen voor Ameland nog hoger dan in de stabiele zone.

Tabel 9-6: Statistische analyse van verschillen tussen de ge(re)activeerde gebieden (Huttenvlak, Eldorado oost, Eldorado west en Ameland) en verschillende situaties binnen een gebied (initiele situatie, deflatiezone, randzone, accumulatiezone en stabiele zone). Significante verschillen zijn weergegeven met hun overschrijdingskans; ns = niet significant ($p > 0.05$).

	Gebied	situatie binnen gebied	Gebied*situatie
Bedekking met kaal zand (%)	ns	0.0001	ns
pH van de bovengrond	0.0001	0.000	0.0001
C-voorraad bovengrond (kg m ⁻²)	0.006	0.0001	0.026
Totaal aantal plantensoorten	0.016	0.0001	ns
Aantal pioniersoorten	0.002	0.0001	ns
Aantal doelsoorten	ns	0.0001	ns

Tabel 9-7: Statistische analyse van de bedekking met kaal zand en de pH en de C-voorraad in de bovengrond (0-5 cm) in verschillende situaties binnen een stuifkuilgebied. Gemiddelde waarden en standaarddeviaties ($n = 2-10$). Verschillende letters geven significante verschillen weer binnen een bepaald gebied ($p < 0.05$).

	Huttenvlak	Eldorado oost	Eldorado west	Ameland
Kaal zand (%)				
Initieel 1995	100 (0) ^c	100 (0) ^b	100 (0) ^b	100 (0) ^d
Deflatiezone	44 (31) ^b	24 (29) ^a	17 (26) ^a	50 (8) ^c
Randzone	46 (47) ^b	4 (5) ^a	2 (3) ^a	6 (6) ^{ab}
Accumulatiezone	13 (24) ^{ab}	6 (4) ^a	0 (0) ^a	16 (2) ^b
Stabiele zone	3 (5) ^a	9 (8) ^a	3 (6) ^a	1 (2) ^a
pH van de bovengrond				
Initieel 1995	8.1 (0.1) ^b	8.3 (0.4) ^c	8.3 (0.4) ^d	-
Deflatiezone	7.7 (0.3) ^{ab}	6.0 (0.5) ^{ab}	5.4 (0.6) ^b	7.4 (0.3) ^c
Randzone	7.7 (0.3) ^{ab}	5.0 (0.4) ^a	4.5 (0.2) ^a	6.6 (0.6) ^b
Accumulatiezone	7.3 (0.3) ^a	6.4 (0.3) ^b	4.4 (0.1) ^a	6.5 (0.4) ^b
Stabiele zone	7.2 (0.2) ^a	5.3 (0.5) ^a	4.4 (0.3) ^a	5.1 (0.5) ^a
Stabiele zone 1995	7.2 (0.8) ^a	6.6 (1.2) ^b	6.6 (1.2) ^c	-
C-voorraad (kg m⁻²)				
Initieel 1995	0.0 (0.0) ^a	0.0 (0.0) ^a	0.0 (0.0) ^a	0.0 (0.0) ^a
Deflatiezone	0.2 (0.1) ^{ab}	0.5 (0.4) ^b	0.3 (0.2) ^b	0.3 (0.2) ^{ab}
Randzone	0.3 (0.2) ^b	1.1 (0.4) ^c	0.8 (0.2) ^c	0.5 (0.2) ^b
Accumulatiezone	0.5 (0.2) ^{bc}	0.4 (0.2) ^{ab}	1.1 (0.3) ^c	0.6 (0.4) ^b
Stabiele zone	0.6 (0.2) ^c	1.0 (0.5) ^c	1.0 (0.4) ^c	0.8 (0.2) ^c

In de pH van de bovengrond zijn de effecten van (re)activatie in verschillende zones echter nog duidelijk merkbaar. In Huttenvlak is de pH in de huidige deflatiezone en rand van de stuifkuil nog bijna net zo hoog als in de initiële situatie, en niet significant verschillend. In de accumulatiezone is de pH in ca 25 jaar echter significant gezakt van 8.3 naar 7.3. Dit is niet verschillend van de stabiele zone, waar de pH zowel nu als in 1995 rond de 7.2 lag. In Eldorado is de pH in de stuifkuil in de afgelopen 25 jaar significant gedaald van 8.3 naar 6.0 (oost) en 5.4 (west). In de stabiele zones is de pH gedaald van 6.6 naar 5.3 (oost) en 4.4 (west). Toch zijn de huidige pH waarden binnen en rond de stuifkuil nog steeds relatief hoog, met name in Eldorado oost. In Eldorado west is de accumulatiezone begroeid geraakt met Kraaiheide en is de pH gedaald tot 4.4. Op Ameland is de initiële pH niet gemeten, maar deze heeft gezien de hoogste pH-waarden van 7.7 op dit moment waarschijnlijk ook boven de 8 gelegen. Na 25 jaar is de pH in en rond de stuifkuil met waarden van 6.5-7.4 nog steeds significant hoger dan in de zogenoemde stabiele zone met pH 5.1. Deze pH is hoger dan in de stabiele zone van de gestabiliseerde stuifkuil verder naar het oosten, waar de gemiddelde pH 4.2 (± 0.4) bedraagt, en de vegetatie veel sterker is vergrast. De hogere pH in het transect van de geactiveerde stuifkuil duidt op lichte overstuiving, en is een mogelijke verklaring voor de hoge bedekking aan korstmossen in deze zone, die gemiddeld 35% bedraagt.

De hoeveelheid C in de bovengrond is in en rond de stuifkuilen toegenomen vergeleken met de initiële situatie 25 jaar geleden, maar is in alle gebieden nog steeds lager dan in de stabiele vegetatie. Alleen in de accumulatiezone van Eldorado west is de hoeveelheid c in de bovengrond al vergelijkbaar met de stabiele zone, als gevolg van de dominantie van Kraaiheide.

Tabel 9-8: Statistische analyse van het aantal plantensoorten, pioniersoorten en doelsoorten in verschillende situaties binnen een stuifkuilgebied. Gemiddelde waarden en standaarddeviaties ($n = 2-10$). Verschillende letters geven significante verschillen weer binnen een bepaald gebied ($p > 0.05$).

	Huttenvlak	Eldorado oost	Eldorado west	Ameland
Aantal plantensoorten				
Initieel 1995	0 (0) ^a	0 (0) ^a	0 (0) ^a	0 (0) ^a
Deflatiezone	15 (6) ^b	19 (7) ^c	15 (3) ^b	13 (3) ^b
Randzone	13 (4) ^{ab}	19 (5) ^c	15 (3) ^b	20 (6) ^c
Accumulatiezone	15 (3) ^b	17 (3) ^{bc}	14 (5) ^b	16 (3) ^{bc}
Stabiele zone	12 (3) ^{ab}	19 (4) ^c	14 (5) ^b	16 (3) ^{bc}
Stabiele zone 1995	11 (2) ^a	12 (4) ^b	12 (4) ^b	-
Aantal pioniersoorten				
Initieel 1995	0 (0) ^a	0 (0) ^a	0 (0) ^a	0 (0) ^a
Deflatiezone	8 (2) ^c	10 (4) ^b	8 (4) ^b	9 (4) ^c
Randzone	7 (2) ^{bc}	8 (3) ^b	4 (3) ^{ab}	12 (4) ^c
Accumulatiezone	8 (2) ^c	8 (1) ^b	4 (2) ^{ab}	9 (4) ^c
Stabiele zone	5 (1) ^b	8 (4) ^b	4 (3) ^{ab}	5 (2) ^b
Aantal doelsoorten				
Initieel 1995	0 (0) ^a	0 (0) ^a	0 (0) ^a	0 (0) ^a
Deflatiezone	8 (3) ^b	8 (4) ^b	6 (4) ^b	5 (3) ^{ab}
Randzone	6 (2) ^b	8 (4) ^b	4 (3) ^{ab}	11 (5) ^{ab}
Accumulatiezone	6 (2) ^b	5 (1) ^b	3 (2) ^{ab}	7 (3) ^c
Stabiele zone	3 (1) ^a	7 (4) ^b	4 (4) ^{ab}	5 (2) ^b

Het totale aantal plantensoorten verschilt significant tussen de vier gebieden, en is gemiddeld het hoogst in Eldorado oost (Tabel 9-6 en Tabel 9-8). Het aantal soorten is overal significant toegenomen in vergelijking met het kale zand van de beginsituatie. Binnen een bepaald gebied zijn er echter geen consistente verschillen in het totaal aantal plantensoorten tussen de verschillende zones in en rond de stuifkuil. Het aantal pioniersoorten is over het algemeen lager in de stabiele zones, en hoger in deflatiezones en randzone van de stuifkuil. Ook het aantal doelsoorten is over het algemeen hoger in deflatie en randzones, en lager in de meer stabiele zones.

9.6 Discussie en conclusies

De resultaten van dit deelonderzoek laten zien dat eolisch actieve en stabiele gebieden duidelijk verschillen in bodem en vegetatie. Een hogere eolische activiteit leidt in zowel kalkrijke als kalkarme gebieden tot meer kaal zand, een hogere pH, minder koolstof in de bovengrond, en een lagere C:N ratio van de bodem. Een hogere eolische activiteit leidt ook tot minder bovengrondse biomassa van de vegetatie en een lagere bedekking van hoge grasachtigen. Ook het N-gehalte van de vegetatie is gemiddeld hoger in de meer actieve gebieden, hoewel niet overal en zonder een duidelijke relatie met kaal zand of pH. Ook neemt het aantal pioniersoorten, korstmossen en doelsoorten toe bij hogere eolische activiteit, vooral als gevolg van de hogere pH. Verrassend genoeg werd in dit deelonderzoek de hoogste diversiteit in de vegetatie niet gevonden in de kalkrijke duinen, maar in de kalkarme duinen, met name in het eolisch steeds actief gebleven de Nederlanden op Texel. De piek in het totaal aantal plantensoorten lag rond pH 6, met een iets hogere waarde voor pionier- en doelsoorten (pH 6.5), en een iets lagere voor korstmossen (pH 5.5). In de kalkrijke duinen kan de diversiteit door sterke(re) verstuiving tijdelijk afnemen. Daarnaast biedt verstuiving in de kalkarme duinen een kans aan pioniersoorten als Zandblauwtje, die in kalkrijke duinen nauwelijks voorkomt.

De (re)activatie van stuifkuilen rond 1991 in Huttenvlak, Eldorado oost, Eldorado west en Ameland heeft geleid tot hogere eolische activiteit. In de loop van de tijd zijn alle stuifkuilen echter grotendeels gestabiliseerd, met een tijdelijke opleving in Huttenvlak tussen 2003 en 2013. De stabilisatie verliep sneller in Eldorado oost en met name west, dan in Huttenvlak of op Ameland. In alle ge(re)activeerde stuifkuilen is nog kaal zand aanwezig. De pH van de bovengrond is in 25 jaar weliswaar afgenomen vergeleken met de beginsituatie, maar in en rond de stuifkuil nog steeds significant hoger dan in de meer stabiele zones. In Eldorado oost is de gemiddelde pH in de gereactiveerde kuil zelfs significant hoger dan in de steeds actief gebleven kuil. Op dit moment ligt de waarde van de pH in de deflatiezones van de ge(re)activeerde stuifkuilen rond de 7.7 in Huttenvlak, 7.4 op Ameland, 6.0 in Eldorado oost en 5.4 in Eldorado west. In de accumulatiezones is de pH nog steeds relatief hoog in Huttenvlak, Ameland en Eldorado oost, maar in Eldorado west zijn de pH waarden gezakt tot 4.4, mede als gevolg van de (her)groei van Kraaiheide, die enige overstuiving prima bleek te kunnen weerstaan. Het totaal aantal plantensoorten is niet substantieel verschillend tussen actieve en stabiele zones van de ge(re)activeerde stuifkuilen, maar het aantal pioniersoorten en doelsoorten is significant hoger in en rond de stuifkuil. Het gemiddeld aantal pioniersoorten in een proefvlak van ca 2x2 m nam toe van vijf in de meer stabiele zones naar negen in de deflatiezones, en het aantal doelsoorten van vier naar zeven.

Activatie of reactivatie van stuifkuilen heeft 25 jaar na dato nog steeds positieve effecten, en is derhalve een zinvolle maatregel om de verzuring als gevolg van hoge atmosferische N-depositie tegen te gaan, ook of juist op de Waddeneilanden. Ook als de stuifkuilen grotendeels weer stabiliseren leidt de tijdelijke toename van de hoeveelheid kaal zand tot een verhoging van de pH en een duidelijke toename van het aantal pioniersoorten en doelsoorten in het algemeen. Ook lichte overstuiving lijkt bij te dragen aan verhoging van pH en diversiteit van meer stabiele zones, zoals op Ameland waar de vegetatie in de meer stabiele zones van het transect door de stuifkuil een hogere pH heeft en een rijkere korstmosvegetatie dan het stabiele transect. Alleen in gebieden met veel Kraaiheide lijkt reactivatie minder zinvol, omdat deze soort bestand is tegen lichte overstuiving en zelfs gebieden met sterke accumulatie van zand kan herkoloniseren. In zo'n geval is de verhoging van de pH als gevolg van verstuiving binnen 25 jaar weer geheel verdwenen.

Marijn Nijssen

10.1 Samenvatting

Kleinschalige dynamiek creëert gradiënten in het landschap, zowel in de verdeling van open zand en vegetatie, microklimaat en bodemchemie. De verwachting is dat fauna profiteert van deze gradiënten, zowel direct van de verschillen in standplaatscondities als indirect via verandering in voedselkwaliteit van planten. In dit onderzoek zijn effecten op landschapsschaal bepaald voor sprinkhanen, op lokale schaal voor bodem- en vegetatie-bewonende fauna en plantchemie.

De voedselkwaliteit van planten verschilt tussen soorten én tussen gebieden. Dynamiek in de vorm van overstuiving beïnvloedt de macronutriënten N, C en P nauwelijks, waardoor ook de C:N-ratio's en de N:P ratio's van planten niet veranderen door overstuiving. Uitzondering hierop betreft Buntgras in het Camperduin, die bij sterke overstuiving (zowel actief als inmiddels gestabiliseerd) minder N en P bevat in relatie tot niet overstoven locaties. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door fysische stress (m.n. droogte) in de zeer organisch stof-arme bodems, en wellicht ook door een gebrek aan opneembare N en P op deze locaties. De gehalten van de elementen Ca, Fe, Mg, en Mn in planten worden wel beïnvloedt door actieve overstuiving: De elementen Ca en Fe nemen toe en Mg, Mn en Si nemen af bij actieve overstuiving. In Camperduin, waar de bodems zeer arm zijn aan kalk, ijzer en waarschijnlijk ook andere elementen, is echter geen effect van verstuiving waar te nemen op de gehalten van deze elementen in de plant. De plantkwaliteit verbetert het meest door overstuiving in het kalkrijke Meijendel, terwijl de plantkwaliteit in Camperduin juist afneemt onder invloed van overstuiving. Deze invloed van een overstuiving is 10-15 jaar na stabilisatie zo goed als verdwenen, met alleen nog negatieve effecten op de N en P gehalten in Buntgras in Camperduin.

De patronen in plantkwaliteit worden weerspiegeld in de faunavangsten, waarbij de hoogste dichtheden in Meijendel worden aangetroffen en de laagste in Camperduin. Bovendien is er een positieve correlatie tussen biomassa (vooral van grotere ongewervelden) en actieve overstuiving in Meijendel en een negatieve correlatie in Camperduin. Texel geeft zowel met betrekking tot plantkwaliteit als fauna een intermediair beeld. De patronen in fauna zijn in 10-15 jaar gestabiliseerde locaties niet (Camperduin) of nauwelijks (in Meijendel) meer aanwezig.

Wanneer de algemene patronen in fauna (totale biomassa en biomassa per trofische groep) worden geanalyseerd met alle gebieden samen, is alleen een negatief effect van sterke overstuiving op detritivoren en omnivoren sterk aanwezig. Daarnaast is er een licht positief effect van verstuiving op herbivore grazers en van gestabiliseerde overstuiving op omnivoren.

Op basis van dit onderzoek lijkt verstuiving in kalkrijke duingebieden de plantkwaliteit en biomassa aan fauna te kunnen stimuleren, maar is dit effect kleiner in kalkarme duinen en zelfs negatief wanneer organisch stof in de bodem ontbreekt. De positieve effecten van verstuiving verdwijnen binnen 10-15 jaar na stabilisatie.

10.2 Inleiding

Dit onderzoeksproject betreft naast het duiden van het ontstaan en behouden van kleinschalige dynamiek ook het vaststellen van de ecologische effecten op planten en dieren. Verstuiving is een belangrijk proces in kustduinen en het ontbreken ervan wordt gezien als een van de belangrijkste bedreigingen voor karakteristieke duinfauna (Van Turnhout *et al.* 2004). Verstuiving blijkt daarnaast een belangrijke sturende factor op de diversiteit van bodembewonende fauna (Wouters & Remke 2012) en de beschikbaarheid van prooi-soorten voor insectenetters als Tapuit (Van Oosten *et al.* 2014). Dieren ondervinden invloed van verstuiving doordat hun leefomgeving zowel fysiek als chemisch op een groot aantal punten verandert,

zoals de verdeling van open zand en opgaande vegetatie, de toegankelijkheid van de bodem, microklimaat, vegetatiesamenstelling, chemische samenstelling van de vegetatie en strooisel en – als een resultante van dit alles – een hogere of lagere beschikbaarheid van prooien of gastheren. Samen met de grote bewegingsvrijheid van dieren – en dus de mogelijkheid voor dieren om verstuiwing een deel van hun levenscyclus te vermijden of juist op te zoeken – maakt dat het niet eenvoudig is om effecten van verstuiwing op dieren vast te stellen. Zeker niet wanneer deze soorten, zoals vrijwel alle Natura 2000 doelsoorten, gewervelden zijn die voor hun voedsel afhankelijk zijn van andere (veelal ongewervelde) diersoorten. Lab- of gecontroleerde veldexperimenten waarin verstuiwing wordt nagebootst en die gericht zijn op een enkele ongewervelde diersoort leveren hierbij de meest duidelijke resultaten op, maar zijn lastig te vertalen naar de complexe beheerpraktijk. Een grote veldinventarisatie in dynamische en stabiele duingebieden van een groot aantal diergroepen levert een veel beter beeld op waar verstuiwing in de praktijk toe kan leiden. Doordat echter een veelvoud aan omgevingsfactoren en beheermaatregelen een rol spelen, zijn in een brede veldstudie de effecten van kleinschalige dynamiek niet eenvoudig te duiden.

In dit project is gekozen om een aantal hypothesen over de invloed van verstuiwing op de diergemeenschap te toetsen in drie gebieden waar zowel locaties mét als locaties zonder actieve kleinschalige dynamiek voorkomen. Het onderzoek richt zich hierbij op drie facetten: biodiversiteit (sprinkhaansoorten op landschapsschaal; ordes en families van ongewervelden op locatie), opbouw van het voedselweb (verdeling trofische groeps en lichaamsgrootte binnen bodem- en vegetatie-bewonende ongewervelden) en veranderingen in de voedselkwaliteit van drie soorten waardplanten (Buntgras *Corynephorus canescens*, Fakkelgras *Koeleria macrantha* en Geel walstro *Galium verum*).

In de praktijk bleek het onmogelijk om de in dit project gekozen locaties voor onderzoek aan eolische processen, bodem en vegetatie ook te gebruiken om effecten op fauna te onderzoeken, vooral omdat grote halfopen deelgebieden zonder actieve dynamiek ontbraken in de meeste gebieden. Daarnaast werden geschikte stabiele locaties in de Amsterdamse Waterleidingduinen sterk beïnvloed door de hoge graasdruk van Damherten. Van de eerder bemonsterde locaties kon alleen de gestabiliseerde stuifkuil in Meijndel (H 7) worden gebruikt voor het faunaonderzoek. De stuifkuilen in het gebied De Nederlanden op Texel zijn niet in detail onderzocht, maar worden wel behandeld in H 9. De stuifkuilen in Camperduin zijn alleen voor het faunaonderzoek gebruikt.

10.3 Methoden

10.3.1 Onderzoeksgebieden

In dit onderzoek zijn dynamische en stabiele stuifkuilen in drie kustduingebieden bemonsterd: Meijndel, Camperduin en De Nederlanden (Texel) (tabel10-1). Hierbij betreft Meijndel de meest kalkrijke situatie (Renodunaal district, middenduinen) met een 10-20cm diep ontkalkte bovenlaag op langdurig stabiele plekken. Texel betreft een matig kalkarme situatie (Waddengebied, vrij jong duincomplex achter zeereep) en Camperduin een zeer kalkarme situatie (Waddendistrict, oud middenduin tegen binnenduinen aan). Bij ieder van de 6 bemonsterde stuifkuilen zijn telkens drie locaties in Grijze duinen bemonsterd in een gradiënt in de stuifzone van de stuifkuil: sterke overstuiving (pionier duingrasland met >50% bedekking met planten, waarbij homogene Helmvegetatie is vermeden), matige overstuiving en geen overstuiving. Deze locaties zijn in het veld geselecteerd op basis van zichtbare verstuiwing (actieve stuifkuilen) en gedetailleerde nieuwe en oude luchtfoto's van gestabiliseerde stuifkuilen. Van deze gebieden zijn in het jaar van bemonsteren Camperduin en Texel niet begraasd door vee; Meijndel is extensief begraasd met runderen en paarden (0.08 GVE/ha/jr).

In figuur10-1 zijn foto's opgenomen van de stuifkuilen; voor foto's van de bemonsterde locaties zie Bijlage 4. De stabiele locatie in Meijndel (fig10-1a) betreft een stuifkuil die 7-15 jaar is gestabiliseerd. De structuur van de stuifkuil is nog duidelijk zichtbaar in het landschap met een vrij open grazige, kruiden- en (korst)mosrijke vegetatie omzoomt met struweel en lage boomopslag. Vanwege de sterke dominantie van struweel in de strooizone vlak achter de kern is voor de locatie met veel overstuiving (pionier duingrasland) uitgeweken naar de rand van de oorspronkelijke verstuiwingskern, waar zich een pionier Buntgrasvegetatie heeft ontwikkeld die in de laatste actieve fase zand inving. De dynamische locatie in Meijndel kenmerkt zich door een groot gereactiveerd stuifduin wat voor een gradiënt van overstuiving met vers zand zorgt in een grotendeels gestabiliseerd duinlandschap (fig10-1a).

De stabiele locatie in Camperduin kenmerkt zich door een vrij open vegetatie met veel mossen (waaronder grote oppervlaktes Grijs kronkelsteeltje), Struikheide, open zandige plekken en verspreide pollen van Helm (fig10-1b). Het gebied is omringd door lage struiken en dennen. De dynamische locatie kenmerkt zich door actieve verstuiving van een ZW-helling, waarbij het zand over het duin heen stuift en resulteert in een grazige vegetatie van Helm, Buntgras en struisgrassen met kruiden en korstmossen (fig10-1b).

De stabiele locatie op Texel kenmerkt zich door een lage, vrij dichte grazige vegetatie met veel grassen, kruiden en mossen en plaatselijk Struikheide en Kraaiheide (fig10-1c). De dynamische locatie ligt direct achter een actieve stuifkuil en opener variant van de grazige vegetatie met kruiden en (korst)mossen (fig 10 1c).

Tabel10-1 Onderzoeksgebieden voor het bepalen van effecten van kleinschalige dynamiek op de fauna en voedselkwaliteit van planten voor herbivoren.

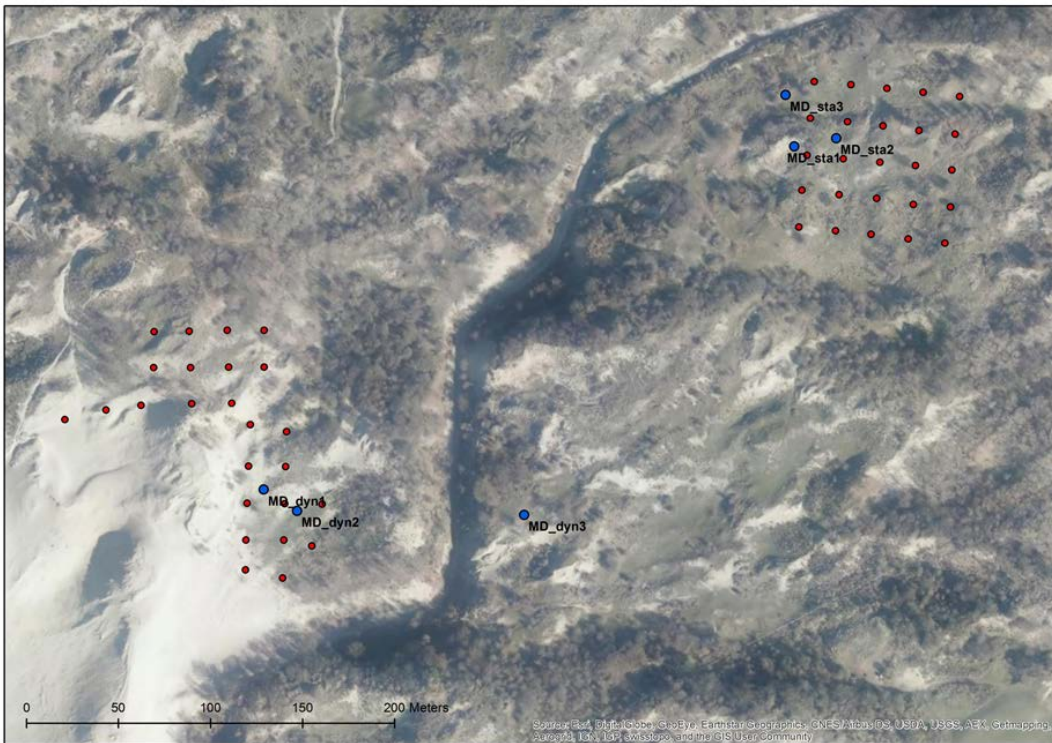
Table10-1 Research areas for effects of small scaled aeolian dynamics on fauna and food quality of plants for herbivores.

	Meijndel	Texel-De Nederlanden	Camperduin
Ligging	binnenduin; 2450 m vanaf zee	boogduincomplex; 350 m vanaf zeereep	middenduin tegen binnenduin aan; 450 m vanaf zee
kalkrijkdom	kalkrijk; stabiele delen 10-20 cm ontkalkt; kalkgehalte hieronder 1.5-3.5 %	kalkarm tot matig kalkhoudend; kalkgehalte \pm 0,5-1 %	zeer kalkarm; kalkgehalte \pm 0.25 %
Verstuiving	locatie stabiel: natuurlijke secundaire stuifkuil, in jaren '90 zeer actief; onderzochte delen \pm 13 jaar stabiel locatie dynamisch: landschap in jaren '90 al kleinschalig dynamisch, sinds 2012 na reactiveren stuifkuil actieve stuifgradiënt	locatie stabiel: oude secundaire verstuivingen, wrs. door konijnenactiviteit; onderzochte delen \pm 10 jaar stabiel locatie dynamisch: spontane secundaire verstuiving, vanaf 1996 tot nu actief met pieken in 2007, 2010 en 2014.	locatie stabiel: natuurlijke secundaire stuifkuil, in 1996 als geheel gestabiliseerd, in 2000 opleving; nu \pm 14 jaar stabiel locatie dynamisch: oude secundaire verstuiving, lange tijd min of meer stabiel, vanaf 2014 weer actief stuivend.
Emergentie vallen	6 stabiel, 6 dynamisch	6 stabiel, 6 dynamisch	6 stabiel, 6 dynamisch
Sprinkhaantelling	ja	ja	-
Sprinkhaanvangst	ja	Ja	-
Plantensoorten voedselkwaliteit	- Buntgras - Geel Walstro	- Smal fakkelgras - Geel Walstro	- Buntgras

10.3.2 Sprinkhanen

Om te bepalen of zandverstuiving op landschapsschaal voor sprinkhanen positieve effecten heeft, bestond het onderzoek uit het bemonsteren (dichtheid, diversiteit, lichaamsgrootte en gewicht) van de sprinkhanenfauna in dynamische proefgebieden én in nabijgelegen stabiele locaties zonder kleinschalige dynamiek. Voor beide typen is een gebied van 250x250 meter geselecteerd, waarna in de binnenste 100x100 meter het onderzoek is uitgevoerd, om randeffecten te voorkomen. Per locatie zijn de sprinkhanen geteld en individuen verzameld. Tellingen vonden plaats in twee rondes in juli en augustus 2016 door op 25 punten per locatie tellingen uit te voeren. Deze punten liggen in een vooraf random bepaald vierkant raster op 20 meter afstand van elkaar (zie figuur10-1a en10-1c). Alleen op de dynamische locatie in Meijndel is van deze vierkante vorm afgeweken om de vorm van de dynamische gradiënt te volgen en de actieve stuifkern zelf en een naastgelegen bosje te ontwijken. Op elk punt is 3 minuten een telling uitgevoerd van roepende dieren in een straal van 5 meter.

Van de algemene soorten Bruine sprinkhaan (*Chorthippus brunneus*) en Knopsprietje (*Myrmeleotettix maculata*) zijn op alle locaties 10 mannetjes en 10 vrouwtjes verzameld, waarna in het laboratorium halsschild lengte, halsschild breedte, pootlengte (dijbeen van de achterpoot) en drooggewicht zijn bepaald (na 48 uur drogen op 70° C).



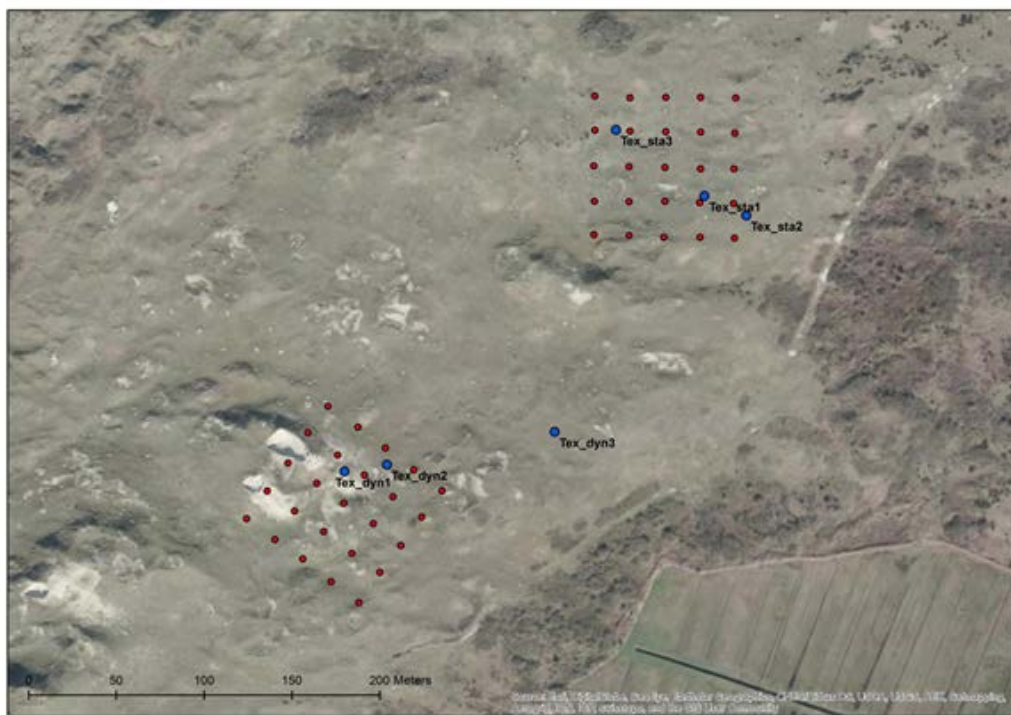
Figuur10-1a Ligging telpunten sprinkhanen (rode stippen) en emergentievallen voor bemonstering bodem- en vegetatiebewonende fauna (blauwe stippen) in Meijndel. Op deze laatste locaties zijn ook Buntgras (*Corynephorus canescens*) en Geel walstro (*Galium verum*) verzameld.

Figure10-1a Location of counting plots for grasshoppers (red dots) and of emergence traps for sampling of fauna in soil and vegetation and collection of Grey hairgrass (*Corynephorus canescens*) and Lady's Bedstraw (*Galium verum*) (blue dots) in dune area Meijndel.



Figuur10-1b Ligging emergentievallen voor bemonstering bodem- en vegetatiebewonende fauna (blauwe stippen) bij Camperduin. Op deze locaties is ook Buntgras (*Corynephorus canescens*) verzameld. Bij Camperduin zijn geen sprinkhanen geteld of bemonsterd.

Figure10-1b Location of emergence traps for sampling of fauna in soil and vegetation and collection of Grey hairgrass (*Corynephorus canescens*) (blue dots) in dune area Camperduin. Grasshoppers were not sampled in this area.



Figuur10-1c Ligging telpunten sprinkhanen (rode stippen) en emergentievallen voor bemonstering bodem- en vegetatiebewonende fauna (blauwe stippen) bij De Nederlanden - Texel. Op deze laatste locaties zijn ook Fakkелgras (*Koeleria glauca*) en Geel walstro (*Galium verum*) verzameld.

Figure10-1a Location of counting plots for grasshoppers (red dots) and of emergence traps for sampling of fauna in soil and vegetation and collection of Blue Hair Grass (*Koeleria glauca*) and Lady's Bedstraw (*Galium verum*) (blue dots) in dune area De Nederlanden- Texel.

10.3.3 Bodem- en vegetatiebewonende ongewervelden

In alle drie de onderzoeksgebieden zijn emergentievallen geplaatst in de dynamische gradiënt bij een actieve stuifkuil en de voormalige actieve gradiënt bij gestabiliseerde stuifkuilen (Voor locaties zie figuur 10-1). Deze vallen hebben de vorm van een piramide met een grondoppervlak van 50x50 cm en sluiten de aanwezige bodem en vegetatie volledig af. Op de top van de verduisterde val zit een doorzichtige – licht doorlatende - pot gevuld met 4% formaline-oplossing. De in de piramide aanwezige fauna verplaatst zich naar het lichte punt boven en wordt daar gevangen. De vallen hebben van 9 juni t/m 12 augustus 2016 open gestaan zijn om de 3 weken geleegd en telkens verplaatst binnen de te bemonsteren zone om een nieuw deel van de vegetatie en bodem te bemonsteren. De vallen zijn op basis van veldbezoeken en oude en recente luchtfoto's geplaatst in duingraslandvegetaties met veel overstuiving, matige overstuiving en een zone zonder zichtbare overstuiving (maar waarschijnlijk wel 'overpoedering'). Deze opzet is zowel gekozen voor één nog actieve stuifkuil als voor één naastgelegen stuifkuil die 10 á 15 jaar daarvoor is gestabiliseerd, waarbij telkens 2 vallen per zone zijn geplaatst. Door harde wind en vee en het weglekken van conserverende vloeistof zijn een aantal vangsten uitgevallen. In totaal konden 101 vangsten (Meijndel 35; Camperduin 33; Texel 33) gebruikt worden voor de analyses.

De gevangen dieren zijn gedetermineerd tot dusdanig taxonomisch niveau (orde, familie; zie tabel 10-2) dat individuen ingedeeld konden worden in de volgende basale trofische groepen:

- detritivoor: eten dood plantaardig en dierlijk weefsel en/of bacteriën en schimmels die hierop leven
- herbivoor-grazer: planteneters die al het weefsel (inclusief celwanden) eten
- herbivoor-browser: planteneters die voedselrijke sapstroom of celinhoud aanpakken
- herbi/carnivoor: eten levend dierlijk óf plantaardig weefsel, geen dood materiaal
- carnivoor: eten (vrijwel) alleen dierlijk weefsel
- omnivoor: kunnen zowel dood als levend, plantaardig of dierlijk weefsel eten en/of bacteriën en schimmels

Diergroepen (m.n. larvestadia van ongewervelde en volwassen vliegen en muggen) die binnen dit project niet tot een taxonomisch niveau konden worden gedetermineerd waarop indeling in een trofische groep mogelijk is zijn in de categorie 'onbekend' geplaatst.

