



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Onderzoek naar

Onderzoek naar vervangend rekenmodel om weersinvloeden
op nitraatconcentraties te berekenen.

vervangend

rekenmodel

Vergelijking van de modellen ONZAT, HYDRUS-1D en SWAP



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

**Onderzoek naar vervangend
rekenmodel om weersinvloeden op
nitraatconcentraties te berekenen.**

Vergelijking van de modellen ONZAT, HYDRUS-1D en SWAP

RIVM Rapport 680717033/2013

Colofon

© RIVM 2013

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

G.M.C.M. Janssen, Deltares
B. Fraters, RIVM
L.J.M. Boumans, RIVM
A. Vrijhoef, RIVM

Contact:
Dico Fraters
Centrum voor Milieukwaliteit
dico.fraters@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Milieu en het ministerie van Economische Zaken, in het kader van het project Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM, projectnummer M/680717)

Rapport in het kort

Onderzoek naar vervangend rekenmodel om weersinvloeden op nitraatconcentraties te berekenen.

Vergelijking van de modellen ONZAT, HYDRUS-1D en SWAP

Het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM) meet sinds 1992 de nitraatconcentraties in het bovenste grondwater om de effecten van overheidsbeleid op de concentraties in beeld te brengen. De hoogte van de gemeten nitraatconcentraties is afhankelijk van het weer, vooral van de hoeveelheid neerslag in de voorafgaande jaren. Na een aantal regenrijke jaren is de nitraatconcentratie door verdunning bijvoorbeeld meestal lager dan normaal.

Het RIVM verwerkt deze weereffecten in de meetresultaten, zodat de effecten van het beleid nauwkeuriger zichtbaar zijn. Dit wordt gedaan met een rekenmodel.

SWAP-model geschikter voor indexconcentratie

Tot op heden gebruikt het RIVM voor de berekening van de indexconcentraties het zelf ontwikkelde model ONZAT, een model dat berekent in welke mate stoffen door de bodem naar en in het bovenste grondwater worden getransporteerd. ONZAT wordt echter niet meer verder ontwikkeld of onderhouden. Hierdoor ontstond de behoefte bij het RIVM om over te stappen op een algemener gebruikt model. Na vergelijking van enkele modellen komt het zogeheten SWAP-model (Soil, Water, Atmosphere and Plant) als het meest geschikt naar voren als vervanging voor ONZAT. De migratie van het ONZAT-model naar SWAP blijkt geen significant effect te hebben op de weerscorrectie van de nitraatmetingen, ondanks de verschillen tussen de modellen.

Trefwoorden: nitraat, bovenste grondwater, weerscorrectie, modelvergelijking, gevoeligheidsanalyse

Abstract

Exploration of alternative models to calculate weather effects on nitrate concentration.

Comparison of the models ONZAT, HYDRUS-1D and SWAP

The Minerals Policy Monitoring Programme (LMM) has measured the nitrate concentrations in the upper groundwater since 1992 in order to show the effects of the national minerals policies on concentrations. However, these nitrate concentrations are also subject to weather influences, especially the precipitation excess in previous years. After a couple of years with high precipitation excess the measured nitrate concentration usually is lower than normal due to dilution.

RIVM accounts for these weather influences on measurement so that policy effects on trends in water quality become more distinct. This is done by using a hydrological process model.

SWAP model more suitable for index concentration

RIVM still uses the ONZAT model, developed by RIVM, for the calculations of the index concentration. However, ONZAT, a model to calculate transport of substances through the soil towards and through groundwater, is no longer updated or maintained. Therefore, RIVM considered it desirable to select and use another, more generally applied process model for the computation of index concentrations. The model comparisons showed that SWAP (Soil, Water, Atmosphere and Plant) was the most suitable successor for ONZAT to calculate index concentrations. The migration of the ONZAT model to SWAP does not have a significant effect on the weather corrections of the nitrate measurements, notwithstanding the differences between these models.

Key words: nitrate, shallow groundwater, weather correction, model comparison, sensitivity analysis

Inhoud

Samenvatting 9

1 Inleiding – 13

- 1.1 Aanleiding voor het onderzoek – 13
- 1.2 Doel van het onderzoek – 14
- 1.3 Opzet van het onderzoek – 14
- 1.4 Leeswijzer – 15

2 Conceptuele verschillen tussen ONZAT, HYDRUS-1D en SWAP – 17

- 2.1 Inleiding – 17
- 2.2 Neerslag, interceptie en potentiële evapotranspiratie – 17
 - 2.2.1 ONZAT – 17
 - 2.2.2 HYDRUS-1D – 17
 - 2.2.3 SWAP – 18
- 2.3 Berekening wortelgroei en actuele transpiratie – 19
 - 2.3.1 ONZAT – 20
 - 2.3.2 HYDRUS-1D – 21
 - 2.3.3 SWAP – 22
- 2.4 Hydraulische eigenschappen van de bodem – 22
 - 2.4.1 ONZAT – 23
 - 2.4.2 HYDRUS-1D – 23
 - 2.4.3 SWAP – 23
- 2.5 Randvoorwaarden waterstroming – 24
 - 2.5.1 Bovenrandvoorwaarden stroming – 24
 - 2.5.2 Onderrandvoorwaarden stroming – 25
- 2.6 Transport – 28
 - 2.6.1 Diffusie en dispersie – 28
 - 2.6.2 Randvoorwaarden – 29

3 Indexconcentratieberekeningen met ONZAT – 33

- 3.1 Methode – 33
 - 3.1.1 Inleiding – 33
 - 3.1.2 Neerslag, interceptie en potentiële evapotranspiratie – 33
 - 3.1.3 Berekening wortelgroei en actuele transpiratie – 34
 - 3.1.4 Hydraulische eigenschappen van de bodem – 35
 - 3.1.5 Randvoorwaarden waterstroming – 35
 - 3.1.6 Transport – 36
 - 3.1.7 Postprocessing van modelresultaten – 37
- 3.2 Resultaten – 37

4 Reproductie van de indexconcentratieberekeningen met HYDRUS – 41

- 4.1 Methode – 41
 - 4.1.1 Neerslag, interceptie en potentiële evapotranspiratie – 41
 - 4.1.2 Berekening wortelgroei en actuele transpiratie – 42
 - 4.1.3 Hydraulische eigenschappen van de bodem – 42
 - 4.1.4 Randvoorwaarden waterstroming – 43
 - 4.1.5 Transport – 44
 - 4.1.6 Postprocessing van modelresultaten – 44
- 4.2 Resultaten – 44

5 Reproductie van de indexconcentratieberekeningen met SWAP – 49

5.1	Methode	49
5.1.1	Neerslag, interceptie en potentiële evapotranspiratie	49
5.1.2	Berekening wortelgroei en actuele transpiratie	50
5.1.3	Hydraulische en transporteigenschappen van de bodem	50
5.1.4	Randvoorwaarden waterstroming	50
5.1.5	Transport	50
5.1.6	Postprocessing van modelresultaten	51
5.2	Resultaten	51
6	Modelkeuze, migratie en gevoeligheidsanalyse	55
6.1	Keuze voor vervanger voor ONZAT-odel	55
6.2	Migratie naar SWAP	55
6.3	Methode	56
6.4	Resultaten	59
6.5	Definitief migratiemodel	64
6.6	Nadere gevoeligheidsanalyse op het definitieve migratiemodel	65
6.6.1	Verdampingsgerelateerde modelparameters	65
6.6.2	Enkele overige parameters	67
6.6.3	Invloed van keuze voor het gewas	67
6.6.4	Invloed van keuze voor het bodemtype	68
7	Conclusies	71
	Referenties	73
	Bijlage 1 Invoer van het ONZAT-model	75
	Bijlage 2 Invoer van het HYDRUS-1D-model	79
	Bijlage 3 SWAP-invoer	91
	Bijlage 4 Definitieve SWAP-resultaten	103

Samenvatting

In het kader van het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM) wordt op landbouwbedrijven de kwaliteit van het bovenste grondwater gemeten. Weerseffecten beïnvloeden de trend in grondwaterkwaliteit die het LMM beoogt in beeld te brengen. Uit beleidsoogpunt is het echter belangrijk om in korte tijd een terugkoppeling te krijgen van het effect van gevoerd beleid, zodat het mestbeleid indien nodig ook zo snel mogelijk bijgestuurd kan worden. Het is daarom belangrijk om de invloed van weerseffecten op de trend in de grondwaterkwaliteit te kwantificeren. Voor dit doel voert het RIVM modelberekeningen uit. Met een hydrologisch-procesmodel wordt voor alle metingen een relatieve verdunningsfactor (een zogenaamde indexconcentratie) berekend. Met behulp van variantie- en regressieanalyse wordt vervolgens bepaald welk deel van de variatie in grondwaterkwaliteit aan het weer kan worden toegeschreven en welk deel aan andere factoren, zoals wijzigingen in de groep van deelnemende bedrijven.

De modelberekeningen worden tot op heden uitgevoerd met het simulatiemodel ONZAT. Buiten het RIVM wordt ONZAT echter nauwelijks toegepast en bovendien wordt ONZAT niet meer doorontwikkeld. De wens is daarom ontstaan om over te stappen op meer gangbare software; in eerste instantie voor de berekening van de indexconcentraties, maar ook voor andere toepassingen waar in de toekomst behoefte aan kan zijn.

Met dit onderzoek werden de volgende doelen beoogd:

- het vaststellen welk modelinstrument het meest geschikt is voor de indexconcentratieberekeningen;
- een revisie van de parametrisatie van de indexconcentratieberekeningen en gevoeligheidsanalyse op de modelinstellingen;
- documentatie van de modelinstellingen;
- de daadwerkelijke (technische) migratie van de indexberekeningen van ONZAT naar het nieuwe modelinstrument in een testomgeving.

HYDRUS-1D en SWAP worden in Nederland het meest gebruikt voor eendimensionaal onverzadigd/verzadigd water- en stoftransport door de bovenste meters van de bodem. Het onderzoek heeft zich daarom toegespitst op deze twee potentiële kandidaten voor de vervanging van ONZAT. Via bestudering van de modelconcepten en door het uitvoeren van vergelijkende modelberekeningen is geëvalueerd naar welk procesmodel de migratie van de huidige opzet van indexconcentratieberekeningen het vloeidendst kan worden uitgevoerd. Bij de modelberekeningen is getracht zo dicht mogelijk bij de oorspronkelijke ONZAT-modellering te blijven.

HYDRUS-1D is niet geschikt gebleken als vervanger voor ONZAT. HYDRUS-1D geeft nagenoeg dezelfde resultaten als ONZAT als er gerekend wordt met diepere grondwaterstanden (diepe onderwateringsbasis). Voor ondiepere grondwaterstanden (ondiepe onderwateringsbasis) kan het met ONZAT gemodelleerde grondwaterstandsverloop echter niet met HYDRUS-1D gereproduceerd worden. Bij een ontwateringsbasis van bijvoorbeeld 50 cm -mv werden geen resultaten verkregen met HYDRUS-1D (geen convergentie bereikt).