Van alle individuen is de lichaamslengte genoteerd in klassen: < 2mm, 3-5 mm, 6-9 mm, 10-14 mm, 15-19 mm, >20 mm). Vervolgens is van alle individuen een inschatting gemaakt van de biomassa (in mg drooggewicht) op basis van de gemiddelde lichaamslengte van deze klasse (in mm) met de formule;

$$\text{drooggewicht} = a \cdot \text{lichaamslengte}^b$$

Deze formule is gedefinieerd en getoetst door Sabo et al. (2002). Hierbij zijn voor een groot aantal diergroepen (allen met een andere lichaamsvorm) de specifieke parameters a en b bepaald die met de gegeven formule de verhouding tussen lichaamslengte en gemeten drooggewicht zo nauwkeurig mogelijk voorspellen. In tabel 10-2 zijn de parameters a en b en de nauwkeurigheid van de schatting (R^2 van de regressielijn door de meetpunten) weergegeven. Voor diergroepen die niet door Sabo et al. (2002) zijn beschreven zijn de variabelen van een gelijkvormige groep gebruikt of is de formule voor 'grand average for order' van terrestrische diergroepen gebruikt uit deze publicatie. Voor de meeste diergroepen is de schatting van het lichaamsgewicht behoorlijk nauwkeurig (R^2 boven de 0,8, meestal boven de 0,9), alleen van niet verder gedetermineerde diptera ligt de nauwkeurigheid lager ($R^2 = 0,67$).

De analyses van de faunavangsten heeft zich gericht op de aantallen individuen van grotere ongewervelden (als potentiële prooi voor karakteristieke diersoorten van grijze duinen, zoals tapuit, zandhagedis en grauwe klauwier, als op de totale biomassa per trofische groep om het ecologisch functioneren van de diergemeenschappen beter te begrijpen.

Tabel10-2 Overzicht van de taxonomische groepen die zijn aangetroffen in de faunamonsters, met indeling naar trofische groep en omrekening van lichaamslengte (in klassen) naar schatting van lichaamsgewicht volgens Sabo et al. (2002).

Table10-2 Taxonomic groups of fauna sampled in emergence traps, with classification to trophic groups and body length (distinct classes) and calculation of body mass, based on body length conform Sabo et al. (2002).

Sabo et al 2002 wetenschappelijke naam	a	b	R2	Nederlandse naam	grootteklasse gemiddelde lichaamslengte	10-14 mm 15-19 mm >20 mm							
						<2mm	3-5 mm	6-9 mm	10-14 mm	15-19 mm	>20 mm	17,0	25,0
Orthoptera	0,03	2,55	0,95	Sabelsprinkhanen	Ensifera	0,03	1,03	5,11	16,94	41,19	110,12	voedselgilde	
Acriddidae	0,085	2,274	0,97	Veidsprinkhanen	Acriddidae	0,09	1,99	8,30	24,18	53,39	128,33	zoofyotofaag	
Aranea	0,05	2,74	0,98	Spinnen	Araneae	0,05	2,23	12,49	45,28	117,60	338,32	fytofaag-gazer	
Aranea	0,05	2,74	0,98	Hooiwagens	Opiliones	0,05	2,23	12,49	45,28	117,60	338,32	zoofaag	
Homoptera cf	0,005	3,33	0,93	Kakkerlakken	Blattodea	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	omnifaag	
Cicadellidae	0,079	2,229	0,99	Cicaden	Auchenorrhyncha	0,08	1,74	7,05	20,10	43,68	103,19	fytofaag-primker	
grand average by order	0,03	2,63	0,91	Springstaarten	Collembola	0,03	1,15	6,01	20,67	51,67	142,46	saprofaag	
Odonata cf	0,14	2,27	0,9	Rupsen	Lepidoptera_larvae	0,14	3,26	13,57	39,43	86,95	208,67	fytofaag-gazer	
Lepidoptera	0,012	2,69	0,82	Vlinders	Lepidoptera_adult	0,01	0,50	2,71	9,60	24,50	69,13	fytofaag-gazer	
grand average by order	0,03	2,63	0,81	Tripsen	Thysanoptera	0,03	1,15	6,01	20,67	51,67	142,46	fytofaag-primker	
grand average by order	0,03	2,63	0,81	Dierluizen	Phthiraptera	0,03	1,15	6,01	20,67	51,67	142,46	zoofaag	
grand average by order	0,03	2,63	0,81	Stofluizen	Psocoptera	0,03	1,15	6,01	20,67	51,67	142,46	saprofaag	
grand average by order	0,03	2,63	0,81	Bladluizen	Aphidoidea	0,03	1,15	6,01	20,67	51,67	142,46	fytofaag-primker	
grand average by order	0,03	2,63	0,81	Pissepedden	Isopoda	0,03	1,15	6,01	20,67	51,67	142,46	saprofaag	
Aranea	0,05	2,74	0,98	Mosmijten	Oribatida	0,05	2,23	12,49	45,28	117,60	338,32	saprofaag	
Aranea	0,05	2,74	0,98	Mijten	Acarina	0,05	2,23	12,49	45,28	117,60	338,32	saprofaag	
Aranea	0,05	2,74	0,98	Teken	Acarina_Ixodida	0,05	2,23	12,49	45,28	117,60	338,32	zoofaag	
Homoptera	0,005	3,33	0,93	Kielwantsen	Heteroptera_Acanthosomatidae	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	fytofaag-primker	
Homoptera	0,005	3,33	0,93	Bloemwantsen	Heteroptera_Anthracoridae	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	zoofaag	
Homoptera	0,005	3,33	0,93	Schildwantsen	Heteroptera_Pentatomidae	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	fytofaag-primker	
Homoptera	0,005	3,33	0,93	Bodemwantsen	Heteroptera_Igidae	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	fytofaag-primker	
Homoptera	0,005	3,33	0,93	Sikkelwantsen	Heteroptera_Nabidae	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	zoofaag	
Homoptera	0,005	3,33	0,93	Wantsen	Heteroptera_sp	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	onbekend	
Homoptera	0,005	3,33	0,93	Steltwantsen	Heteroptera_Berytidae	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	fytofaag-primker	
Homoptera	0,005	3,33	0,93	Blindwantsen	Heteroptera_Miridae	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	fytofaag-primker	
Homoptera	0,005	3,33	0,93	Glavleugelwantsen	Heteroptera_Rhopalidae	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	fytofaag-primker	
Homoptera	0,005	3,33	0,93	Netwantsen	Heteroptera_Tingidae	0,01	0,51	4,10	19,62	62,57	226,00	fytofaag-primker	
Carabidae	0,072	2,401	0,99	Loopkevers	Coleoptera_Carabidae	0,07	2,01	9,09	28,08	64,81	163,60	zoofyotofaag	
Coleoptera	0,04	2,64	0,95	Boktorren	Coleoptera_Cerambycidae	0,04	1,55	8,17	28,26	70,87	196,17	fytofaag-gazer	
Coleoptera	0,04	2,64	0,95	Weekschildkevers	Coleoptera_Cantharidae	0,04	1,55	8,17	28,26	70,87	196,17	zoofaag	
Coleoptera	0,04	2,64	0,95	Bladhaantjes	Coleoptera_Chrysomelidae	0,04	1,55	8,17	28,26	70,87	196,17	fytofaag-gazer	
Coleoptera	0,04	2,64	0,95	Snuitkevers	Coleoptera_Curculionidae	0,04	1,55	8,17	28,26	70,87	196,17	fytofaag-gazer	
Coleoptera	0,343	1,5	0,91	Lieveheersbeestjes	Coleoptera_Coccinellidae	0,34	2,74	7,05	14,26	24,04	42,88	omnifaag	
Coleoptera	0,04	2,64	0,95	Kniptorren	Coleoptera_Elatridae	0,04	1,55	8,17	28,26	70,87	196,17	fytofaag-gazer	
Staphylinidae	0,001	4,026	0,99	Kortschildkevers	Coleoptera_Staphylinidae	0,00	0,27	3,33	22,12	89,91	424,72	zoofaag	
Coleoptera	0,04	2,64	0,95	Zwartlijven	Coleoptera_Tenebrionidae	0,04	1,55	8,17	28,26	70,87	196,17	omnifaag	
Staphylinidae cf	0,001	4,026	0,99	Keuferlarven	Coleoptera_larvae	0,00	0,27	3,33	22,12	89,91	424,72	onbekend	
cf vespidae	0,001	3,723	0,95	Mieren	Hymenoptera_Formicidae	0,00	0,17	1,81	10,42	38,10	160,15	omnifaag	
cf vespidae	0,001	3,723	0,95	Sluipwespen	Hymenoptera_Ichneumonidae	0,00	0,17	1,81	10,42	38,10	160,15	zoofaag	
cf vespidae	0,001	3,723	0,95	Angeldragers	Hymenoptera_Aculeata	0,00	0,17	1,81	10,42	38,10	160,15	zoofaag	
Apidae	0,006	3,407	0,81	Bijen	Hymenoptera_Aculeata	0,01	0,68	5,75	28,51	93,39	347,48	zoofaag	
cf Apidae	0,006	3,407	0,81	Hout- en Bladwespen	Hymenoptera_Symphyla	0,01	0,68	5,75	28,51	93,39	347,48	fytofaag-gazer	
Brachycera	0,006	3,05	0,85	Bochelvliegen	Diptera_Phoridae	0,01	0,41	2,80	11,74	33,96	110,12	fytofaag-gazer	
Nematocera	0,1	1,57	0,9	Rouwmuggen	Diptera_Sciaridae	0,10	0,88	2,37	4,95	8,55	15,66	fytofaag-gazer	
Nematocera	0,1	1,57	0,9	Galmuggen	Diptera_Cecidomyiidae	0,10	0,88	2,37	4,95	8,55	15,66	fytofaag-gazer	
Nematocera	0,1	1,57	0,9	Dansmuggen	Diptera_Chironomidae	0,10	0,88	2,37	4,95	8,55	15,66	saprofaag	
grand average by order	0,04	2,26	0,67	Muggen en vliegen	Diptera_overig	0,04	0,92	3,80	10,99	24,15	57,73	onbekend	
Aranea cf	0,05	2,63	0,81	Netvliegligen	Planipennia	0,03	1,15	6,01	20,67	51,67	142,46	zoofaag	
Staphylinidae cf	0,001	4,026	0,99	Oorwormen	Gastropoda	0,05	2,23	12,49	45,28	117,60	338,32	fytofaag-gazer	
					Dermoptera	0,00	0,27	3,33	22,12	89,91	424,72	omnifaag	

10.3.4 Plantchemie

Om de effecten van overstuiving op de voedselkwaliteit van de vegetatie te bepalen zijn in alle onderzoeksgebieden waardplanten verzameld. Vanwege verschillen in vegetatiesamenstelling was het niet mogelijk om op elke locatie dezelfde plantensoorten te verzamelen. Er is gekozen om in alle gebieden een smalbladige grassoort te verzamelen (Buntgras of Smal fakkelgras) en een kruidachtige (Geel walstro of Gewoon biggenkruid). In tabel 10-3 is een overzicht gegeven van de bemonsteringen. Van Gewoon Biggekruid (Camperduin) en 5 van de 6 monsters van Geel walstro op de meest dynamische locatie van Texel bleek te weinig vitale biomassa om metingen aan te verrichten.

Bemonstering en verwerking

De monsters zijn verzameld aan het einde van het groeiseizoen (Fakkelgras en Geel Walstro Texel 2-8-2016, Buntgras Meijndel 4-8-2016, Buntgras Camperduin 16-8-2016, Geel walstro Meijndel 18-8-2016). Alle planten zijn apart in papieren zakken gestopt, gekoeld vervoerd en daarna ingevroren. Voorafgaand aan analyse zijn alle vitale delen geselecteerd (groene bladeren en stengels) en alle dode delen verwijderd. De vitale biomassa is schoongemaakt en 2 à 3,5 gram versgewicht gedroogd gedurende 24u in de droogstoof bij 60°C. Plantenmonsters waarvan minder dan 2 gram vitaal versgewicht kon worden verzameld (zoals alle Gewoon biggenkruid individuen van Camperduin) zijn weggelaten. Gedroogd plantenmateriaal is in een kogelmolen tot poeder vermaald (Retsch Mixer Mill MM 400): Buntgras 120 seconden 30 r/s, Fakkelgras 60 seconden 30 r/s, Geel walstro 45 seconden 30 r/s.

Tabel 10-3 Overzicht bemonsterde plantenmonsters voor analyse effecten van verstuiving op voedselkwaliteit. Getallen tussen haakjes zijn wel in het veld bemonsterd, maar de vitale biomassa bleek in het lab te laag om te analyseren.

Table 10-3 Sampled plant species for analyses of effects of sand accumulation on food quality of plants. Numbers between brackets are sampled in the field, but biomass turned out to be too low for analyses.

Gebied	Meijndel			Camperduin			Texel					
	dynamisch			stabiel			dynamisch			stabiel		
Locatie	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+
Overstuiving	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+
Buntgras	6	6	6	6	6	6	6	6	6			7
												2
Smal fakkelgras										6	6	6
Geel walstro	6	6	6	6	6	6				6	6	6
Biggenkruid							(6	(6	(6			7
)))			-

Voor bepaling van C en N is van alle gedroogde en vermalen plantenmonsters $3,0 \pm 0,1$ mg afgewogen (op 96 wells plaat) en in een tinnen cupje tot een klein bolletje gedraaid. Meting vond plaats met een NA1500 (Carlo Erba - Thermo Fisher Scientific).

De overige elementen zijn met een destructiemethode geanalyseerd door 200 ± 5 mg fijngemalen monster af te wegen en 4 ml 65% HNO₃ en 1 ml 30% H₂O₂ toe te voegen. De monsters zijn ± 45 minuten in een rotor in een destructiemagnetron geplaatst en daarna afgekoeld in de koelkast. Monsters zijn opgelost in 100 ml MilliQ en geanalyseerd op AA (Na, K) en ICP (overige elementen).

Resultaten zijn omgerekend naar gewichtspersentages, dus aantal gram van een element per gram drooggewicht van de vitale biomassa van de plant. In sommige gevallen zijn deze gewichtspersentages omgerekend naar ratio's, zoals de C:N-ratio en N:P ratio in de plant.

10.3.5 Statistische analyse

Bij de statistische toetsing is gebruik gemaakt van het programma R (R core team, 2017). Effecten van verstuiving op plantchemie en sprinkhanen zijn getoetst met verschillende statistische toetsen (zie betreffende figuren in de hoofdttekst).

Voor het bepalen van de effecten van verstuiving op de samenstelling van de fauna is gebruik gemaakt van Linear Mixed Effects Models. Vanwege de Zero-inflated structuur van de data (veel nul-waarnemingen, vooral van grote dieren, en een groot aantal taxonomische groepen) zijn de drie vangstrondes in het seizoen per val bij elkaar opgeteld en zijn de totale biomassa's bepaald per trofische groep. Dit is zowel uitgevoerd voor kleine dieren (<6 mm), middelgrote dieren (6-14 mm) en grote dieren (>14 mm) als voor alle grootteklassen samen. Voor de grote dieren waren er soms te weinig vangsten om een toets uit te kunnen voeren.

Met de biomassa van de trofische groepen als respons variabele en gebied als random factor is met behulp van de R-package NLME (Version 3.1-131; Pinheiro 2017) twee modellen gedraaid:

a) Verschil tussen overstuivingsklassen binnen de actieve en gestabiliseerde gradiënt

Hierbij is binnen de actief stuivende gradiënt en binnen de gestabiliseerde verstuivingsgradiënt getoetst (8 vrijheidsgraden) of de biomassa van een specifieke trofische groep (en van alle trofische groepen samen) op de locaties met matige of sterke overstuiving afwijkt van de biomassa op de locatie zonder overstuiving.

b) Verschil binnen overstuivingsklassen tussen de actieve en gestabiliseerde gradiënt

Hierbij is getoetst of de biomassa van een specifieke trofische groep (en van alle trofische groepen samen) op locaties met eenzelfde mate van overstuiving (niet, matig, sterk) afwijkt tussen de actief stuivende gradiënt en de gestabiliseerde verstuivingsgradiënt getoetst (13 vrijheidsgraden).

10.4 Resultaten diergemeenschappen

10.4.1 Effecten van verstuiving op voedselkwaliteit planten

De voedselkwaliteit van planten voor herbivoren is niet in één maat te vangen. Het betreft zowel de totale hoeveelheid van noodzakelijke chemische elementen, als ook de verhouding van deze elementen ten opzichte van elkaar (stoichiometrie) en de hoeveelheid moeilijk verteerbare of giftige anti-vraat stoffen. Plantaardig en dierlijk weefsel verschillen sterk van elkaar. De hoeveelheid stikstof (N) en fosfor (P) is in planten veel lager dan in dierlijk weefsel, terwijl de hoeveelheid koolstof (C) in planten juist hoog is. Herbivoren moeten daarom veel plantbiomassa verwerken om aan voldoende N en P te komen. Een hoog gehalte aan N en P in planten is daardoor gunstig voor herbivoren. De meeste ongewervelde herbivoren gebruiken de intake van N of C als graadmeter voor hun totale voedselinname; ze stoppen met eten wanneer ze voldoende N of C hebben opgenomen (o.a. Behmer 2009). De inname van andere elementen wordt niet actief gereguleerd, maar lift passief mee met de N-inname. Wanneer elementen als P, Ca, Fe of Mn in lage concentraties voorkomen in een plant ten opzichte van de concentratie N kan dit tot een te lage inname van deze elementen leiden. De consequenties hiervan voor fauna van droge heiden zijn recentelijk beschreven door Vogels *et al.* (2011, 2017).

In dit project zijn Buntgras, Fakkелgras en Geel walstro verzameld in gradiënten van overstuiving achter stabiele stuifkuilen en achter stuifkuilen die al 11 tot 15 jaar stabiel zijn. Verschillen tussen plantensoorten of plantengroepen (bijvoorbeeld smalbladige grassen vs kruidachtigen) worden veroorzaakt door verschillen in groei-strategie en samenstelling van het plantenweefsel. Verschillen in chemische samenstelling binnen één plantensoort tussen gebieden kunnen worden veroorzaakt door verschillen in bodemopbouw en –chemie, mate van N-depositie en hoeveelheid neerslag. Deze factoren zijn binnen dit onderzoek niet geanalyseerd. Wel is onderzocht of er per plantensoort binnen hetzelfde gebied een effect te zien is van actieve overstuiving (actieve dynamische gradiënt: geen-matige-sterke overstuiving) en of dit effect nog steeds zichtbaar is in een ‘fossiele’ verstuivingsgradiënt die gestabiliseerd is (stabiele gradiënt: geen-matige-sterke overstuiving 10 tot 15 jaar geleden).

De effecten van verstuiving op voedselkwaliteit wordt geanalyseerd op basis van de volgende variabelen: totaal gehalte aan N en P, de C:N-ratio en N:P-ratio en totaal gehalten aan Ca, Fe, Si, Mg en Mn. Alle gehalten zijn uitgedrukt in massapercentage ten opzichte van het drooggewicht van de plant. Verschillen in gehalten tussen gradiënten of gebieden zijn getoetst met een ongepaarde T-toets; alleen significante verschillen worden gemeld in de tekst.

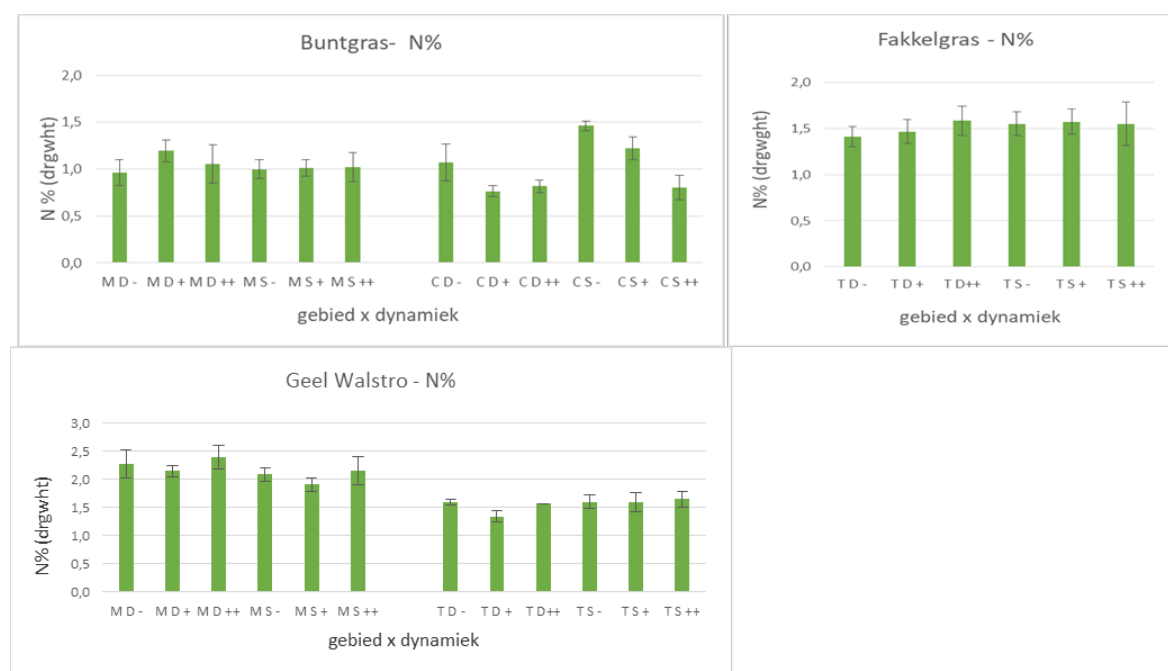
N-gehalte en C/N-ratio

Het N% als fractie van het drooggewicht (figuur10-2) van Fakkелgras (1,52 %) is significant hoger dan het N% van Buntgras (1,03 %). Hoewel een gebiedseffect niet kan worden uitgesloten – Buntgras is in Meijendel en Camperduin verzameld, Fakkелgras op Texel - is dit vrijwel zeker een soortspecifiek verschil. Geel walstro heeft in Meijendel (2,16 %) een significant hoger N% dan op Texel (1,56 %). Dit gebiedseffect wordt waarschijnlijk veroorzaakt door verschillen in bodemchemie, maar effecten van verschil in groeiselheid van de plant (bijvoorbeeld als gevolg van verschil in neerslag) voorafgaand aan bemonsteren kan niet worden uitgesloten.

De aanwezigheid van recente of historische dynamiek heeft alleen effect op het N% van Buntgras in deelgebied Camperduin. Hier is in het stratum ‘sterke overstuiving’ zowel achter de

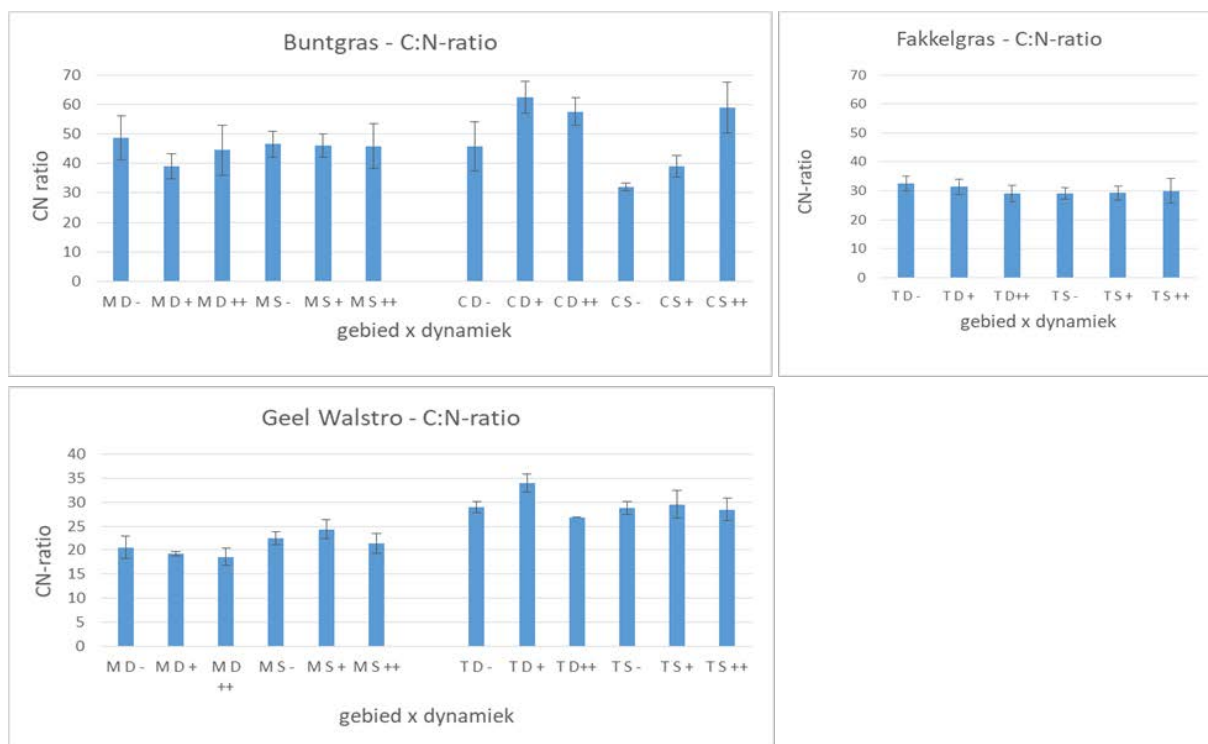
actieve stuifkuil als achter de gestabiliseerde stuifkuil een negatief effect van overstuiving op het N%. In de actieve gradiënt is dit effect ook bij het stratum 'matige overstuiving' nog aanwezig. De meest waarschijnlijk reden voor het lage N% is dat de bodems in Camperduin zeer arm aan organisch stof zijn en zeer hydrofoob, waardoor de beschikbaarheid van N waarschijnlijk lager is en daarnaast planten eerder met droogtestress te maken krijgen. In de oudere stabiele bodems is de N-beschikbaarheid waarschijnlijk hoger en de droogtestress lager: hier zijn de N% in Buntgras wel hoog. Het (indirecte) effect van matige en sterke overstuiving is zodanig dat het stikstofgehalte ruim onder 1% komt te liggen. Dit maakt deze planten voor veel herbivoren oninteressant, met name voor herbivore grazers die al het plantenmateriaal consumeren om aan voedingsstoffen te komen. Herbivore browsers als wantsen en cicaden kunnen de celinhoud en sapstromen aanpakken en zodoende effectiever nutriënten opnemen.

De gehalten aan C% zijn tussen planten vrijwel gelijk (Buntgras 46,5 %: Fakkkelgras 45,6 %: Geel Walstro 45,3%) en er zijn binnen soorten geen significante effecten van verstuing. Verschillen in C:N-ratio's van de planten worden dan ook veroorzaakt door de verschillen in N% (figuur10-3). Door de hoge N% van Geel walstro in Meijendel is hier de C:N-ratio lager dan van dezelfde soort op Texel, en ook heeft Fakkkelgras een lagere C:N-ratio dan Buntgras. In Camperduin kent Buntgras op overstoven plekken door het lage N% een zeer hoge C:N-ratio van boven de 50.



Figuur10-2 Percentage stikstof (N% van drooggewicht \pm SD) in Buntgras, Smal fakkkelgras en Geel walstro. Codes geven Gebied-Dynamiek-Overstuiving. Betekenis afkortingen: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamisch, S = stabiel; - = geen overstuiving, + = matige overstuiving, ++ = sterke overstuiving. T D ++ betreft slechts 1 monster en kent derhalve geen SD.

Figure10-2 Percentage of nitrogen (N% of dry weight \pm SD) in Grey hair grass, Blue hair grass and Lady's bedstraw. Codes and abbreviations: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamic, S = stabile; - = no dynamics, + = moderate dynamics, ++ = strong dynamics. T D ++ contains of only 1 sample (no SD).



Figuur10-3 C:N-ratio (\pm SD) in Buntgras, Smal fakkелgras en Geel walstro. Codes geven Gebied-Dynamiek-Overstuiving. Betekenis afkortingen: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamisch, S = stabiel; - = geen overstuiving, + = matige overstuiving, ++ = sterke overstuiving. TD ++ betreft slechts 1 monster en kent derhalve geen SD.

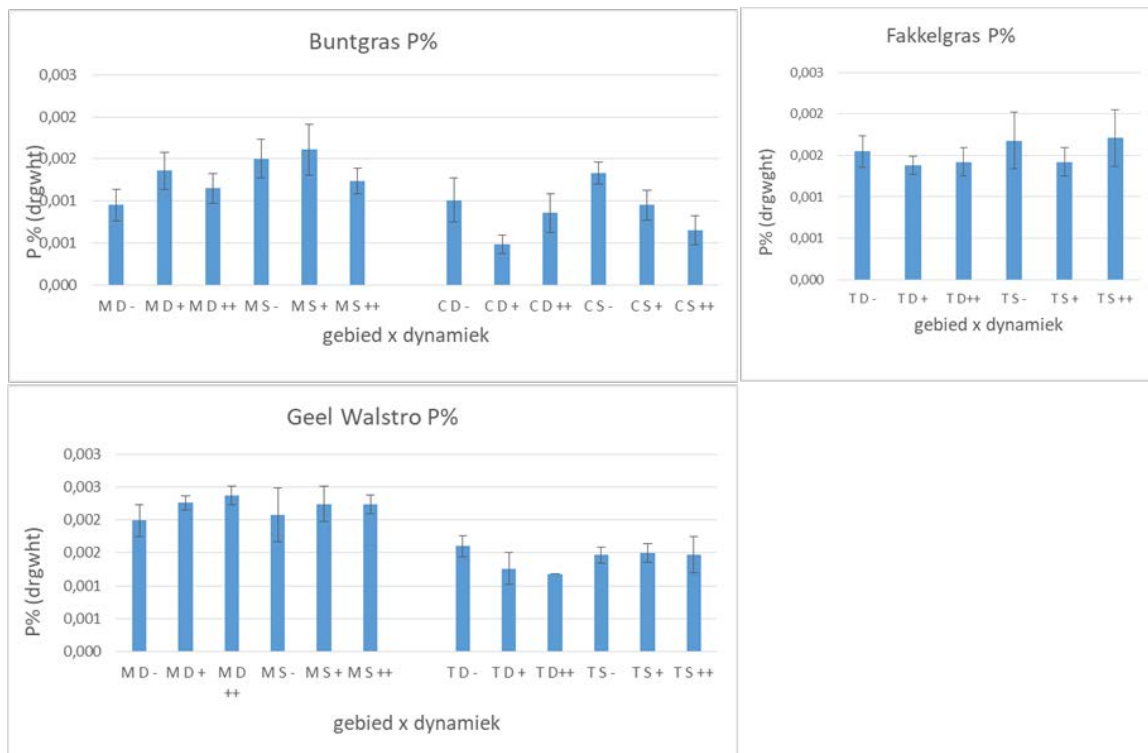
Figure10-3 C:N-ratio (\pm SD) in Grey hair grass, Blue hair grass and Lady's bedstraw. Codes and abbreviations: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamic, S = stabile; - = no dynamics, + = moderate dynamics, ++ = strong dynamics. TD ++ contains of only 1 sample (no SD).

P gehalte en N/P-ratio

Het gehalte aan fosfor (P) van de drie onderzochte plantensoorten is weergegeven in figuur10-4. Deze gehalten zijn veel lager dan gehalten aan stikstof en laten zowel tussen gebieden als binnen gebieden een grotere variatie zien. Tussen gebieden verschilt het P% van Buntgras tussen Meijendel ($1,30 \cdot 10^{-3}$) en Camperduin ($0,88 \cdot 10^{-3}$) en is gemiddeld lager dan het P% van Fakkелgras op Texel ($1,53 \cdot 10^{-3}$). Het P% in Geel Walstro is gemiddeld hoger dan in de grassen, maar verschilt tussen Meijendel ($2,20 \cdot 10^{-3}$) en Texel ($1,41 \cdot 10^{-3}$). Voor fosfor spelen dus zowel soortspecifieke als gebiedseffecten een rol.

De aan- of afwezigheid van verstuiwingsactiviteit heeft geen consistent effect op de gehalten aan P in de onderzochte planten. Er zijn geen significante verschillen tussen overstoven en niet overstoven planten, met uitzondering van Buntgras in de stabiele gradiënt op Camperduin. Door de afwezigheid van dit patroon in de actieve verstuiwingsgradiënt op Camperduin en beide gradiënten in Meijendel, als ook voor de andere twee plantensoorten, wordt verondersteld dat dit een artefact is.

De N:P-ratio is een belangrijke maat voor de voedselkwaliteit van waardplanten voor dieren. Deze ratio varieert tussen plantensoorten en tussen gebieden. Er is een significant verschil in N:P-ratio van Buntgras tussen de dynamische gradiënt (9,47) en de gestabiliseerde gradiënt (7,13) in Meijendel, maar verder zijn er geen effecten van dynamiek terug te vinden. Doordat in Camperduin van Buntgras zowel het N% (significant) als het P% (niet significant) afneemt onder invloed van verstuiwing is er geen verschil in N:P-ratio van Buntgras in dit gebied. Vrijwel alle waarden vallen in de range 10 tot 15, wat voor herbivoren een gunstige N:P ratio is om op te foerageren. In een enkel geval ligt de N:P ratio hoger (Buntgras in Camperduin, matige actieve overstuiving: 16,4) of juist ver daaronder (Buntgras in Meijendel: nauwelijks tot matige overstuiving in gestabiliseerd gebied: 6,3-6,7). In beide gevallen is de N:P-ratio voor herbivoren niet optimaal, maar treedt er waarschijnlijk nog geen direct negatief effect op (Vogels *et al.* 2011).



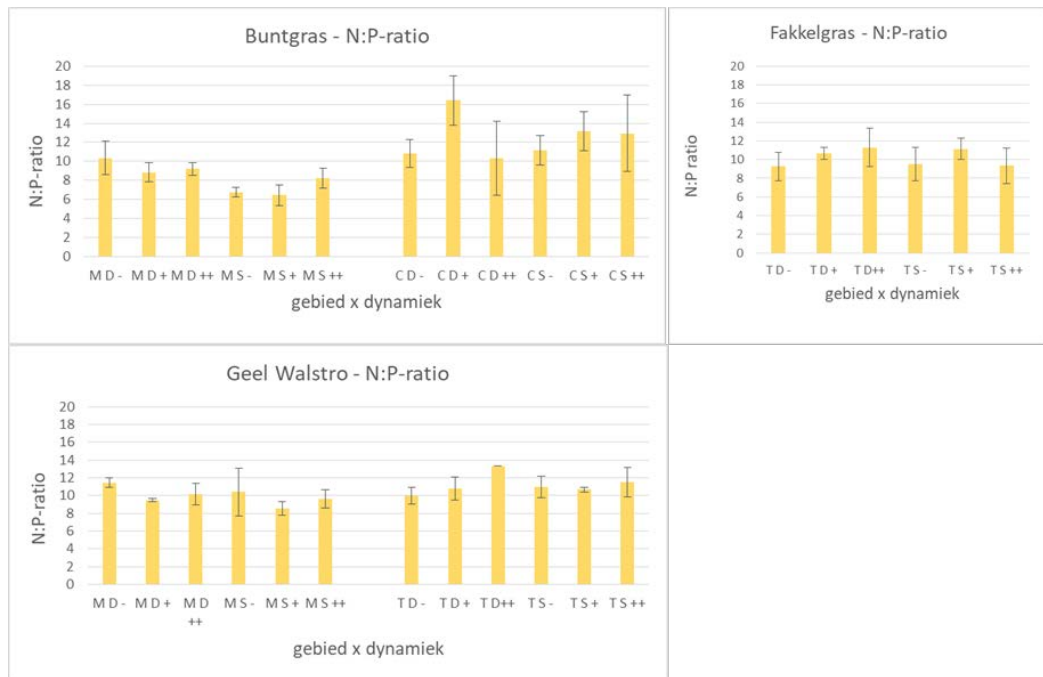
Figuur 10-4 Percentage fosfor (P% van drooggewicht \pm SD) in Buntgras, Smal fakkkelgras en Geel walstro. Codes geven Gebied-Dynamiek-Overstuiving. Betekenis afkortingen: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamisch, S = stabiel; - = geen overstuiving, + = matige overstuiving, ++ = sterke overstuiving. T D ++ betreft slechts 1 monster en kent derhalve geen SD.

Figure 10-4 Percentage of phosphorus (P% of dry weight \pm SD) in Grey hair grass, Blue hair grass and Lady's bedstraw. Codes and abbreviations: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamic, S = stabile; - = no dynamics, + = moderate dynamics, ++ = strong dynamics. T D ++ contains of only 1 sample (no SD).

Elementen: calcium, ijzer, magnesium, mangaan en silicium

Ook de elementen calcium (Ca), ijzer (Fe), magnesium (Mg) en mangaan (Mn) zijn belangrijk voor herbivoren om voldoende 'passief' van op te nemen. Wanneer van deze elementen te weinig in een plant aanwezig is ten opzichte van stikstof dan kan er een tekort ontstaan. Silicium (Si) wordt door planten gebruikt om zich te versterken en tegen vraat te beschermen. Hoge gehalten aan Si zijn dus nadelig voor planteneters. In figuur 10-6 t/m 10-10 zijn voor de verschillende planten en gebieden de totale gehalten (in percentage van het drooggewicht) van deze vier elementen weergegeven.

Gehalten aan Ca (figuur 10-6) verschillen zowel significant tussen plantensoorten als tussen kalkrijke en kalkarme gebieden en tussen mate van overstuiving. De hoogste waarden worden gevonden in Geel walstro in Meijendel ($18,5 \cdot 10^{-3}$) en Texel ($15,8 \cdot 10^{-3}$). Buntgras in Meijendel ($4,1 \cdot 10^{-3}$) is een stuk armer aan Ca, maar significant rijker dan Buntgras in de zeer kalkarme duinen van Camperduin ($2,3 \cdot 10^{-3}$) en Fakkkelgras op Texel ($2,7 \cdot 10^{-3}$). Bij grassen is een duidelijk effect van verstuiving te zien, waarbij actieve verstuiving in de (matig) kalkrijke duinen van Meijendel en Texel voor een toename van Ca in de plant zorgen; dit treedt niet op in de kalkarme duinen van Camperduin, en ook niet bij de kruidachtige Geel walstro. Na 10-15 jaar stabilisatie is dit verschil in Ca gehalte nauwelijks nog aanwezig.



Figuur 10-5. N:P-ratio (\pm SD) in Buntgras, Smal fakkelgras en Geel walstro. Codes geven Gebied-Dynamiek-Overstuiving. Betekenis afkortingen: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamisch, S = stabiel; - = geen overstuiving, + = matige overstuiving, ++ = sterke overstuiving. T D ++ betreft slechts 1 monster en kent derhalve geen SD.

Figure 10-5 N:P-ratio (\pm SD) in Grey hair grass, Blue hair grass and Lady's bedstraw. Codes and abbreviations: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamic, S = stable; - = no dynamics, + = moderate dynamics, ++ = strong dynamics. T D ++ contains of only 1 sample (SD misses).

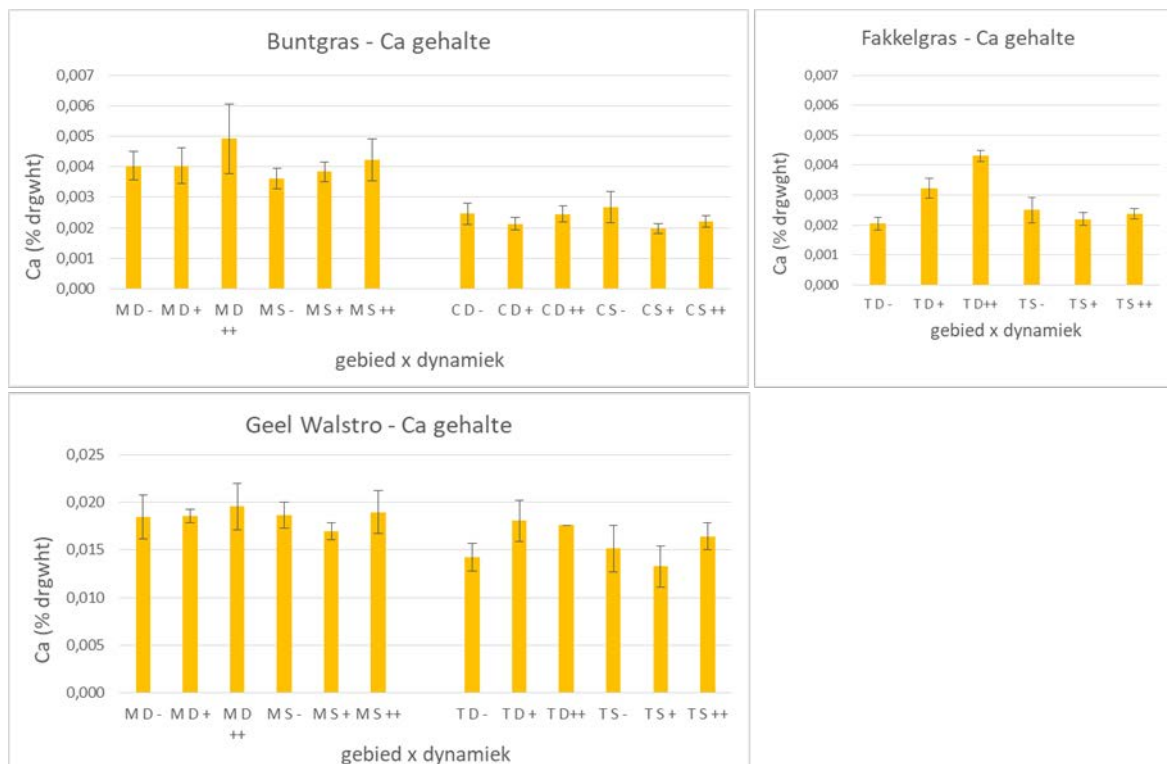
Gehaltes aan Fe (figuur10-7) vertonen eenzelfde patroon als van Ca, met relatief hoge waarden in Geel walstro in kalk- en ijzerrijke duinen van Meijendel ($0,43 \cdot 10^{-3}$) en in Fakkelgras ($0,41 \cdot 10^{-3}$) en Geel walstro in de matig kalk- en ijzerrijke duinen van Texel ($0,38 \cdot 10^{-3}$). Buntgras is als soort armer aan Fe, vooral in de zeer Fe-arme duinen van Camperduin ($0,10 \cdot 10^{-3}$) en in mindere mate in de kalk- en ijzerrijkere duinen van Meijendel ($0,30 \cdot 10^{-3}$). Naast deze verschillen tussen plantensoorten en tussen gebieden is er in het kalk- en ijzerrijke duinzand van Meijendel en Texel treedt er een positief effect van actieve verstuiving op, zowel voor Buntgras, Fakkelgras als Geel walstro. In de het kalk- en ijzer arme duinzand van Camperduin ontbreekt dit effect en na 10-15 jaar stabilisatie is dit effect ook in andere gebieden niet meer aanwezig.

Silicium (figuur10-8) in grassen is lager in planten in een dynamische gradiënt dan in planten in een gestabiliseerde gradiënt. Dit geldt zowel voor Buntgras op Camperduin als Fakkelgras op Texel. Het effect van dynamiek is ook na 10-15 jaar stabilisatie nog aanwezig. Opvallend is dat dynamiek in de kalkrijke duinen van Meijendel geen significant effect laat zien op het Si-gehalte in Buntgras. Het Si-gehalte in Geel walstro varieert sterk, waarbij zowel gebied als mate van dynamiek geen verklarende factor lijken te zijn.

De gehaltes aan Mn% (figuur10-9) vertonen zowel grote verschillen binnen (grote standaarddeviaties) als tussen plantensoorten en tussen gebieden. Er zijn geen consistente effecten van actieve overstuiving op het Mn gehalte van planten. De hoogste waarden worden gevonden in Geel walstro ($0,19 \cdot 10^{-3}$) en Fakkelgras ($0,14 \cdot 10^{-3}$) en de laagste in Buntgras op Camperduin ($0,05 \cdot 10^{-3}$) en Meijendel ($0,04$). Geel walstro in Meijendel ligt daartussen ($0,09$). De bodemchemie lijkt hierbij de voornaamste factor, met hoge waarden van Mn in kalkarme gebieden Camperduin en Texel en vrij lage waarden in het kalkrijke Meijendel. Daarnaast heeft actieve overstuiving een duidelijk negatief effect op het gehalte aan Mn op Texel, zowel voor Geel walstro als voor Fakkelgras.

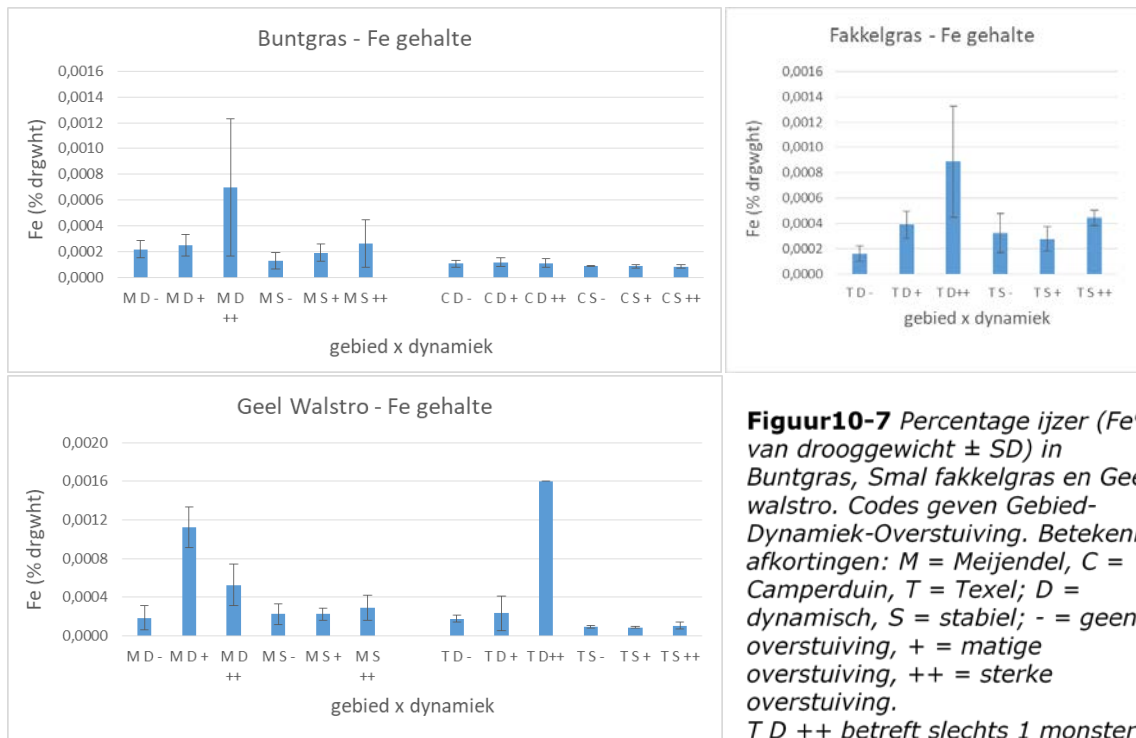
De gehalten aan Mg (figuur10-10) verschillen in Buntgras tussen Meijendel ($0,73 \cdot 10^{-3}$) en Camperduin ($1,00 \cdot 10^{-3}$), en tussen Fakkелgras in een dynamische gradiënt ($0,93 \cdot 10^{-3}$) en in een gestabiliseerde gradiënt ($1,13 \cdot 10^{-3}$). Er zijn geen effecten waarneembaar van de mate van overstuiving op het Mg% in planten. Waar Ca en Fe positief gecorreleerd zijn in planten (figuur x.11) zijn Ca en Fe juist negatief gecorreleerd met Mg. Dit kan komen omdat Mg pas beschikbaar komt in sterker verzuurde, ontcalcite bodems, dus vooral in kalkarme gebieden en pas na stabilisatie.

Opvallend is dat er een sterke correlatie is tussen gehalten van verschillende elementen in de onderzochte planten (figuur10-11). Hierbij zijn Ca en Fe positief gecorreleerd, vooral in de smalbladige grassen Buntgras en Fakkелgras, in mindere mate ook in Geel Walstro. Er is een sterk negatieve correlatie tussen Ca en Mg in Buntgras en tussen Ca en Mn in Fakkелgras en Geel Walstro. Deze correlaties hebben te maken met de verweringsprocessen in de bodem die zorgen voor een omslag in de beschikbaarheid van de elementen en deels door de opnameprocessen door wortels, waarbij een overmaat van Ca en/of Fe de opname van Mg en Mn remt.



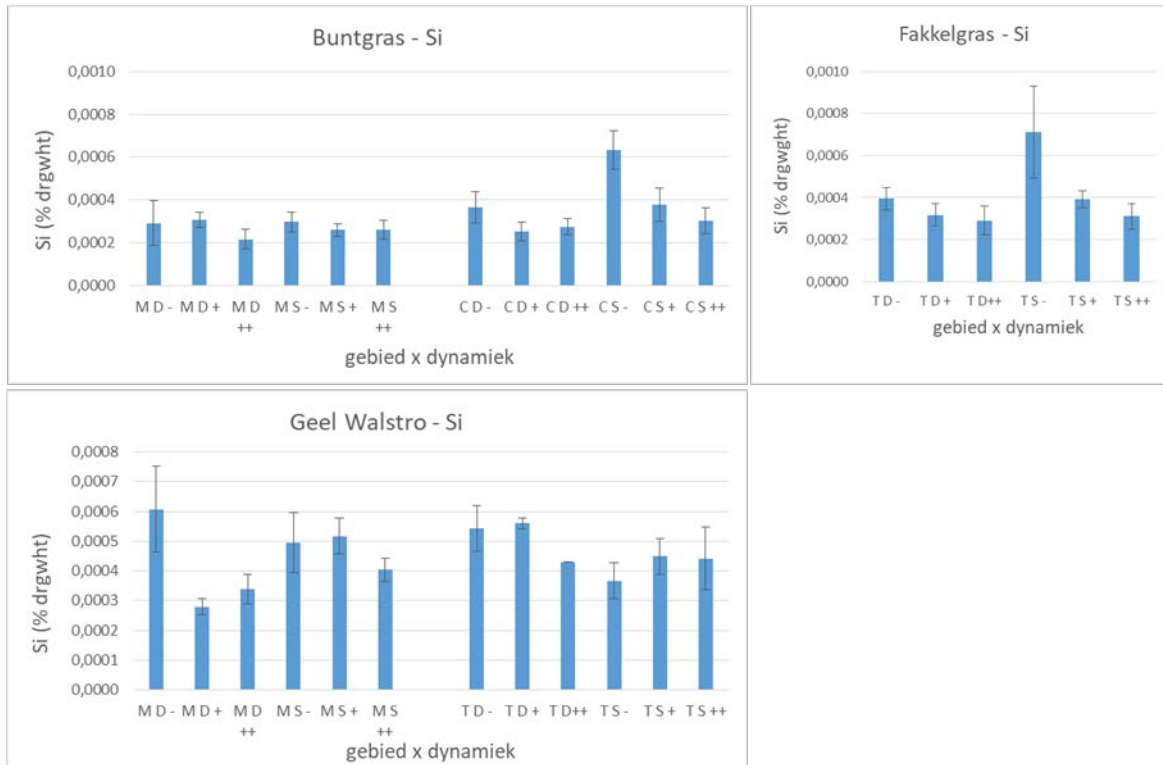
Figuur 10-6 Percentage calcium (Ca% van drooggewicht \pm SD) in Buntgras, Smal fakkелgras en Geel walstro. Codes geven Gebied-Dynamiek-Overstuiving. Betekenis afkortingen: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamisch, S = stabiel; - = geen overstuiving, + = matige overstuiving, ++ = sterke overstuiving. T D ++ betreft slechts 1 monster en kent derhalve geen SD.

Figure 10-6 Percentage of calcium (Ca% of dry weight \pm SD) in Grey hair grass, Blue hair grass and Lady's bedstraw. Codes and abbreviations: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamic, S = stabile; - = no dynamics, + = moderate dynamics, ++ = strong dynamics. T D ++ contains of only 1 sample (no SD).



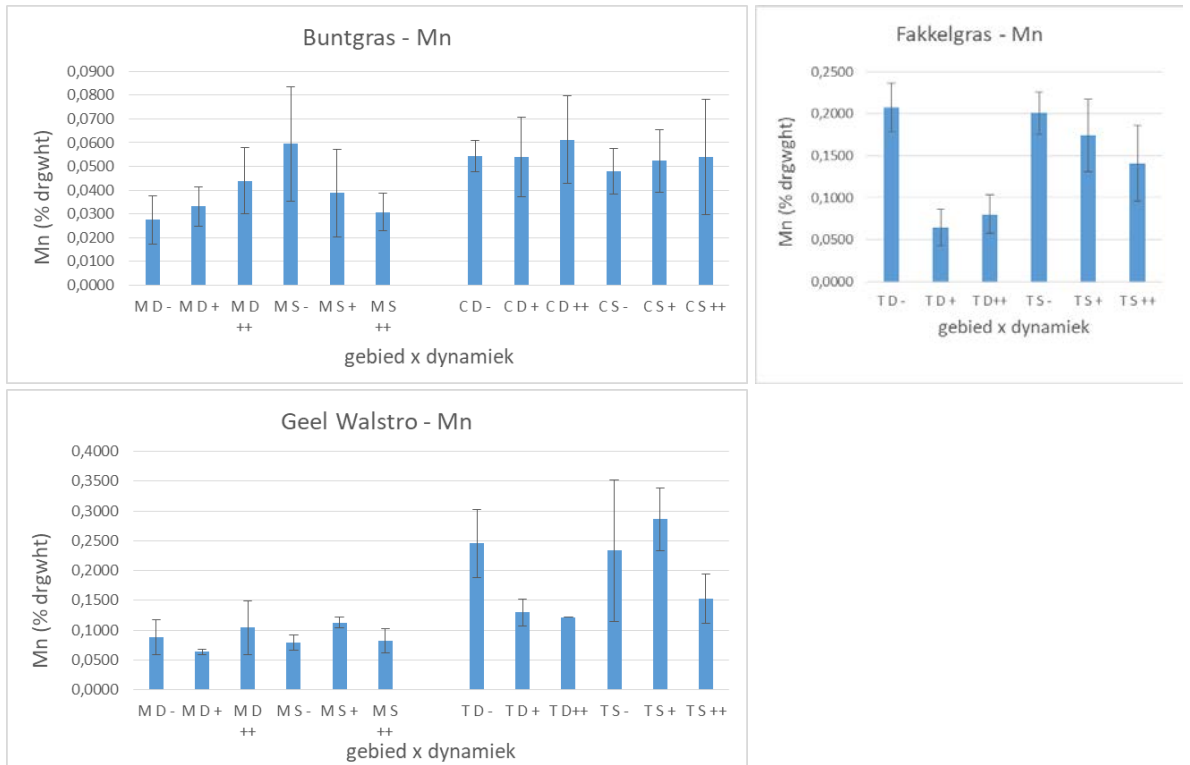
Figuur10-7 Percentage ijzer (Fe% van drooggewicht \pm SD) in Buntgras, Smal fakkelgras en Geel walstro. Codes geven Gebied-Dynamiek-Overstuiving. Betekenis afkortingen: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamisch, S = stabiel; - = geen overstuiving, + = matige overstuiving, ++ = sterke overstuiving. TD ++ betreft slechts 1 monster

Figure10-7 Percentage of iron (Fe% of dry weight \pm SD) in Grey hair grass, Blue hair grass and Lady's bedstraw. Codes and abbreviations: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamic, S = stabile; - = no dynamics, + = moderate dynamics, ++ = strong dynamics. TD ++ contains of only 1 sample (no SD).



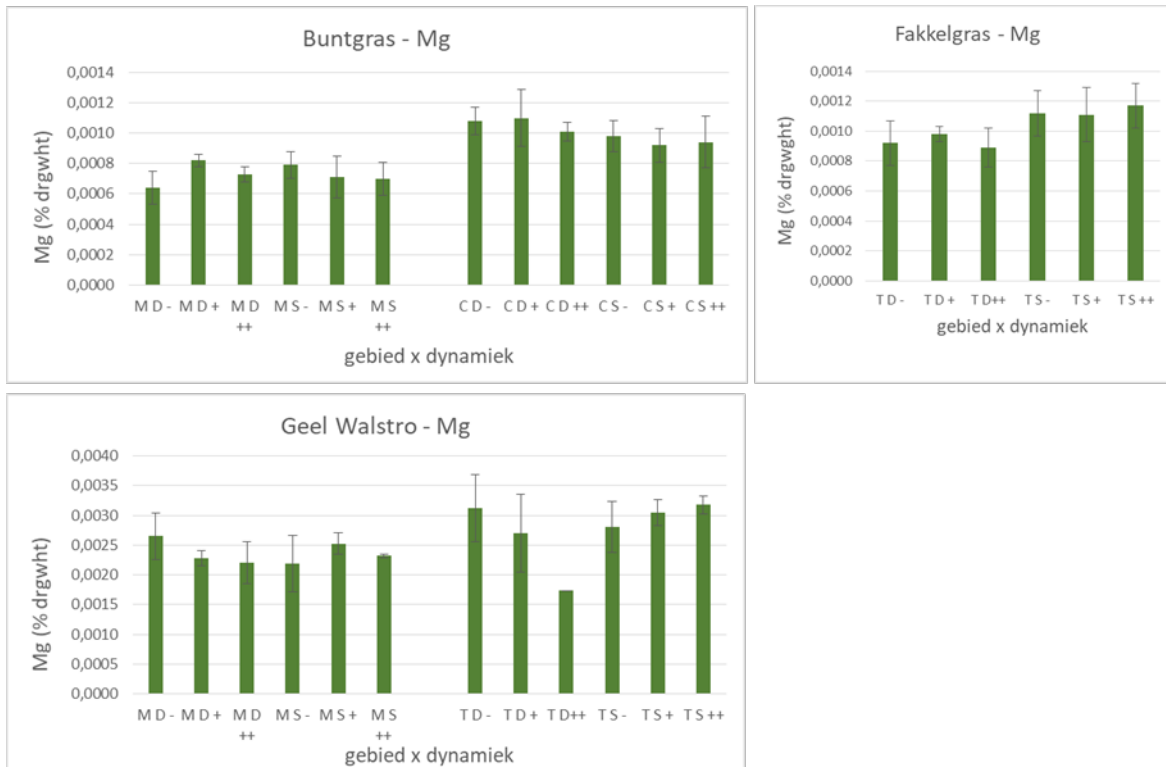
Figuur10-8 Percentage silicium (Si% van drooggewicht \pm SD) in Buntgras, Smal fakkkelgras en Geel walstro. Codes geven Gebied-Dynamiek-Overstuiving. Betekenis afkortingen: M = Meijndel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamisch, S = stabiel; - = geen overstuiving, + = matige overstuiving, ++ = sterke overstuiving. T D ++ betreft slechts 1 monster en kent derhalve geen SD.

Figure10-8 Percentage of silicon (Si% of dry weight \pm SD) in Grey hair grass, Blue hair grass and Lady's bedstraw. Codes and abbreviations: M = Meijndel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamic, S = stabile; - = no dynamics, + = moderate dynamics, ++ = strong dynamics. T D ++ contains of only 1 sample (no SD).



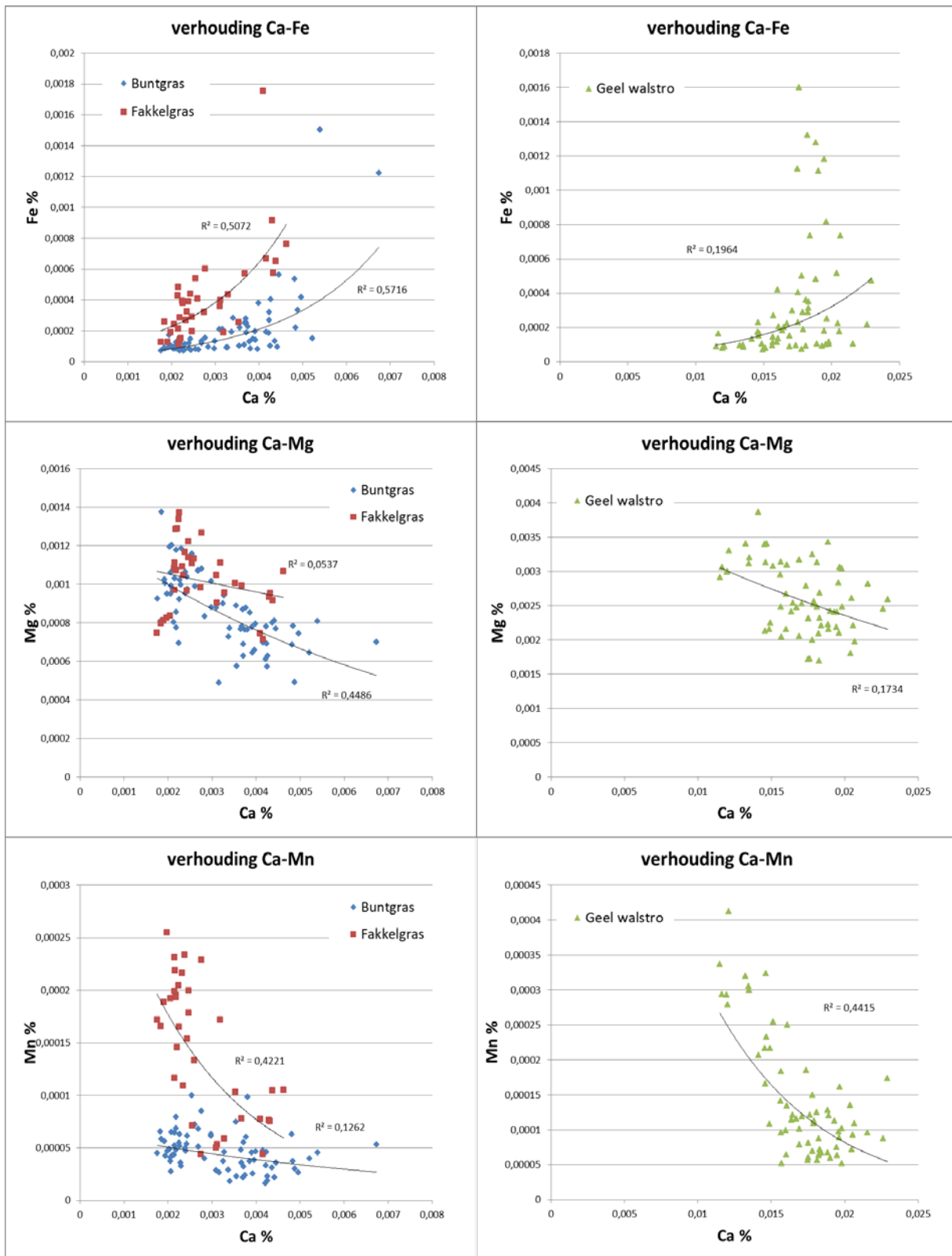
Figuur 10-9 Percentage mangaan (Mn% van drooggewicht \pm SD) in Buntgras, Smal fakkelgras en Geel walstro. Codes geven Gebied-Dynamiek-Overstuiving. Betekenis afkortingen: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamisch, S = stabiel; - = geen overstuiving, + = matige overstuiving, ++ = sterke overstuiving. TD ++ betreft slechts 1 monster en kent derhalve geen SD.

Figure 10-9 Percentage of manganese (Mn% of dry weight \pm SD) in Grey hair grass, Blue hair grass and Lady's bedstraw. Codes and abbreviations: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamic, S = stabile; - = no dynamics, + = moderate dynamics, ++ = strong dynamics. TD ++ contains of only 1 sample (no SD).



Figuur10-10 Percentage magnesium (Mg% van drooggewicht \pm SD) in Buntgras, Smal fakkkelgras en Geel walstro. Codes geven Gebied-Dynamiek-Overstuiving. Betekenis afkortingen: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamisch, S = stabiel; - = geen overstuiving, + = matige overstuiving, ++ = sterke overstuiving. T D ++ betreft slechts 1 monster en kent derhalve geen SD.

Figure10-10 Percentage of magnesium (Mg% of dry weight \pm SD) in Grey hair grass, Blue hair grass and Lady's bedstraw. Codes and abbreviations: M = Meijendel, C = Camperduin, T = Texel; D = dynamic, S = stabile; - = no dynamics, + = moderate dynamics, ++ = strong dynamics. T D ++ contains of only 1 sample (no SD).



Figuur10-11. Positieve correlatie in de verhouding tussen Ca en Fe (boven) en negatieve correlatie in de verhouding tussen Ca en Mg (midden) en Ca en Mn (onder) in Buntgras, Smal fakkelgras en Geel walstro.

Figure10-11 Positive correlation between percentages of Ca + Fe (above), Ca + Mg (middle) and Ca+Mn (below) in plant species Grey h.air grass, Blue hair grass and Lady's bedstraw.

Conclusies plantkwaliteit

Overstuiving heeft geen significant effect op de absolute gehalten aan N, P en C, noch op de verhoudingen tussen deze elementen, in Buntgras, Fakkелgras en Geel Walstro aan het einde van het groeiseizoen. Een uitzondering hierop is dat wanneer de verstuiving leidt tot zeer organisch stof arme bodem, een ondiep wortelende soort als Buntgras lage gehalten aan stikstof en fosfor bevat met een zeer ongunstige C:N ratio tot gevolg. Dit wordt waarschijnlijk deels veroorzaakt door een gebrek aan de beschikbaarheid van N en P en deels door droogtestress die in humusarme bodem eerder optreedt dan in een humeuze bodem. In eerdere onderzoeken (o.a. Nijssen *et al.* 2010, 2011, Wouters & Remke 2012) is aangetoond dat overstuiving wel effecten kan hebben op het N-gehalte van Buntgras en Rood Zwenkgras. Deze grassen werden in dit onderzoek vroeger in het seizoen verzameld, midden in het groeistadium.

Verstuiving heeft wel invloed op de gehalten aan andere elementen, vooral in Buntgras en Fakkелgras en in mindere mate in Geel walstro: door verstuiving neemt Ca en Fe toe in planten, terwijl Si afneemt. Dit effect treedt alleen op waar deze elementen in makkelijk verweerbare mineralen voorkomen (kalk en ijzerhydroxiden) beschikbaar zijn in de bodem: in de kalkloze en ijzerarme bodems van Camperduin ontbreken deze effecten.

Hoe groot het ecologisch effect is van deze verschillen in plantkwaliteit verschilt per diersoort. Verwacht wordt dat in Meijndel en op Texel zowel overstoven als niet-overstoven planten geschikt zijn als voedsel, maar de verschillen in plantkwaliteit door overstuiving kunnen wel de groei en reproductie van herbivoren bevorderen. Op Camperduin is het gehalte aan N in Buntgras in (voormalig) overstoven deelgebieden zodanig laag dat deze voor de meeste herbivoren ongeschikt zal zijn.

10.4.2 Effecten van verstuiving op diergemeenschappen

De effecten van verstuiving op diergemeenschappen zijn gemeten door middel van piramidevallen die in dezelfde strata zijn geplaatst als waar de vegetatie is bemonsterd, in een gradiënt achter een stuifkuil: sterke overstuiving, matige overstuiving en geen overstuiving. Dit is in alle gebieden – Meijndel, Texel en Camperduin - zowel in een actieve verstuivingsgradiënt uitgevoerd als in een sinds 10-15 jaar gestabiliseerde stuifgradiënt. In totaal betreft het 12.472 individuen verdeeld over 50 onderscheiden taxa.

Bij faunagemeenschappen zijn kleine soorten per definitie in hogere dichtheden aanwezig dan grote soorten. Dit betekent dat kleine soorten vaak vrij geleidelijk verdeeld zijn binnen en tussen bemonsterde locaties, maar dat voor grote soorten de trefkans lager is en er dus vaak geen of slechts een enkel individu wordt gevangen. Daarnaast zeggen functionele groepen (bijvoorbeeld ingedeeld op basis van dieet) ecologisch meer dan de variatie in taxonomische families of ordes. In figuur 10-12 is de verhouding tussen aantal individuen en biomassa van deze individuen weergegeven voor alle onderscheiden taxonomische groepen. In deze analyse is er daarom voor gekozen om niet met het aantal individuen te rekenen, maar met de totale biomassa van alle dieren binnen een trofische groep (zie §10-3.3 voor de indeling in trofische groepen). Daarbij is wel geanalyseerd of de patronen consistent zijn voor kleine (<5mm), middelgrote (6-14 mm) en grote soorten (>14 mm).

In dit hoofdstuk analyseren we de effecten van verstuiving op diergemeenschappen van een groot naar een klein schaalniveau. Eerst worden vangsten van alle gebieden bij elkaar gevoegd en geanalyseerd of er consistente patronen zijn over de gradiënt van sterke, matige en niet overstoven locaties (is er een overall effect van overstuiving?). Daarna wordt geanalyseerd of er overeenkomstige patronen zijn tussen actieve stuifgradiënten en gestabiliseerde stuifgradiënten (zijn de effecten van overstuiving duurzaam?). Doordat de gebieden in deze analyse bij elkaar worden gevoegd is de steekproef van vangsten groot genoeg om met statistische analyses te werken (zie § 1.3.5). Bij deze analyses wordt een p-waarde van 0.05 gehanteerd voor significante verschillen en een p waarde van 0.06-0.10 voor trends (near-significant verschillen). Bij p-waardes hoger dan 0.10 worden de verschillen als niet significant beschouwd. Na deze grootschalige analyses zoomen we in op de effecten per gebied en kunnen de patronen tussen gebieden vergeleken worden. Omdat in elk onderzocht gebied zowel de factor 'mate van verstuiving' als 'actieve/stabiele gradiënt' een rol spelen, is de steekproef per locatie (n=2 vallen over drie bemonsteringsrondes) te klein om een statistische analyse op uit te voeren. De patronen zullen op dit schaalniveau alleen worden beschreven zonder verdere toetsing.