Bij HYDRUS-1D zakken de grondwaterstanden in de zomer dieper weg dan bij ONZAT. De oorzaak voor dit verschil is dat in HYDRUS-1D de waterstroming niet op dezelfde wijze gedefinieerd kan worden als in ONZAT. Het is niet mogelijk om in HYDRUS-1D opwaartse kwelfluxen vanuit de diepere grondwaterlagen te simuleren. In de ONZAT-berekeningen treedt wel opwaartse kwel op bij een ondiepere ontwateringsbasis. Bij de HYDRUS-1D-berekeningen neemt de flux over de onderrand af tot nul als de grondwaterstand onder het drainageniveau is weggezakt, terwijl in ONZAT in deze perioden opwaartse aanvoer van water plaatsvindt, waardoor de grondwaterstand minder ver wegzakt dan in de HYDRUS-1D-berekeningen.

Met SWAP kunnen de ONZAT-resultaten van de indexconcentratieberekeningen goed gereproduceerd worden. Daarom is SWAP gekozen als vervanger van ONZAT voor de berekening van indexconcentraties.

Om de indexconcentratieberekeningen op eenzelfde manier uit te kunnen voeren als in ONZAT zijn wel enkele aanpassingen noodzakelijk aan de broncode van SWAP. De eerste aanpassing betreft het mogelijk maken van het toedienen van een constante *dosis* stof aan maaiveld (bovenrandvoorwaarde). De originele SWAP-versie (versie 3.2) kent alleen de mogelijkheid een constante *concentratie* op te geven. De tweede aanpassing is het mogelijk maken dat de vanuit de opgegeven dosis berekende stofconcentraties aan de *bruto* neerslag (vóór interceptieverdamping) is gerelateerd. In de originele SWAP-versie is de opgegeven concentraties (bovenrandvoorwaarde) gerelateerd aan de netto neerslag (dus na interceptieverdamping). Handhaven van dat concept zou leiden tot verlies van stof, omdat de stofconcentratie in het neerslagwater dan niet wordt aangepast voor interceptieverdamping. Voor het behoud van massa is in de aangepaste broncode bovendien geregeld dat de hoeveelheid stof die zich in het interceptiewater bevindt, wordt opgeteld bij de dosis van de volgende tijdsstap.

Voor de vergelijkende berekeningen tussen SWAP en ONZAT is zo veel mogelijk vastgehouden aan de concepten en parametrisatie van de ONZAT-berekeningen. Voor de definitieve overstap (migratie) van de ONZAT naar SWAP voor de indexberekeningen is het beter om te kiezen voor de concepten en parametrisatie zoals die in STONE worden gebruikt. Het idee hierachter is dat deze op actuelere informatie zijn gebaseerd. De verschillen met de ONZAT-concepten en -parametrisatie zijn op bepaalde punten aanzienlijk, zoals de lengte van het groeiseizoen van gras. Uit de berekening blijkt dat de volledige migratie van ONZAT naar SWAP een aanzienlijk effect heeft op de berekende indexconcentraties.

De berekende indexconcentraties dienen als invoer voor een regressiemodel dat de gecorrigeerde nitraatconcentraties berekent. Het is daarom belangrijk te bekijken wat het effect van de migratie is op de genormaliseerde indexconcentratie, waarmee hier bedoeld wordt de indexconcentratie gedeeld door de gemiddelde indexconcentratie van de reeks. Het blijkt dat het effect van de migratie naar SWAP op de genormaliseerde indexconcentraties zeer klein is. Uit de regressieanalyse blijkt dan ook dat het effect van de migratie op de weerscorrectie van de nitraatmetingen uit het LMM niet significant is.

Een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op het uiteindelijke SWAP-model laat zien dat de genormaliseerde indexconcentraties niet gevoelig zijn voor realistische aanpassingen aan enkele individuele verdampingsgerelateerde modelparameters. Als er echter een geheel ander gewas gemodelleerd wordt, kan het effect op de genormaliseerde indexconcentraties wel groot zijn. De voor grasland berekende (genormaliseerde) indexconcentraties verschillen sterk met de resultaten voor

maïs, aardappelen en graan. De resultaten voor maïs, aardappelen en graan verschillen onderling veel minder sterk. Bij verdere differentiatie van de concentratie-indexberekeningen naar landgebruik is het daarom mogelijk dat volstaan kan worden met een onderscheid tussen grasland en bouwland.

De modelberekeningen zijn uitgevoerd voor een zandgrond. Het rekenen met een andere bodemsoort kan bij diepere ontwateringsbases eveneens een groot effect hebben op de genormaliseerde indexconcentraties. Een differentiatie naar bodemsoort zou daarom mogelijk de weerscorrecties kunnen verbeteren. Vervolgonderzoek moet hierover uitsluitsel geven.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding voor het onderzoek

In het kader van het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid (LMM) wordt op landbouwbedrijven de kwaliteit van het bovenste grondwater gemeten. De invloed van bemesting op de kwaliteit van het bovenste grondwater wordt, behalve door factoren als mestgift, bodemtype en (geo)hydrologische situatie, sterk beïnvloed door weereffecten zoals neerslag en evapotranspiratie. In natte jaren wordt de nutriëntenconcentratie in het grondwater sterker verdund dan in droge jaren. Deze weereffecten beïnvloeden de trend in grondwaterkwaliteit die het LMM beoogt in beeld te brengen (zie bijvoorbeeld Boumans et al., 1997). Veranderingen in grondwaterkwaliteit die het resultaat zijn van mestbeleid zijn daardoor lastig zichtbaar te maken op de korte termijn. Uit beleidsoogpunt is het echter belangrijk om een zo snel mogelijke terugkoppeling te krijgen van het effect van gevoerd beleid, zodat het mestbeleid indien nodig ook zo snel mogelijk bijgestuurd kan worden. Het is daarom belangrijk om de invloed van weereffecten op de trend in grondwaterkwaliteit te verminderen. Voor dit doel voert het RIVM modelberekeningen uit.

In een eendimensionaal model wordt het instationaire transport gesimuleerd van een zich conservatief gedragende stof. Deze stof wordt elke decade (10 dagen) in een constante dosis aan het neerslagwater toegevoegd. Hoe meer neerslag er in een bepaald tijdsinterval valt, hoe sterker de stof dus verdund wordt en hoe lager de concentratie in het grondwater. De doelvariabele van deze berekeningen is de *indexconcentratie*: de tijdsafhankelijke, gemiddelde concentratie van de conservatieve stof in de bovenste meter van het grondwater (het in het LMM bemonsterde deel van het grondwater). Dit modelresultaat geeft de variatie in de stofconcentratie zoals deze wordt beïnvloed door alleen de variatie in het weer. In een laatste stap wordt op de grondwaterkwaliteitsmetingen uit het LMM een gecombineerde variantie-/regressieanalyse uitgevoerd met de variatie in de indexconcentratie als een van de verklarende factoren. De andere meegenomen factoren zijn grondwaterstand en bemonsteringslocatie. Het deel van de variatie in de grondwaterkwaliteit dat niet verklaard kan worden door deze drie factoren moet aan andere factoren worden toegeschreven. Indien er geen alternatieve verklarende fysisch-chemische omgevingsfactoren zijn, kan het onverklaarde deel van de variatie in principe worden toegeschreven aan het mestbeleid. Een gedetailleerde omschrijving van deze methode wordt gegeven door Boumans en Fraters (2011) en door Hendriks en Boumans (2002).

De modelberekeningen worden tot op heden uitgevoerd met het simulatiemodel ONZAT (Van Drecht, 1985; OECD, 1989). Buiten het RIVM wordt ONZAT echter nauwelijks toegepast en bovendien wordt ONZAT niet meer doorontwikkeld. De wens is daarom ontstaan om over te stappen op meer gangbare software; in eerste instantie voor de berekening van de indexconcentraties, maar ook voor andere toepassingen waar in de toekomst behoefte aan kan zijn. Een overstap naar meer algemeen gebruikte software heeft de volgende voordelen:

- Er kan geprofiteerd worden van de nieuwste ontwikkelingen (zoals nieuwe in de software geïmplementeerde kennis, nieuwe applicaties, nieuwe parametrisaties, updates).
- Er kan geprofiteerd worden van de ondersteuning die voor deze software geboden wordt.

- Er kan geprofiteerd worden van een grote gebruikersgemeenschap, zodat het bijvoorbeeld gemakkelijker wordt externen in te zetten in het modelonderzoek.
- Het RIVM kan gemakkelijker deelnemen aan discussies over hydrologische modellering, omdat het de tools kent waar ook de gesprekspartners (opdrachtnemers, projectpartners etc.) mee werken en kennis van hebben.

1.2 Doel van het onderzoek

Met dit onderzoek worden de volgende doelen beoogd:

- het vaststellen welk modelinstrument het meest geschikt is voor de indexconcentratieberekeningen;
- een revisie van de parametrisatie van de indexconcentratieberekeningen en gevoeligheidsanalyse op de modelinstellingen;
- een goede documentatie van de modelinstellingen;
- de daadwerkelijke (technische) migratie van de indexberekeningen van ONZAT naar het nieuwe modelinstrument.

1.3 Opzet van het onderzoek

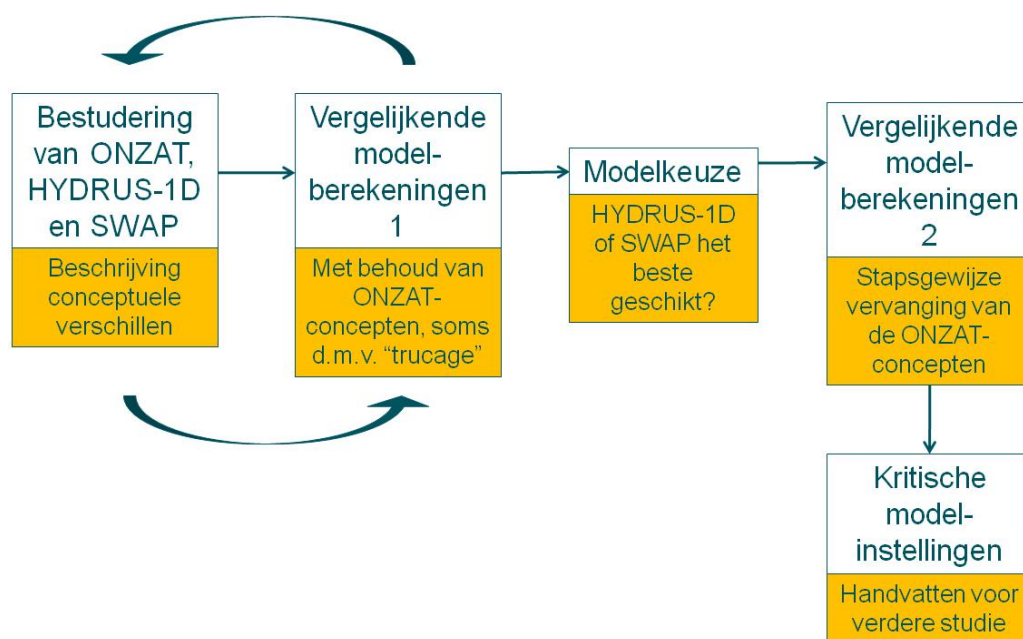
Voorafgaand aan het onderzoek was al duidelijk welke modelinstrumentaria in Nederland het meest gebruikt worden voor eendimensionaal verzadigd/onverzadigd water- en stoftransport door de bovenste meters van de bodem: dit zijn HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2005, 1998) en SWAP (Kroes et al., 2008). Deze twee modellen zijn dan ook de in dit onderzoek onderzochte kandidaten voor de vervanging van ONZAT. HYDRUS-1D is en wordt ontwikkeld door de University of California Riverside en vindt vooral toepassing in de universitaire en onderzoekswereld. SWAP is en wordt ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Researchcentrum en is sterker dan HYDRUS-1D gericht op de praktijk van het waterbeheer.

Om een gefundeerde keuze te maken tussen HYDRUS-1D en SWAP voor vervanging van ONZAT worden beide modellen ingezet voor het berekenen van indexconcentraties. Voor dit doel worden, na kennis genomen te hebben van de theorie en werking van HYDRUS-1D en SWAP, de indexconcentratieberekeningen van één weersdistrict met deze modellen herhaald. Met de aldus opgebouwde gebruikerservaring en op basis van de verkregen modelresultaten wordt vervolgens een keuze gemaakt.

Bij deze modelvergelijking worden de ONZAT-concepten en de ONZAT-parametrisatie zoveel mogelijk gehandhaafd. Dit is gedaan, omdat anders eventuele verschillen tussen de modelresultaten van de modellen het resultaat kunnen zijn van een veelvoud van verschillen in de modelconcepten, waardoor deze niet meer te herleiden zijn naar de individuele oorzaken en daarmee onverklaarbaar worden. Voor een aantal concepten (bijvoorbeeld de concepten die verschillen tussen ONZAT en de twee andere modellen, en die niet via de parametrisatie ervan aan elkaar gelijk te maken zijn) betekent dit dat trucs toegepast moeten worden om toch zoveel mogelijk dezelfde waterbalans te behouden. Zo zal bijvoorbeeld de door ONZAT berekende interceptie nagebootst worden in HYDRUS-1D en SWAP door deze interceptie af te trekken van de neerslag en de interceptieverdamping af te trekken van de potentiële evapotranspiratie. Op deze manier wordt per stressperiode dezelfde hoeveelheid netto neerslag en potentiële evapotranspiratie verkregen, iets wat met het HYDRUS-1D- en SWAP-concept voor interceptie niet gelukt zou zijn.

Nadat het meest geschikte modelinstrument is bepaald, worden de gehandhaafde ONZAT-concepten sequentieel vervangen door de concepten van het nieuwe model. Daarmee wordt informatie verkregen over de mate waarin de nieuwe concepten de indexconcentratie beïnvloeden. Indien een (ten opzichte van ONZAT) veranderd modelconcept leidt tot sterke veranderingen in het patroon van indexconcentraties, kan dat aanleiding zijn om aanvullend onderzoek te verrichten naar deze concepten en ook naar de invloed ervan op de correcties van de grondwaterkwaliteitsmetingen. Indien een veranderd concept nauwelijks van invloed is op de indexconcentraties, kan geconcludeerd worden dat een nadere gevoeligheidsanalyse van dit concept niet nodig is. Hetzelfde geldt voor modelconcepten die in SWAP en HYDRUS-1D hetzelfde zijn als in ONZAT en waarvoor sinds de ontwikkeling van ONZAT dus blijkbaar geen succesvolle alternatieven ontwikkeld zijn; de huidige context is niet de plaats om aan deze concepten te tornen.

Een illustratie van de gevolgde werkwijze wordt gegeven in Figuur 1-1.



Figuur 1-1 Schematische weergave van de voor het in dit rapport beschreven onderzoek gevolgde werkwijze.

1.4 Leeswijzer

Allereerst zullen in hoofdstuk 2 de conceptuele verschillen tussen ONZAT, HYDRUS-1D en SWAP besproken worden, voor zover deze relevant zijn voor de berekening van indexconcentraties. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de huidige praktijk van het berekenen van indexconcentraties met ONZAT toegelicht. Daarna wordt in hoofdstuk 4 en 5 de (poging tot) reproductie van de indexconcentratieberekeningen met respectievelijk HYDRUS-1D en SWAP besproken. In hoofdstuk 6 wordt de migratie naar het nieuwe modelinstrument besproken, inclusief het effect van enkele concept- en parametrisatiewijzigingen die hiervan het gevolg zijn, en wordt een gevoeligheidsanalyse op een aantal sleutelparameters uitgevoerd. Hoofdstuk 7 geeft tenslotte de conclusies van de huidige studie.

2 Conceptuele verschillen tussen ONZAT, HYDRUS-1D en SWAP

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste conceptuele verschillen tussen ONZAT, HYDRUS-1D en SWAP besproken, voor zover deze verschillen relevant zouden kunnen zijn voor de berekening van indexconcentraties ten behoeve van weerscorrecties op gemeten nitraatconcentraties.

2.2 Neerslag, interceptie en potentiële evapotranspiratie

2.2.1 ONZAT

Met interceptie wordt het (tijdelijk) opvangen van een deel van de neerslag door (bijvoorbeeld het bladerdek van) het gewas bedoeld waardoor die neerslag niet (direct) het bodemoppervlak bereikt.

Interceptie wordt in ONZAT simpelweg gemodelleerd als een reservoir met een bepaalde maximale berging, dat gevuld wordt door middel van neerslag en waaruit water verdwijnt door interceptieverdamping. Indien de maximale berging wordt overschreden, vindt een 'overstort' plaats van het interceptiereservoir naar het bodemoppervlak. Het deel van de neerslag dat het bodemoppervlak bereikt en dus niet verdampt vanaf het gewasoppervlak wordt 'netto neerslag' genoemd.

In ONZAT wordt aangenomen dat als er water aanwezig is op het bladoppervlak (het interceptiereservoir), de potentiële transpiratie eerst met dit water wordt voorzien, en de plantenwortels pas beginnen met transpiratie als dit water volledig verdampt is.

De potentiële transpiratie en de potentiële evaporatie dienen in ONZAT te worden ingevoerd. ONZAT voert intern geen uitsplitsingen uit van referentie-evapotranspiraties naar potentiële transpiratie en de potentiële evaporatie. Ook worden geen correcties uitgevoerd voor het te simuleren gewas, graad van bodembedekking etcetera. Deze bewerkingen dienen derhalve in een preprocessor geregeld te worden.

2.2.2 HYDRUS-1D

In HYDRUS wordt de interceptie per tijdstap bepaald volgens de vergelijking voorgesteld door Von Hoyningen-Hüne (1983):

$$P_i = a \cdot LAI \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{SCF \cdot P_{bruto}}{a \cdot LAI}} \right) \quad \text{Vergelijking 2-1}$$

waarbij bij toenemende neerslag de hoeveelheid interceptiewater asymptotisch een bepaalde maximale waarde bereikt. Dit verschilt dus met ONZAT, waarin gebruik gemaakt wordt van een lineair interceptiereservoir. In Vergelijking 2-1 geldt:

P_i = de geïntercepteerde hoeveelheid precipitatie ($L T^{-1}$);

a = een empirische coëfficiënt ($L T^{-1}$);

P_{bruto} = de bruto precipitatie ($L T^{-1}$);

SCF = Soil Cover Fraction (-): de fractie van het grondoppervlak die bedekt wordt door het gewas, zoals gezien vanaf recht boven het gewas.

Indien de LAI bekend is, wordt deze berekend via Vergelijking 2-2.

Indien de hoeveelheid interceptiewater groter is dan de potentiële transpiratie, wordt het verschil overgebracht naar de volgende tijdstap (schriftelijke mededeling Šimůnek, 2009, HYDRUS-1D Forum op www.pc-progress.com).

In HYDRUS kan interceptie alleen meegenomen worden indien Penman-Monteith of Hargreaves aangeroepen wordt om de potentiële evapotranspiratie te berekenen (zie hieronder).

HYDRUS biedt diverse verschillende mogelijkheden voor de invoer van de potentiële evapotranspiratie:

- a. Berekening van de potentiële evapotranspiratie E_{p0} ($L T^{-1}$) op basis van tijdsafhankelijke meteorologische en gewasinformatie. Deze berekening kan uitgevoerd worden met de Penman-Monteith- of de Hargreavesvergelijking, of door de energiebalans voor het oppervlak op te lossen (door middel van de wet van Beer, zie Ritchie (1972), zoals geciteerd door Šimůnek et al. (2005)). De potentiële evapotranspiratie wordt vervolgens gescheiden in potentiële transpiratie en potentiële evaporatie op basis van een ingevoerde of intern berekende tijdsafhankelijke LAI (Leaf Area Index) en een gewasafhankelijke stralingsextinctiecoëfficiënt. Dit gaat volgens de Ritchiefunctie (1972):

$$SCF = 1 - e^{(-r * LAI)} \quad \text{Vergelijking 2-2}$$

$$T_p = E_{p0} * SCF \quad \text{Vergelijking 2-3}$$

$$E_p = E_{p0} * (1 - SCF) \quad \text{Vergelijking 2-4}$$

waarbij

LAI = Leaf Area Index (-); het totale bladoppervlak dat blootstaat aan inkomende lichtenergie, gedeeld door het grondoppervlak;

r = gewasafhankelijke stralingsextinctiecoëfficiënt (-);

E_p = potentiële evaporatie ($L T^{-1}$);

T_p = potentiële transpiratie ($L T^{-1}$);

E_{p0} = potentiële evapotranspiratie ($L T^{-1}$).

- b. Directe invoer van de tijdsafhankelijke potentiële evapotranspiratie, die gescheiden wordt in potentiële transpiratie en potentiële evaporatie op basis van een ingevoerde tijdsafhankelijke LAI (Leaf Area Index) en een gewasafhankelijke stralingsextinctiecoëfficiënt.
- c. Directe invoer van, afzonderlijk, de tijdsafhankelijke potentiële evaporatie en de potentiële transpiratie. Deze optie komt overeen met de werking van ONZAT.