Effecten van overstuiving op diergemeenschappen

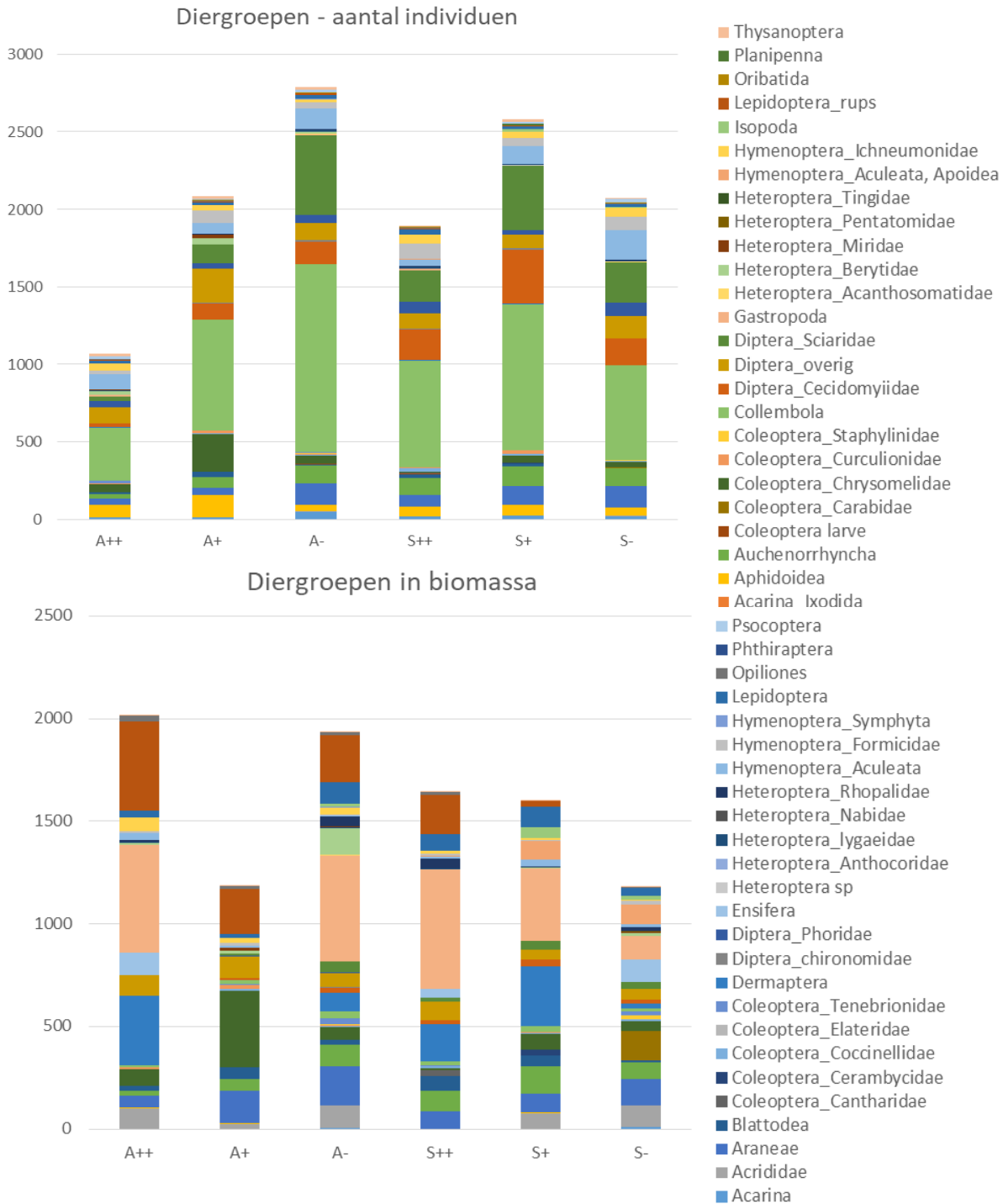
Effecten van sterke en matige overstuiving in actieve gradiënten en gestabiliseerde gradiënten zijn getoetst voor alle gebieden samen (tabel 10-4). Hieruit blijkt dat er voor de meeste trofische groepen geen significant effect van verstuiving is, met uitzondering van negatieve effecten van

actieve verstuiwing op detritivoren en in mindere mate herbivore grazers en browsers en omnivoren. Geen enkel negatief effect op diergroepen is gevonden van verstuiwing nadat deze gestabiliseerd is. Wel is er een klein positief effect van gestabiliseerde verstuiwing op herbivore grazers en omnivoren.

Effecten van stabilisatie van dynamiek op diergemeenschappen

In tabel 10-5 is voor alle strata van overstuiwing (geen, matige en sterke overstuiwing) geanalyseerd of de effecten in actieve gradiënten anders zijn dan in gestabiliseerde gradiënten. Het aantal significante effecten is zeer laag: wanneer alle gebieden samen worden geanalyseerd, wijken de effecten van actieve verstuiwing niet significant af van de gestabiliseerde vergelijkbare locaties.

Positieve effecten van actieve verstuiwing ten opzichte van vergelijkbare gestabiliseerde situaties betreffen herbivore grazers en browsers en dan met name in het stratum 'geen overstuiwing'. Negatieve effecten van actieve overstuiwing ten opzichte van gestabiliseerde locaties zijn enkel vastgesteld voor omnivoren bij sterke overstuiwing.



Figuur10-12 Verdeling in aantal individuen (boven) en biomassa (beneden) van de bemonsterde taxonomische groepen gesommeerd voor alle gebieden, in een actieve gradiënt met strata sterke (A++), matige (A+) en geen overstuiving (A-) en in een gestabiliseerde gradiënt met strata voorheen veel (S++), matige (S+) en geen overstuiving (S-).

Figure10-12 Distribution of total individuals (above) and calculated biomass (below) of taxonomic groups for all research areas, in an active gradient with strong (A++), moderate (A+) and no sand accumulation (A-), as well as in a stabilised gradient with former strong (S++), moderate (S+) or no (S-) sand accumulation.

Tabel10-4 Overzicht uitkomsten van Linear Mixed Effects Model, waarbij zowel binnen actieve als gestabiliseerde gradiënten de effecten van matige en sterke overstuiving zijn getoetst ten opzichte van geen overstuiving. Betekenis kleuren: rood= significant negatieve effecten ($p < 0.05$); roze= near-significant negatieve effecten ($p < 0.10$); lichtgroen= near-significant positieve effecten ($p < 0.10$); groen = significant positieve effecten ($p < 0.05$). Voor grote ongewervelden waren er voor verschillende groepen nul-waarnemingen zodat er geen toets kon worden uitgevoerd.

Table10-4. Results of Linear Mixed Effects Model, in which effects of strong (sterk) and moderate (matig) sand accumulation are tested against absence of sand accumulation for active and stabilised gradients. Red = significant negative effect ($p < 0.05$) pink = near-significant negative effect ($p < 0.10$), soft green = near-significant positive effect ($p < 0.10$) and green = significant positive effect ($p < 0.05$). Large invertebrates were sometimes absent or in such small numbers that no test could be applied.

Trofische groep	gradiënt	verstuiving	p-waarden			
			klein	gemiddeld	groot	totaal
totaal	actief	matig	0,54	0,90	0,14	0,93
		sterk	0,18	0,34	0,59	0,62
	stabiel	matig	0,88	0,80	0,81	0,42
		sterk	0,42	0,79	0,75	0,24
carnivoren	actief	matig	0,70	0,62	1,00	0,80
		sterk	0,99	0,15	0,36	0,18
	stabiel	matig	0,32	0,34	-	0,63
		sterk	0,47	0,30	-	0,97
detritivoren	actief	matig	0,03**	0,08	-	0,04
		sterk	0,01	0,08	-	0,05
	stabiel	matig	0,60	0,28	-	0,41
		sterk	0,76	0,59	-	0,72
herb.grazers	actief	matig	0,22	0,76	0,05	0,54
		sterk	0,69	0,44	0,46	0,68
	stabiel	matig	0,34	0,47	0,43	0,08
		sterk	0,45	0,81	0,58	0,58
herb.browsers	actief	matig	0,65	0,09	-	0,22
		sterk	0,56	0,08	-	0,10
	stabiel	matig	0,33	0,49	-	0,91
		sterk	0,40	0,64	-	0,31
omnivoren	actief	matig	0,52	0,37	0,53	0,89
		sterk	0,02	0,38	0,22	0,54
	stabiel	matig	0,91	0,65	0,29	0,67
		sterk	0,07	0,88	0,47	0,04

Tabel10-5 Overzicht uitkomsten van Linear Mixed Effects Model, waarbij de effecten in een actieve gradiënt voor geen, matige en sterke overstuiving zijn getoetst ten opzichte van de gestabiliseerde gradiënt. Alleen categorieën waarin significante effecten zijn gevonden zijn weergegeven. Betekenis kleuren: rood= significant negatieve effecten; roze=near-significant negatieve effecten; lichtgroen=near-significant positieve effecten; groen = significant positieve effecten.

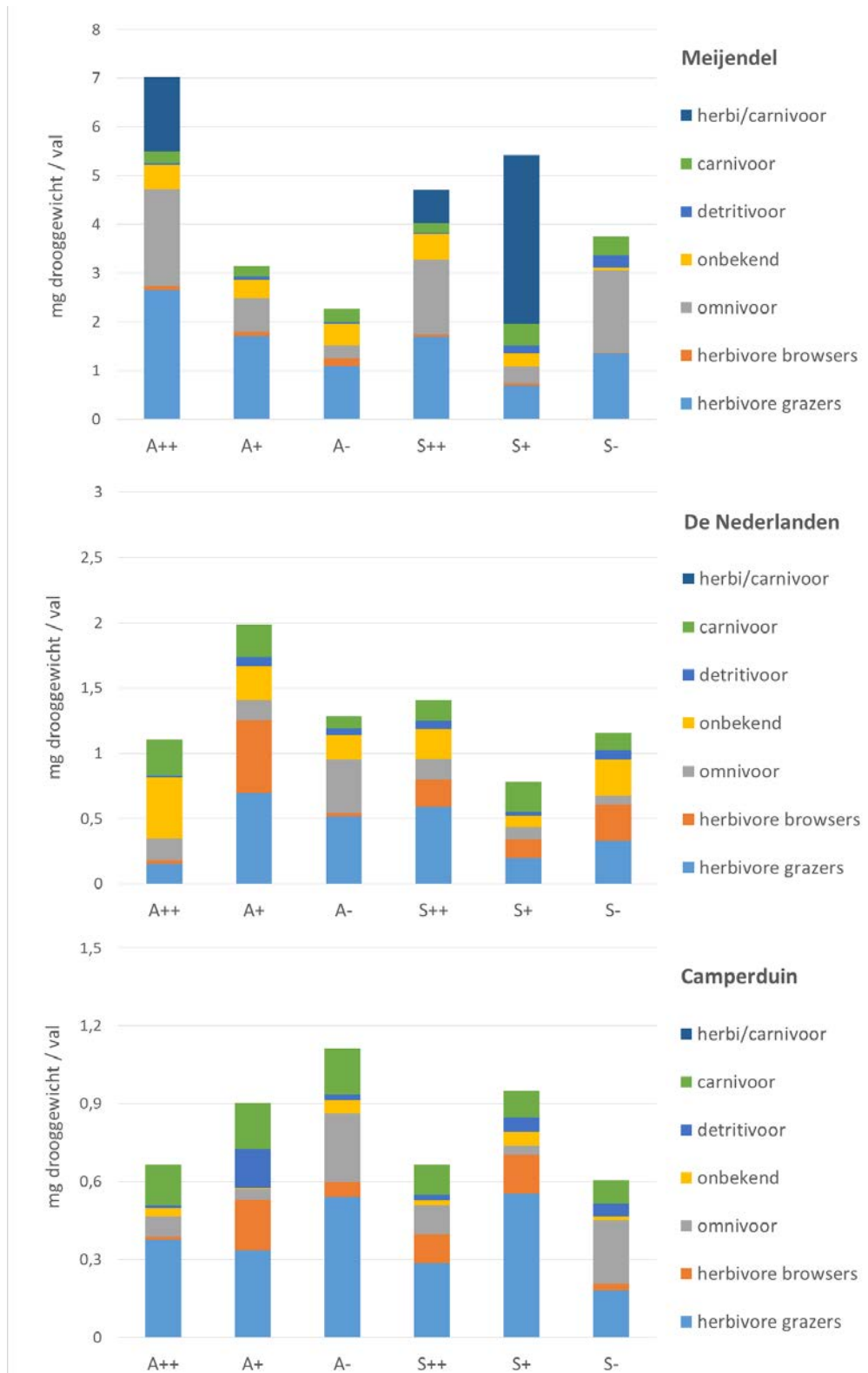
Table10-4. Results of Linear Mixed Effects Model, in which effects in an active gradient are tested against a stabilised gradient for strong (sterk) and moderate (matig) sand accumulation. Red = significant negative effect ($p < 0.05$) pink = near-significant negative effect ($p < 0.10$), soft green = near-significant positive effect ($p < 0.10$) and green = significant positive effect ($p < 0.05$).

		overstuiving	trend	p-waarde
klein (<6 mm)	herbivore browsers	niet	meer	0,04
		matig	meer	0,46
		sterk	meer	0,94
klein (<6 mm)	omnivoren	niet	minder	0,28
		matig	minder	0,40
		sterk	minder	0,04
medium (6-14 mm)	Carnivoren	niet	meer	0,27
		matig	meer	0,25
		sterk	meer	0,07
groot (>10 mm)	herbivore grazers	niet	meer	0,09
		matig	minder	0,19
		sterk	meer	0,48
Totaal	herbivore grazers	niet	meer	0,07
		matig	meer	0,58
		sterk	meer	0,53
Totaal	herbivore browsers	niet	meer	0,07
		matig	meer	0,51
		sterk	minder	0,44
Totaal	omnivoren	niet	minder	0,33
		matig	minder	0,30
		sterk	minder	0,05

Verschillen in effect op diergemeenschappen tussen gebieden

In figuur10-13 zijn de gemiddelde biomassa per val weergegeven van de verschillende trofische niveaus voor de drie onderzochte gebieden. Hierbij valt op dat de dichtheden aan biomassa in Meijndel gemiddeld veel hoger liggen (2-7 mg per val) dan die op Texel (0,7-2 mg/val) en Camperduin (0.6-1.1 mg/val). Hierbij valt op dat met name herbivore grazers, omnivoren en herbi-carnivoren (vooral sabelsprinkhanen en loopkevers) in veel hogere mate zijn gevangen in Meijndel ten opzichte van de andere gebieden.

Daarnaast zijn ook de patronen als gevolg van verstuing verschillend. In Meijndel lijkt er een duidelijk positief effect te zijn van actieve verstuing, wat vooral wordt veroorzaakt door een hoger aantal grote ongewervelden dat is gevangen. Dit verklaart ook het grote verschil tussen aantal individuen en biomassa in figuur10-12 bij actieve overstuiving. In de gestabiliseerde gradiënt in Meijndel is dit patroon niet meer aanwezig, hoewel er in de sterk en matig overstoven locaties wel meer biomassa is gevangen dan in de niet overstoven locatie. Bij De Nederlanden op Texel is dit patroon in het geheel afwezig: zowel in de actieve als in de stabiele gradiënt is er geen duidelijk effect waar te nemen van overstuiving. Op Camperduin lijkt de actieve overstuiving juist een negatief effect te hebben op de biomassa, met name op die van herbivoren en omnivoren. Ook hier geldt dat dit patroon in de gestabiliseerde gradiënt afwezig is.



Figuur 10-13 Overzicht van verdeling in biomassa van de trofische groepen per gebied, in een actieve gradiënt met strata sterke (A++), matige (A+) en geen overstuiving (A-) en in een gestabiliseerde gradiënt met strata voorheen veel (S++), matige (S+) en geen overstuiving (S-). N.B. de schaal op de y-assen varieert.

Figure 10-13. Biomass of trophic groups per research area in an active gradient (A) and stabilized gradient (S) with strong (++), moderate (+) and no sand accumulation (-). N.B. Scale of y-axes differ between graphs.

10.4.3 Effecten op sprinkhanengemeenschap

In tabel10-6 zijn de aantallen sprinkhanen weergegeven die zijn geteld tijdens de punttellingen. Voor de meeste soorten geldt dat de totale aantallen als ook de gemiddelde totaal aantallen per telpunt niet verschillen tussen actieve en gestabiliseerde duinlandschappen. Het gemiddeld aantal soorten dat per telpunt is waargenomen verschilt op Texel wel significant ($p=0,04$), met gemiddeld 1.36 soorten in het dynamische gebied en 1.18 in het stabiele gebied. In Meijndel is geen verschil in gemiddeld aantal soorten vastgesteld.

Wel zijn er verschillen tussen de onderzochte gebieden. Net als voor de herbivoren en omnivoren bij de faunabemonsteringen met piramidevallen (zie § 1.4.2) is de dichtheid aan sprinkhanen in Meijndel hoger dan de dichtheden op Texel.

Tabel10-6 Aantal sprinkhanen waargenomen tijdens de punttellingen in actieve delen en gestabiliseerde delen (100x100 meter) van de onderzoeksgebieden Meijndel en De Nederlanden op Texel.

Table10-6 Number of grasshoppers counted in plots in active and stabilised parts (100x100m) of the research areas Meijndel and De Nederlanden-Texel.

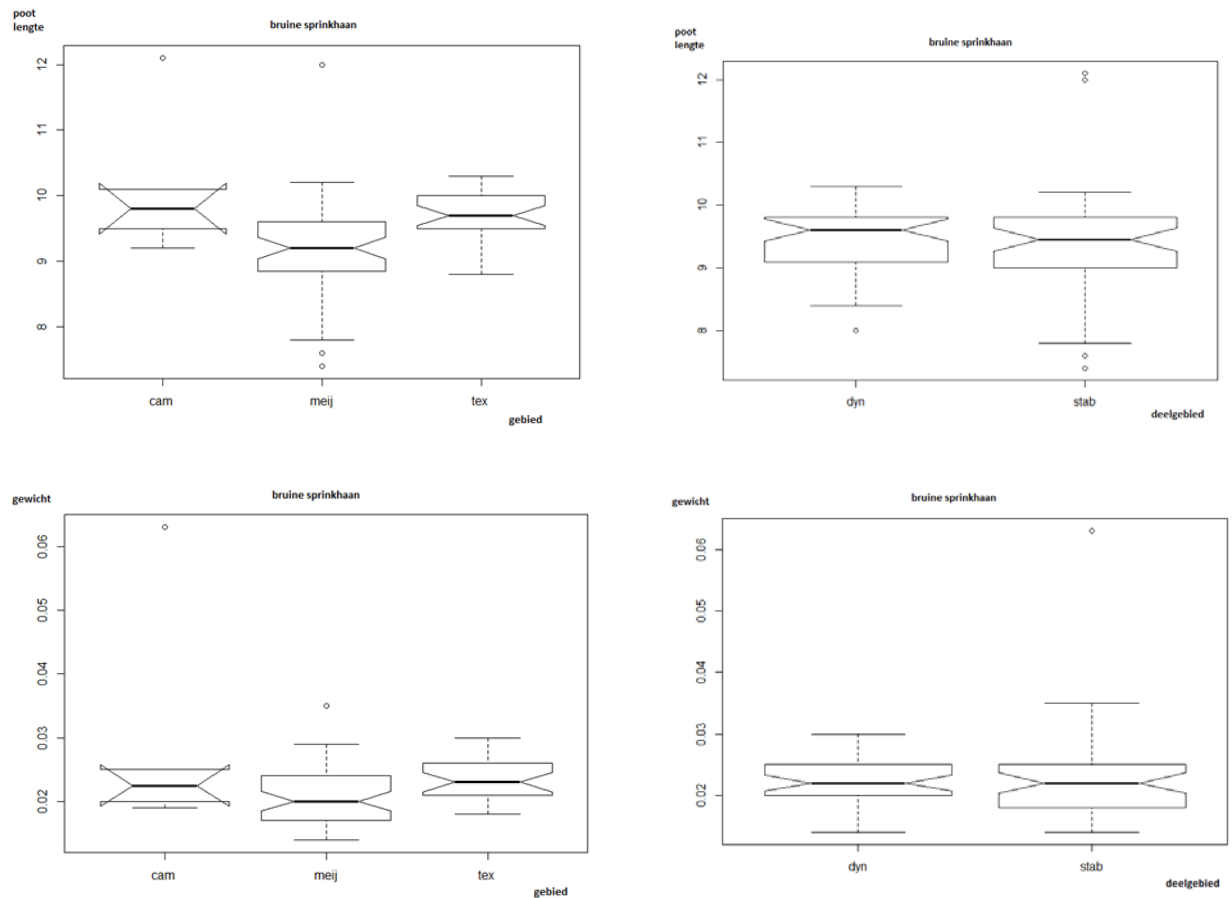
gebied	dynamiek												# soorten gemiddeld	# individuen gemiddeld
		Knopsriet	Duinsabelsprinkhaan	Bruine sprinkhaan	Wekkertje	Gr. groene sprinkhaan	Snortikker	Gewoon spritskopje	Spitskopje sp.	Ratelaar	Blauwleugelsprinkhaan	Sikkelsprinkhaan		
Meijndel	Dynamisch	50	32	50	-	3	10	1	-	4	39	1	1,80	6,28
	Stabiel	49	36	50	-	-	25	1	2	-	46	3	1,83	6,75
Texel	Dynamisch	49	33	49	25	1	-	-	-	-	48	-	1,36	5,56
	Stabiel	37	35	50	27	1	-	-	-	-	47	-	1,18	4,59

Zowel op Texel als in Meijndel zijn er individuen gevangen van Knopsrietjes en Bruine Sprinkhanen. Deze zijn onderverdeeld in mannetjes en vrouwtjes, aangezien de mannen bij sprinkhanen altijd kleiner en lichter in gewicht zijn dan de vrouwtjes. Vervolgens zijn zowel grootte van het halsschild, pootlengte en drooggewicht bepaald van deze dieren.

In figuur10-14 zijn de grafieken voor pootlengte en gewicht weergegeven voor beide soorten. De overige grafieken staan in Bijlage XXX-2. Er is voor geen enkele soort een significant effect gevonden van overstuiving of gebied op de grootte of gewicht van sprinkhanen.

Figuur10-14. Boxplots van pootlengte (mm) en drooggewicht (mg) voor Bruine sprinkhaan (*Chorthippus brunneus*) in de gebieden Camperduin (cam), Meijendel (meij) en Texel (tex) (links) en voor de behandeling actief dynamisch (dyn) en stabiel (stab).

Figure10-14 Boxplots of femur length (mm) and dry weight (mg) of grasshoppers *Chorthippus brunneus* in research areas Camperduin (cam), Meijendel (meij) and Texel (tex) (links) and treatments active dynamic gradient (dyn) and stabile (stab).



10.4.4 Conclusies effecten op fauna

Verstuiving heeft op lokale schaal een effect op diergemeenschappen, waarbij vooral de dichtheid (biomassa) aan detritivoren en omnivoren (waaronder een groot aantal soorten dat voornamelijk van detritus leeft) een negatief effect ondervindt van actieve overstuiving. Herbivoren en carnivoren kennen geen algemeen effect van verstuiving. In Meijendel is er een positieve correlatie tussen verstuiving en gevangen biomassa, wat wellicht te maken heeft met de kalkrijkdom van de bodem: zowel de 'basis' voedselkwaliteit van planten zonder verstuiving, als het positieve effect van verstuiving op de voedselkwaliteit treedt op in dit gebied en wordt weerspiegeld in de faunavangsten. Daartegenover kent het zeer kalkarme en ijzerarme gebied Camperduin de slechtste plantkwaliteit, met een negatief effect van actieve overstuiving en is hier ook de laagste dichtheid aan fauna aangetroffen, vooral op de sterk overstoven locaties. Op Texel zijn geen duidelijk effecten van verstuiving waargenomen op de fauna.

Het lijkt er daarmee op dat positieve effecten van verstuiving op het voedselweb op kunnen treden in kalkrijke duinen, en dat deze effecten ontbreken in kalkarme en matig kalkrijke duinen. Dit effect kon echter niet worden getoetst door een combinatie van een lage steekproef van gebieden (n=3) en per unieke locatie (n=2) en het feit dat de meeste biomassa bepaald wordt door grote diersoorten die niet normaal verdeeld in de steekproef aanwezig zijn, maar een zero-inflated spreiding van data kennen.

Zowel met betrekking tot de fauna als de plantkwaliteit zorgt stabilisatie van verstuiving na 10-15 jaar tot het verdwijnen van deze patronen, met de kanttekening dat de resultaten in Meijendel er op wijzen dat het (grotere) effect in kalkrijke duinen waarschijnlijk langer blijft bestaan.

Op landschapsschaal is er in dit onderzoek geen effect van dynamiek vastgesteld op de abundantie, grootte of soortdiversiteit in sprinkhanen.

11.1 Patronen en trends van kleinschalige verstuiving in relatie tot abiotische en biotische factoren

In dit onderzoek zijn de patronen en de recente trends in ontwikkeling van kleinschalige dynamiek in de Nederlandse kustduinen geanalyseerd. Dit betrof spontane kleinschalig dynamiek, veelal in de vorm van secundaire stuifkuilen in het duingebied achter de zeereep/zeewering. Bij deze analyse zijn patronen en trends beschreven en in verband gebracht met diversen factoren (abiotisch, biotisch en antropogeen). Daarbij stonden de volgende onderzoeksvragen centraal:

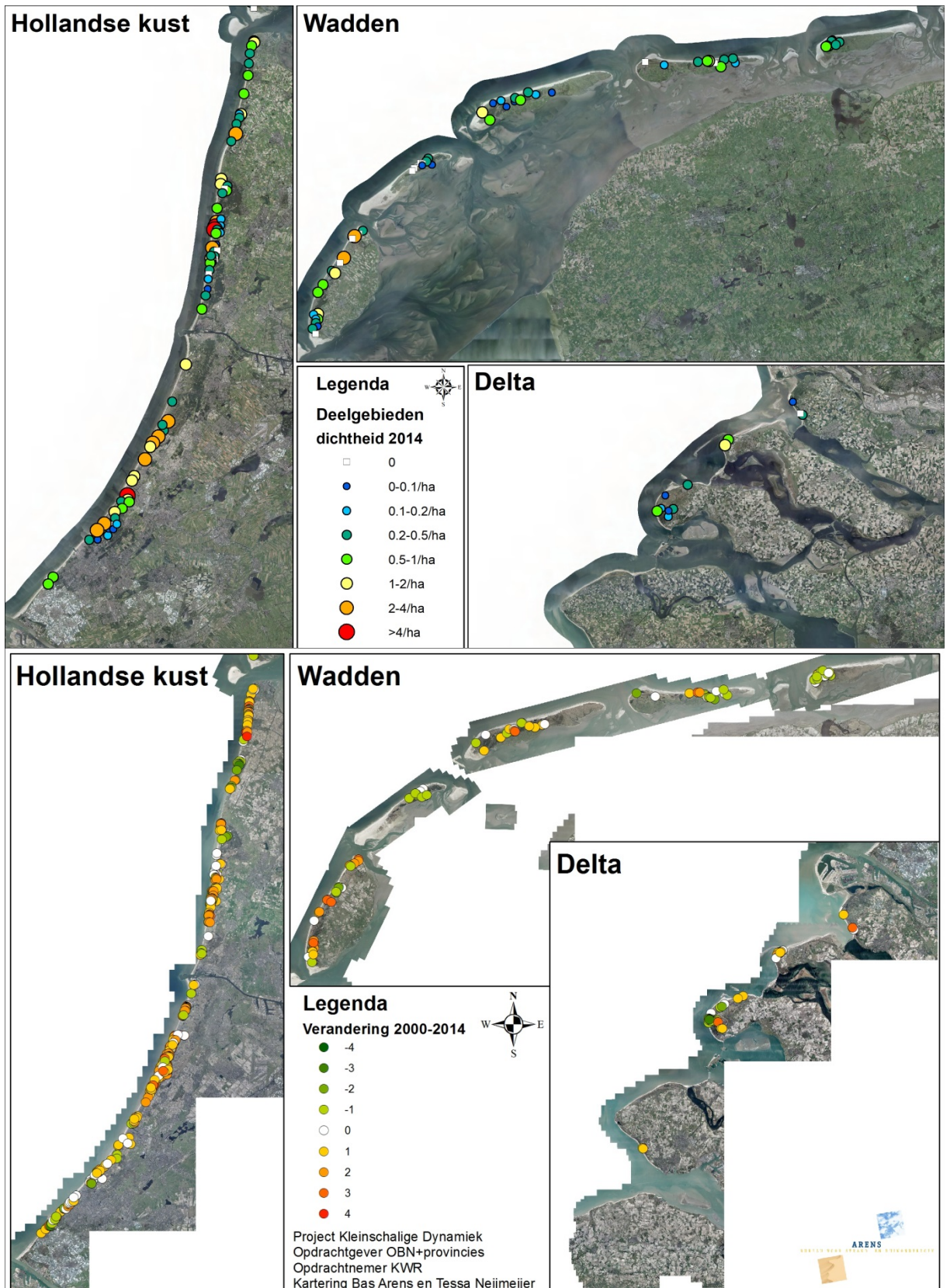
- *Wat zijn verschillen in (a)biotische factoren (klimaat/ meteorologie, N-depositie, ligging, bodem, omliggende vegetatie, kalkrijkdom van de bodem, begrazing, betreding, konijnen etc.) van locaties die lang eolisch actief zijn en van locaties die snel spontaan stabiliseren?*
- *Welke abiotische en biotische factoren bepalen de hoeveelheid en activatie van secundaire stuifkuilen in duingebieden in de recente situatie van de Nederlandse kustduinen?*

11.1.1 Actuele patronen en trends van kleinschalige verstuiving

Voor de start van dit onderzoek was nog maar weinig bekend over de precieze toestand van de kust met betrekking tot kleinschalige dynamiek. Er was wel een globaal beeld van stuifkuilactiviteit in verschillende gebieden, maar een onderbouwing met exacte data ontbrak. Voor de PAS worden richtlijnen gebruikt die gebaseerd zijn op de toestand in één gebied. Deze richtlijnen worden algemeen toegepast, terwijl niet bekend is van welke verschillende factoren bijvoorbeeld de dichtheid van stuifkuilen in een bepaald gebied afhankelijk is. Om inzicht te krijgen in de verdeling van stuifkuilen over de Nederlandse kust, en de recente ontwikkeling hiervan, is een kartering uitgevoerd van de eolisch actieve gebieden, met het aantal stuifkuilen en de mate van activiteit in het gebied in 2000 en 2014. Uit de inventarisatie blijkt dat er grote verschillen bestaan in de mate van kleinschalige verstuiving en recente trends tussen regio's (Figuur 11-1).

Op de Wadden is het aantal actieve stuifkuilen gering, de gemiddelde dichtheid is laag, met 0.3 kuil per hectare (of 30 per km²). Langs de Hollandse kust is er veel variatie, met gebieden met een afname, vooral rond Bergen aan Zee zuid, maar verder overwegend een toename in aantal. De dichtheid hier is gemiddeld hoger dan op de Wadden, met 0.5 kuil per hectare of 50 per km², met uitschieters naar 1 en zelfs 6 kuilen per hectare of 100-600 per km². In de Delta is het aantal actieve stuifkuilen bijzonder laag met gebieden waar nauwelijks verstuiving optreedt. De gemiddelde dichtheid is met 0.16 kuil per hectare of 16 per km² zeer gering. De grootste tweedeling in verstuivingsactiviteit ligt tussen het kalkarme Waddendistrict en het kalkrijke Renodunaal district. Opvallend is dat met vooral in het kalkarme Waddendistrict het aantal kuilen overwegend is afgenomen, met als gunstige uitzondering Texel en de Landerumerheide op Terschelling. Langs de kalkrijke Hollandse kust is het aantal kuilen vooral toegenomen in de hoge duinmassieven in duinzones dichtbij de kust, soms extreem. Hier zijn de middenduin- en binnenduinzones van brede duingebieden echter weer minder actief.

Bovengenoemde regionale verschillen in het verstuivingspatroon zijn een indicatie dat factoren met een patroon op een regionale schaal belangrijk zijn voor het ruimtelijke en temporele patroon van verstuiving.



Figuur 11-1: Het ruimtelijke patroon van de dichtheid van actieve stuifkuilen in 2014 en de trends in kleinschalige dynamiek tussen 2000 en 2014. Bij trend: -4 is extreme stabilisering, 0 geen verandering, 4 extreme activering.

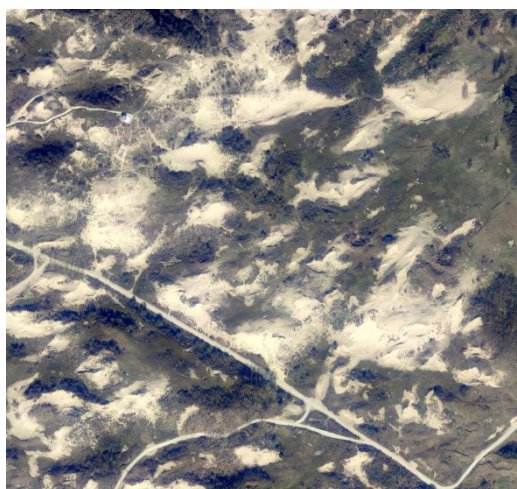
Figuur 11-1: The spatial pattern of active blowout density in 2014, and trends in small-scale dynamics between 2000 and 2014. Indication for trends: - 4 = extremely stabilising, 0 = no change, 4 = extremely activation.



Terschelling, Landerumerheide



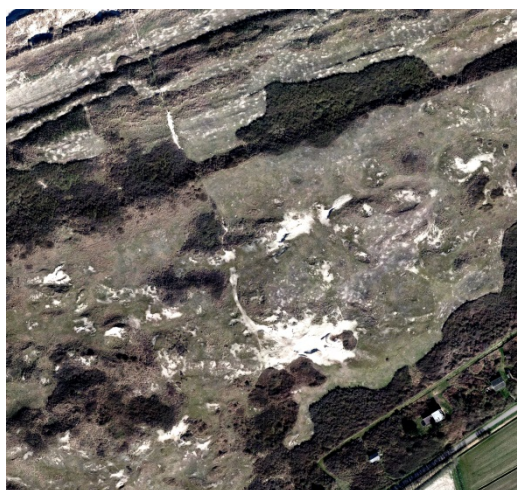
Terschelling, Oosterend



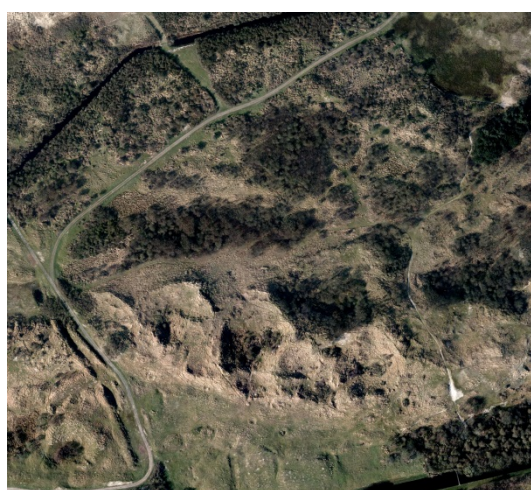
Zuid-Holland, Vlaggeduin



Noord-Holland, Zuid-Kennemerland



Goeree, Midden



Walcheren, Oranjezon

Figuur 11-2: Voorbeelden van gebieden met veel (links) en met weinig kleinschalige verstuiving (rechts). Boven voor een Waddeneiland, midden voor Zuid/ Noord-Holland en onder voor de Delta.

Figure 11-2: Examples of dune areas with much (left) and with little (right) small-scale aeolian activity. Above for a barrier island in the Wadden region, mid for Zuid/ Noord-Holland and below for the Delta region.

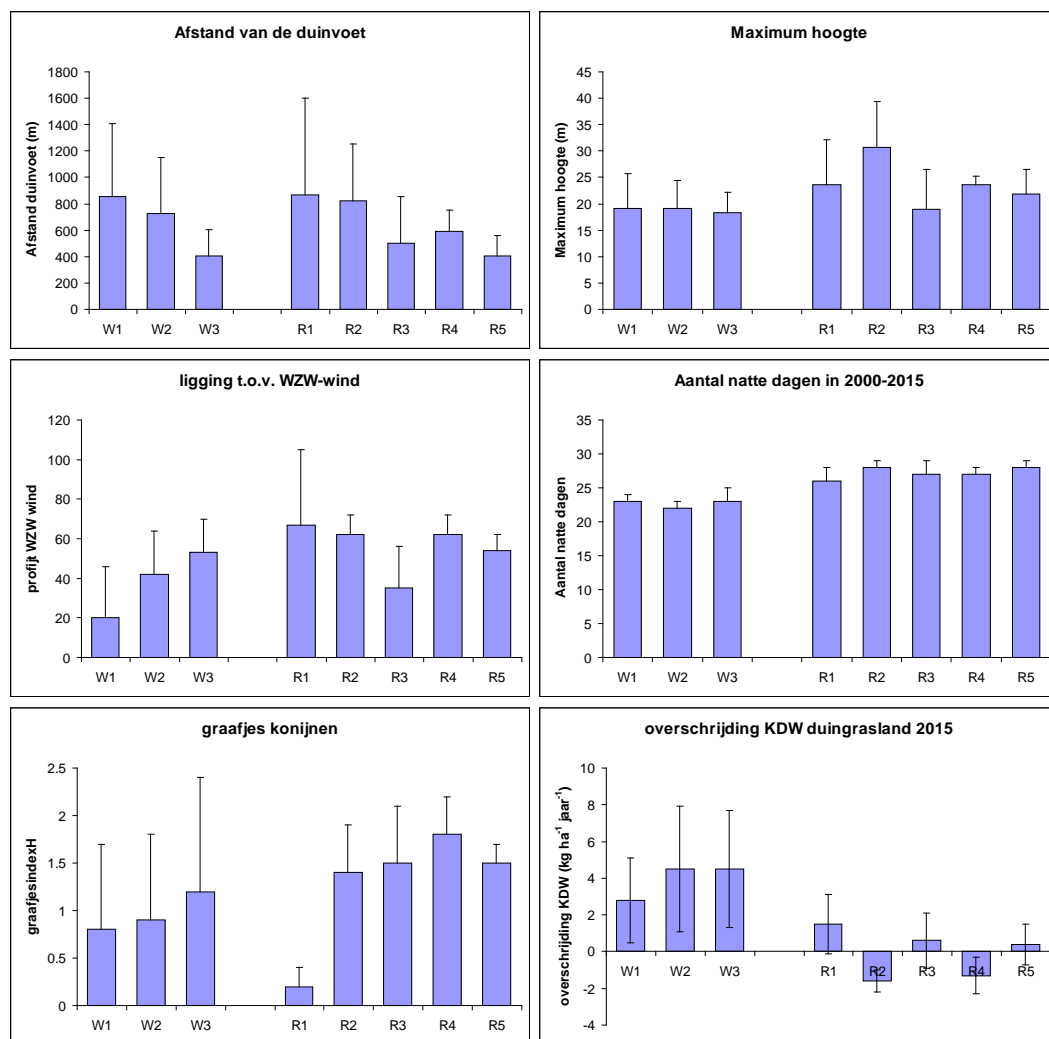


Foto 11-1: In het Vlaggenduin is de verstuivingsdynamiek sterk toegenomen. De dichtheid aan stuifkuilen is hier zo hoog dat de ruimtelijke effecten van afzonderlijke stuifkuilen op de bodem en vegetatie elkaar deels overlappen.

Foto 11-1: In dune area het Vlaggenduin aeolian dynamics increased strongly. Because the density of blowouts became is so high, spatial effects on soil and vegetation of separate blowouts partly overlap.

11.1.2 Samenspel van factoren is belangrijk voor aanwezigheid kleinschalige verstuiving

De gevonden patronen en trends van kleinschalige verstuivingsactiviteit in de kustduinzone zijn lastig te verklaren op basis van alleen afzonderlijke factoren. De verschillen in eolische activiteit tussen kustregio's en duingebieden lijken vooral veroorzaakt door elkaar versterkende factoren en niet door één dominante factor. Het aantal stuifkuilen per km² en het percentage actief en zeer actief oppervlak is in de kalkrijke duinen van het Renodunaal district gemiddeld vele malen hoger dan in de kalkarme duinen van het Waddendistrict. In zowel het Waddendistrict als het Renodunaal district liggen de gebieden met relatief veel stuifkuilen het dichtst aan zee (Figuur 11-3). Maar in de kalkarme duinen van het Waddendistrict is de situatie verder relatief ongunstig door een optelsom van (1) lagere maximum hoogte van duinmassieven, (2) ongunstiger ligging op de wind, (3) minder neerslag en natte dagen, (4) lagere kalkrijkdom en pH van de bodem, (5) een lagere konijnenstand en (6) een N-depositie die hoger is dan de KDW voor kalkarme Grijze duinen met een overmaat aan NH₄. De hoogste eolische dynamiek wordt in het Waddendistrict gevonden bij een relatief korte afstand van de duinvoet en een gunstige expositie van de kust t.o.v. de WZW-wind, de nettotransportrichting.



Figuur 11-3. Gemiddelde waarden en standaarddeviaties van factoren voor verschillende stuifkuiklassen in de kalkarme en kalkrijke duinen van het Wadden- en Renodunaal district. W = Waddendistrict; R = Renodunaal district; 1 = 0-10, 2 = 11-20; 3 = 21-50; 4 = 51-100 en 5 = > 100 stuifkuilen per km².

Figuur 11-3: Average values and standard deviations of factors for different classes for aeolian activity in the acidic dunes in the Wadden region (W) and calcareous dunes in the Renodunaal (R) district. Classes for aeolian activity: 1 = 0-10, 2 = 11-20; 3 = 21-50; 4 = 51-100 en 5 = > 100 blowouts per km².

In de kalkrijke duinen van het Renodunaal district is de situatie veel gunstiger dan in het Waddendistrict, dankzij de optelsom van (1) hogere maximum hoogte van duinmassieven, (2) gunstiger oriëntatie van de kust op de overheersende wind, (3) meer neerslag en natte dagen, (4) hogere kalkrijkdom en pH van de bodem, (5) meer konijnen en (6) een N-depositie die dicht de KDW van kalkrijke Grijze duinen ligt en gedomineerd wordt door NO₃. Een gecombineerde index van de N-depositie en het aantal konijnen laat zien dat deze factoren elkaar kunnen versterken. In de kalkrijke duinen trad grootschalige stabilisatie op in de jaren negentig als gevolg van een afname van het aantal konijnen in combinatie met een nog steeds te hoge N-depositie. In de jaren daarna trad in de kalkrijke duinen herstel op van de eolische activiteit door toename van het aantal konijnen en verdere daling van de N-depositie. Nog een voordeel is dat veel kalkrijke duingebieden ook in de jaren negentig sterk actief waren, waardoor het humusprofiel nog niet ver is ontwikkeld en de vegetatie rond 2000 waarschijnlijk vooral nog uit pioniersoorten en mossen bestond. Dit is gemakkelijker opnieuw in verstuiving te brengen dan dichtbegroeide vegetaties op bodems met een dik humusprofiel.

Een overzicht van factoren die bepalend kunnen zijn voor kleinschalige verstuivingsdynamiek is weergegeven in Figuur 11-5. Dit overzicht is gebaseerd op gevonden correlaties tussen kleinschalige activiteit in 2000 en 2014 en klimatologische/meteorologische factoren, landschappelijke positie en de dichtheid van konijnen. Ook de analyse van de temporele dynamiek speelt hierbij een rol. Deze interpretatie heeft een hypothetisch en correlatief karakter, omdat we niet expliciet onderzoek verricht hebben aan de werking van processen die

ten grondslag liggen aan verstuivingsgevoeligheid en het initiëren van verstuiving. Wel worden veel veronderstellingen ondersteund door bevindingen uit ander onderzoek. Een belangrijk punt is verder dat de kleinschalige verstuiving in duingebieden over het algemeen los staat van de huidige dynamiek van de zeereep/zeewering. De zeereepdynamiek heeft nauwelijks invloed op de eolische dynamiek in de achterliggende duingebieden, evenals de ingrepen in de zeereep/zeewering en de toegenomen zandsuppleties voor de kust.

Onderstaande factoren versterken elkaar:

Windkracht. De windkracht lijkt gek genoeg van weinig betekenis. In de kalkrijke duinen van het Renodunaal district trad tussen 1990 en 2003 een grote stabilisatie op, terwijl de gemiddelde transportkracht niet lager was dan in de periode daarvoor, toen de verstuiving juist toenam. Ook heeft de toename van de verstuiving tussen 2003 en 2014 plaatsgevonden bij een significant lagere transportkracht. Volgens Jungerius et al. (1991) is vooral windkracht 6-7 belangrijk voor verstuiving, en die komt vaak genoeg voor. Wel kunnen zeer zware stormen als die van januari 1990 en welllicht januari 2018 veel zand verplaatsen, hoewel dit niet perse leidt tot verhoogde activiteit in de jaren daarna. De invloed van zeer zware stormen kan nader worden onderzocht aan de hand van analyse van de gevolgen van de storm van begin 2018.

Ligging van het duinmassief. Hoewel windkracht zelf niet direct van belang lijkt, is de ligging van het duingebied wel degelijk belangrijk, met name wat betreft afstand tot de duinvoet en de expositie van de kust t.o.v. de WZW-wind. Duingebieden met veel stuifkuilen liggen over het algemeen dicht aan de kust dan gebieden met weinig stuifkuilen. Verder is de oriëntatie van de kust t.o.v. de WZW-wind belangrijk, omdat deze windrichting de netto transportrichting is. De lage eolische dynamiek op de Waddeneilanden ten oosten van Texel is op zijn minst ten dele te verklaren door de noordelijke expositie van de kust.

Hoogte van het duinmassief. Verder hebben veel stuifkuilen zich spontaan ontwikkeld op hellingen in de hogere duincomplexen, die hoog boven de voorliggende zeereep uitsteken. In de statistische analyse was de maximum hoogte echter alleen belangrijk voor de oppervlakte van de stuifkuilen. Wel liggen de stuifkuilen van het kalkarme Waddendistrict, waar de verstuivingsactiviteit lager is, gemiddeld in gebieden met lagere maximum hoogte dan in het kalkrijke Renodunaal district. Een hogere positie in het landschap zorgt voor hogere windsnelheden aan het oppervlak dan een lagere positie. In hogere en vooral sterk geaccidenteerde duinen is ook meer kans op watererosie als trigger voor verstuiving door de aanwezigheid van steilere en langere hellingen. Waarschijnlijk is bovenaan de helling het effect door watererosie sterker. Bij watererosie spoelt hier sediment af en treedt geen accumulatie op, terwijl lager op de helling juist afzetting van colluviaal zand kan optreden. Dit afgespoelde zand bevat vaak zaden en stabiliseert daardoor snel (Arens et al., 2006). Relatief veel kleinschalige verstuiving is in hoog gelegen duinmassieven waargenomen in een aantal duingebieden, waarbij opvalt dat de Zuid-Hollandse duinen hier het meest zijn vertegenwoordigd. Omdat door afwezigheid van grootschalige dynamiek het macroreliëf van duingebieden niet verandert, kan de hoogte van duinmassieven geen temporele variatie in verstuiving veroorzaken.

Invloed microklimaat. De verwachting was dat hellingen die het meest op de wind geëxponereerd zijn, dus zuidwest- west- en noordwesthellingen gevoeliger zouden zijn voor winderosie, maar dit is niet het geval. Het zijn juist de hellingen met de grootste droogtestress, dus zuidoost-, zuid- en zuidwesthellingen die opvallend vaak door winderosie zijn aangetast. Juist extreme droogtestress perioden bepalen in sterke mate de samenstelling van de vegetatie sterk beïnvloeden (Bartholomeus et al. 2017). Door de grotere droogtestress kunnen zulke hellingen ook een tragere humusaccumulatie hebben en daardoor dus ook gevoeliger zijn voor water- en winderosie. Het reliëf heeft dus een sterke doorwerking op de verstuivingsgevoeligheid via het microklimaat.

Aantal natte dagen (dagen met neerslag van >10 mm). In dit onderzoek was het aantal natte dagen significant positief gecorreleerd met het aantal stuifkuilen. Meer neerslagpieken vergroten de kans op watererosie op duinhellingen. Veel neerslag in een korte periode na een droge periode kan zorgen voor afstroming van regenwater over maaiveld. Regen die op een droge bodem valt kan niet meteen infiltreren door de geringe capillaire transportcapaciteit van de bodemtoplaag en een hoge mate van waterafstotendheid (zie [Tekstkader 1](#) op p.123). Watererosie is het belangrijkste proces dat verstuiving initieert doordat kale plekken ontstaan waarop de wind vat kan krijgen (o.a. Jungerius & Van der Meulen, 1988). Deze factor werkt op regionale schaal en voor de Nederlandse kustzone vertoont deze factor ruimtelijke variatie: het aantal natte dagen is relatief hoog aan de Hollandse kust tussen Bergen en Voorne en hier is sinds 1987 het aantal natte dagen groter geworden.

Droge perioden in het voorjaar/voorzomer (maart-juni) vergroot in theorie de gevoeligheid voor verstuiving. In principe kan een droge periode in het voorjaar leiden tot versterking van de verstuiving. Minder neerslag zorgt voor meer vochttekorten voor de vegetatie en daardoor neemt de productiviteit af. De productiviteit van droge duinbodems met een ondiep humusprofiel is sterk afhankelijk van het neerslagoverschot. Tevens kunnen planten door een langere periode van vochttekort afsterven. Vooral de langere droogte perioden werken daarbij sterk door op de vegetatie (Bartholomeus et al. 2007). De vegetatie wordt hierdoor opener en de bodem wordt minder goed vastgehouden door wortels. Dit vergroot de gevoeligheid voor zowel water- en winderosie. Uit de statistische analyse van zowel de temporele dynamiek als de regionale verschillen in verstuivingsactiviteit bleek echter dat er geen correlatie was tussen verstuiving en het aantal droge dagen in het voorjaar. Deze factor vertoonde weinig ruimtelijke en temporele variatie. Mogelijk dat deze factor bepalend is voor het moment waarop spontane activatie optreedt.

Kalkgehalte/zuurgraad en humusprofiel: In dit onderzoek bleek het onderscheid tussen de kalkarme duinen van het Waddendistrict en de kalkrijke duinen van het Renodunaal district een van de belangrijkste verklarende factoren te zijn wat betreft de verstuivingsactiviteit. Kalkrijkdom heeft invloed op zowel de ontwikkeling van de vegetatie als van de bodem. In de kalkarme duinen van het Waddendistrict is de biomassa-productie van de vegetatie fors hoger dan in de kalkrijke duinen van het Renodunaal district. Dit is gemeten in enclosures, waar konijnen niet bij konden komen, en is het gevolg van de hogere P-beschikbaarheid in de bodem, in combinatie met de hoge N-depositie (Kooijman & Besse 2002). In kalkrijke duinen komt vooral Ca-gebonden P voor, die onoplosbaar is bij hoge pH, waardoor de hoge N-depositie minder sterk leidt tot vergrassing (Kooijman et al. 2017). In het Waddendistrict wordt de vegetatie snel gedomineerd door sterk wortelende soorten als Helm, Zandzegge en Kraaiheide. Verder zorgt de hoge biomassa-productie in combinatie met de kalkarme en snel verzuurde bodem voor versterkte opbouw van het humusprofiel. Een hoger organisch stofgehalte en een dieper humusprofiel maakt de bodem minder gevoelig voor verstuiving. Bovendien zorgt meer humus voor een betere vochtvoorziening, daarmee voor minder droogtestress en dus potentieel voor een meer productieve vegetatie. Daarnaast zullen droogteperioden in een humeuze bodem minder snel tot afsterven van de vegetatie leiden dan in een weinig humeuze bodem. Successie van vegetatie en bodem leidt al met al tot een afname van de erosiegevoeligheid van de bodem. In ontkalkte bodems kan organische stof sneller accumuleren en mogelijk is daardoor de bodemvorming in de kalkarme delen van het Waddendistrict verder voortgeschreden dan in het Renodunaal district. Hoe ouder de bodem, hoe verder de bodemvorming is voortgeschreden. Bij een hogere ouderdom kan de bodem ook dieper ontkalkt en ook sterker verzuurd zijn. Activatie van verstuiving heeft daarom meer kans op jongere bodems. Met toenemende ouderdom wordt de humushoudende bodemtoplaag dikker en krijgt een hoger organisch-stofgehalte. In de duingraslanden van het Renodunaal district vindt de snelste accumulatie van humus plaats gedurende 20 tot 40 jaar na stabilisatie van de bodem (Aggenbach et al. 2013). Daarna vlakt de opbouw van humus af. In het Waddendistrict gaat de opbouw van het humusprofiel waarschijnlijk gewoon verder, vooral onder Kraaiheide. In veel duingebieden is het overgrote deel van de bodems ouder dan 40 jaar en is het aandeel van nog oudere bodems hoog. Op een langere tijdschaal (decennia) zorgt de vegetatie- en bodemsuccessie voor een geringere verstuivingsgevoeligheid.

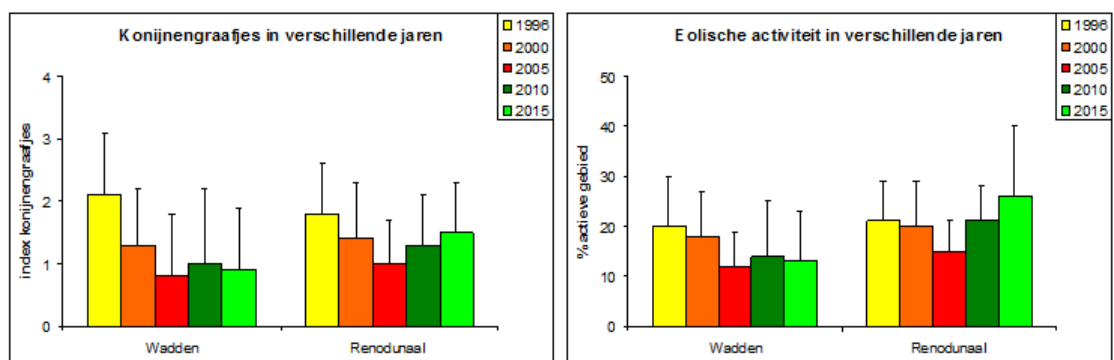
Atmosferische stikstofdepositie werkt via de invloed op de vegetatie door op de verstuivingsgevoeligheid. De hoge N-depositie is vooral een probleem in de kalkarme duinen van het Waddendistrict, door de hoge biomassa-productie en snelle vergrassing van de vegetatie (Kooijman & Besse 2002, Kooijman et al. 2017) en die leidde tijdens de depositiepiek tot de ontwikkeling van dikke grasmatten van vooral Helm, met strooisellaag en dichte beworteling. De vergrassing kon hier sterk optreden, omdat in de overwegend kalkarme en ijzerarme bodems van de Waddeneilanden geen fosfaatlimitatie optreedt voor de productiviteit van de vegetatie (Kooijman & Besse 2002, Kooijman et al. 2017). De sterke vergrassing en strooiselaccumulatie hebben een stabiliserend effect gehad, waardoor veel stuifkuilen in de loop der jaren zijn dichtgegroeid en door de dichte bedekking en beworteling geen nieuwe konden ontstaan. Ook leidt een hoge N-depositie tot verhoogde algengroei, die het zand kunnen vastleggen (Pluis & van Boxel 1993, Sparrius et al. 2012). Bij het terugdringen van stikstofdepositie verdwenen de grasmatten en dikke strooiselpakketten niet snel. Er zijn op basis van indrukken uit recente veldbezoeken in diverse duingebieden op de Waddeneilanden aanwijzingen dat wel daar recent de vergrassing van Helm en de dikte van de strooiselpakketten is afgenomen. Dit is zowel in begraasde als niet begraasde gebieden het geval (Aggenbach et al. 2016). Vooralsnog heeft dat niet geleid tot een toename van kleinschalige verstuiving.

In de oppervlakkig en diep ontkalkte duingebieden van het Renodunaal district trad ook vergrassing op in de jaren '90. De mate van vergrassing was echter geringer en er trad veel

minder accumulatie van strooisel op dan in het Waddendistrict. De vergrassing kon hier door de aanwezige en lokaal toegenomen konijnenpopulatie en ingestelde beweiding in veel duingebieden gemakkelijker worden teruggedrongen na de jaren '90. De afname van de totale N-depositie na de jaren '90 droeg hier ook aan bij (Kooijman et al. 2005). Dat ging samen met een toename van de verstuivingsdynamiek tussen 2000 en 2014. De recente daling van de N-depositie is vooral belangrijk geweest voor de kalkrijke duinen van het Renodunaal district. Hier is de N-depositie gedaald in een aanzienlijk deel tot dicht bij de KDW voor kalkrijke Grijze duinen. Ook nam de verstuiving toe tussen 2003 en 2014 nadat de konijnenstand weliswaar na de VHS crisis weer wat opkrabbelde, maar het gemiddelde aantal konijnen nog steeds lager was dan in de jaren tachtig. In die tijd nam de verstuiving toe ondanks de N-depositie boven de KDW, dankzij het relatief hoge aantal konijnen. In de kalkrijke duinen lijkt de toename van verstuiving na 2003 vooral te danken aan de afname van de N-depositie. In de Waddeneilanden is de N-depositie helaas nog veel te hoog en duidelijk hoger dan de KDW voor kalkarme Grijze duinen.

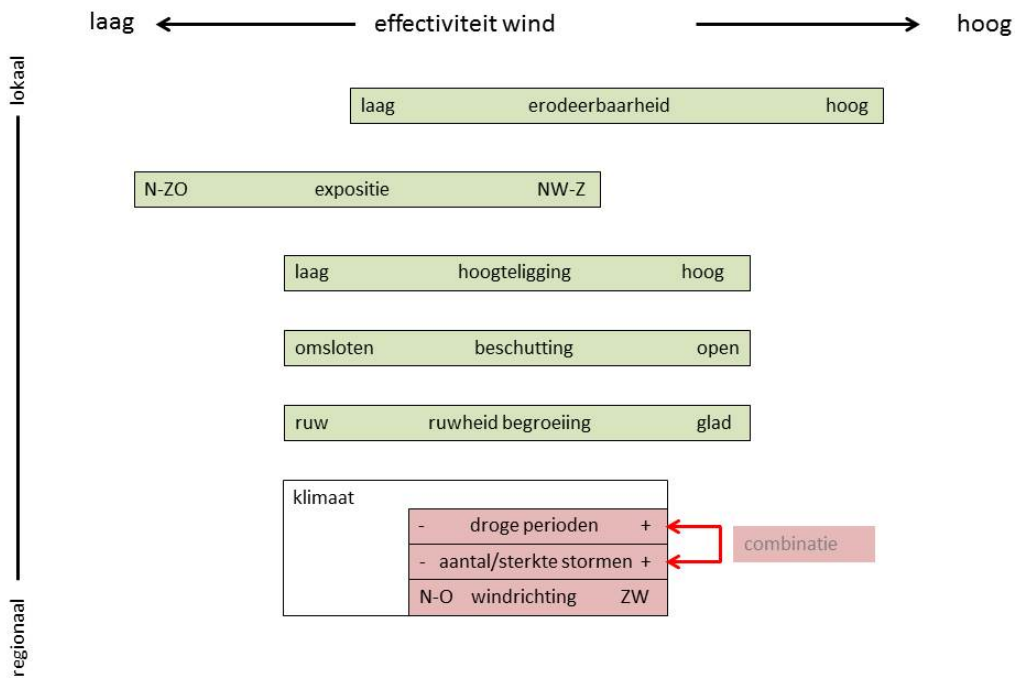
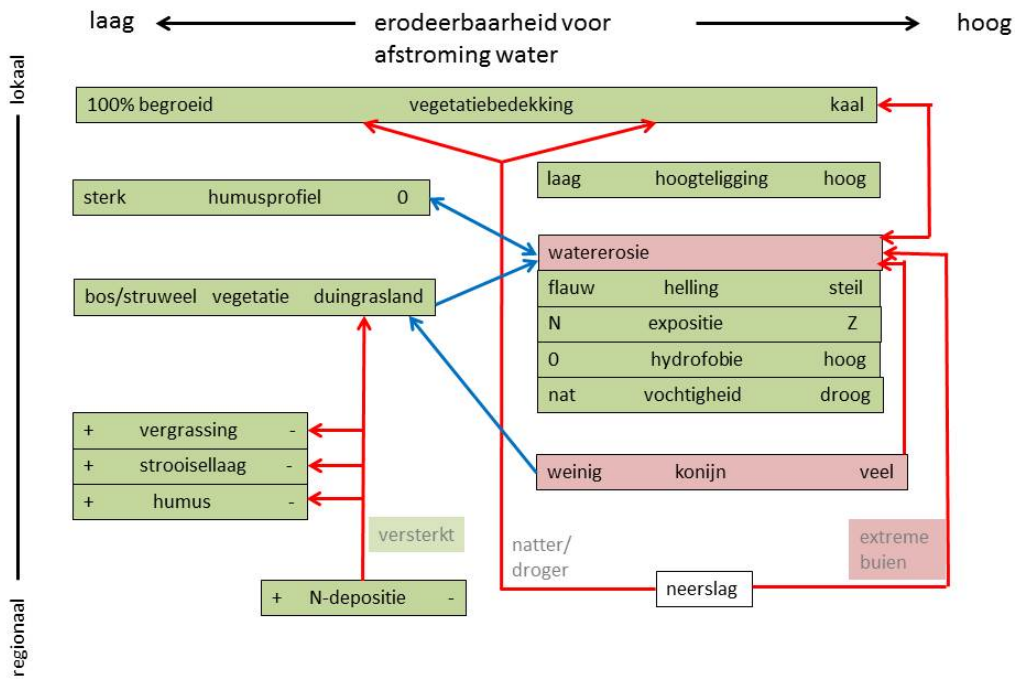
De recente ontwikkelingen en actuele begroeiing zijn sterk bepalend voor de verstuivingsgevoeligheid. In dit onderzoek bleek het aantal stuifkuilen in 2014 sterk gecorreleerd met de grootte van het actieve oppervlak in 2000. Een hoge en dichte begroeiing zorgt voor een lage verstuivingsgevoeligheid. Onder bos en struweel zal de bodem niet snel verstuiven, evenmin in duingrasland met een dichte bedekking van grassen en een goed doorwortelde bodem. Op een dichte begroeiing van Kraaiheide, Helm of Zandzegge heeft de wind ook weinig vat. Duingraslanden met korte vegetatiestructuur en een geringe bedekking van grassen en kruiden en open zandige plekje kunnen daarentegen gevoeliger zijn voor verstuiving, ook omdat dit aantrekkelijker is voor konijnen. De actuele toestand van de vegetatie is daarmee een sterk bepalende factor. Duingraslanden met een korte vegetatiestructuur zijn bovendien gevoeliger voor droogte. Na extreem droge periodes kan deze vegetatie zelfs afsterven, waarna verstuiving een kans krijgt. Tussen duingebieden kunnen er afhankelijk van de ouderdom en beheerhistorie grote verschillen zijn. Er zijn ook regionale verschillen: een deel van de Waddeneilanden heeft een hoog aandeel dichte Kraaiheide begroeiingen (geringe verstuivingsgevoeligheid). Aan de Hollandse kust is het aandeel kort duingraslanden hoog (relatief hoge verstuivingsgevoeligheid). In het Delta gebied is het aandeel van duindoornstruweel en bos hoog (lage verstuivingsgevoeligheid).

Konijnen spelen een belangrijke rol bij het ontstaan van stuifkuilen, vooral in combinatie met de N-depositie. Op grond van langjarige telgegevens en luchtfoto-analyse is voor een aantal gebieden duidelijk dat de ontwikkeling van stuifkuilen vaak parallel loopt aan de ontwikkeling van de konijnenstand (Figuur 11-4). Hoewel ook de daling van de N-depositie een grote rol speelt, ging de toename van verstuiving na 2003 in de Hollandse duinen in ieder geval lokaal gepaard met een duidelijke toename van de konijnenpopulatie. Ook de hoge verstuivingsactiviteit in de jaren tachtig was waarschijnlijk ten dele te danken aan de toen nog relatief hoge konijnenstand, naast het stoppen met het vastleggingsbeheer. Op de Waddeneilanden zijn konijnen minder algemeen, wat ten dele de lagere eolische activiteit hier kan verklaren. Daarnaast trad na 2003 op de Waddeneilanden geen herstel van de konijnenactiviteit op. Zelfs in gebieden met relatief veel konijnen, zoals Texel, nam de verstuiving na 2003 niet toe. Dit duidt er op dat konijnen vooral verstuiving bevorderen als de gevoeligheid voor eolische erosie voldoende groot is. Konijnen grazen lokaal de vegetatie kort, maken schraapplekken voor het eten van plantenwortels en graven konijnenholen. Al deze activiteiten kunnen voor een hogere gevoeligheid zorgen voor water- en winderosie.



Figuur 11-4: Trends van de konijnactiviteit en verstuivingsactiviteit in duingebieden in de Wadden en het Renodunaal district.

Figuur 11-4: Trends of rabbit activity and aeolian activity in the dune areas of the Wadden and the Renodunaal district.



Figuur 11-5: Schema's met factoren die verstuivingsgevoeligheid bepalen (groene blokken) en factoren die verstuiving initiëren (rode blokken). Boven voor de erodeerbaarheid van de bodem door afstroming van water en onder voor de effectiviteit van het zandtransport door de wind.

Figuur 11-5: A scheme with factors governing sensitivity for aeolian activity (green boxes), and factor initiating aeolian activity (red boxes). Scheme above for soil erosion by water run-off, and the scheme below for the effectivity for sand transport by wind.

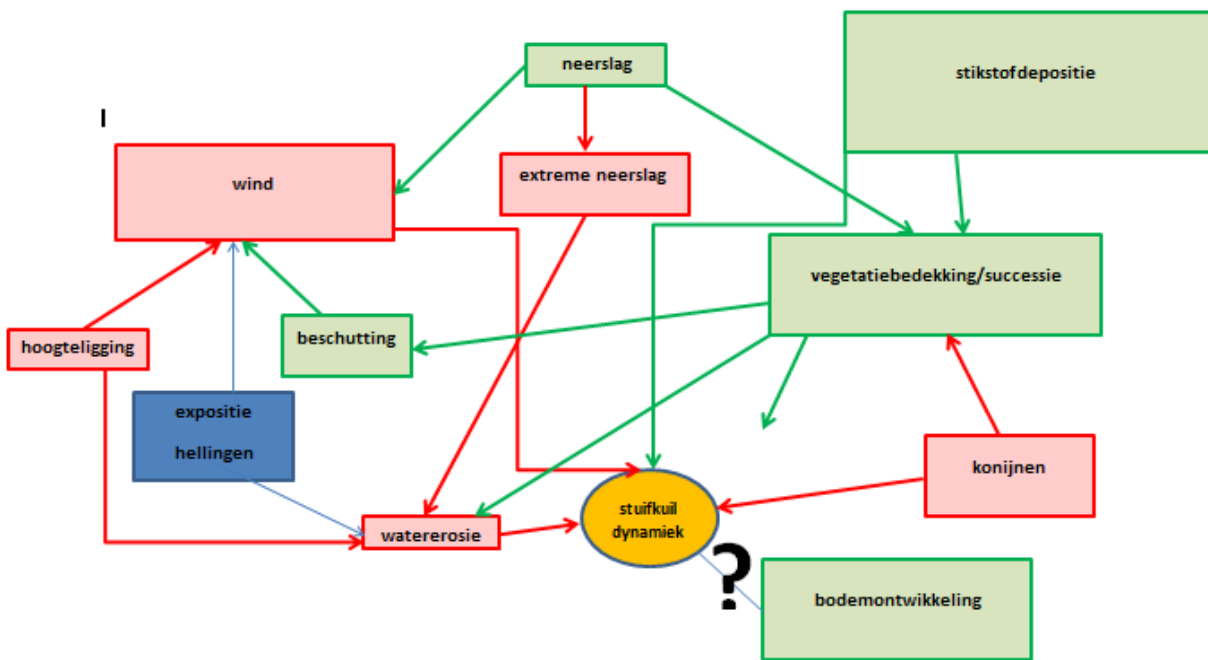
Regionale verschillen

De doorwerking van bovengenoemde factoren vertoont regionale verschillen die schematisch worden weergegeven in Figuur 11-6).

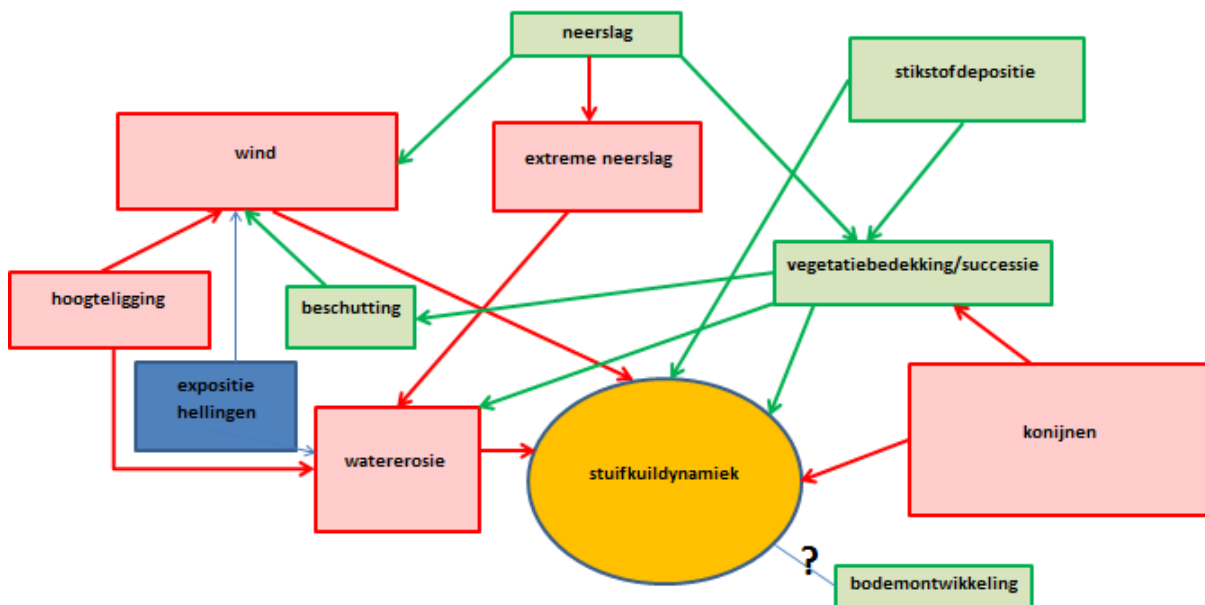
Zoals eerder is aangegeven, is de verstuivingsgevoeligheid in het **Waddendistrict** gering door de aanwezigheid van dichte vegetaties van Helm, Zandzegge en Kraaiheide die na de N-depositiepiek nog lang in stand bleef. Ook de vorming van dikke strooiselpakketten zal de verstuivingsgevoeligheid hebben beperkt. De huidige N-depositie is hier nog steeds ongunstig voor het meest belangrijke duingraslandtype, Habitatype H2130B kalkarme Grijze duinen. De huidige depositie is nog steeds hoger dan de kritische depositiewaarde en wordt gedomineerd door NH_4 . Diep ontcalciteerd duinbodems overheersen en de bodemvorming kan daardoor ver zijn voortgeschreden. De verstuivingsgevoeligheid wordt ook belemmerd door versnelde accumulatie van organische stof in en op het minerale bodemprofiel als gevolg van de vroegere en nog steeds te hoge N-depositie. Daarnaast heeft een aanzienlijk deel van het duinareaal sowieso al een relatief oude bodem. Ook is de gevoeligheid voor verstuiving geringer wegens de veelal geringe hoogte van duinmassieven, de ongunstige ligging t.o.v. de WZW-wind. Ook is de kans op het initiëren van verstuiving door watererosie geringer dan in de Hollandse kust wegens het relatief lage aantal natte dagen. De recente activiteit van secundaire verstuiving is in Waddendistrict gering en afnemend.