Indien interceptie wordt gesimuleerd, geldt in HYDRUS-1D dat eerst al het aanwezige interceptiewater wordt verdampt alvorens evaporatie vanuit de bodem of transpiratie kan plaatsvinden.

2.2.3

SWAP

SWAP gebruikt voor de berekening van de potentiële evapotranspiratie grotendeels dezelfde concepten als HYDRUS.

SWAP biedt de volgende keuzes om te komen tot de potentiële transpiratie en potentiële evaporatie:

- a. Invoer van meteorologische gegevens en voor het gemodelleerde gewas specifieke parameters (zoals gewashoogte, gewasweerstand, albedo). Hiermee wordt Penman-Monteith geparametriseerd voor de berekening van de potentiële evapotranspiratie *voor het betreffende gewas*. De potentiële evapotranspiratie wordt vervolgens gesplitst in potentiële evaporatie en potentiële transpiratie met behulp van een opgegeven *SCF* of *LAI* in combinatie met een stralingsextinctiecoëfficiënt (zie boven).
- b. Invoer van meteorologische gegevens. Hiermee wordt met Penman-Monteith *voor een referentiegewas* de potentiële referentie-evapotranspiratie berekend. Op deze potentiële referentie-evapotranspiratie wordt vervolgens een gewasfactor toegepast om te komen tot de potentiële evapotranspiratie voor het betreffende gewas. Deze wordt vervolgens gesplitst in potentiële evaporatie en potentiële transpiratie met behulp van een opgegeven *SCF* of *LAI* in combinatie met een stralingsextinctiecoëfficiënt.
- c. Invoer van een potentiële referentie-evapotranspiratie en gewasfactoren (die afhangen van de methode die gebruikt is voor de berekening van de potentiële referentie-evapotranspiratie). De referentie-evapotranspiratie wordt met de gewasfactoren omgerekend tot de voor het betreffende gewas geldige potentiële evapotranspiratie, en deze wordt vervolgens gesplitst in potentiële evaporatie en potentiële transpiratie met behulp van een opgegeven *LAI* en stralingsextinctiecoëfficiënt, of met behulp van de *SCF*.

Net zoals in HYDRUS wordt in SWAP de interceptie berekend met Von Hoyningen-Hüne. Er bestaat echter een opvallend verschil in implementatie van Von Hoyningen-Hüne tussen HYDRUS-1D en SWAP. In SWAP wordt aangenomen dat elke dag al het interceptiewater verdampt (Massop et al., 2005), ongeacht of hiervoor voldoende verdampingsenergie beschikbaar is. In ONZAT en HYDRUS-1D wordt in een volgende tijdstap rekening gehouden met een 'restant interceptiewater'¹; in SWAP bestaat deze term niet¹ en verdwijnt dit restant dus.

Een ander belangrijk verschil tussen SWAP enerzijds en HYDRUS-1D en ONZAT anderzijds is dat bij SWAP de meteorologische randvoorwaarden met een maximale tijdstap van een dag opgegeven kunnen worden. Op dit moment is men bij het RIVM gewoon om deze invoer in de vorm van decadewaarden in ONZAT in te voeren (zie hoofdstuk 3). Dit is ook mogelijk met HYDRUS-1D, maar in geval van SWAP dient deze invoer dus teruggeschaald te worden naar dagwaarden (zie hoofdstuk 5).

2.3 Berekening wortelgroei en actuele transpiratie

Om te komen tot de actuele transpiratie wordt de watervraag, zoals becijferd in de potentiële evapotranspiratie, vergeleken met de waterbeschikbaarheid. Indien voldoende water beschikbaar is, is de actuele transpiratie gelijk aan de potentiële transpiratie.

Waterbeschikbaarheid is echter alleen relevant waar dat water ook daadwerkelijk opgenomen kan worden. Daarom is voor de actuele transpiratie, in tegenstelling tot

¹ Indien in SWAP gerekend wordt met zogenaamde 'gedetailleerde neerslaggegevens' (met tijdstappen < 1 dag), wordt overigens wel met deze restterm rekening gehouden. In dit rapport wordt met SWAP echter steeds met dagwaarden van de neerslag gerekend.

de potentiële evapotranspiratie, tevens de verdeling van de wateropnamecapaciteit over de wortelzone van belang. Deze bestaat uit drie factoren:

1. De (tijdsafhankelijke) dikte van de wortelzone L_R (L).
2. De wateropnameverdelingsfunctie $b(z)$, afhankelijk van de worteldichtheidverdelingsfunctie. De functie $b(z)$ geeft aan welk deel van T_p op diepte z gerealiseerd wordt.

$$S_p(z) = b(z)T_p \quad \text{Vergelijking 2-5}$$

waarin:

$S_p(z)$ = de potentiële wateropnamesnelheid (L/T) op diepte z .

Hier wordt $b(z)$ genormaliseerd verondersteld, zodat geldt:

$$\int_{L_R} b(z) dz = 1 \quad \text{Vergelijking 2-6}$$

zodat:

$$\int_{L_R} b(z)T_p dz = \int_{L_R} S_p(z) dz = T_p \quad \text{Vergelijking 2-7}$$

3. De wateropnamereductiefunctie (kortweg reductiefunctie) R , afhankelijk van de gevoeligheid van het gewas voor water-, droogte- en eventueel osmotische stress. De laatstgenoemde vorm van stress wordt verwaarloosd in de indexconcentratieberekeningen en wordt hier daarom verder buiten beschouwing gelaten. De wateropnamereductie is in dat geval altijd een functie van het watergehalte of de drukhoogte in de bodem: $R = R(h)$.

2.3.1 ONZAT

In ONZAT wordt de dikte van de wortelzone berekend uit de cumulatieve actuele gewastranspiratie vanaf het begin van het groeiseizoen (Van Drecht, 1985):

$$L_R(n) = f \cdot \sum_{i=1}^n E_t(i)$$

$$L_{R,MIN} \leq L_R(n) \leq L_{R,MAX} \quad \text{Vergelijking 2-8}$$

waarbij:

f_g = dimensieloze groeifactor (-);

n = dagnummer, gerekend vanaf het begin van het groeiseizoen ($n_{start} \leq n \leq n_{end}$);

n_{start} = dagnummer van de eerste dag van het groeiseizoen;

n_{end} = dagnummer van de laatste dag van het groeiseizoen;

$L_{R,MIN}$ = minimum dikte van de wortelzone (L);

$L_{R,MAX}$ = maximum dikte van de wortelzone (L).

In ONZAT wordt de wateropnameverdelingsfunctie intern berekend, maar is deze alleen afhankelijk gemaakt van de berekende reductiefactoren. In feite hanteert ONZAT dus geen wateropnameverdelingsfunctie, en geldt:

$$b(z) = \Delta z / L_R \quad \text{voor } 0 < z < L_R. \quad \text{Vergelijking 2-9}$$

De wateropnamereductiefunctie heeft in ONZAT de volgende vorm (Van Drecht, 1985):

$$R(h) = 1 - \left[\frac{h - h_3}{h_4 - h_3} \right]^\alpha$$

$$R(h) = 1 \text{ voor } h > h_3$$

$$R(h) = 0 \text{ voor } h < h_4$$

Vergelijking 2-10

waarbij

h_3 = de drukhoogte waaronder reductie van de wateropname optreedt (het reductiepunt);

h_4 = de drukhoogte waaronder geen wateropname meer plaatsvindt (het verwelkingspunt);

a = een dimensieloze constante ($0 \leq a \leq 1$).

Uit Vergelijking 2-10 blijkt dat in ONZAT geen waterstress gesimuleerd kan worden; boven het reductiepunt is er, ongeacht de drukhoogte, geen sprake meer van reductie. Merk op dat $R(h)$ een lineaire functie is indien $a = 1$. Hier wordt later gebruik van gemaakt.

2.3.2 HYDRUS-1D

In HYDRUS-1D kan de worteldiepte op drie verschillende manieren opgegeven worden:

1. een aparte invoerwaarde van de worteldiepte per stressperiode²;
2. een tabel met waarden voor de worteldiepte op een willekeurig aantal tijdstippen; tussen deze waarden wordt lineair geïnterpoleerd;
3. met behulp van de Verhulst-Pearl-groefunctie, waarin de worteldiepte afhankelijk wordt gesteld van de initiële worteldiepte, de maximale worteldiepte en een groeifactor (T^{-1}).

Wanneer in HYDRUS de worteldiepte berekend wordt met behulp van een wortelgroei-model of gespecificeerd wordt samen met de tijdsafhankelijke randvoorwaarden, wordt het volgende wateropnameverdelingsmodel gehanteerd (Hoffman en van Genuchten, 1983):

$$b(z) = \frac{1,66667}{L_R} \quad \text{als } z > L - 0,2L_R$$

$$b(z) = \frac{2,0883}{L_R} \left(1 - \frac{z_0 - z}{L_R} \right) \quad \text{als } L - L_R > z > L - 0,2L_R$$

$$b(z) = 0 \quad \text{als } z < L - L_R \quad \text{Vergelijking 2-11}$$

waarin:

L = de z-coördinaat van het maaiveld/bodemoppervlak [L], waarbij z afneemt met de diepte;

L_R = de worteldiepte is [L].

² Een stressperiode is een simulatieperiode waarin de randvoorwaarden voor de simulatie gelijk blijven.

De in deze vergelijking voorkomende parameters en coëfficiënten zijn alle hard ingecodeerd in de code van HYDRUS-1D. De gebruiker heeft dus niet de vrijheid om deze functie naar eigen inzicht aan te passen. Ook kunnen, indien de wortelzonedikte tijdsafhankelijk is, geen andere wortelverdelingsmodellen gekozen worden.

HYDRUS-1D kent twee formuleringen van de wateropnamereductiefunctie:

- a. de formulering van Feddes, waarin lineair geïnterpoleerd wordt tussen het verwelkingspunt h_4 , het reductiepunt h_3 , de drukhoogte h_2 waarboven waterstress optreedt, en de drukhoogte h_1 waarboven de waterstress zo ernstig is dat de plant geen vocht meer opneemt. HYDRUS-1D kent hierbij de mogelijkheid om h_3 afhankelijk te maken van de potentiële transpiratiesnelheid.
- b. de S-vormige functie van Van Genuchten:

$$R(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p} \quad \text{Vergelijking 2-12}$$

waarin:

h_{50} = de drukhoogte waarbij $R(h) = 0,5$.