In de **kalkrijke duinen van de Hollandse vastelandskust** (tussen Bergen en Meijndel) werkt het samenspel van factoren sterk ten gunste van eolische dynamiek. De verstuivingsgevoeligheid is in veel gebieden hoog door een groot areaal duingrasland waarvan de vergrassingsgraad na de jaren '90 veelal is afgenomen. Bovendien geldt voor de kalkrijke Grijze duinen, habitatype H2130A, dat de N-depositie sinds dicht bij de kritische depositiewaarde ligt. Ook wordt de N-depositie gedomineerd door NO_3 , wat sterker uitspoelt naar het grondwater. Tevens zijn veel duinmassieven hier hoog. Omdat de meeste gebieden niet of hooguit ondiep zijn ontcalciteerd, kan de bodemvorming ook minder ver zijn voortgeschreden dan in het Waddendistrict. Daarnaast heeft de Zuid-Hollandse regio sinds eind jaren '80 een toename van het aantal natte dagen en daarmee gunstiger meteorologische condities voor watererosie. De combinatie met hoge duinmassieven en dus relatief veel steile duinhellingen werkt daarbij ook versterkend voor het initiëren van eolische dynamiek door watererosie. Nog een voordeel is dat veel kalkrijke duingebieden ook begin jaren negentig nog sterk actief waren, waardoor de vegetatie rond 2000 (in ieder geval in de buitenduinen) waarschijnlijk vooral nog uit pioniersoorten en mossen bestond, en de bodem nog een relatief ondiep humusprofiel had. Zulke voormalige verstuivingsplekken kunnen relatief gemakkelijk opnieuw gaan verstuiven. Lokale (en deels tijdelijke) forse toename van de konijnendichtheid kan bij zulke verstuivingsgevoelige vegetatie en bodem ook gunstig werken voor de eolische dynamiek. De recente activiteit van kleinschalige verstuiving is relatief hoog en toegenomen. In brede duingebieden zijn de lokale factoren het meest gunstig in het buitenduin (dichtbij de kust). In het middenduin en binnenduin zijn die minder gunstig.

In het **Delta-gebied** werkt in de jonge duingebieden veelal de toestand van de actuele vegetatie in het nadeel. Deze bestaat daar voor een belangrijk deel uit duindoornstruweel en hoog struweel/bos. Zo zijn bijvoorbeeld de Meeuwenduinen op Schouwen dichtgegroeid met duindoorn. De bodem heeft hier een dun humusprofiel (< 5 cm) en is dus potentieel nog wel gevoelig voor verstuiving. De dichte duindoornstruwelen belemmeren echter sterk een reactivatie van eolische dynamiek. Daarnaast zijn er oude vroongronden met veel duingraslanden met een korte vegetatiestructuur, maar daar is de verstuivingsgevoeligheid gering wegens de eeuwenoude ouderdom van de bodem en daardoor relatief diepe humusprofielen. Tevens zijn de duinen hier ook vaak laag en dus minder sterk geëxposeerd op de wind.



Wadden district



Renodunaal district

Figuur 11-6: Het samenspel van factoren die van invloed zijn op de gevoeligheid voor verstuiving en die verstuiving kunnen initiëren. Betekenis kleuren: rood = bevordert verstuiving, groen = remt verstuiving, blauw = effect afhankelijk van toestand. De grootte van de vakken geeft een globale indicatie van het relatieve belang. Hoe groter het vak hoe belangrijker de factor is.

Figuur 11-6: The interaction of factors affecting the sensitivity for aeolian activity, and triggering aeolian activity. Colours: red = promoting aeolian activity, green = inhibiting aeolian activity, blue = effect depending on the condition. The size of the boxes indicate the relative importance.

11.1.3 Overige factoren in relatie tot kleinschalige verstuiving

Hieronder worden factoren besproken die slechts een beperkte invloed hebben op de activiteit van kleinschalige verstuiving.

Betreding. Betreding is in sommige gevallen een factor van belang. Het kan betreding door recreanten zijn, maar ook door ingezette grazers, en bijvoorbeeld ook door damherten. In sommige gebieden kan dit verstuiving initiëren of stuifkuilen langdurig actief houden.

Begrazing. Begrazing kan verstuiving initiëren in geval van hoge dichtheden (drukbe grazing). Zulke begrazing is tot nu toe in een beperkt aantal gebieden toegepast en heeft daar inderdaad tot een toename van verstuivingen geleid, zoals bijvoorbeeld op de Landerumerheide op Terschelling en ten Westen van de Bernardweg op Schiermonnikoog. Stieren kunnen plekken open trappen waardoor kaal zand ontstaat. Zo zijn trapplekken van Wisenten in het Kraansvlak ten delen eolisch actief geworden en daardoor in omvang toegenomen.

11.2 Effecten van kleinschalige verstuiving op de bodem, vegetatie en fauna

In dit onderzoek is met behulp van beschrijvende veldstudies in beeld gebracht hoe verstuiving door werkt op de bodemcondities, vegetatie en kleine fauna van duingraslanden. Daarbij zijn locaties onderzocht langs de vastelandskust van het Renodunaal district en op de Waddeneilanden. Met dit onderzoek was het mogelijk om de effecten van verstuiving in sterke mate te relateren aan verschillen in kalkrijkdom. Tevens zijn zowel nog actieve als enige tijd geleden gestabiliseerde stuifkuilen onderzocht, zodat ook een beeld kon worden verkregen van de temporele effecten van verstuiving na stabilisatie. Bij deze lokale onderzoeken stonden de volgende onderzoeksvragen centraal:

- *Hoe groot is het ruimtelijke effect van kleinschalige verstuiving op bodemchemie, vegetatie en fauna?*
- *Hoe lang treden nog bodemchemische en ecologische effecten van kleinschalige verstuiving op, nadat de eolische activiteit is gestopt?*
- *Van welke factoren (kwaliteit bronmateriaal, dikte overstuivingslaag, duur van eolische activiteit, etc.) zijn ruimtelijke effecten en de 'ecologische levensduur' van kleinschalige dynamiek afhankelijk?*

11.2.1 Ruimtelijke effecten op bodem en vegetatie

Een hogere eolische activiteit leidt in zowel kalkrijke als kalkarme gebieden tot meer kaal zand, een hogere pH, minder koolstof in de bovengrond, en een lagere C:N ratio van de bodem. Een hogere eolische activiteit leidt ook tot minder bovengrondse biomassa van de vegetatie en een lagere bedekking van hoge grasachtigen. Ook het N-gehalte in bulkmonsters van de bovengrondse biomassa is gemiddeld hoger in de meer actieve gebieden. Dit wijkt overigens af van het patroon van N-gehalte in de bovengrondse biomassa van enkele afzonderlijke plantensoorten (paragraaf 11.2.3). Het aantal pioniersoorten, korstmossen en duingraslandsoorten is hoger bij overstuiving, vooral als gevolg van de hogere pH. De hoogste diversiteit van deze soorten treedt op als de eolische dynamiek niet al te groot is of in het geval dat deflatiezones en sterke accumulatiezones weer enige tijd zijn gestabiliseerd.

Ruimtelijke effecten op bodem en vegetatie worden sterk bepaald door de omvang van de deflatiezone, windexpositie en het kalkgehalte. De omvang van de deflatiezone werkt min of meer evenredig door in de oppervlakte in de omgeving van de deflatiezone waar effecten optreden. Een sterke windwerking door een hoge ligging en afwezigheid van opgaande begroeiing in de omgeving van de stuifkuil zorgt voor een veel grotere oppervlakte met effect op de omgeving (hogere ratio van oppervlakte met effect buiten deflatiezone/ oppervlakte deflatiezone). Gemiddeld ligt de ratio van de oppervlakte accumulatiezone/ deflatiezone op 4.1, bij beschutte stuifkuilen is dat veel minder (1.4-3.9) en bij sterk op de wind geëxposeerde stuifkuilen veel hoger (4.9-10.6). De oorzaak hiervan is dat bij een goede expositie in verhouding tot de oppervlakte veel zand uit de deflatiezone wordt uitgestoven en wijd verspreid wordt. In het geval van sleufvormige stuifkuilen op duintoppen wordt het stuifzand het verst verspreid in de omgeving.

Het kalkgehalte in de stuifkuil beïnvloedt ook de oppervlakte van de zone rond de stuifkuil waarin het kalkgehalte en pH van de toplaag wordt verhoogd. De ratio van de oppervlakte met een pH-verhoging in de bodemtoplaag en de oppervlakte van de deflatiezone is groter naarmate de kalkrijkdom in de stuifkuil hoger is. De kalkrijkdom van de bodemtoplaag in de stuifkuil en

daarmee ook het zand dat wordt verstoven, wordt bepaald door het kalkgehalte van het diepere duinzand (uit de niet of weinig ontkalkte horizont) en de dikte van de ontkalkte horizont van de bodem. De dikte van de ontkalkingszone werkt door in de verhouding waarmee in de stuifkuil ontkalkt en kalkrijk zand mengt. In de stuifkuil mengen beide zandtypen omdat het zand ook heen en weer wordt verplaatst door de variabele windrichting. Een dikkere ontkalkingszone zorgt daarmee voor een groter aandeel ontkalkt zand in de deflatiezone en daarmee voor een lager kalkgehalte in de toplaag van de deflatiezone dan de diepere zandlaag.

Al hoewel niet expliciet onderzocht in deze studie wordt aangenomen dat de duur van verstuiving ook bijdraagt aan de omvang van ruimtelijke effecten. Dat werkt op drie manieren. In ontkalkt duingebied waarbij de deflatiezone het kalkrijke zand bereikt, zal een langere eolische levensduur leiden tot een groter aandeel kalkrijk zand in de toplaag van de stuifkuil en daarmee ook van het verstoven zand. Bovendien is bij een langere levensduur de kans op stormen onder droge omstandigheden die veel zand verplaatsen groter. Bij een langere levensduur kan de stuifkuil ook groter worden en daardoor meer zand gaan verstuiven. Daarnaast zorgt een langere eolische levensduur voor afzetting van meer stuifzand in de omgeving van de stuifkuil en daarmee tot een sterke aanvulling van de zuurbuftercapaciteit van de (nieuwe) bodemtoplaag.

De structuur en soortensamenstelling van de vegetatie in de beïnvloedingszone rond de deflatiezone van kalkhoudende tot kalkrijke stuifkuilen vertoont een duidelijke samenhang met de gradiënten van humusprofiel, kalkrijkdom en zuurgraad. De deflatiezones van actieve stuifkuilen hebben geen of nauwelijks vegetatie van mossen en vaatplanten, die van gestabiliseerde stuifkuilen een vegetatie met veel (korst)mosses en weinig vaatplanten. In de zone buiten de deflatiezone is een gradiënt aanwezig met 1) een zone met relatief lage soortenrijkdom in de accumulatiezone bij de rand van de stuifkuil met sterke stress door droogtetekorten (geen Ah laag) en door begraving als gevolg van de relatief sterke instuiving met zand, 2) een zone met de hoogste soortenrijkdom op enige afstand van de rand met invloed van (voormalige) zwakke instuiving op een oude bodem met een Ah-C profiel, en 3) een zone met weer een relatief lage soortenrijkdom verder verwijderd van de stuifkuil, met een oude bodem met zeer geringe of geen invloed van instuiving.

Deze patronen in soortenrijkdom worden sterk bepaald door verschillen in het aantal soorten van gesloten duingraslanden. Geringe instuiving kan faciliterend werken voor laag productieve soorten door een lagere bedekking van de grasachtige en lage struiksoorten. Dit kan het gevolg zijn van de instuiving die leidt tot een geringere beschikbaarheid van een of meerdere nutriënten en daarmee tot een geringere productiviteit. Daarnaast kan de instuiving leiden tot een betere voedselkwaliteit van de boven- en ondergrondse biomassa voor grazers (zowel zoogdieren als ongewervelden) en plantparasieten, waardoor de bovengrondse biomassa van vaatplanten beperkt wordt (paragraaf 11.2.3). De detailpatronen van basenrijke en basenminnende soorten van gesloten duingraslanden in de beïnvloedingszone worden sterk bepaald door het kalkgehalte in de toplaag van de stuifkuil: hoe kalkrijker, hoe breder de gradiënt van basenminnende soorten. Bij een lager kalkgehalte kunnen basenarme soorten ook dichter bij de stuifkuil voorkomen. Het aantal basenminnende pioniersoorten is relatief hoog in de deflatiezone en het deel van de accumulatiezone dichtbij de deflatiezone van gestabiliseerde stuifkuilen. Tegen de verwachting in is voor een hoge soortenrijkdom van pioniersoorten juist stabilisatie nodig (10-20 jaar bij de onderzochte stuifkuilen). Bij actieve stuifkuilen kan de eolische dynamiek voor diverse pioniersoorten nog te hoog zijn.

Bij kalkarme stuifkuilen is het effect op de omgeving veel beperkter dan in geval van stuifkuilen die kalkhoudend tot kalkrijk zand verstuiven. Hier wordt in duingrasland de meeste winst geboekt in de deflatie zone, na stabilisatie. Wel is er in kalkarme stuifkuilen een groter verschil in pH tussen stabiele en actieve zones dan in kalkrijke duinen. Dit kan een positief effect hebben op de diversiteit aan plantensoorten, met name als er af en toe overstuiving optreedt, zoals in de Nederlanden op Texel.

De effecten van verstuiving hoeven niet altijd gunstig te zijn voor duingraslanden. Wanneer de dichtheid van stuifkuilen zeer hoog wordt, is het oppervlakteaandeel van actieve deflatiezones en zones met sterke overstuiving zeer groot. Bestaande duingraslanden eroderen dan grotendeels weg en worden bedolven onder een dik zandpakket.

11.2.2 Temporele effecten op bodem en vegetatie

Effecten op het organische stofgehalte van de bodem werken in de deflatiezone en zones met sterke accumulatie gedurende meerdere decennia door, omdat hier na stabilisatie een nieuwe bodem moet ontstaan. Uit het lokale onderzoek aan stuifkuilen blijkt dat na 10-25 jaar na verstuiving in en rond stuifkuilen de bodems nog steeds een laag organische stofgehalte

hebben. Onderzoek in gereconstrueerde tijdreeksen in kalkrijke en kalkarme duingraslanden laat zien dat snelle opbouw van een humusprofiel met in de toplaag relatief hoge organisch stofgehalten ca. vier decennia duurt (Aggenbach et al. 2013). Daarna neemt de humusvoorraad langzamer toe.

Bij verstuiving in oppervlakkig ontkalkt duingebied met kalk in het moedermateriaal is 10-25 jaar na stabilisatie de pH van de bodem in deflatie- en accumulatiezone nog duidelijk hoger dan in de omgeving. Modelleren van ontkalking laat zien dat in geval van verstuiving met kalkrijk zand (ca. 3 %) de ontkalking en verzuring van de toplaag langer duurt, in de orde van grootte van 50-100 jaar. Na stabilisatie van stuifkuilen zijn de nog beïnvloede gebieden rond de deflatiezone geringer in oppervlakte dan bij actieve stuifkuilen. In diep ontkalkt duingebied of kalkarme gebieden is het zand in de deflatiezone kalkarm, maar heeft wel een relatief hoge pH. Ook hier zijn 25 jaar na (re)activatie nog pH effecten waarneembaar. In geval van accumulatiezones in bestaande Kraaiheide-vegetatie is dit effect echter niet meer waarneembaar na 25 jaar.

Effecten op de structuur en soortensamenstelling van de vegetatie zijn na 10 tot 25 jaar nog altijd aanwezig in de gestabiliseerde deflatiezones en in meer of mindere mate in de accumulatiezones. Een uitzondering hierop is het effect in Kraaiheidevegetatie in de accumulatiezone met kalkarm zand. Na 25 jaar zijn effecten op de vegetatie hier verdwenen. Het lokale onderzoek aan stuifkuilen kan niet verder terug kijken dan ca. 25 jaar naar stabilisatie. Eerder onderzoek in chronosequenties van gestabiliseerde duinbodems liet echter zien dat onder kalkrijke omstandigheden de effecten op de soortensamenstelling in de deflatiezone minstens 90 jaar aanhouden. De toplaag van de bodem is dan nog weinig ontkalkt en slechts in geringe mate verzuurd. Onder kalkarme omstandigheden, met bodems die snel oppervlakkig ontkalken, zijn veel basenminnende en zwakgebufferde soorten na ca. 40-60 jaar verdwenen. In zowel kalkrijke als kalkarme duinen was de bedekking van kaal zand 40 jaar na stabilisatie sterk afgenomen en de bedekking van vaatplanten toegenomen. De bedekking van mossen en korstmossen nam in snel ontkalkende bodem tot ca. 40 jaar sterk toe en bleef daarna stabiel, maar in kalkrijke situaties nam de bedekking van mossen geleidelijk toe (Aggenbach et al. 2013). Daarmee is de kalkrijkdom van het zand in de deflatiezone bepalend voor de duur van de effecten van verstuiving op de soortensamenstelling en deels ook op structuur van de vegetatie. De snelheid van ontkalking en verzuring hangt in deflatiezones af van het kalkgehalte in de toplaag, en in accumulatiezones van het kalkgehalte van het ingestoven zand en de hoeveelheid zand die is ingestoven.

Samenvattend kan gesteld worden dat de effecten van verstuiving na stabilisatie van de stuifkuil op een tijdschaal van decennia door kunnen werken. Verschillen in kalkgehalte van het stuivende zand zijn daarbij sterk bepalend voor de duur en de zones waarin soortenrijke duingraslanden aanwezig zijn.

11.2.3 Effecten op voedselkwaliteit

Met lokale veldstudies is gekeken naar de kwaliteit van de bovengrondse biomassa van enkele plantensoorten die in instuifzones algemeen zijn. Het doel hiervan was een indruk te krijgen van de effecten van verstuiving op de voedselkwaliteit voor herbivore fauna, die een basispositie hebben in het voedselweb. De plantkwaliteit verschilt tussen soorten én tussen gebieden, en wordt beïnvloed door actieve overstuiving. De gehalten aan Si in grassen nemen onder verstuiving af, wat de verteerbaarheid van planten verbetert. De macronutriënten N, C en P, gemeten aan het einde van het groeiseizoen, worden echter nauwelijks beïnvloed door overstuiving, waardoor ook de C:N-ratio's en de N:P ratio's niet verschillen tussen planten die wel of niet overstoven worden. Dit was wel het geval in studies op een grotere landschapsschaal, waarin de kwaliteit van de bulkvegetatie door verstuiving wel toenam, en bij overstuiving een hoger N gehalte bevatte. Ook in eerdere studies naar individuele soorten in de groeifase (voorjaar, vroege zomer) zijn deze effecten op het N-gehalte waargenomen (Wouters & Remke 2012).

De elementen Ca en Fe nemen wel weer sterk toe bij overstuiving, terwijl Mg en Mn juist afnemen, zij het in mindere mate. Alleen in Camperduin, waar de bodems zeer arm zijn aan kalk en ijzer, was er geen effect van verstuiving op deze elementen. Over het algemeen neemt de voedselkwaliteit van Buntgras, Fakkelgras en Geel walstro toe met actieve overstuiving. Dit komt doordat de hoeveelheid Ca en Fe toeneemt in verhouding tot N en P, terwijl al deze elementen toenemen in verhouding tot het vraatwerende silicium. Deze effecten zijn groot in Meijndel, kleiner op Texel en vrijwel afwezig in Camperduin, waarschijnlijk als gevolg van verschillen in bodemchemie. Hoe rijker het duinzand is aan gemakkelijk verweerbare mineralen als kalk en ijzerhydroxiden, des te groter het positieve effect op de voedselkwaliteit van diverse plantensoorten. De aangetroffen verschillen bij actieve stuifkuilen zijn nagenoeg verdwenen in

situaties 10-15 jaar na stabilisatie. Dit impliceert dat de effecten van overstuiving op voedselkwaliteit van specifieke plantensoorten kortdurend lijken te zijn.

11.2.4 Effecten op kleine fauna

Algemene effecten van overstuiving op de ongewervelde fauna die in de bodem en vegetatie leeft zijn lastig te duiden. Actieve overstuiving heeft een negatief effect op detritivoren en omnivoren, waarschijnlijk omdat op deze locaties minder strooiselophoping plaatsvindt. Effecten op andere soortgroepen zijn vrijwel afwezig wanneer alle terreinen samen worden geanalyseerd. Dit wordt in ieder geval deels veroorzaakt doordat de effecten van verstuiving in kalk- en ijzerrijke duinen (Meijendel) anders zijn dan – en deels tegengesteld aan – de effecten in kalk- en ijzerarme duinen.

Er is in de actieve stuifkuilen een sterke samenhang tussen waardplantkwaliteit en de biomassa aan ongewervelden die zijn gevangen. In de kalkrijke duinen van Meijendel, met een hoge voedselkwaliteit is de biomassa aan ongewervelden veel hoger dan in de kalkarmere duinen van Texel; het laagste is de biomassa in de kalkloze en ijzerarme duinen van Camperduin.

Bovendien is het positieve effect van overstuiving op de biomassa van ongewervelde fauna groter in Meijendel dan op Texel en is dit in Camperduin vrijwel afwezig, waarschijnlijk als gevolg van de verschillen in kalk- en ijzergehalten van de bodem. Het gehalte van gemakkelijk verweerbare mineralen als kalk en ijzerhydroxiden in het duinzand lijkt door een effect op de voedselkwaliteit van invloed te zijn op de ongewervelde fauna. De hogere biomassa wordt voornamelijk bepaald door grotere individuen van herbivore grazers (ruspen en sprinkhanen) en carni-herbivoren (loopkevers en sabelsprinkhanen: zij eten levend dierlijk of plantaardig weefsel). Herbivore browsers (foeragerend op sapstroom en celinhoud) zijn over het algemene kleiner en laten net als carnivoren vrijwel geen effect zien van verstuiving.

Overeenkomstig met de lokale effecten op de vegetatiechemie dooft ook het effect van verstuiving op kleine fauna snel uit na stabilisatie. 10-15 jaar na stabilisatie lijken effecten reeds verdwenen te zijn, waarbij er wederom in kalkrijke een duurzamer effect lijkt te zijn dan in kalkarme duinen. Daarmee lijkt verstuiving vooral een momentaan effect op de ongewervelde fauna te hebben en is het dus voor de fauna van belang dat er altijd actieve stuifplekken in een terrein aanwezig zijn. Vooral in kalkrijke duinen lijkt dit te leiden tot een hogere dichtheid van grotere ongewervelden en daarmee tot een potentiële toename van het voedselaanbod voor insectivoren zoals tapuit, boompieper en grauwe klauwier.

Op landschapsschaal is het effect van verstuiving onderzocht op sprinkhanen. Hieruit blijkt dat in een landschap met kleinschalige dynamiek er geen grotere dichtheden, grotere individuen of hogere totale biomassa van sprinkhanen voorkomen dan in een gestabiliseerd (maar niet verruigd!) landschap. Ook het aantal soorten sprinkhanen verschilt niet, maar de soortensamenstelling (aan-afwezigheid van soorten en relatieve dichtheden) verschillen wel tussen actieve en gestabiliseerde landschappen. Bovendien zijn op Texel in een dynamisch landschap sprinkhaansoorten meer fijnschalig verspreid dan in een stabiel landschap. Hieruit blijkt dat kleinschalige dynamiek wel invloed uitoefent op de ruimtelijke schaal van biodiversiteit: op kleine oppervlakten komen dan nog veel soorten voor.

11.3 De relatie tussen dichtheid van stuifkuilen en gunstige ruimtelijke effecten op de vegetatie van duingrasland en doorvertaling naar de praktijk

Voor ecologisch herstel van droge duingraslanden is kleinschalige verstuiving geen doel op zich, maar het gaat juist om de mate waarin stuifkuilen een gunstig effect uitoefenen in ruimte en tijd op droge duingraslanden. Bij het beoordelen van de verstuivingstoestand en het plannen van maatregelen die kleinschalige verstuiving bevorderen is daarom van belang om een indicatie te hebben voor het aantal stuifkuilen dat wenselijk zou kunnen zijn om Grijze duinen met een hoge kwaliteit in stand te houden of te herstellen. Daarvoor is het nodig om te weten wat de relatie is tussen de dichtheid van stuifkuilen en het ruimtelijke effect op duingraslanden. Hieronder wordt deze relatie kwantitatief uitgewerkt op basis van resultaten uit het deelonderzoek naar de patronen van kleinschalige dynamiek langs de Nederlandse kust (hoofdstuk 4) en de deelonderzoeken aan de ruimtelijke effecten van stuifkuilen op bodem en vegetatie (hoofdstukken 8 en 9).

Uit de uitgevoerde inventarisatie van kleinschalige eolische activiteit blijkt dat de dichtheid van actieve stuifkuilen niet alleen sterk verschilt tussen regio's, maar ook tussen duingebieden binnen regio's (Tabel 11-1 en Figuur 11-1). Veel duingebieden hebben momenteel geen of nauwelijks kleinschalige verstuiwing. In duingebieden waar wel kleinschalige verstuiwing optreedt, ligt de gemiddelde waarde van de stuifkuildichtheid voor verschillende regio's in 2014 in de range van 40 tot 120 stuifkuilen/km². Dit is iets tot ver boven een richtwaarde van 35 stuifkuilen/km² die ooit door R. Slings is opgesteld voor een goede toestand van het habitattypen Grijze duinen in Noord-Kennemerland (zie ook Ontwerp Natura 2000 beheerplan Kennemerland-Zuid 2016-2022). Uit de studie aan de eolische dynamiek blijkt verder dat de gemiddelde grootte van de deflatiezone van stuifkuilen circa 400 m² bedraagt. De ruimtelijke effecten op vegetatie worden sterk bepaald door de omvang van de deflatiezone en het kalkgehalte van het verstoven zand. Omdat verhoging van het basengehalte en bodem-pH in de deflatie- en accumulatiezone sterk bepalend zijn voor de kwaliteit van de vegetatie van duingraslanden, de voedselkwaliteit en kleine fauna, is het zinvol om de ruimtelijke effecten te relateren aan de omvang van de deflatiezone en de omvang van de zone daarbuiten waar de bodem pH wordt verhoogd. Verder is bij verstuiwing van kalkarm zand de pH-verhoging in de accumulatiezone lager dan bij kalkrijk zand, waardoor effecten op de vegetatie lager zijn. Aan de andere kant zijn de pH-verschillen tussen stabiele en actieve delen in kalkarme duinen groter dan in kalkrijke duinen, waardoor er toch een flinke verhoging van de diversiteit kan plaatsvinden. Ook kan in de deflatiezone van kalkarme stuifkuilen na stabilisatie duingrasland ontstaan, omdat de bodem ook na langere tijd nog een hogere pH heeft. Voor de berekening van het oppervlakte aandeel (in %) met verhoging van de bodem pH door verstuiwing kan de volgende formule worden gebruikt:

$$\text{opp}_{\text{beïnvloed}} = 100 * (\text{opp}_{\text{Defl}} + 1.9 * \text{opp}_{\text{Defl}} * \text{CaCO}_{30-5\text{cm}}) \quad (\% \text{ oppervlak})$$

Waarbij:

opp_{Defl} de oppervlakte van de deflatiezone is (m²)

$\text{CaCO}_{30-5\text{cm}}$ het kalkgehalte van de toplaag in de deflatiezone is (% DG).

Deze berekening is gebaseerd op de formule in paragraaf 8.5.2.

Om een idee te geven van de variatie in kalkgehalte van niet ontkalkt strand- en duinzand langs de Nederlandse kust is Figuur 11-7 opgenomen. Het is wel van belang om rekening te houden met het feit dat kalkgehalte in de toplaag van deflatiezones lager kan zijn dan van niet ontkalkt duinzand.

Tabel 11-2 geeft berekeningen uitgaande van de gemiddelde oppervlakte van de deflatiezone van 402 m² van stuifkuilen in Nederland (op basis van data uit hoofdstuk 4). De berekeningen geven aan dat zowel de dichtheid van stuifkuilen als het kalkgehalte sterk doorwerken in het beïnvloedingsgebied. Een gewenst aandeel dat gunstig beïnvloed is zou 10 tot 15 % van het oppervlak kunnen bedragen. Het nastreven van een veel hoger aandeel heeft als nadeel dat het oppervlak met sterke dynamiek (uitstuiwing en sterke accumulatie van zand) groot wordt, en het aandeel duingrasland per saldo afneemt. Bestaande duingraslanden worden dan vergaand geërodeerd of bedolven onder een dik zand pakket en het aandeel oud, soortenrijk duingrasland zal gering zijn. Het aandeel van 10-15 % is tevens gekozen met het idee dan op één specifiek moment niet een groot deel van het duingebied hoeft te worden beïnvloed door actieve stuifkuilen. Door variatie in ruimte en tijd van actieve stuifkuilen kan door niet overlappende beïnvloedingszones van actieve en reeds gestabiliseerde stuifkuilen het beïnvloede oppervlakte veel hoger zijn. De berekening houdt echter alleen rekening met de dichtheid actieve stuifkuilen op één moment.

Wanneer wordt gestreefd naar een aandeel van 10 tot 15 % dan kunnen de berekeningen als volgt worden geduid. Bij kalkhoudend stuifzand (0.5-1.0 %) zijn voor het gewenste pH-regime ca. 100 tot 200 stuifkuilen/km² nodig. Bij kalkrijk zand (> 1.0 %) wordt ook bij lagere stuifkuildichtheden als 25 tot 60 stuifkuilen per km² voldoende oppervlakte beïnvloed. Dat is vergelijkbaar met de gemiddelde waarde van actueel actieve gebieden in Zuid-Holland en de Delta (Figuur 11-1). De eerder genoemde Slings-richtwaarde van 30 stuifkuilen/km² ligt in deze range. In de kalkrijke delen van de Delta en Zuid-Hollandse regio zijn gezien de kalkrijkdom relatief makkelijk grote ruimtelijke effecten te bereiken. Ook is de verstuiwingsgevoeligheid hier hoger, en worden aantallen van 100-200 stuifkuilen per km² nu ook bereikt door door spontane activatie.

In kalkarme duingebieden is voor het gewenste pH-regime echter een veel groter aantal stuifkuilen nodig, namelijk ca. 300 stuifkuilen /km². Dit is echter vele malen hoger dan de gemiddelde dichtheid van spontaan actieve gebieden in de kalkrijke duinen van het Renodunaal district, laat staan in kalkarme duinen van de Wadden en Noord-Holland (Tabel 11-2). In de kalkarme duinen komen nu maximaal zo'n 50 stuifkuilen per km² voor. Tevens is de verstuiwingsgevoeligheid hier gering door de ongunstige ligging (lage duinmassieven, kust

meestal niet goed geëxposeerd op de overheersende windrichting), de kalkarme bodem en relatief hoge P-beschikbaarheid, de hoge N-depositie en het geringe aantal konijnen. Het realiseren van het berekende extreem hoge aantal is dan niet haalbaar en zou tevens enorme inspanning vergen die buitenproportioneel is voor de huidige toestand van het duinlandschap .

Deze rekenexercitie maakt vooral duidelijk dat in de kalkrijke gebieden relatief makkelijk substantiële ruimtelijke effecten zijn te realiseren, zeker in de voorduingebieden. Overigens zijn in de kalkarme midden- en binnenduinzones in het Renodunaal district, waar de windwerking ook minder is, de mogelijkheden voor secundaire verstuiving weer geringer, zou ook naar een geringer aandeel beïnvloed gebied moeten worden gestreefd. In de kalkarme duingebieden is het realiseren van gunstige effecten op duingraslanden met behulp van secundaire verstuiving in kalkarme gebieden alleen op een beperkte ruimtelijke schaal mogelijk omdat zeer hoge stuifkuildichtheden niet realistisch zijn. Voor de kalkarme duingebieden in Noord-Holland en op de Waddeneilanden is het daarom ook zeer zinvol om de oppervlakte met gunstige beïnvloeding te bevorderen met de instuiving van kalkhoudend zand vanaf de zeereep naar het achterliggende duin. Een kanttekening bij de berekeningen is ook dat in werkelijkheid ook volstaan kan worden met lagere dichtheden dan berekend, omdat bij verstuiving van kalkhoudend tot kalkrijk zand effecten op de basenhuishouding enkele decennia kunnen voortduren, mits stuifkuilen in de loop van de tijd op verschillende locaties actief zijn. Verder is nu gerekend met een landelijk gemiddelde voor de omvang van de deflatiezone (402 m²). Omdat deze omvang van de deflatiezone lokaal sterk kan verschillen van 100 tot 1300 m² zou ook rekening kunnen worden gehouden met de lokale omvang van deflatiezones, op basis van actueel actieve en gestabiliseerde stuifkuilen. Resultaten van de rekenexercitie moet niet klakkeloos worden toegepast. Het is belangrijk is om rekening te houden met het type duinlandschap, de haalbaarheid van verstuiving en de negatieve impact van aanleg van stuifkuilen (bv veel werkpaden).

Tabel 11-1: Overzicht van dichtheden van actieve stuifkuilen per regio in 2000 en 2014.

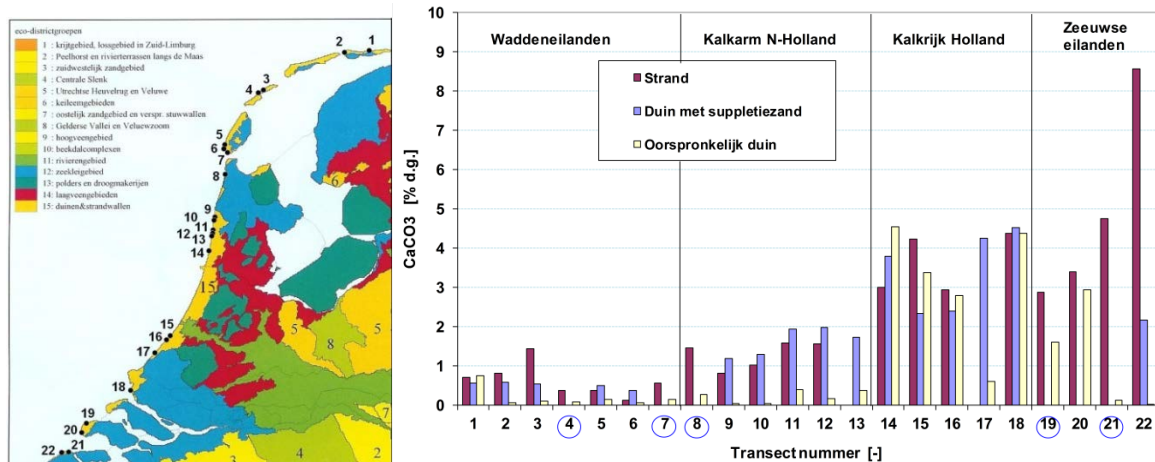
Tabel 11-1: Overview of active blowout densities (#/km²) per region in 2000 and 2014.

Regio	Oppervlakte onderzocht duingebied/ dune area investigated	Dichtheid/ density 2000	Dichtheid/ density 2014
	(km ²)	(aantal per km ²)	(aantal per km ²)
Wadden: totaal	29.9	2.1	1.9
Wadden: met verstuiving	7.6	31.0	27.8
Noord-Holland: totaal	20.9	6.3	7.4
Noord-Holland: met verstuiving	12.0	42.0	49.5
Zuid-Holland: totaal	30.1	13.5	25.7
Zuid-Holland: met verstuiving	23.2	42.8	81.2
Delta: totaal	13.4	1.6	2.2
Delta: met verstuiving	5.6	11.8	16.0

Tabel 11-2: Het percentage oppervlakte waarin de pH wordt verhoogd door verstuiving in relatie de dichtheid van stuifkuilen en het kalkgehalte van het verstoven zand. De pH-verhoging treedt op in de deflatiezone en in een zone daaromheen waar stuifzand wordt afgezet. De omvang van deze laatste zone is afhankelijk van het kalkgehalte in de deflatiezone. Bij waarden van 100% gaan de effecten van afzonderlijke stuifkuilen sterk met elkaar overlappen.

Tabel 11-2: Percentage of dune area with increase of the pH by aeolian activity in relation to the density of blowouts and calcium carbonate content of the aeolian sand. The pH-increase occurs in the deflation zone, and a surrounding zone with sand deposition. The size of the later zone is dependent on the calcium carbonate content of the sand in the deflation zone.

kalkgehalte toplaag deflatiezone (% DG)	oppervlakte pH beïnvloed van 1 stuifkuil (m ²)	oppervlakte pH beïnvloed (%) bij X stuifkuilen/km ²						
		10	25	35	100	200	300	600
0	402	0.4	1.0	1.4	4.0	8.0	12.1	24.1
0.5	784	0.8	2.0	2.7	7.8	15.7	23.5	47.1
1	1167	1.2	2.9	4.1	11.7	23.3	35.0	70.0
2	1931	1.9	4.8	6.8	19.3	38.6	57.9	100
3	2695	2.7	6.7	9.4	27.0	53.9	80.9	100
5	4224	4.2	10.6	14.8	42.2	84.5	100	100



Figuur 11-7: Kalkgehalte van strandzand, duinzand bestaande uit suppletiemateriaal en oorspronkelijk duinzand (zonder suppletiemateriaal) gaande van Ameland Oost (loc.1) naar Walcheren West (Loc. 22) (naar Stuyfzand et al. 2012). Merk op dat metingen van oorspronkelijk duinzand dicht achter de zeeleep/zeewering zijn genomen. Voor de kalkarme kustzones, zoals de Waddeneilanden en Noord-Holland kan dat een overschatting voor het kalkgehalte in duinzones die verder van de kust zijn verwijderd. Verder kan het kalkgehalte van de toplaag in een deflatiezone lager zijn dat van niet ontkalkt duinzand.

Figuur 11-7: Calciumcarbate content of beach and dune sand consisting of suppletion sediment, original dune sand along the Dutch coast going from Ameland Oost (site 1) to Walcheren West (site 22) (according to Stuyfzand et al. 2012).

12 Adviezen voor beheer- en herstelpraktijk

Het doel van dit OBN onderzoek is om handvatten te geven voor instandhouding en herstel van Grijze duinen door het (re)activeren van kleine stuifkuilen. De centrale vraag daarbij is:

- *Hoe kunnen eolische en ecologische effecten – en de variatie daarin – ruimtelijk en temporeel vertaald worden in herstelstrategieën voor Grijze duinen op landschapsschaal?*

Op basis van de nieuwe inzichten uit dit onderzoek kunnen daarbij handvatten worden gegeven op twee niveaus: 1) strategieën op landschapsschaal en een langere tijdschaal van 50-100 jaar die ook rekening houden met spontane eolische processen en 2) meer praktische tips voor het bevorderen van kleinschalige verstuiving op een korte termijn (<10 j).

12.1 Lange termijn strategieën op landschapsschaal

Voordat op een korte termijn (<10 j) maatregelen voor kleinschalige verstuiving worden gepland, is het zinvol om eerst een strategie voor de lange termijn (50-100 jaar) uit te werken. Zo'n strategie kan het beste worden afgewogen tegen de ecologische noodzaak voor kleinschalig verstuivingsactiviteit, de ecologische potenties en de haalbaarheid om de eolische activiteit daadwerkelijk te realiseren. De ecologische noodzaak wordt in het kader van dit OBN-onderzoek gerelateerd aan behoud en/of herstel van droge duingraslanden, c.q. habitatype H2130A Grijze duinen (kalkrijk) en H2130B Grijze duinen (kalkarm). De strategie wordt voor een lange termijn uitgewerkt omdat effecten van verstuiving op bodem en vegetatie gedurende enkele decennia tot 50-100 jaar kunnen doorwerken nadat stuifkuilen weer zijn gestabiliseerd. Niet alleen de effecten tijdens verstuivingsactiviteit zijn van belang, maar ook de effecten die na stabilisatie een tijdlang aanhouden worden meegenomen in de strategie. Stabilisatie van stuifkuilen en bijbehorende bodemontwikkeling en vegetatiesuccessie die plaatsvindt in een tijdsbestek van decennia zijn daar dus ook onderdeel van. Als deze strategie helder is, is het goed mogelijk om maatregelen voor de korte termijn ruimtelijk uit te werken. Voor een langere termijn kunnen ook maatregelen worden voorzien, maar die hoeven nog niet meteen in detail te worden uitgewerkt. Latere maatregelen kunnen worden afgestemd op de toekomstige ontwikkeling van het duingebied.

In Figuur 12-1: Stroomschema voor het afwegen van een lange termijnstrategie voor kleinschalige verstuiving, wordt voor het bepalen van een strategie en maatregelen een stroomschema gegeven. PAS-opgaven ten aanzien van maatregelen die verstuiving bevorderen zouden ook binnen zo'n afweging van een lange-termijn strategie kunnen worden ingekaderd. In het schema wordt ook aangegeven welke type informatie kan worden gebruikt.

Een eerste spoor is vaststellen in hoeverre er een ecologische 'noodzaak' is voor verstuiving op basis van de huidige toestand van duingraslanden en natuurdoelen. Natura 2000 doelen en eigen natuurdoelen bepalen of t.o.v. de actuele toestand uitbreiding en verbetering van de kwaliteit van duingraslanden gewenst is. Verstuiving is zinvol in de volgende gevallen:

- Verstuiving ontbreekt geheel of treedt beperkt op: dan is initiëren van verstuiving zinvol voor kleine fauna die afhankelijk is van verstuiving of kaal zand;
- Duingraslanden hebben geringe oppervlakte en verstuiving treedt niet of beperkt op: verstuiving en ook latere stabilisatie van stuifkuilen draagt bij aan uitbreiding;
- Er zijn veel soortenarme duingraslanden op oppervlakkig ontkalkte bodem waarvan de bodemtoplaag matig tot sterk verzuurd is en/of soortenarm: verstuiving met kalkhoudend of kalkrijk zand draagt bij aan herstel van de basenrijkdom en hogere pH van de bodemtoplaag en daarmee de kwaliteit van de vegetatie; de invloed van kalkrijk zand zorgt ook voor een betere voedselkwaliteit voor kleine fauna.

- Er is een afnemende trend in areaal en kwaliteit van duingraslanden. Zeker wanneer die samenhangt met ontkalking en verzuring kan verstuiwing worden ingezet om in de toekomst het duingrasland in stand te houden.
- Er zijn hoge potenties voor herstel van de basenrijkdom in verzuurde duingebieden zijn aanwezig wanneer sprake is van een relatief ondiepe ontkalkingsdiepte van de bodem (< 50 cm-mv) en/of instuiving van kalkhoudend zand vanaf het strand en de zeereep/zeewering mogelijk is.
- Er zijn veel zure, diep ontkalkte duingebieden, waarbij het terugzetten van de successie bijdraagt aan het ontstaan van pioniervegetatie, waar ook de kleine fauna van kan profiteren.

Een tweede spoor is het in kaart brengen van de mogelijkheden om kleinschalige verstuiwing te bevorderen en wat het toekomstige perspectief kan zijn voor spontane activatie van verstuiwing. Daarbij kan voor de evaluatie van mogelijkheden voor spontane en artificiële activatie van verstuiwing rekening worden gehouden met de volgende zaken:

- de verstuiwingsgevoeligheid van het terrein; deze is hoog bij:
 - korte afstand tot de duinvoet;
 - aanwezigheid van hoge duinmassieven;
 - veel korte, open vegetatie: veel duingrasland met een lage bedekking van de kruidlaag, weinig opgaande begroeiing van struweel en bos, weinig oude gesloten kraaiheiden, weinig vergrassing van duingraslanden;
 - een hoog aandeel van relatief jonge bodems met een ondiep humusprofiel en relatief laag organisch stofgehalte; het voorkomen van zulke bodems op ZW tot NO hellingen en toppen van duinen maakt het terrein extra verstuiwingsgevoelig;
- de kans op spontane verstuiwing kan hoger zijn als het duingebied in de regio Noord- en Zuid-Holland ligt (tussen Bergen en Voorne). Dit heeft te maken met de kalkrijkdom van de bodem, een kritische depositiewaarde die lager is voor kalkrijke dan voor kalkarme Grijze duinen en de kleinere kans op woekering van sterk-wortelende soorten als Helm, Zandzegge en Kraaiheide. Ook is de kustligging t.o.v. de WZW winden is gunstiger dan op de Waddeneilanden. Daarnaast is hier een gunstig klimaat voor watererosie a.g.v. een relatief hoog aantal natte dagen, die een belangrijke initiator kan zijn voor winderosie;
- een hoge konijnendichtheid vergroot ook de kans op activatie mits het terrein verstuiwingsgevoelig is;
- een lage N-depositie, vooral in relatie tot de kritische depositiewaarde;
- periodiek spontane activatie van stuifkuilen in het recente verleden (tot ca. 50 jaar terug) kan een aanwijzing zijn dat in de toekomst mogelijk ook spontane activatie zou kunnen optreden; uiteraard geldt dat alleen als in de tussentijd de verstuiwingsgevoeligheid niet sterk is verminderd door bijvoorbeeld bodemontwikkeling, vegetatiesuccessie en vergrassing.

De uitkomsten van beide sporen worden met elkaar vergeleken. Vastgesteld wordt of de ecologische 'noodzaak' voor verstuiwing matcht met de ingeschatte mogelijkheden voor spontane en artificiële activatie. Die confrontatie geeft richting voor een strategie. De volgende strategieën zijn mogelijk:

- Verhogen van verstuiwingsgevoeligheid door vegetatiebeheer (bijv. inzet van grazers) dat successie naar opgaande begroeiing tegenhoudt en vergrassing onderdrukt. Verder kan de ontwikkeling overgelaten worden aan spontane eolische activatie in gunstige perioden. Deze strategie is mogelijk in geval van een hoge verstuiwingsgevoeligheid van het terrein en er aanwijzingen zijn dat dit ook in het recente verleden (<50 jaar geleden) optrad. Een ligging in de regio Zuid-Holland is ook voordelig wegens het regionale klimaat (zie boven). Een keuze van deze strategie vergt geduld van de beheerder. Dit is zeker een verstandige optie in de Zuid-Hollandse duingebieden waar gedurende de laatste 15 jaar spontaan veel stuifkuilen ontstaan zijn en waar voor duingraslanden meer dan voldoende verstuiwing is gaan optreden. Het verwijderen van opgaande begroeiing kan ook goed worden gecombineerd met het bestrijden van exoten, zoals Amerikaanse vogelkers.
- Kiezen voor (re)activatie van stuifkuilen met maatregelen op een korte termijn (<10 j) omdat de huidige verstuiwingsactiviteit te gering is voor de beoogde doelen voor droge duingraslanden en de vooruitzichten op spontane activatie gering zijn.
- De instuiving van kalkhoudend zand vanaf strand/zeereep bevorderen en dit eventueel combineren met het activeren van stuifkuilen. Deze optie is aantrekkelijk voor kalkarme buitendingebieden in het Waddendistrict waar met alleen actieve stuifkuilen geen kalkhoudend zand kan worden opgewerkt. De combinatie van instuiving vanaf strand/zeereep en doorstuiving via achterliggende kuilen kan er voor zorgen dat kalkrijk zand dieper in het gebied kan doordringen.

- Kleinschalige verstuiwing zou op basis van ecologische overwegingen wel gewenst zijn, maar van maatregelen voor activatie wordt afgezien, omdat de mogelijkheden voor activatie gering zijn. Zo kan een zeer lage verstuiwingsgevoeligheid van het duinlandschap de kans op succesvolle activatie met maatregelen beperken. Ook heeft bijvoorbeeld verstuiwing in een diep ontkalkt duinlandschap een gering ruimtelijk effect. Een reden om af te zien van kleinschalige verstuiwing kan ook zijn dat aan de praktische uitvoerbaarheid grote nadelen zitten, zoals lange werkpaden voor machines.

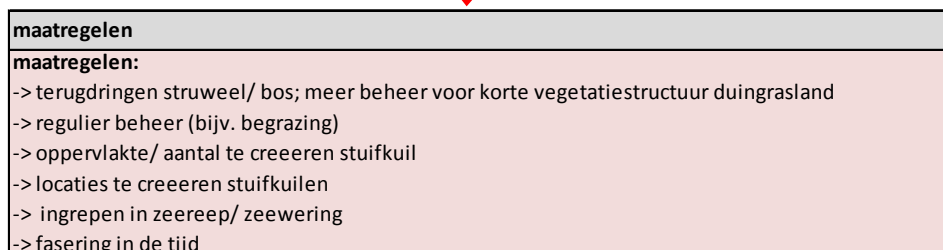
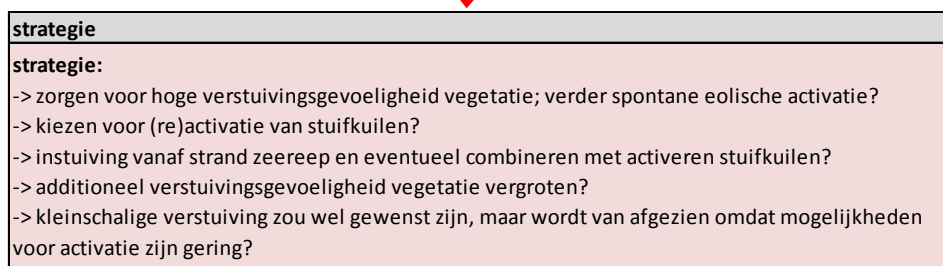
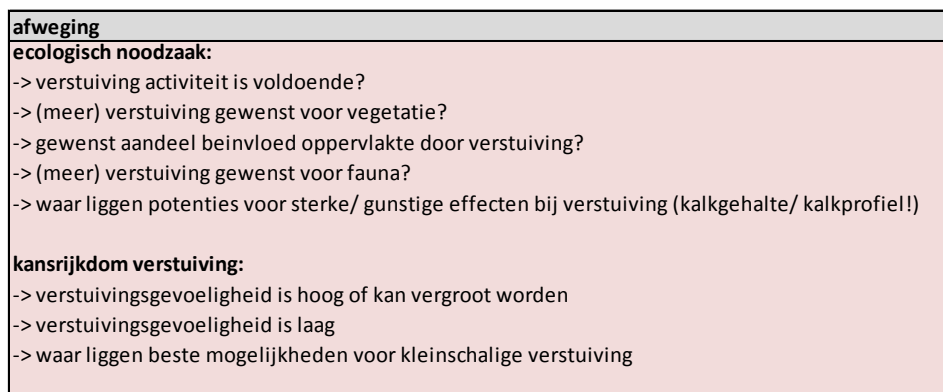
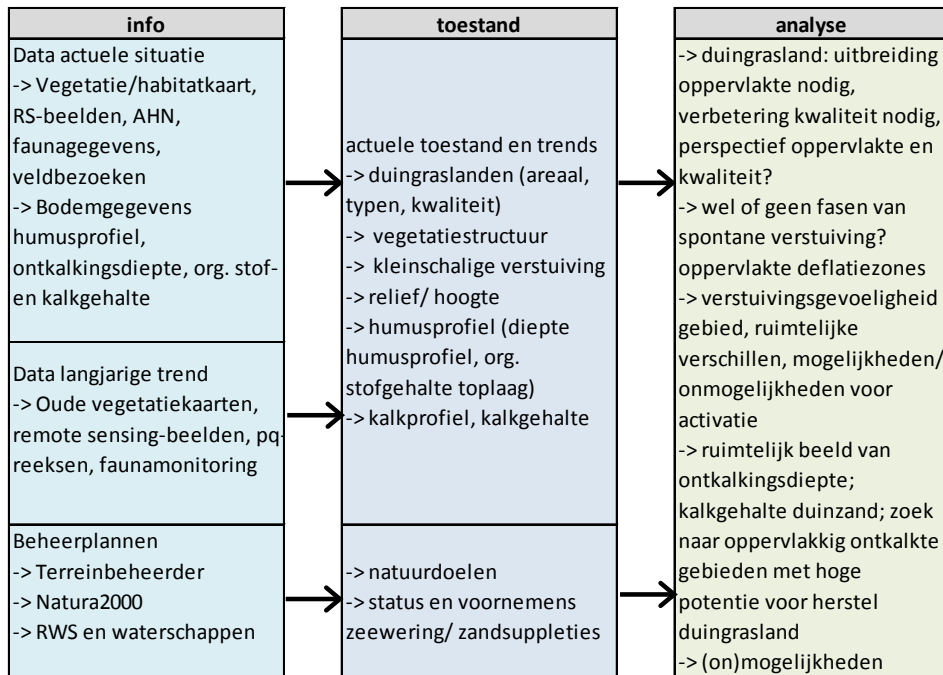
Wanneer voor het activeren van stuifkuilen wordt gekozen is de vraag welke dichtheid aan stuifkuilen gewenst is voor behoud en herstel duingraslanden. Op basis van de bijbehorende stuifkuildichtheden en de omvang van deflatiezones kan een schatting worden gemaakt van het oppervlaktaandeel waar door verstuiwing de bodem pH wordt verhoogd (paragraaf 11.3). Zodoende kan een beeld worden verkregen van de ruimtelijke effecten van stuifkuilen op de bodem en vegetatie. Belangrijk daarbij de schatting van ruimtelijke effecten niet klakkeloos wordt nagestreefd, maar dat deze wordt afgestemd op de mogelijkheden voor eolische activiteit en past bij het type duinlandschap. Zo is bijvoorbeeld het nastreven van extreem veel stuifkuilen in een oud duinlandschap waarin op grote schaal duinheiden voorkomen niet gewenst en zou ook leiden tot enorm veel ingrepen. Voorst dienen maatregelen voor activatie uitgevoerd worden met respect voor de geomorfologie.

Bij de ruimtelijke uitwerking van maatregelen voor activatie kunnen nog de volgende zaken meegenomen worden in de afweging:

- In duinzones waarvan de bodem ondiep tot diep (<50 tot 100 cm) is ontkalkt kunnen stuifkuilen kalkhoudend/ kalkrijk zand gaan verstuiwen. Het ruimtelijke effect op de basenhuishouding van de bodem en de kwaliteit van duingraslanden kan daardoor potentieel groot zijn;
- Verstuiwingsmaatregelen worden bij voorkeur uitgevoerd in duingrasland met een geringe kwaliteit van de vegetatie of waar duingraslanden ontbreken of verdwenen zijn. Daarnaast zijn activatiemaatregelen zinvol in duingraslanden die vergaand zijn verzuurd.
- In niet ontkalkt duingrasland met een goed ontwikkelde vegetatie zijn activerende maatregelen voor behoud van vegetatie met hoge kwaliteit niet noodzakelijk voor een korte tot middellange termijn (<40 jaar). Voor kleine fauna diversiteit en biomassa is activatie hier wel zinvol, als er actueel geen verstuiwing optreedt.

Over de tijdschaal van beheer- en herstelmaatregelen kan nog het volgende worden gemeld:

- Hoe kalkrijker het verstoven duinzand is hoe langer de verstuiwing na stabilisatie nog doorwerkt in de basenhuishouding van de bodem en de kwaliteit van de vegetatie. Bij verstuiwing van kalkrijk zand kunnen zulke effecten 50-100 jaar doorwerken. In kalkrijke duinlandschappen hoeft activatie van verstuiwing dus minder frequent te worden uitgevoerd dan in kalkarme duinlandschappen.
- Bodemontwikkeling met opbouw van een humusprofiel op gestabiliseerde bodems (deflatiezone en sterke accumulatiezone van stuifkuilen) vergt minstens 40 jaar. Tijdens deze successie ontstaan gesloten, soortenrijke duingraslanden. In de eerste decennia van de successie komen ook nog veel pioniersoorten voor. Stuifkuilen die stabiliseren leveren op deze wijze dus op termijn extra duingrasland op. Het stabiliseren van stuifkuilen is dus niet erg en is juist een essentieel proces in een gezond duinlandschap.
- Zwakke instuiving van kalkhoudend en kalkrijk zand op oude, ontkalkte bodems kan snel tot een hogere basenrijkdom van de bodem toplaag leiden en tegelijk tot een kwaliteitsverbetering van het gesloten duingrasland. Omdat er al een humusprofiel aanwezig kan soortenrijk duingrasland zich op korte termijn (enkele jaren) herstellen.
- Effecten van verstuiwing op voedselkwaliteit van plantensoorten en kleine fauna treden vooral op tijdens de actieve periode en lijken na stabilisatie snel (<15 jaar) weer verdwenen te zijn. Voor een hogere diversiteit en biomassa van kleine fauna kan het periodiek (bv om de 20-30 jaar) activeren van stuifkuilen daarom belangrijk zijn.



Figuur 12-1: Stroomschema voor het afwegen van een lange termijnstrategie voor kleinschalige verstuiving.

Figuur 12-1: Flowchart for choosing long-term strategies for small-scale aeolian activity.

12.2 Strategieën gedifferentieerd voor regio's

De mate van en trends in kleinschalige verstuiving vertonen grote verschillen tussen de regio's Delta, de Hollandse vastelandskust in het Renodunaal district en het Waddendistrict. Daaraan liggen factoren voor verstuivingsgevoeligheid en factoren die verstuiving kunnen initiëren ten grondslag. Strategieën ten aanzien van kleinschalige verstuiving kunnen daarom voor deze regio's gedifferentieerd worden. Dit is hieronder uitgewerkt. Uiteraard kunnen afzonderlijke duingebieden weer afwijken van het regionale patroon en is er vaak sprake van verschillen binnen gebieden voor wat betreft verschillende landschapszones.

Waddendistrict:

In een groot deel van de duingebieden lijken de vooruitzichten op spontane kleinschalige verstuiving gering te zijn door een lage verstuivingsgevoeligheid. Wegens de geringe mate van verstuiving en de overwegend afnemende trend in het Waddendistrict is het bevorderen van kleinschalige verstuiving voor herstel en behoud van duingraslanden daarentegen sterk gewenst. Een relatief groot ruimtelijk effect van stuifkuilen en kansen voor soortenrijkere duingraslanden kan bereikt worden in ondiep ontkalkte duinzones met kalkhoudend zand en ook in zones achter de zeereep/zeewering waar kalkhoudend zand het duin in kan stuiven. Daarnaast komen hier veel diep ontkalkte duingebieden voor. Stuifkuilen zorgen daar vrijwel alleen voor het ontstaan van jonge, nieuwe duingraslanden in de deflatiezones nadat deze weer gestabiliseerd zijn en hebben daarmee voor herstel van duingrasland een gering ruimtelijk effect. Desalniettemin dragen zij wel bij aan een herstel van de biodiversiteit. In OBN-adviezen voor de Waddeneilanden en Noordduinen zijn kansrijke duinzones voor het reactiveren van kleinschalige verstuiving in beeld gebracht (Aggenbach et al. 2016; Van Til et al. 2016). Daarbij is prioriteit gegeven aan gebieden met hoge duinmassieven (meer kans op activatie), duingebieden die ondiep ontkalkt zijn (relatief groot ruimtelijk effect op de vegetatie) en voorduinzones waar instuiving van kalkhoudend zand vanuit de zeereep/zeewering mogelijk is. De geplande opgaven van de PAS voor reactivatie zijn voor de Waddeneilanden en voor de Schoorlse duinen gering in verhouding met de beperkte verstuivingsactiviteit (Figuur 12-2). Een grotere inzet van activatiemaatregelen dient hier daarom te worden overwogen.

Duingebieden Hollandse vastelandskust in het Renodunaal district:

Een aanzienlijk deel van de duingebieden in deze regio heeft actueel een relatief hoge tot zeer hoge dichtheid aan actieve stuifkuilen en recent is de dynamiek daar spontaan toegenomen. Dit is vooral het geval in de buitenduinzones. Dit heeft te maken met de nog steeds hoge verstuivingsgevoeligheid door de aanwezigheid van nog relatief veel open vegetatie, hoge duinmassieven, gunstige expositie van de kust op de overheersende windrichting en gunstige klimatologische condities die watererosie bevorderen. Daarnaast ging het hier tot voor kort relatief goed met de konijnenstand, en is in een aanzienlijk deel de N-depositie gezakt tot waarden dicht bij de kritische depositiewaarde voor kalkrijke Grijze duinen. Een extra factor kan zijn dat de stabiliserende werking van de aanplant die in het verleden is uitgevoerd t.b.v. stabilisatie is uitgewerkt. Een bedreiging voor de verstuivingsgevoeligheid vormt wel de toename van struweel en bos. Het lange-termijn beheer dient zich daarom vooral te richten op het beperken van struweel en bosvorming. Dit is ook van belang om te voorkomen dat in eolisch actieve perioden alleen kaal zand en opgaande begroeiing resteren, i.p.v. een driedeling van kaal zand, kort duingrasland en opgaande begroeiing.

Omdat de regio goede kansen heeft op spontane reactivatie van stuifkuilen kan terughoudend worden omgesprongen met kunstmatige activatie van stuifkuilen in de buitenduinen, zoals ook in een OBN-advies voor Hollands duin is geadviseerd (Arens et al. 2017). Deze ingreep zou vooral moeten worden ingezet in perioden met geringe eolische activiteit ten behoeve van kleine fauna die gebonden is aan eolische activiteit. In landschapszones waar verstuiving momenteel gering is, zoals de midden- en binnenduinzone van brede duingebieden, is het wel zinvol om verstuiving te activeren, zeker als sprake is van (oppervlakkige) ontkalking en vergrassing (bijv. AWD, Kennemerduinen, Solleveld). De forse PAS-opgaven (Figuur 12-2) voor de Natura 2000 gebieden kunnen daarom het beste in zulke zones worden uitgevoerd. In geval van voortschrijdende struweel- en bosvorming is het belangrijk om met andere vormen van vegetatiebeheer als struweelverwijdering en de inzet van grazers zulke opgaande vegetatie te verminderen of de ontwikkeling ervan af te remmen. Daarmee kan de verstuivingsgevoeligheid op een langere termijn voldoende hoog worden gehouden voor spontane verstuiving.

Duingebieden Delta:

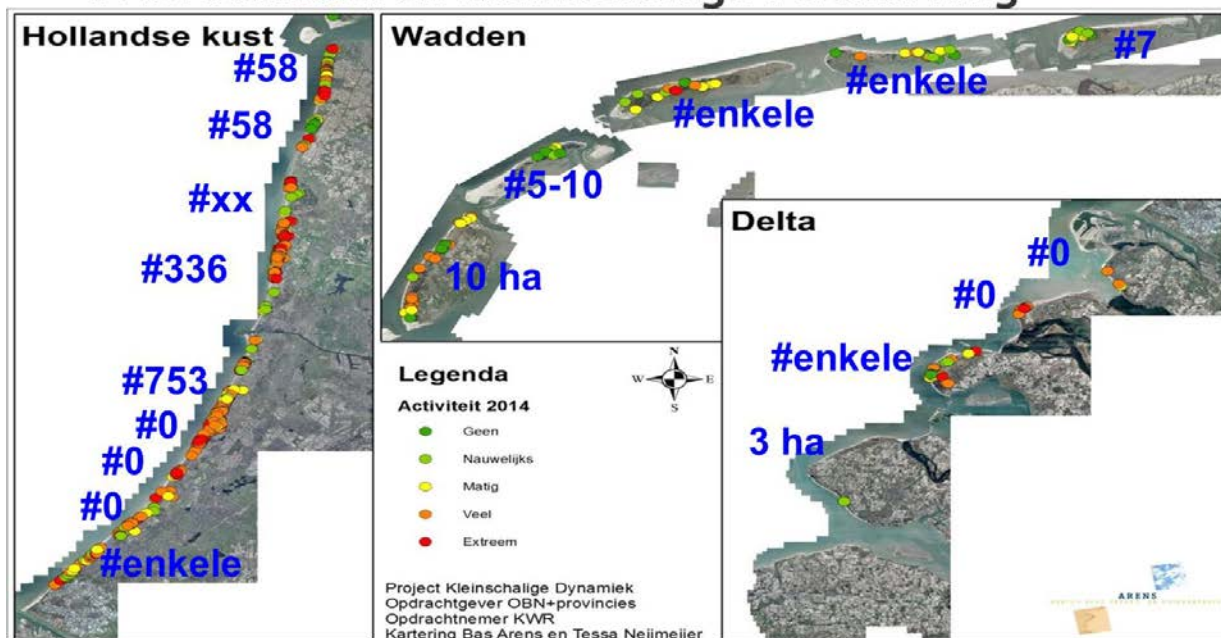
De verstuivingsgevoeligheid is hier in het algemeen laag door de ver voortgeschreden successie naar struweel en bos en deels ook aanplant van bos. De geaccidenteerde, jonge duingebieden hebben goede potentie voor verstuiving, omdat de bodemontwikkeling hier nog niet ver is gevorderd. Door op grotere schaal Duindoornvegetatie te verwijderen kan de verstuivingsgevoeligheid worden bevorderd. Daarbij hoeft niet overal de bodemtoplaag te

worden verwijderd, omdat bij verwijderen van struweel en daarop volgend maaibeheer ook snel kalkrijke duingraslanden kunnen worden hersteld (Aggenbach & Fujita 2015a). Met gerichte ingrijpen als de verwijdering van de bodemtoplaag kan op geschikte locaties lokaal verstuing worden bevorderd.

Daarnaast kan hier het activeren van stuifkuilen worden gecombineerd met bestrijding van Amerikaanse vogelkers. Diverse duingebieden in de Delta hebben te kampen met een groot probleem met deze invasieve exoot. Die manifesteert zich aanvankelijk vooral in duindoornstruweel, en is daar door begrazing moeilijk te bestrijden. Door Amerikaanse vogelkers te verwijderen samen met de Duindoorn kan én verdere uitbreiding hiervan worden tegengaan én verstuing worden geactiveerd. Ook plekken met Amerikaanse vogelkers in duingrasland kunnen goed worden aangepakt door deze soort te verwijderen en aanvullend te plaggen, waarbij op gunstige plekken stuifkuilen kunnen worden aangelegd of zelfs spontaan ontstaan als voldoende diep wordt geplagd.

Voor verbetering van de kwaliteit van duingraslandvegetatie kan ook de invloed van instuivend zand worden bevorderd door ingrijpen in de zeereep/zeewering, zodat zand van het strand het duin kan binnenkomen. De vroongronden hebben lage duinen en oude bodems met een diep humusprofiel. De verstuinggevoeligheid is daardoor laag. Deze gebieden zijn daarom minder geschikt voor het bevorderen van kleinschalige verstuing. Opvallend is dat de maatregelen van de PAS voor reactivatie van kleinschalige verstuing in de Delta beperkt zijn, terwijl de verstuingactiviteit in de meeste duingebieden momenteel erg gering is (Figuur 12-2).

PAS: stimuleren kleinschalige verstuing



Figuur 12-2: Samenvatting van geplande maatregelen voor reactivatie van kleinschalige verstuing in de PAS (info PAS-gebiedsanalysen) en de mate van activiteit van kleinschalige verstuing. # = aantal stuifkuilen en xx ha is oppervlakte stuifkuil. Voor onderzochte deelgebieden wordt de mate van verstuing met kleuren weergegeven. Opvallend: de omvang van PAS-maatregelen is negatief gecorreleerd met de huidige activiteit van kleinschalige verstuing!

Figuur 12-2: Summary of planned measures for reactivation of small-scale aeolian activity in the Dutch Program Nitrogen (PAS), and the degree of small-scale aeolian activity. # = number of blowouts, and xx ha is the area of blowouts. Classes for aeolian activity range from no activity (dark green) to extreem (red).

12.3 Maatregelen voor reactivatie kleinschalige verstuiving

Wanneer besloten wordt tot activatie van kleinschalige verstuiving dan kunnen de volgende praktische handvaten worden gegeven op basis van dit onderzoek:

- Verwijder de vegetatie en humeuze toplaag op locaties met een hoge verstuivingsgevoeligheid. De beste locaties zijn aan de bovenzijde van (hoge duinen) op bij voorkeur de zuidoost-, zuid- en zuidwest hellingen en eventueel ook west- en noordwest hellingen. De toppen van duinen en duinmassieven dienen te worden ontzien, aangezien anders deze duin(massiev)en wegstuiven en het oorspronkelijke reliëf dreigt te verdwijnen.
- Voor de grootte van te reactiveren plekken zijn nog geen algemene richtlijnen te geven. De gemiddelde grootte van deflatiezones in de Nederlandse kustduinen bedraagt ca. 400 m². In experimenten tot nu toe zijn verschillende dimensies toegepast met wisselend succes. Voor de grootte van te (re)activeren plekken zou rekening kunnen worden gehouden met de duinzonering (buitenduin relatief groot, midden- en binnenduin relatief klein). Verder hangt de grootte van de ruimte die er is voor reactivering (i.v.m. bijv. aanwezige infrastructuur, type reliëf, patroon van duinen en valleien). Zorg ook dat er ruimte overblijft voor een instuifzone waar duingrasland aanwezig is, kan ontstaan of kan verbeteren in kwaliteit. De ruimtelijke effecten op de omgeving kunnen 1 tot 10 maal groter zijn dan de deflatiezone en bevindt zich vaak vooral ten zuidoosten van de deflatie zone.
- De aflagdiepte hangt mede af van het type vegetatie. De humuslaag en het overgrote deel van het wortelprofiel dienen te worden verwijderd. In een open ruimte met een korte vegetatie en weinig of geen bodemontwikkeling kan een stuifplek van een tiental m² waar alleen oppervlakkig geplagd is al voldoende zijn om tot ontwikkeling te komen. Bij een dichte helm- of duindoornbedekking is een grotere aflagdiepte aan te bevelen omdat anders te veel wortels achter blijven en de kans op stabilisatie groot is. Mede afhankelijk van het type vegetatie en de hoeveelheid achtergebleven wortels kan besloten worden tot meer of minder intensief nabeheer, totdat de verstuivingen goed op gang zijn gekomen.
- Zorg voor een sterke blootstelling aan de wind van te reactiveren locaties door eventueel aanwezige opgaande begroeiing in de omgeving te verwijderen. Hoe ruwer de omringende vegetatie, hoe groter de open ruimte die gecreëerd moet worden. Een aanloop van tenminste 200 m wordt voldoende geacht.
- Leg stuifkuilen bij voorkeur aan op (hogere) duinen en met lage begroeiing in de omgeving, aangezien zij door een sterke windwerking het stuifzand over een relatief groot oppervlak verspreiden. In geval van kalkhoudend en kalkrijk zand hebben zulke stuifkuilen een groot ruimtelijk effect op de basenchemie van de bodem en kwaliteit van duingraslanden.
- In geval van ruimtelijke verschillen in kwaliteit van gesloten duingraslanden geef dan voor het uitvoeren van activatie maatregelen voorkeur aan plekken met een slechte of matige kwaliteit (met bijv. dominantie van hoge grassen of Grijs kronkelsteeltje). Daarmee worden goed ontwikkelde duingraslanden bij het uitvoeren van maatregelen gespaard. Ook kan gekeken worden op plekken met exoten in aanmerking komen voor activatie. Daarmee worden twee vliegen in klap geslagen.
- Zorg dat instuifzones een overwegend korte vegetatie hebben. Zwakke instuiving in een sterk vergrast duingrasland en struweel levert nog geen duingrasland met een goed ontwikkelde vegetatie. Additioneel, eenmaal of enkele malen vegetatiebeheer (maaien, chopperen) in de omgeving kan daarom zinvol zijn.
- Plan activatie van stuifkuilen op een tijdschaal van decennia en/of varieer in grootte bij de aanleg van stuifkuilen. Door te variëren in grootte krijg je automatisch ook stuifkuilen in verschillende stadia van stabilisatie; grote stuifkuilen blijven over het algemeen langer actief dan kleine stuifkuilen. Het is veel zinvoller om in een duingebied verschillende stadia van stuifkuilen te hebben (actief, uitdovend, gestabiliseerd) dan veel actieve stuifkuilen in een korte periode. Spreidt activatiemaatregelen daarom in de tijd en ruimte. Een planning op een tijdschaal van decennia is ook relevant om te profiteren van bodem en vegetatiesuccessie in deflatiezones en sterke accumulatiezones die zijn gestabiliseerd. Op een termijn van 20-40 jaar geeft dat soortenrijke duingraslanden. Stabilisatie is dus niet altijd een nadeel en zelfs ook gewenst.
- Weeg de positieve effecten van activatiemaatregelen af tegen negatieve invloeden van werkzaamheden. Denk daarbij aan vooral de effecten van rijroutes (beschadiging bodem en vegetatie, verdichting) voor graafmachines en afvoer van plaggemateriaal.
- Vermijd de aanleg van permanente depots. Idealiter wordt plaggemateriaal afgevoerd. Wanneer dit niet mogelijk is moet zeer kritisch gekeken worden waar het materiaal wordt weggewerkt. Bestaande depressies kunnen enigszins opgevuld worden. Bij

werkzaamheden in de buurt van het strand kan soms zand op het strand of bij de vloedlijn worden afgezet, waarna het door golven afgevoerd kan worden. Voorkomen moet worden dat de aanleg van stuifkuilen leidt tot steeds meer onnatuurlijke elementen in het landschap. Bovendien is deflatiezone over het algemeen beperkt qua omvang. Als dan in de buurt een depot wordt gemaakt is er geen sprake van winst maar eerder van een netto verlies, omdat een stuk natuurlijke morfologie wordt opgeofferd. Daarnaast kunnen zand depots ook leiden tot een verruigde vegetatie.