2.3.3

SWAP

Gewasgroei kan in SWAP met een eenvoudig of met een complex gewasmodel gesimuleerd worden. Voor het doel van de berekening van indexconcentraties volstaat het eenvoudige gewasgroeimodel. We zijn immers niet geïnteresseerd in de groei van het gewas zelf (bijvoorbeeld opbrengsten), maar louter in het berekenen van een goede bovenrandvoorwaarde voor bodemvochtbeweging. In het eenvoudige gewasgroeimodel wordt de dikte van de wortelzone uitgedrukt als een functie van het ontwikkelingsstadium (*development stage*, DVS). Er kan voor gekozen worden het DVS lineair in de tijd toe te laten nemen of afhankelijk te maken van de temperatuursom. In het eerste geval is het DVS gelijk aan het aantal dagen vanaf het begin van het groeiseizoen gedeeld door 100. De lengte van de gewascyclus wordt gedefinieerd door de dag van *emergence* en de dag van oogst. Maximaal 36 paren van het DVS en de bijbehorende wortelzonedikte kunnen worden opgegeven. Tussen de opgegeven paren wordt lineair geïnterpoleerd.

Indien het DVS afhankelijk gesteld wordt van de temperatuursom, moeten de temperatuursommen opgegeven worden waarbij de bloei van het gewas begint en waarbij volwassenheid bereikt wordt. Daartussen wordt lineair geïnterpoleerd.

De wateropnameverdeling over de wortelzone dient in SWAP in tabelvorm opgegeven te worden. Voor verschillende waarden van de relatieve wortelzonedikte wordt een waarde voor de relatieve worteldichtheid gegeven.

Als wateropnamereductiefunctie is het concept van Feddes geïmplementeerd (zie vorige paragraaf 2.3.2).

2.4

Hydraulische eigenschappen van de bodem

Voor de oplossing van de stromingsvergelijking heeft het model informatie nodig over de relatie tussen de drukhoogte h enerzijds en het volumetrisch watergehalte θ (-) en de doorlatendheid K ($L T^{-1}$) anderzijds. $\theta(h)$ en $K(h)$ vormen de hydraulische karakteristieken van de bodem. Voor deze relaties zijn vele concepten en modellen ontwikkeld.

2.4.1 ONZAT

In ONZAT is geen specifiek concept voor $\theta(h)$ en $K(h)$ geïmplementeerd; de relaties dienen expliciet in tabelvorm opgegeven te worden, waarna ONZAT tussen de opgegeven combinaties interpoleert.

Hysterese (het fenomeen dat de hydraulische functies een andere vorm hebben wanneer een bodem uitdroogt dan wanneer deze vochtiger wordt) kan in ONZAT niet meegenomen worden. In HYDRUS-1D en in SWAP zijn hiervoor wel formuleringen opgenomen, maar omdat dit proces niet meegenomen wordt in de huidige indexconcentratieberekeningen wordt hier verder niet op ingegaan.

2.4.2 HYDRUS-1D

In HYDRUS-1D kan gekozen worden uit vijf verschillende analytische modellen voor de hydraulische eigenschappen. Deze worden hier niet allemaal afzonderlijk besproken; alleen het model van Van Genuchten - Mualem wordt hier gegeven. Dit is in Nederland het meest gebruikelijke model voor de hydraulische eigenschappen. De hydraulische functies van Van Genuchten - Mualem zien er als volgt uit:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \text{ voor } h < 0 \quad \text{Vergelijking 2-13}$$

$$\theta(h) = \theta_s \text{ voor } h > 0 \quad \text{Vergelijking 2-14}$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left[1 - (1 - S_e^{l/m})^m \right]^2 \right]$$

$$\text{waarbij } m = 1 - 1/n \text{ en } n > 1 \quad \text{Vergelijking 2-15}$$

waarbij:

θ_r = residueel vochtgehalte (-);

θ_s = vochtgehalte bij verzadiging (-);

a = de inverse van de luchtintreewaarde (L^{-1});

K_s = de hydraulische doorlatendheid bij verzadiging ($L T^{-1}$);

S_e = de effectieve verzadiging, = $(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ (-);

l = de turtuositeitsparameter (-);

n = de poriegrootteverdelingsindex (-).

De zes onafhankelijke parameters van Vergelijking 2-13 tot en met Vergelijking 2-15 (namelijk θ_r , θ_s , a , K_s , l en n) staan bekend als de Van Genuchtenparameters. HYDRUS-1D vraagt bij de invoer om deze zes parameters, waarmee het de volledige hydraulische karakteristiek kan construeren. Behalve de verschillende analytische modellen is het in HYDRUS-1D ook mogelijk om, net als in ONZAT, de $\theta(h)$ en $K(h)$ functies in tabelvorm op te geven.

2.4.3 SWAP

De mogelijkheden voor de definitie van de hydraulische eigenschappen in SWAP komen sterk overeen met die van HYDRUS-1D. Het is in SWAP echter niet mogelijk om $\theta(h)$ en $K(h)$ in tabelvorm op te geven.

2.5 Randvoorwaarden waterstroming

In bodemvocht- en grondwatermodellering worden meestal een of meer van onderstaande typen randvoorwaarden gebruikt:

1. Dirichlet (First-type) randvoorwaarden: hiermee wordt de waarde van de afhankelijke variabele van de partiële differentiaalvergelijking op de rand gespecificeerd. In grondwatermodellen is de partiële differentiaalvergelijking de stromings- of transportvergelijking, en is de afhankelijke variabele de stijghoogte respectievelijk de stofconcentratie.
2. Neumann (Second-type) randvoorwaarden: in dit geval wordt de waarde van de eerste afgeleide van de differentiaalvergelijking loodrecht op de modelrand gespecificeerd. In grondwatermodellen komt dit erop neer dat dh/dz of dc/dz wordt opgelegd. Dat uit zich in het feit dat de modelgebruiker gevraagd wordt de flux q over de modelrand op te geven (merk op dat $q = -K dh/dz$).
3. Cauchy (third-type, Mixed) randvoorwaarden: de flux over de modelrand is een functie van de afhankelijke variabele (de stijghoogte) en externe variabelen (vaak constanten), bijvoorbeeld een vaste stijghoogte buiten het modeldomein in combinatie met een bepaalde weerstand.

2.5.1 Bovenrandvoorwaarden stroming

2.5.1.1 ONZAT

De in Paragraaf 2.2 beschreven processen neerslag, interceptie en evaporatie resulteren in een netto neerslag P_{net} die de bodemkolom bereikt. Deze P_{net} vormt de bovenrandvoorwaarde (gespecificeerde flux, dus een Neumannconditie) voor de simulatie van stroming in de bodemkolom. ONZAT kent geen andere bovenrandvoorwaarden voor stroming.

2.5.1.2 HYDRUS-1D

In de handleiding van HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2005) wordt onderscheid gemaakt tussen zogenaamde 'systeemonafhankelijke' en 'systeemafhankelijke' randvoorwaarden. Onder de eerste groep vallen de mogelijkheid van een opgelegde constante flux (Neumann) of een opgelegde constante of variabele stijghoogte (Dirichlet), waarbij HYDRUS-1D tevens de mogelijkheid biedt om in de tijd te variëren in deze randvoorwaarden.

Bij de 'systeemafhankelijke' randvoorwaarden wordt de randvoorwaarde niet a-priori vastgelegd, maar kan deze veranderen afhankelijk van het verloop van de simulatie (dat wil zeggen, de waarden die de state-variabelen aannemen tijdens de simulatie). De twee systeemafhankelijke randvoorwaarden zijn:

1. Atmosferische randvoorwaarden gecombineerd met een eventuele dynamische waterlaag op het maaiveld. Hierbij wordt een Neumannrandvoorwaarde opgelegd waarbij de flux over de bovenrand gelijk is aan de door de atmosferische condities bepaalde flux (het verschil tussen precipitatie en evaporatie, ofwel de netto infiltratiesnelheid), gecorrigeerd met de bergingsverandering van de waterlaag en/of eventueel geïnitieerde oppervlakteafvoer.
2. Atmosferische randvoorwaarden gecombineerd met oppervlakteafvoer. Hierbij wordt geen waterlaag op het maaiveld toegestaan. De flux over de bovenrand wordt in principe bepaald door de netto infiltratie, maar indien de stijghoogte aan het maaiveld groter dan 0 wordt, vindt er oppervlakteafvoer plaats. Bovendien wordt de stijghoogte aan het bodemoppervlak gebonden aan een door het evenwicht tussen bodemvocht en atmosferische waterdamp bepaald

minimum h_A . Als dit minimum wordt onderschreden, wordt h aan het bodemoppervlak vastgesteld op h_A , waarmee de Neumannconditie (opgelegde flux) dus overgaat in een Dirichletconditie (opgelegde stijghoogte).

2.5.1.3 SWAP

In SWAP wordt de bovenrandvoorwaarde altijd gevormd door atmosferische randvoorwaarden in combinatie met een eventuele opbouw van een waterlaag op het bodemoppervlak en eventueel geïnitieerde oppervlakteafvoer, indien de stijghoogte aan het maaiveld een bepaald maximum h_{MAX} overschrijdt. Dit lijkt erg op de eerste systeemafhankelijke randvoorwaarde van HYDRUS-1D. Een verschil is dat SWAP in het geval van een waterlaag op het bodemoppervlak altijd overschakelt op een Dirichletvoorwaarde, terwijl HYDRUS-1D daar een correctie uitvoert op de Neumannconditie.

2.5.2 Onderrandvoorwaarden stroming

2.5.2.1 ONZAT

De waterflux door de onderrand van het modeldomein wordt in ONZAT gemodelleerd met een Cauchyrandvoorwaarde. Er wordt een diepe aquifer aangenomen waaraan in de modelinvoer een constante stijghoogte wordt toegekend. Daarnaast wordt een weerstand opgegeven voor stroming tussen de onderrand en de diepe aquifer. Uit deze weerstand en het stijghoogteverschil tussen onderrand en diepe aquifer kan de flux q_{bot} (L/T) over de onderrand berekend worden:

$$q_{bot} = \frac{\phi_{aquifer} - \phi_n}{c_1} \quad \text{Vergelijking 2-16}$$

waarbij:

$\phi_{aquifer}$ = de stijghoogte in de onderliggende aquifer (L);

ϕ_n = de stijghoogte op de onderrand van het model (L);

c_1 = de weerstand tussen de onderrand van het model en de onderliggende aquifer (T^{-1}).

$\phi_{aquifer}$ wordt in de invoer van ONZAT als een constante opgegeven; deze kan niet in de tijd variëren.