- Kijk in het geval van buitenduingebieden ook naar mogelijkheden voor aanvoer van zand vanaf het strand en de zeereep/zeewering. Opties zijn dan aanleg van kerven, verlagen van de zeewering of de aanleg van stuifkuilen bovenop de zeereep. Aanvoer van kalkhoudend zand vanaf het strand is zeker belangrijk voor kalkarme kustzones en vaak de enige mogelijkheid om basen- en kalkhoudend zand binnen duingebieden van het Waddendistrict te realiseren. Door grootschalige zandsuppleties zijn de mogelijkheden voor nieuwe aanvoer van zand naar het duin ook toegenomen. In combinatie met activatie van ketens van stuifkuilen is het ook mogelijk om kalkhoudend zand verder het duingebied in te transporteren.
- Zorg met vegetatiebeheer dat de verstuiwingsgevoeligheid van het duinlandschap hoog blijft. Dit kan door ontwikkeling naar struweel en bos tegen te gaan en te zorgen dat gesloten duingraslanden een korte vegetatie hebben (beweiding, eventueel in combinatie met of voorafgegaan door maaien/chopperen). Voor een langere termijn vergroot dit de kans op spontane activatie en stuifkuilen kunnen dan langere tijd actief blijven.
- Check vooraf aan het plannen van afgraafwerkzaamheden op de aanwezigheid van oude munitie.

13 Kennislacunes en aanbevelingen voor verder onderzoek

Dit OBN-onderzoek heeft veel nieuwe kennis opgeleverd over kleinschalige verstuiving en de ecologische effecten daarvan. Tegelijk komen daarbij ook een aantal belangrijke kennislacunes in beeld. Hieronder worden deze opgesomd en geven we suggesties voor toekomstig onderzoek:

13.1 Kennislacunes

1. De effecten van (re)activatie maatregelen worden beperkt en veelal op uiteenlopende wijze gemonitord. De effectiviteit van zulke maatregelen op bodem, vegetatie en fauna is daardoor beperkt in beeld.
2. De kleinschalige verstuiving vertoont in diverse duingebieden op een tijdschaal van decennia fluctuaties. Vermoedelijk sturen meerdere factoren deze fluctuaties aan. Daarbij kunnen variatie in de meteorologie (neerslag/verdamping, neerslagpieken, wind), trends in atmosferische stikstof-depositie en fluctuaties in de konijnendichtheid een rol spelen. Het relatieve belang van deze factoren is momenteel moeilijk te duiden. Tijdens het onderzoek is een database met een schat aan gegevens samengesteld. Door middel van multivariate analyse is hier waarschijnlijk nog meer uit te halen.
3. Voor het transport van zand door de wind zijn verschillende meteorologische parameters van belang. Daarnaast is vooral de volgorde van gebeurtenissen bepalend. Een storm aan het eind van een droge periode heeft een heel ander effect dan een storm na een periode met veel neerslag. Dit kan door middel van tijdreeksanalyse onderzocht worden.
4. De opvallende verschillen in het recente patroon en trends van kleinschalige verstuiving tussen het Waddendistrict, de Hollandse vastelandsduinen in het Renodunaal district en de Delta worden vermoedelijk door meerdere factoren veroorzaakt. We veronderstellen dat meer neerslagpieken bijdragen aan het initiëren van verstuiving via watererosie. De vraag is of dit mechanisme voor het huidige verstuivingspatroon inderdaad zo werkt. In het verleden is wel met onderzoek aangetoond dat watererosie belangrijk is voor het initiëren van kleinschalige verstuiving.
5. Naast verschillen in vegetatie tussen de regio's kunnen ook verschillen in bodemontwikkeling bepalend zijn voor de verstuivingsgevoeligheid van de bodem. Ver voortgeschreden bodemontwikkeling zou daarbij een belangrijke limiterende factor voor verstuiving kunnen zijn in de sterk verzuurde duingebieden van het Waddendistrict. Diepere bodemprofielen kunnen ook zorgen voor een sterkere doorworteling van de bodem en daarmee betere erosiebestendigheid. Mogelijk is dit ook een verklaring voor het feit dat in zure duingebieden waar recent de vergrassing en het strooisellaag is afgenomen, geen stuifkuilen ontstaan. Gegevens van humusprofielen en organische stofgehalten van zulke zure duingebieden zouden daarvoor bekeken kunnen worden.
6. De hoogte van de stikstofdepositie kan ook effect hebben op de verstuivingsgevoeligheid van de vegetatie. De overschrijding van de kritische depositiewaarde van kalkarme duingraslanden en het hoge aandeel van NH_x in het Waddendistrict zou daarbij de verstuivingsgevoeligheid kunnen beperken. Naast meer vergrassing kan een hogere productiviteit van soorten als Kraaiheide en Kruiwilg daarbij ook van belang zijn. In welke mate een hoge N-depositie verstuiving belemmert, is onduidelijk.
7. Klimaatverandering en de ontwikkeling van de atmosferische stikstofdepositie hebben een onbekend effect op de verstuivingsgevoeligheid. Complicerende factor is daarbij dat meteorologische fluctuaties, klimaatverandering en verandering van N-depositie door elkaar heen spelen. Daarnaast werkt klimaat door op zowel verstuivingsgevoeligheid (via neerslagoverschot en verlenging groeiseizoen op de productiviteit van de vegetatie) en het initiëren van de verstuiving (effect van neerslagpieken op watererosie en effect van stormen op winderosie).
8. De indruk bestaat dat stabilisatie en destabilisatie in de duinen in cycli optreden. Dit is gebaseerd op de ontwikkeling van verstuivingen in twee duingebieden. Om hier meer inzicht in te krijgen zouden voor meer duingebieden langere tijdreeksen van de ontwikkeling van de verstuivingsdynamiek moeten worden opgesteld.

9. De invloed van instuiving op oude bodems op de nutriëntenhuishouding. Bedekking van de kruidlaag in de zone met zwakke instuiving is lager dan in delen waar geen of nauwelijks instuiving optreedt. Dit heeft ook via betere lichtcondities een gunstige doorwerking in de rijkdom aan plantensoorten van duingraslanden. Deze verschillen kunnen samenhangen met een lagere nutriëntenrijkdom van de bodem in zwakke instuifzones en/of met meer begrazing en plantparasieten door een betere voedselkwaliteit. In hoeverre deze mechanismen een rol spelen is onduidelijk. Een effect op nutriëntenhuishouding is ook van belang voor een eventueel mitigerend effect van verstuiving voor hoge stikstofdepositie (PAS).
10. Verstuiving heeft een invloed op de voedselkwaliteit van de vegetatie voor herbivoren, zowel door een verandering in soortensamenstelling als verandering in bloemaanbod en in de chemische samenstelling van de planten. De richting en mate van chemische verandering hangen zowel af van de bodemchemie, de mate van overstuiving in verhouding tot de onderliggende organische bodem, de plantensoort én het groeistadium van de plant. Vooral de lage gehalten aan Ca en Fe in (verzuurde bodems van) de Waddenregio lijkt ervoor te zorgen dat verstuiving weinig effect heeft. Op dit moment is er nog te weinig kennis over de invloed van verschillende factoren om de effecten van verstuiving in de praktijk te kunnen voorspellen.
11. Naast een verandering in voedselkwaliteit heeft verstuiving ook invloed op het microklimaat en stabiliteit en toegankelijkheid van de bodem als nest- en overwinteringsgelegenheid. Effecten hiervan voor doelsoorten als parelmoervlinders, konijn, tapuit etc. zijn veelal onvoldoende bekend om specifieke verstuivingsmaatregelen voor deze soorten te formuleren, zeker wanneer deze soorten afhankelijk zijn van andere diersoorten als prooi of gastheer.
12. Effecten van stuifkuilen op duingraslanden werken op een complexe wijze door in de ruimte en de tijd. De inzichten uit dit onderzoek bieden de mogelijkheid om zulke effecten meer kwantitatief uit te werken in relatie tot dichtheden van stuifkuilen, omvang van de deflatiezone, kalkrijkdom en ontkalkingsdiepte van het duinlandschap. Daarmee zou het mogelijk zijn om lange termijn scenario's met verstuivingsmaatregelen beter te beoordelen op hun effecten op landschapsschaal. Dit is vooral van belang voor de dimensionering en fasering van maatregelen. Ook kan het interessant zijn om verschillende "referentiegebieden", waar de situatie zich al min of meer van nature gunstig heeft ontwikkeld, eens nader onder de loep te nemen.

13.2 Aanbevelingen voor onderzoek

- Kennislacune 1: een representatieve set ge(re)activeerde stuifkuilen in duingebieden langs de Nederlandse kust monitoren op de effecten op bodem, vegetatie en fauna. Vooraf aan de maatregelen wordt de nulsituatie beschreven en tevens worden de maatregelen gedocumenteerd. Een gestandaardiseerde monitoring maakt het mogelijk om naderhand het succes en falen van (re)activatie maatregelen beter te begrijpen. Zulke inzichten kunnen worden gebruikt voor het beter plannen en uitvoeren van (re)activatiemaatregelen.
- Voor kennislacune 2 t/m 7: Procesmatig onderzoek aan de invloed van klimaat en stikstofdepositie op de verstuivingsgevoeligheid van duinen. Door middel van empirische onderzoek aan bodemprofielen, vochthuishouding en stikstofhuishouding en modellering van de vochthuishouding en productiviteit van de vegetatie kan de invloed van verschillen in klimaat en stikstofdepositie meer gekwantificeerd worden. Met scenario-analyse zouden effecten van klimaatverandering, meteorologische fluctuaties en trends van stikstofdepositie kunnen worden geëvalueerd. Met het meenemen van bodemsuccesie is het ook mogelijk om de doorwerking van succesie op de verstuivingsgevoeligheid te evalueren.
- Kennislacune 5: Beschrijvend onderzoek aan de organisch stofaccumulatie in droge, korte vegetaties in diep ontkalkte duingebieden. Dit zou kunnen op basis van onderzoek in chrono-sequensen waarbij locaties die verschillen in ouderdom van de bodem worden geanalyseerd. Door chrono-sequensen te construeren in gebieden met zowel een hoge als lage N-depositie is kan ook gekeken worden naar de invloed van stikstofdepositie op bodemontwikkeling. De resultaten zouden dan kunnen worden vergeleken met onderzochte chrono-sequensen in kalkrijke duingebieden.
- Kennislacune 6, 9 en 10: Onderzoek aan de nutriëntenhuishouding, voedselkwaliteit en herbivorie (jaarrond) in gradienten van veel naar geen instuiving van stuifkuilen.
- Kennislacune 8: Analyse van lange-termijn ontwikkeling van verstuivingsdynamiek in uiteenlopende duingebieden op basis van remote sensing beelden.
- Kennislacune 11: In kaart brengen van verschillen in effecten van verstuiving tussen kalkrijke en kalkarme gebieden voor specifieke doelsoorten en opbouw van het

voedselweb voor predatoren en parasieten. Zowel voor deze kennislacune als voor kennislacune 6 ligt het voor de hand om veld-, kas- en/of labexperimenten uit te voeren om de verschillende sleutelprocessen en effecten uit elkaar te kunnen trekken.

- Kennislacune 12: Kwantitatieve inzichten in de effecten van stuifkuilen uit dit onderzoek formaliseren in een eenvoudig model waarmee verstuivingsscenario's op landschapsschaal en een lange termijn (tot 100 jaar) worden geëvalueerd. In dit model zou ook recente kennis kunnen worden meegenomen over de ontkalkingsnelheid van duinbodems.

14 Literatuur

Aggenbach, C.J.S., Kooijman, A.M., Fuyita, Y., Hagen, H. van der, Til, M. van, Cooper, D. and Jones, L. (2017). Does atmospheric nitrogen deposition lead to greater nitrogen and carbon accumulation in sand dune soils? *Biological Conservation*

Aggenbach C.J.S., A. Kooijman, R.P. Bartholomeus & Y.Fujita Y. (2013) Herstelbaarheid van droge duingraslanden in relatie tot accumulatie van organisch stof en stikstof in de bodem. KWR 2013.028. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.

Aggenbach, C.J.S., S.M. Arens, A. Kooijman, E.J. Lammerts (2016). Beheeradvies activering eolische dynamiek op de Waddeneilanden als PAS-maatregel voor habitatype H2130 Grijze duinen. Advies 2016/ OBN 11-DK, Vereniging van Bos- en Natureigenaren. Driebergen.

Arens, S.M. (2017). Project Noordvoort; Monitoring geomorfologie (2016). Rapport Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek RAP2017.04 in opdracht van Waternet.

Arens, S.M. (2017). Luchtfoto-analyse ontwikkeling stuifkuilen Vlaggenduin. Rapport Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek RAP2017.0b in opdracht van Gemeente Katwijk.

Arens, S.M., F.H. Everts, A.M. Kooijman, S.T. Leek, M. Nijssen, N.P.J. de Vries (2012). Ecologische effecten van zandsuppleties op de duinen langs de Nederlandse kust. OBN rapport DK166 in opdracht van OBN en Kustlijnzorg Ecologie, RWS-Deltares.

Arens, S.M., F.H. Everts, A.M. Kooijman, E.J. Lammerts, S.T. Leek, M.E.Nijssen, B. van der Valk & N.P.J. de Vries (2013). Geomorfologische en ecologische effecten van zandsuppleties op duinen. *De levende natuur*, 6, 246-251.

Arens S.M. & L.H.W.T. Geelen (2006). Dune landscape rejuvenation by intended destabilisation in the Amsterdam Water Supply Dunes. *Journal of Coastal Research*, 23, 1094-1107.

Arens, S.M., L. Geelen, H. van der Hagen & R. Slings (2007). Duurzame verstuiwing in de Hollandse duinen. *Kans, droom of nachtmerrie*. Eindrapport Fase 1. Amsterdam, Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek RAP2007.02 in opdracht van Waternet, nv PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland en Dunea.

Arens, S.M., L. Geelen, H. van der Hagen & R. Slings (2009). Duurzame verstuiwing in de Hollandse duinen. *Kans, droom of nachtmerrie*. Eindrapport Fase 2. Amsterdam, Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek RAP2009.03 in opdracht van Waternet, nv PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland en Dunea.

Arens, S.M., M.A.M. Löffler en E.M. Nuijen (2007). Evaluatie Dynamisch Kustbeheer Friese Waddeneilanden. Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek RAP2016.04 in opdracht van Rijkswaterstaat Noord-Nederland.

Arens, S.M., J.P.M. Mulder, Q.L. Slings, L.H.W.T. Geelen, P. Damsma (2013). Dynamic dune management, integrating objectives of nature development and coastal safety. *Geomorphology* 199, 205-213.

Arens, S.M., T. Neijmeijer (2013). Noordwestkern. Effecten van ingrepen op dynamiek. *Metingen 2013*. Amsterdam, Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek RAP2013.07 in opdracht van nv PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland.

Arens, S.M., T. Neijmeijer (2014). Ontwikkeling van stuifkuilen in de Amsterdamse Waterleidingduinen – Zuidwestkern, 2001-2013. Amsterdam, Arens Bureau voor Strand- en Duinonderzoek RAP2014.02 in opdracht van Waternet.

Arens, S.M., M. Witteveldt, F. Erinkveld & J. Kloppenburg (2006). Stuifkuilen in de Schoorlse Duinen. *Dijk en Duin*, 2006-2, p8-10.

Arens, S.M., F.H. Everts, A.M. Kooijman, E.J. Lammerts, S.T. Leek, M.E.Nijssen, B. van der Valk & N.P.J. de Vries (2013). Geomorfologische en ecologische effecten van zandsuppleties op duinen. *De levende natuur*, 6, 246-251.

Arens, S.M., F.H. Everts, A.M. Kooijman, S.T. Leek, M. Nijssen, N.P.J. de Vries (2012). Ecologische effecten van zandsuppleties op de duinen langs de Nederlandse kust. OBN rapport DK166 in opdracht van OBN en Kustlijnzorg Ecologie, RWS-Deltares.

- Bartholomeus, R. P., Witte, J.-P. M. and Runhaar, J. (2012), Drought stress and vegetation characteristics on sites with different slopes and orientations. *Ecohydrol.*, 5: 808–818.
- Behmer, S. T. (2009). Insect herbivore nutrient regulation. *Annual review of entomology*, 54.
- Bernard R. Voortman, B.R., Y. Fujita, R. P. Bartholomeus, C.J.S. Aggenbach & J.P.M. Witte (2017). How the evaporation of dry dune grasslands evolves during the concerted succession of soil and vegetation: How the evaporation of dry dune grasslands evolves during succession.
- Cody RP, Smith JK (1987) *Applied statistics and the SAS programming language*. Elsevier Science Publishers Co. Int. 280 pp.
- Dekker, L. W.; Jungerius, P. D. (1990) Water repellency in the dunes with special reference to The Netherlands. *Catena*, Supplement 1990 No.18 pp.173-183
- Dekker, L.W., C.J. Ritsema en K. Oostindie (2000). Extent and significance of water repellency in dunes along the Dutch coast. *Journal of Hydrology* 231-232 (2000) 112-125.
- Jungerius, P.D. & L.W. Dekker (1990). Water erosion in the dunes. *Catena*, Supplement 1990 No18, pp 185-193.
- De Keijzer, S & J.H. Van Boxel (2003). De vernatting van Nederland: het gevolg van een toename van de extreme neerslag? *Weerspiegel*, 30 (3), 328-336.
- Fujita Y & Aggenbach C.J.S. (2015a). Effects of mowing, sod-cutting, and drift sand on development of soil and vegetation in Grey Dunes. KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein
- Fujita Y & Aggenbach C.J.S. (2015b). Patterns of soil development and plant species diversity in dune grasslands in Meijendel. BTO 2015.009 Nieuwegein.
- Fujita Y & Aggenbach C.J.S. (2015c). Effects of small scale eolian activity on soil and vegetation of grey dunes Duinen. KWR 2015.097, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Fujita Y., Melis J.W.C., Kooijman A.M., Aggenbach C.J.S. (2014). Interactions between SOM accumulation, nutrient availability, and plant diversity in lime-rich and lime-poor dune grassland succession. Rapport KWR 2014.006, KWR Watercycle Research Institute, Nieuwegein.
- Geertsma, G., A. Hopman & J.P. Op den Kamp (1986). *Stuifkuilen in de Haasvelderduinen*. Publicaties van het Fys. Geogr. En Bodemk. Lab., Univ. Amsterdam.
- Jungerius, P.D. & J.H. de Jong (1989). Variability of water repellence in the dunes along the Dutch coast. *Catena*, vol 16, pp491-497.
- Jungerius, P.D. & M.J. ten Harkel (1994). The effect of rainfall intensity on surface runoff and sediment yield in the grey dunes along the Dutch coast under conditions of limited rainfall acceptance. *Catena* 23, 269-279.
- Jungerius, P.D. & F. van der Meulen (1988). Erosion processes in a dune landscape along the Dutch coast. *Catena*, 15, 217-228
- Jungerius, P.D. & F. van der Meulen (1997). Aeolian dynamics in relation to vegetation in a blowout complex in the Meijendel dunes, The Netherlands. *Journal of Coastal Conservation*, 3, 63-70.
- Jungerius, P.D., J.T. Verheggen & A.J. Wiggers (1981). The development of blowouts in 'De Blink', a coastal dune area near Noordwijkerhout, The Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6, 375-396.
- Kawamura, R. (1951). Study of sand movement by wind. *Reports of Physical Sciences Research Institute of Tokyo University* 5 (3-4), 95-112 (in Japanese). Translated in 1964 as *University of California Hydraulics Engineering Laboratory Report*, HEL-2-8, 99-108, Berkeley, California, pp 1-38.
- KNMI (2000). *Handboek Waarnemingen; 1. Meetstation algemeen, versie juli 2000*.
- KNMI (2011). *De Bosatlas van het klimaat*. Noordhoff Atlasproducties/KNMI
- <http://www.klimaatatlas.nl/klimaatatlas.php?wel=neerslag&ws=kaart&wom=Gemiddeld%20aan%20dagen%20met%2010.0%20mm%20of%20meer>
- Kooijman, A.M., Bloem, J., Cerli, C., Jagers op Akkerhuis, G.A.J.M., Kalbitz, K., Dimmers, W., Vos, A., Peest, A.K. & Kemmers, R.H. (2014). Stikstofkringloop in kalkrijke en kalkarme duinbodems en de implicaties daarvan voor de effectiviteit van plaggen. Rapport nr. 2014/OBN 189-DK. Directie Agrokennis, Ministerie van Economische Zaken.

- Kooijman, A.M. & Besse, M. (2002). The higher availability of N and P in lime-poor than lime-rich coastal dunes in the Netherlands. *Journal of Ecology* 90: 394-403.
- Kooijman, A.M., Besse, M. en Haak, R (2005).. Effectgerichte maatregelen tegen verzuring en eutrofiering in open droge duinen. Directie Kennis, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, rapport DK 2005/dk008-O.
- Kooijman, A.M., J. Bloem, C. Cerli, G.A.J.M. Jagers op Akkerhuis, K. Kalbitz, W. Dimmers, A. Vos, A.K. Peest & R.H. Kemmers (2014). Stikstofkringloop in kalkrijke en kalkarme duinbodems en de implicaties daarvan voor de effectiviteit van plaggen. Rapport nr. 2014/OBN189-DK, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren.
- Kooiman, A.M., M. Besse, R. Haak, J.H. van Boxel, H. Esselink, C. ten Haaf, M. Nijssen, M. van Til, C. van Turnhout (2005). Effectgerichte maatregelen tegen verzuring en eutrofiering in open droge duinen. "Eindrapportage fase 2." Rapport DK nr. 2005/dk008-O, 158 pp. Kooijman et al. 2005
- Kooijman, A.M. & de Haan, M.W.A. (1995). Grazing as a measure against grass encroachment in Dutch dry dune grassland: effects on vegetation and soil. *Journal of Coastal Conservation* 1: 127-134.
- Kooijman, A.M., M. van Til, E. Noordijk, E. Remke, & K. Kalbitz (2017). N-deposition and grass-encroachment in calcareous and acidic Grey Dunes (H2130) in NW-Europe. *Biological Conservation* (in press).
- Kuper, J., Van Duinen, G. J., Nijssen, M., Geertsma, M., & Esselink, H. (2000). Is the decline of the Red-backed Shrike (*Lanius collurio*) in the Dutch coastal dune area caused by a decrease in insect diversity. *Ring*, 22(1), 11-25.
- Nijssen, M. M. Riksen, L. Sparrius, R.J. Bijlsma, A. van den Burg, H. van Dobben, P. Jungerius, R. Ketner-Oostra, A. Kooiman, L. Kuiters, Chr. van Swaay, Chr. van Turnhout & R. de Waal (2011). Effectgerichte maatregelen voor het herstel en beheer van stuifzanden. OBN stuifzandonderzoek 2006-2010. Rapport nr. 2011/OBN144-DZ, Den Haag.
- Nijssen, M., B. Wouters, J. Vogels, A. Kooijman, H. van Oosten, Chr. van Turnhout, M. Wallis de Vries, J. Dekker & I. Janssen. (2014). Begrazingsbeheer in relatie tot herstel van faunagemeenschappen in droge duingraslanden. Eindrapportage 2009-2013. Rapport nr. 2014/OBN 190-DK. Directie Agrokennis, Ministerie van Economische Zaken.
- Nijssen, M., Wouters, B., Vogels, J., Kooijman, A., Oosten, H., Turnhout, & Janssen, I. (2014). Begrazingsbeheer in relatie tot herstel van faunagemeenschappen in droge duingraslanden: eindrapportage 2009-2013. OBN rapportnr 2014/OBN190-DK. VBNE, Driebergen.
- Noest, V. (1987). Stabilisatie van stuifkuilen. *Zuidhollands Landschap* 2, 12-13.
- Noordijk, H., A. Hollander, F. Sauter en W.A.J. van Pul (2014). Ammoniakdepositie in de duinen langs de Noordzee- en Waddenzee-kust. Analyse van het verschil tussen gemeten en met OPS gemodelleerde concentraties. RIVM Rapport 80030001 in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken.
- Oldenburg, C. (2015). Stuiwend zand; een onderzoek naar geografische en morfologische kenmerken van stuifplekken in kustduinen. Rapport PWN.
- RIVM (2016). Het verloop van de ammoniakconcentratie over 2005-2014. RIVM rapport 2016-0136, in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken.
- Rutin, J. (1983). Erosional processes on a coastal sand dune, De Blink, Noordwijkerhout. Publicaties van het Fys. Geogr. En Bodemk. Lab., Univ. Amsterdam, 35..
- Sabo, J. L., Bastow, J. L., & Power, M. E. (2002). Length–mass relationships for adult aquatic and terrestrial invertebrates in a California watershed. *Journal of the North American Benthological Society*, 21(2), 336-343.
- Scholten, R. (2014). The water repellency of dune soils and the hydrological effects along a vegetation gradient: a case study in the Dutch dunes of Texel. Bachelor thesis, IBED, Universiteit van Amsterdam
- Slings, Q.L. (2015). Kennis over stuifkuilen. Memo, oktober 2015
- Smits, N.A.C. & A.M. Kooijman (2012a). Herstelstrategie H2130A: Grijze duinen (kalkrijk).
- Smits, N.A.C. & A.M. Kooijman (2012b). Herstelstrategie H2130B: Grijze duinen (kalkarm).
- Sparrius, L.B., Kooijman, A.M. and Sevink, J. (2012). Effects of nitrogen deposition on soil and vegetation in primary succession stages in inland drift sands. *Plant and Soil* 353, 261-272

- Stuyfzand, P.J. (2010). Modellerings kwaliteit ondiep (duin)grondwater en ontgalking, inclusief effecten van klimaatverandering en kustuitbreiding: DUVELCHEM. KWR-rapport BTO 2010.031(s), 86p.
- Stuyfzand, P.J. (1993). Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands. Ph.D Thesis Vrije Univ. Amsterdam.
- Stuyfzand, P.J. (2015). Effects of climate and environmental change on shallow groundwater quality and quantity in Dutch coastal dunes. KRW report KWR BTO.2015.0?? (s) in prep.
- Stuyfzand P.J., S.M. Arens, A.P. Oost, P.K. Baggelaar (2012). Geochemische effecten van zandsuppleties in Nederland. Langs de kust van Ameland tot Walcheren. Rapport nr. 2012/OBN167-DK, Directie Kennis en Innovatie, Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie.
- Van Boxel, J.H. van, P.D. Jungerius, N. Kieffer & N. Hampel  (1997). Ecological effects of reactivation of artificially stabilized blowouts in coastal dunes. *Journal of Coastal Conservation*, 3, 57-62.
- Van Boxel, J. H., Jungerius, P. D., Kieffer, N., & Hampele, N. (1997). Ecological effects of reactivation of artificially stabilized blowouts in coastal dunes. *Journal of Coastal Conservation*, 3(1), 57-62.
- Van Boxel, J. H., & Jungerius, P. D. (1997). Parabolisering op Ameland. Voortgangsrapport 1997. Amsterdam: UvA FGBl.
- Van Boxel, J. H., & Jungerius, P. D. (2005). Experiment parabolisering op Ameland 1993-2004: eindrapport. Amsterdam: Instituut voor Biodiversiteit en Ecosysteem Dynamica, Universiteit van Amsterdam.
- Van Boxel, J., & Cammeraat, E. (1999a). Wordt Nederland steeds natter? Een analyse van de neerslag in deze eeuw. *Meteorologica*, 8(1), 11-15.
- Van Boxel, J.H., L.H. Cammeraat, 1999b. Nog meer nattigheid?. *Weerspiegel*, 26: 667-672.
- Van Boxel, J.H., L.H. Cammeraat (2000). Weersverwachting voor de 21ste eeuw. *Geografie*, (3): 18-21.
- Van Boxel, J.H. (2002). Het klimaat verandert. En de duinen? *Duin* 25(4): 13-15.
- Van der Meulen, F., Kooijman, A.M., Veer, M.A.C. & Van Boxel, J.H. (1996). Effectgerichte maatregelen tegen verzuring en eutrofiering in open droge duinen. Eindrapport Fase I: 1991-1995. Amsterdam, 232 pp.
- Van der Putten, W. H., Van Dijk, C., & Troelstra, S. R. (1988). Biotic soil factors affecting the growth and development of *Ammophila arenaria*. *Oecologia*, 76(2), 313-320.
- Van der Valk, L., S.M. Arens, A. Koomen en M.A.J. Bakker (2013). Verkenning herstel mogelijkheden duindynamiek Westduinen (Schouwen). Bosschap, Bedrijfschap voor bos en natuur en Ministerie van Economische Zaken, Rapport nr 2013/OBN184-DK in opdracht van OBN en Provincie Zeeland.
- Van Dobben, H.F., R. Bobbink, D. Bal & A. van Hinsberg (2012). Overzicht van kritische depositiewaarden voor stikstof, toegepast op habitattypen en leefgebieden van Natura 2000. *Alterra-rapport 2397*, Alterra Wageningen UR.
- Van Duinen, G. J., Beusink, P., Nijssen, M., & Esselink, H. (2005). Larval development of *Anomala dubia* (Scarabaeidae) in coastal dunes: Effects of sand-spray and *Ammophila arenaria* root biomass. *Proc. Neth. Entomol. Soc. Meet*, 16, 63-70.
- Van Duinen, G.J., J. Kuper, M. Geertsma & M. Nijssen (2004). Broed- en voedsel ecologie van Grauwe Klauwieren in intacte kustduinen - de Kleine Junikever als schakel in het voedselweb: referentieonderzoek voor optimalisatie van beheers- en herstelmaatregelen voor fauna in Nederlandse duinen. Stichting Bargerveen, Afdeling Dierecologie en-ecofysiologie & Afdeling Milieukunde, Radboud Universiteit Nijmegen.
- Van Duinen, G. J., Beusink, P., Nijssen, M., & Esselink, H. (2005). Larval development of *Anomala dubia* (Scarabaeidae) in coastal dunes: Effects of sand-spray and *Ammophila arenaria* root biomass. *Proc. Neth. Entomol. Soc. Meet*, 16, 63-70.
- Van Haperen, A.M.M. (2009). Een wereld van verschil, landschap en plantengroei van de duinen op de Zeeuwse en Zuid-Hollandse Eilanden, 274 pagina's. Proefschrift Wageningen Universiteit.
- Haperen, A.M.M. van, Kooijman, A.M., Oostermeijer, J.G.B., Slings, Q.L. (2014). Advies kalkrijke duingraslanden Vlaggeduin (gemeente Katwijk). Expertteam Monitoring Vlaggeduin, 15 pp.

- Van Oosten (2015). On the brink of extinction. Biology and conservation of Northern Wheatears in the Netherlands. PhD-thesis Radboud University Nijmegen.
- Van Oosten, H, A.B van den Burg, R. Versluijs & H. Siepel (2014). Habitat selection of brood-rearing Northern Wheatears *Oenanthe oenanthe* and their invertebrate prey. *Ardea* 102: 61-69.
- Van Til, M., B. Arens, C. van Turnhout & M. Nijssen (2016). Beheeradvies Noordduinen – Grafelijkheidsduinen herstel verstuivingsdynamiek. OBN-Deskundigenteam Duin- en Kustlandschap, Advies OBN-12-DK, Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren
- Van Turnhout, C, S. Stuijzand, M. Nijssen & H. Esselink (2004). Gevolgen van verzuring, vermisting en verdroging en invloed van herstelbeheer op duinfauna. Rapport EC-LNV nr. 2003/153 Ede, 2003 ISBN: 90-80643-2-46.
- Verkaik, J.W. (2001). Documentatie Windmetingen in Nederland. KNMI, De Bilt.
- Vogels, J., A. van den Burg, E. Remke, H. Siepel (2011). Effectgerichte maatregelen voor herstel en beheer van faunagemeenschappen heideterreinen. Evaluatie en ontwerp van bestaande en nieuwe herstelmaatregelen (2006-2010).
- Vogels, J. J., Verberk, W. C. E. P., Lamers, L. P. M., & Siepel, H. (2016). Can changes in soil biochemistry and plant stoichiometry explain loss of animal diversity of heathlands?. *Biological Conservation* 212. Pages 432-447
- Witter, J.V., P.D. Jungerius en M.J. ten Harkel (1991). Modelling water erosion and the impact of water repellency. *Catena* 18, 115-124.
- Wouters, B. & E. Remke (2012). Onderzoeksprogramma Levende Duinen. Stichting Bargerveen rapport, Nijmegen. 130 pag. + bijlagen.

ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn

Het Kennisnetwerk Ontwikkeling Beheer Natuurkwaliteit:

- is een onafhankelijk en innovatief platform waarin beheer, beleid en wetenschap op het gebied van natuurherstel en -beheer samenwerken;
- ontwikkelt en verspreidt kennis met als doel het structureel herstel en beheer van natuurkwaliteit.

**Kennisnetwerk OBN wordt gecoördineerd door de VBNE en gefinancierd door
het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en BIJ12**

Vereniging van bos- en natuurterreineigenaren (VBNE)

Princenhof Park 7
3972 NG Driebergen
0343-745250

drs. W.A. (Wim) Wiersinga
Adviseur Plein van de kennis/
Programmaleider Kennisnetwerk OBN
0343-745255 / 06-38825303
w.wiersinga@vbne.nl

M. (Mark) Brunsveld MSc
Programma-medewerker Kennisnetwerk OBN
0343-745256 / 06-31978590
m.brunsveld@vbne.nl