Behalve over de onderrand van het modeldomein en via verdamping kan in ONZAT water het modeldomein ook verlaten (en binnenkomen) via laterale lektermen in de richting van een in de modelinvoer gedefinieerd oppervlaktewaterstelsel. De drainageflux vanuit een bepaalde modellaag in de richting van het oppervlaktewater wordt bepaald door enerzijds het verschil tussen de stijghoogte in de modellaag en het oppervlaktewaterpeil, en anderzijds de drainageweerstand. Er kunnen in ONZAT meerdere oppervlaktewateren gedefinieerd worden, elk met een eigen parametrisatie. Aldus wordt de totale drainageflux in de richting van het oppervlaktewater als volgt berekend:

$$q_{drain,tot} = \sum_{i=1}^{N_{sw}} \sum_{j=1}^{N_{el}} \frac{\phi_j - \max(\phi_{sw,i}, z_{bed,i})}{c_{2,i}} \quad \text{Vergelijking 2-17}$$

waarbij:

$q_{drain,tot}$ = de totale drainageflux in de richting van het oppervlaktewater ($L T^{-1}$);

$z_{bed,i}$ = de diepte van de waterbodem van sloot/oppervlaktewater i (L);

$c_{2,i}$ = de drainageweerstand van sloot/oppervlaktewater i (T);

N_{sw} = het aantal sloten/oppervlaktewateren;

N_{el} = het aantal modellagen;

- φ_j = de stijghoogte in modellaag j (L);
 $\varphi_{sw,i}$ = het waterpeil in sloot/oppervlaktewater i (L).

2.5.2.2 HYDRUS-1D

HYDRUS-1D biedt een aantal verschillende mogelijkheden voor het berekenen van de waterflux over de onderrand van het modeldomein:

1. Constante (opgegeven) drukhoogte op de onderrand van het modeldomein (Dirichlet).
2. Constante (opgegeven) flux over de onderrand van het modeldomein (Neumann).
3. Variabele (opgegeven) drukhoogte op de onderrand van het modeldomein (Dirichlet).
4. Variabele (opgegeven) drukhoogte over de onderrand van het modeldomein (Neumann).
5. Vrije drainage (Neumann): in dit geval wordt aangenomen dat de stijghoogtegradiënt gelijk is aan hoogtegradiënt ($\partial(h+z)/\partial z = 1$). In dat geval is de (absolute waarde van de) flux over de onderrand gelijk aan de hydraulische doorlatendheid (L/T) van het onderste compartiment van het modeldomein.
6. 'Seepage face' (Neumann/Dirichlet): hier wordt verondersteld dat er atmosferische druk heerst onder het modeldomein (zoals bij een lysimeterexperiment). Als de gemodelleerde drukhoogte onderin het model lager is dan de atmosferische druk, vindt er geen uitstroom van water plaats. Als deze drukhoogte hoger is dan de atmosferische druk wordt de flux op de gebruikelijke manier berekend (afhankelijk van drukhoogteverschil en hydraulische doorlatendheid van het onderste compartiment).
7. Horizontale drains (Cauchy): er wordt drainage in de richting van drainbuizen gesimuleerd. In dat geval wordt aangenomen dat de waterflux over de onderrand van het model volledig in de drains terecht komt en wordt deze afhankelijk gesteld van de karakteristieken van het drainagesysteem, zoals drainagediepte, doorlatendheden van de bodem waarin de drains gelegen zijn, de drainafstand en de intreeweerstand. HYDRUS-1D biedt twee analytische beschrijvingen van de relatie tussen de flux over de onderrand en deze karakteristieken: de Hooghoudtvergelijking en de Ernstvergelijking.
8. Tenslotte kan de flux over de onderrand berekend worden met behulp van een functionele relatie tussen deze flux en de actuele grondwaterstand (Cauchy). Deze functie ziet er als volgt uit (Hopmans en Stricker, 1989):

$$q_{bot} = Ae^{B \cdot GWS} \quad \text{Vergelijking 2-18}$$

waarbij:

A en B = empirische coëfficiënt (resp. $(L T^{-1})$ en (T^{-1}));

GWS = de grondwaterstand (L) (in vergelijkingen soms ook aangeduid met GWL).

Merk op dat geen van de in HYDRUS-1D mogelijke onderrandvoorwaarden simulatie van opwaartse stroming (kwel) over de onderrand mogelijk maakt. Hiermee is HYDRUS-1D een typisch uitspoelingsmodel, zonder mogelijkheden om interactie met de omgeving te simuleren. HYDRUS-1D kent dan ook geen mogelijkheden voor het simuleren van laterale lektermen.

2.5.2.3 SWAP

Alle mogelijkheden die HYDRUS-1D heeft voor het toekennen van een onderrandvoorwaarde voor waterstroming, heeft SWAP ook. Daarnaast heeft SWAP nog een aantal extra opties:

- Net zoals in ONZAT kan in SWAP de flux over de onderrand afhankelijk gesteld worden van de stijghoogte in de onderliggende aquifer en de weerstand tussen de onderrand en de aquifer (Cauchy). In SWAP bestaat hiervoor een expliciete en een impliciete aanpak. In de expliciete aanpak wordt het stijghoogteverschil genomen tussen de grondwaterstand zoals berekend in de voorgaande tijdstap en de stijghoogte in de aquifer:

$$q_{bot}(t) = \frac{\phi_{aquifer} - GWS(t-1)}{c_1 + \sum_{i=1}^n c_i} \quad \text{Vergelijking 2-19}$$

waarbij:

t = de tijdstap (-);

c_i = de weerstand over modelcompartiment i (T^{-1}).

Het meenemen van de tweede term in de noemer van Vergelijking 2-19 (de totale weerstand tussen de grondwaterstand en de onderrand van het model) is overigens optioneel in SWAP.

In de impliciete aanpak wordt de flux over de onderrand van het domein berekend aan de hand van de op het moment zelf geldende stijghoogte ($z+h$) op de onderrand. Een impliciete aanpak is bijvoorbeeld noodzakelijk wanneer SWAP gekoppeld wordt aan een regionaal grondwaterstromingsmodel. In de impliciete aanpak kan geen gebruik gemaakt worden van de GWS, omdat in een modelkoppeling met een verzadigdezone-model de grondwaterstand van het tijdstip zelf juist een functie is van q_{bot} . q_{bot} moet dus eerst bekend zijn, alvorens het grondwatermodel de nieuwe grondwaterstand berekent (Van Walsum et al., 2004). De formulering is als volgt (Kroes et al., 2008):

$$q_{bot}(t) = \frac{\phi_{aquifer} - [h(t)+z]_{z=bot}}{c_1} \quad \text{Vergelijking 2-20}$$

In zowel de expliciete als de impliciete methode kan $\phi_{aquifer}$ berekend worden aan de hand van een in de invoer geparametriseerde sinusfunctie, of direct in tabelvorm (datum vs. $\phi_{aquifer}$) ingevoerd worden. Als de impliciete benadering wordt gebruikt voor een koppeling met een grondwatermodel, wordt $\phi_{aquifer}$ uiteraard door dit grondwatermodel aangeleverd.

- De relatie tussen q_{bot} en GWS kan ook in tabelvorm opgegeven worden (Cauchy). In dat geval is q_{bot} het resultaat van een interpolatie tussen opgegeven waarden op basis van de gesimuleerde grondwaterstand.

Net als ONZAT kent SWAP laterale lektermen om drainage in de richting van oppervlaktewater te simuleren. De mogelijkheden in SWAP zijn echter veel uitgebreider dan in ONZAT en het voert te ver om alle opties hier uiteen te zetten. Daarvoor wordt verwezen naar de handleiding van SWAP (Kroes et al., 2008). Het concept dat in SWAP is geïmplementeerd voor de simulatie van drainage in de richting van sloten zonder simulatie van het oppervlaktewater is sterk vergelijkbaar met het drainageconcept van ONZAT. Als in SWAP voor deze drainageoptie wordt gekozen, geeft de gebruiker, net als in ONZAT, per oppervlaktewater de

drainagediepte, het peil en de drainageweerstand op. De berekening van de drainageflux, en vooral de verdeling ervan over de diepte van de modelkolom, verloopt wel iets anders. In SWAP wordt eerst de totale drainageflux per oppervlaktewater berekend aan de hand van de grondwaterstand.

In geval van één enkel drainageniveau en een isotrope bodem (dit is in de huidige praktijk van de indexconcentratieberekeningen het geval) wordt deze flux gelijkmatig verdeeld over de verzadigde modellagen, onder de Dupuit-Forscheimeraanname van horizontale stroming in het grootste gedeelte van het stromingsdomein. Voor andere gevallen is de verdeling van de flux over de diepte gecompliceerder en wordt voor de bijbehorende theorie verwezen naar Kroes et al. (2008).

2.6 Transport

2.6.1 Diffusie en dispersie

Naast convectie, de normale 'meebeweging' van de opgeloste stof met het transportmedium (in dit geval het bodemvocht), wordt het transport ook beïnvloed door diffusie en dispersie. Diffusie is het proces van het minimaliseren van (energetisch ongunstige) concentratiegradiënten, door middel van zogenaamde brownbewegingen van moleculen van een omgeving met hoge concentraties naar een omgeving van lagere concentraties. De flux die hiermee gepaard gaat, wordt doorgaans met de wet van Fick beschreven:

$$J_{dif} = -\theta D_{dif} \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{Vergelijking 2-21}$$

waarin:

J_{dif} = de transportflux ($M L^{-2} T^{-1}$);

D_{dif} = de diffusiecoëfficiënt ($L^2 T^{-1}$);

C = de concentratie opgeloste stof ($M L^{-3}$).

Dispersie is het proces van spreiding dat optreedt, doordat er variatie bestaat in de stroombanen die de moleculen volgen, waarbij die stroombanen ook nog eens variatie vertonen in stroomsnelheid. Ook dispersie wordt doorgaans met een Fickiaanse beschrijving gemodelleerd:

$$J_{dif} = -\theta D_{dis} \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{Vergelijking 2-22}$$

waarin:

D_{dis} = de dispersiecoëfficiënt ($L^2 T^{-1}$).

De dispersiecoëfficiënt D_{dis} wordt in alle modellen intern berekend als

$$D_{dis} = L_{dis} \frac{|q|}{\theta} \quad \text{Vergelijking 2-23}$$

waarbij:

L_{dis} = de dispersielengte (L).

Wat betreft de berekening van de diffusiecoëfficiënt D_{dif} bestaan er echter verschillen tussen ONZAT enerzijds en HYDRUS-1D en SWAP anderzijds. In ONZAT wordt D_{dif} als volgt berekend:

$$D_{dif} = D_w a \theta^b, \quad a > 0, b > 0 \quad \text{Vergelijking 2-24}$$

waarbij:

D_w = de diffusiecoëfficiënt van de stof in vrij water ($L^2 T^{-1}$);
 a en b = turtuositeitsparameters (-).

D_w , a en b zijn in ONZAT invoerparameters. Voor de dispersie dient ook L_{dis} opgegeven te worden.

In HYDRUS-1D en SWAP wordt D_{dif} daarentegen als volgt berekend:

$$D_{dif} = D_w \tau \quad \text{Vergelijking 2-25}$$

waarbij:

τ = de turtuositeitsparameter (-).

In HYDRUS-1D wordt τ berekend volgens ofwel Millington en Quirk:

$$\tau = \frac{\theta^7}{\theta_s^2} \quad \text{Vergelijking 2-26}$$

waarbij:

θ_s = het volumetrisch watergehalte bij verzadiging (ofwel de porositeit) (-).

ofwel volgens Moldrup:

$$\tau = 0.66 \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{\frac{8}{3}} \quad \text{Vergelijking 2-27}$$

Volgens Šimůnek et al. (2005) presteert de eerstgenoemde formulering beter voor zandgronden en de laatste formulering beter in het algemeen.

HYDRUS-1D kent daarnaast nog de mogelijkheid om de turtuositeit te verwaarlozen. SWAP kent alleen de formulering van Millington en Quirk.

In SWAP en HYDRUS-1D dienen derhalve ten behoeve van de berekening van diffusie en dispersie louter D_w en L_{dis} opgegeven te worden. θ_s is al bekend vanuit de opgegeven hydraulische eigenschappen (zie Paragraaf 2.4).

2.6.2 Randvoorwaarden

2.6.2.1 ONZAT

Voor zowel de onderrandvoorwaarde als de bovenrandvoorwaarde voor transport gebruikt ONZAT de waterflux over de modelrand en de concentratie van het inkomende of uitgaande water om de stofflux te berekenen (Cauchyvoorwaarde):

$$-\theta \frac{\partial C}{\partial z} + qC = q_0 C_q \quad \text{als } z = 0 \text{ of } z = L_D \quad \text{Vergelijking 2-28}$$

$$C_q = C_1 \quad \text{als } z = 0 \text{ en } q < 0 \text{ (opwaartse flux over bovenrand)}$$

$$C_q = C_{pre} \quad \text{als } z = 0 \text{ en } q > 0 \text{ (neerwaartse flux over bovenrand)}$$

$$C_q = C_{gw} \quad \text{als } z = L_D \text{ en } q < 0 \text{ (opwaartse flux over onderrand)}$$

$$C_q = C_n \text{ als } z = L_D \text{ en } q < 0 \text{ (neerwaartse flux over onderrand)}$$

waarbij

θ = het volumetrisch vochtgehalte (-);

q_0 = de door de gebruiker opgegeven of door het model zelf berekende waterflux;

over de boven- of onderkant van het modeldomein ($L T^{-1}$);

C_q = de stofconcentratie ($M L^{-3}$) in het water van flux q ;

C_1 = de stofconcentratie ($M L^{-3}$) in het bovenste modelcompartiment;

C_{pre} = de stofconcentratie ($M L^{-3}$) in de netto precipitatie;

C_{gw} = de stofconcentratie ($M L^{-3}$) in het diepere grondwater;

C_n = de stofconcentratie ($M L^{-3}$) in het onderste modelcompartiment.

Dit komt erop neer dat de stofconcentratie in de neerslag en in het diepe grondwater gespecificeerd worden. In ONZAT kan de eerste tijdsafhankelijk opgegeven worden, maar de laatste is een constante invoerwaarde.

2.6.2.2 HYDRUS-1D

In HYDRUS-1D kunnen behalve Cauchyrandvoorwaarden ook Dirichlet- en Neumannrandvoorwaarden gekozen worden. In geval van een Dirichletvoorwaarde wordt de concentratie op de rand vastgelegd:

$$c(z, t) = c_0(z, t) \text{ voor } z = 0 \text{ of } z = L_D \quad \text{Vergelijking 2-29}$$

waarbij:

$c(z, t)$ = de stofconcentratie op diepte z en tijd t ($M L^{-3}$);

$c_0(z, t)$ = de opgelegde stofconcentratie op diepte z en tijd t ($M L^{-3}$);

L_D = de lengte van het modeldomein (L).

In HYDRUS-1D kan c_0 zowel constant als tijdsvariabel opgegeven worden. Omdat in HYDRUS-1D opwaartse stroming over de onderrand niet mogelijk is, hoeft geen waarde voor $c_0 = c_{gw}$ opgegeven te worden.

Voor de onderrand kan ook een zogenaamde 'zero concentration gradient'- of 'vrije drainage'-voorwaarde gekozen worden. De concentratiegradiënt over de onderrand wordt in dat geval op nul gesteld:

$$-\theta \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \text{ voor } z = 0 \text{ of } z = L_D \quad \text{Vergelijking 2-30}$$

Omdat hiermee effectief de waarde van de eerste afgeleide van de transportvergelijking wordt vastgelegd, betreft het hier een Neumannconditie.

2.6.2.3 SWAP

SWAP kent voor het transport over zowel de bovenrand als onderrand van het modeldomein alleen de Cauchyvoorwaarde. Daarbij is een belangrijk verschil met ONZAT en HYDRUS-1D dat de stofconcentratie in de neerslag niet tijdsafhankelijk opgegeven kan worden. Hier wordt later op teruggekomen in Paragraaf 5.1.5. De concentratie in de diepe aquifer kan wel tijdsafhankelijk opgegeven worden, iets wat in HYDRUS-1D ook, maar in ONZAT niet kan.

Een ander belangrijk verschil met ONZAT en HYDRUS-1D is dat de stofconcentraties die opgegeven worden voor de neerslag geacht worden te gelden voor de *netto* neerslag in plaats van de bruto neerslag. Dit houdt dus onder andere in dat

interceptieverdamping niet resulteert in verhoging van de stofconcentraties in het neerslagwater. In ONZAT en HYDRUS-1D is dat wel het geval. Hier wordt in Paragraaf 6.3 op teruggekomen.

3 Indexconcentratieberekeningen met ONZAT

3.1 Methode

3.1.1 Inleiding

Hieronder wordt de parametrisatie van ONZAT ten behoeve van de berekeningen van de indexconcentraties besproken. De parametrisatie is hierbij onderverdeeld in dezelfde categorieën als gehanteerd in hoofdstuk 2. De invoerbestanden van ONZAT zijn gegeven in Bijlage 1.

3.1.2 Neerslag, interceptie en potentiële evapotranspiratie

Voor de bovenrandvoorwaarden van het model wordt gebruik gemaakt van door het KNMI aangeleverde decadewaarden voor neerslag P ($L T^{-1}$) en Makkink (tot 1-4-1987 Penman-openwater-)referentieverdamping E_0 ($L T^{-1}$). Het RIVM maakt voor de berekening van de indexconcentraties onderscheid tussen de vijftien verschillende weersdistricten van het KNMI. Dit onderzoek beperkt zich tot één weersdistrict, omdat de modelvergelijking niet tot afwijkende resultaten zal leiden in andere weersdistricten. Het gebruikte weersdistrict is weersdistrict 1 van het KNMI (kop van Noord-Holland, Texel).

In de ONZAT-berekeningen vormt de (sinds 1-4-1987 via preprocessing vanuit de Makkink verdamping teruggerekende³) Penman-openwater-referentieverdamping E_0 van het KNMI samen met gewasfactoren F_{gewas} (-) de basisinvoer voor de berekening van de potentiële transpiratie T_p ($L T^{-1}$) en de potentiële evaporatie E_p ($L T^{-1}$). De gewasfactoren zijn gepubliceerd in Werkgroep Landbouwkundige Aspecten (1984) en CHO (1987) en geven aan hoe groot de potentiële verdamping is die het gewas kan bereiken ten opzichte van de E_0 . Deze factoren zijn gewoonlijk bepaald in bodemvochtbalansexperimenten, waarbij voldoende water aan het gewas werd toegediend om de potentiële verdamping te bereiken.

Beide variabelen worden in een preprocessor van ONZAT ingelezen en verwerkt. De waarden worden door het KNMI aangeleverd voor elke 1ste, 11de en 21ste van de maand. Voor deze verwerking is nog een aantal andere invoerparameters nodig, die ingelezen worden uit het invoerbestand Bound.par. Deze zijn:

- de reductiefactor F_{red} waarmee het reducerende effect van begroeiing op de evaporatie wordt verdisconteerd (ten opzichte van het open water waarvoor E_0 is gedefinieerd);
- een numerieke waarde voor het gewasstype, gebruikt voor het inlezen van de juiste gewasfactoren F_{gewas} (-) uit invoerbestand Coverfac.dat;
- de maximale interceptiecapaciteit $I_{\text{capr,MAX}}$ (L) van het gewas. Dit kan gezien worden als de maximale hoogte van de waterkolom die op het gewas kan staan, indien het gewas de bodem volledig bedekt.

Vanuit de decadewaarden van E_0 wordt de gemiddelde E_0 per dag berekend. De potentiële transpiratie wordt vervolgens berekend als:

³ In de preprocessor die de weersgegevens van het KNMI voorbereidt, worden de Makkinkwaarden vanaf 1-4-1987 gedeeld door 0,8. Daarbij wordt ervan uitgegaan dat de gewasfactoren voor Penman gedurende het gehele jaar 0,8 bedragen, en die voor Makkink gedurende het gehele jaar 1,0. Voor Penman komt dit overeen met de literatuur; voor Makkink worden echter vanaf de laatste decade van augustus lagere gewasfactoren opgegeven in de literatuur (CHO-TNO 1984), namelijk 0,9. Deling van de Makkinkwaarden door 0,8 zou dan een te hoge Penman-openwater-referentieverdamping opleveren.

$$T_p = E_0 * F_{\text{gewas}}$$

Vergelijking 3-1

De potentiële evaporatie E_p wordt vervolgens berekend als het restant van E_0 na aftrek van T_p , vermenigvuldigd met een begroeiingsafhankelijke reductiefactor:

$$E_p = F_{\text{red}} * (1 - F_{\text{gewas}}) * E_0$$

Vergelijking 3-2

Merk op dat de betekenis van F_{red} vergelijkbaar is met die van SCF in Vergelijking 2-2.

De actuele interceptiecapaciteit I (L) van het regenwater wordt eveneens berekend met F_{gewas} :

$$I_{\text{cap}} = F_{\text{gewas}} * I_{\text{cap},\text{MAX}}$$

Vergelijking 3-3

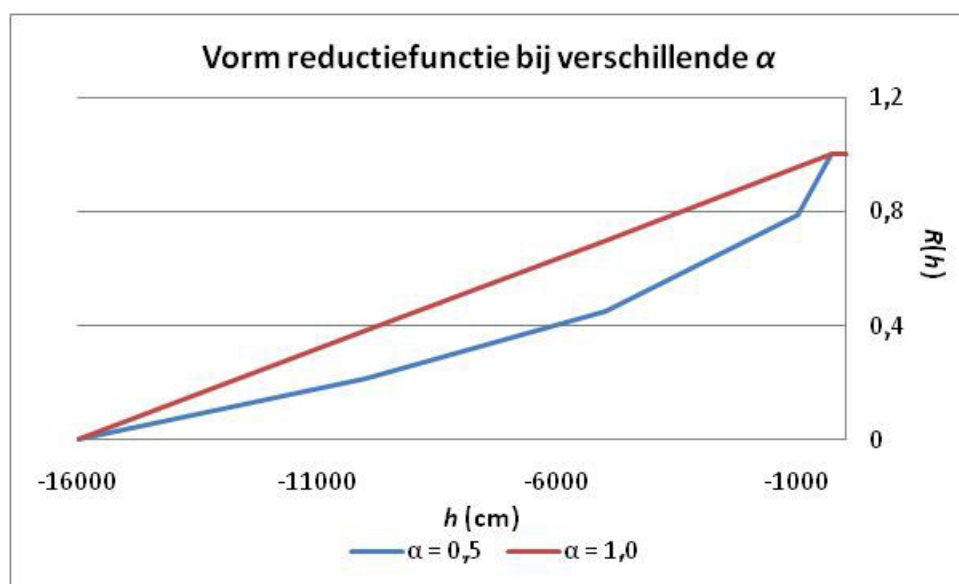
Bij het huidige gebruik van ONZAT voor de berekening van indexconcentraties wordt steeds uitgegaan van het gewastype gras, waarvoor een tijdsafhankelijke F_{gewas} van 0,8 wordt aangenomen (conform CHO, 1987). Bovendien wordt steeds gewerkt met een waarde voor F_{red} van 0, ofwel de bodemverdamping wordt altijd op nul gesteld (er wordt aangenomen dat de grasbedekking directe verdamping vanuit de bodem volledig tegengaat). De waarde van $I_{\text{cap},\text{MAX}}$ wordt steeds gesteld op 0,1 cm. Daarmee heeft I_{cap} dus altijd de waarde van 0,08 cm.

Nadat de preprocessor alle benodigde informatie verzameld heeft en hieruit onder andere T_p , E_p en I_{cap} heeft berekend, worden deze weggeschreven in het formaat van het door ONZAT gebruikte invoerbestand Input.dat.

3.1.3 Berekening wortelgroei en actuele transpiratie

Voor de concentratieberekeningen met ONZAT wordt een minimale dikte $L_{R,\text{MIN}}$ van de wortelzone van 10 cm en een maximale dikte $L_{R,\text{MAX}}$ van 50 cm aangenomen. De groeifactor van de wortelzone f_g wordt op 1,0 gesteld. In de ONZAT-berekeningen loopt de groeicyclus van dag 100 (10 of 11 april) tot en met dag 300 (26 of 27 oktober). Zoals al in Paragraaf 2.3.1 gemeld is, wordt de wortelgroei gedurende dit groeiseizoen berekend uit de cumulatieve actuele gewastranspiratie.

De reductiefunctie $R(h)$ (Vergelijking 2-10) wordt geparametriseerd met reductiepunt $h_3 = -310$ cm, $h_4 = -16.000$ cm en macht $a = 0,5$. Dit levert de reductiefunctie op zoals weergegeven in Figuur 3-1 (blauwe lijn). Voor de huidige studie is echter $a = 1,0$ gekozen, zodat een lineaire reductiefunctie ontstaat (zie Figuur 3-1, rode lijn). Dit is gedaan om in de drie in deze studie gebruikte modellen exact dezelfde reductiefunctie te kunnen hanteren. Het in ONZAT gebruikte niet-lineaire concept voor $R(h)$ is namelijk niet op een andere manier na te bootsen met de concepten in HYDRUS-1D en SWAP.



Figuur 3-1 Illustratie van de vorm van de oorspronkelijke reductiefunctie ($\alpha = 0,5$) en de linearisatie van deze functie door de keuze $\alpha = 1,0$.

3.1.4 Hydraulische eigenschappen van de bodem

De parametrisatie van de hydraulische eigenschappen van de bodem wordt ontleend aan een oude versie van de Staringreeks (Wösten et al., 1987). De Staringreeks bevat voor een groot aantal bodemtypes (combinaties bovengrond en ondergrond) $\theta(h)$ - en $K(h)$ -tabellen en de Van Genuchtenparameters waarmee deze tabellen analytisch beschreven kunnen worden. Voor de berekening van de indexconcentratie wordt op dit moment louter bodemtype B1 (leemarm, zeer fijn tot middelfijn zand, 0-10 procent leem, 0-15 procent organische stof) voor de bovengrond in combinatie met O1 (leemarm, zeer fijn tot middelfijn zand, 1-9 procent leem, 0,1-2 procent organische stof) voor de ondergrond gebruikt. Voor de weerscorrecties van de nitraatmetingen uit het LMM wordt dus geen onderscheid gemaakt in bodemopbouw ter locatie van de metingen. De $\theta(h)$ en $K(h)$ tabellen uit de Staringreeks worden rechtstreeks overgenomen in de invoer van ONZAT (respectievelijk invoerbestanden th_hp.dat en k_hp.dat).

Sinds de bovengenoemde eerste versie van de Staringreeks is deze inmiddels al tweemaal geactualiseerd (Wösten et al., 1994; 2001). Er is voor het huidige onderzoek getracht om de nieuwe Staringreeks (Wösten et al., 2001) te gebruiken. Dit leidt echter tot convergentieproblemen bij ONZAT. De reden hiervoor is voornamelijk niet gevonden, al zou het te maken kunnen hebben met onvoldoende precisie van de definitie van de retentiecure nabij verzadiging. Kleine veranderingen in de vorm van de retentiecure kunnen namelijk grote invloed hebben op de simulatie en zelfs de prestatie van het gebruikte numerieke schema in termen van stabiliteit en convergentie (Vogel et al., 2000). Omdat deze problemen binnen het kader van de voorliggende studie niet oplosbaar zijn, is besloten om de vergelijkingen tussen de modellen nog uit te voeren met de oude Staringreeks en de update naar de nieuwe reeks uit te voeren met het model waarop uiteindelijk overgestapt zal worden voor het berekenen van de indexconcentraties.

3.1.5 Randvoorwaarden waterstroming

Bij de berekening van de indexconcentraties wordt niet alleen onderscheid gemaakt in weersdistricten (variatie in bovenrandvoorwaarde), maar ook in

geohydrologische regimes. De berekeningen worden uitgevoerd voor een serie van tien ontwateringsbases (OB), om zo het dieptetraject waarover de indexconcentraties worden berekend zoveel mogelijk in overeenstemming te kunnen laten zijn met het dieptetraject waarover gemeten wordt (dat wil zeggen, de positie van de bovenste meter van het grondwater tijdens bemonstering). De ontwateringsbases zijn OB = 50 cm beneden maaiveld (-mv), 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 en 500 cm -mv. De gemiddelde grondwaterstanden die met deze ontwateringsbases worden verkregen, verschillen niet veel van de ontwateringsbasis zelf (zie bijvoorbeeld Paragraaf 4.2).

De verschillende ontwateringsbases worden gesimuleerd door te variëren met de parametrisatie van de Cauchy-onderrandvoorwaarde voor stroming. De vergelijking voor het berekenen van de onderrandflux was gegeven in Vergelijking 2-16. Van deze vergelijking worden zowel C_1 als ϕ_{aquifer} gevarieerd. Tabel 3-1 geeft de parametrisatie van C_1 en ϕ_{aquifer} ter verkrijging van de verschillende voor de indexconcentratieberekeningen gehanteerde ontwateringsbases.

Tabel 3-1 Parametrisatie van de Cauchy-onderrandvoorwaarde voor stroming, ter differentiatie van de ONZAT-berekeningen met betrekking tot de ontwateringsbasis.

Ontwateringsbasis (cm -mv)	$C_1 (d^{-1})$	$\phi_{\text{aquifer}} (cm)$
50	50	- 50
100	100	-100
150	150	-150
200	200	-200
250	250	-250
300	300	-300
350	350	-350
400	400	-400
450	450	-450
500	500	-500

In de modelopzet voor de indexconcentratieberekeningen wordt in de huidige praktijk in ONZAT bovendien de aanwezigheid van oppervlaktewater gedefinieerd, in de vorm van een sloot met een bepaalde diepte (20 cm -mv), drainageweerstand (20 d) en initieel waterpeil (20 cm -mv). Dit resulteert in een Cauchyrandvoorwaarde op de zijrand van het model, waarmee laterale drainage wordt gesimuleerd, zodra de stijghoogte in een knooppunt van het model boven het peil in het oppervlaktewater uitkomt (zie ook Vergelijking 2-17).

3.1.6 Transport

De bovenrandvoorwaarde voor transport wordt met ONZAT voorbereid in de preprocessor. Voor de indexconcentratieberekeningen wordt per decade een dosis D (M) tracer van 0,01 gram toegediend aan de in de betreffende decade vallende neerslag (merk op dat, hoewel hier de eenheid van gram wordt gegeven, deze eenheid niet relevant is). De neerslaggegevens worden ingelezen uit dezelfde KNMI-bestanden als de E_0 -gegevens.

Indien er in een bepaalde decade minder dan 0,01 cm regen valt, wordt de hoeveelheid regen P (L) op 0,01 cm gesteld, om te voorkomen dat er zeer hoge concentraties berekend worden⁴:

$$P_{LB} = 0,01 \text{ cm}$$

⁴ Het lijkt overigens netter in dit geval de oorspronkelijke neerslagwaarde P te behouden, de concentratie aan een (boven)grens te onderwerpen en het restant door te schuiven naar een volgende decade, zodat zowel de water- als de stoffenbalans intact blijft.

$$c_P = D / P_{LB} \text{ als } P < P_{LB}$$

Vergelijking 3-4

waarbij:

c_P = de tracerconcentratie in de neerslag ($M L^{-3}$);

D = de tracerdosis ($M L^{-2} T^{-1}$);

P = de neerslagsom ($L T^{-1}$);

P_{LB} = minimale neerslagsom ($L T^{-1}$).

Doordat een neerslagoverschot van 10 mm/decade dichtbij het langjarig gemiddelde neerslagoverschot ligt, resulteert de gehanteerde stofgift in een gemiddelde stofconcentratie in het grondwater van rond de 1.

De indexconcentratieberekeningen met ONZAT worden standaard uitgevoerd met de volgende instellingen van de transportparameters:

- dispersielengte $L_{dis} = 5$ cm (zie Vergelijking 2-23);
- turtuositeitsparameters a en $b = 0,5$ voor zowel de boven- als ondergrond (zie Vergelijking 2-24);
- diffusiecoëfficiënt in vrij water $D_w = 1,0$ $cm^2 d^{-1}$ (zie Vergelijking 2-24);
- de droge bulkdichtheid ρ_b van de bovengrond = $1,2$ $g\ cm^{-3}$, van ondergrond $1,6$ $g\ cm^{-3}$.

3.1.7 Postprocessing van modelresultaten

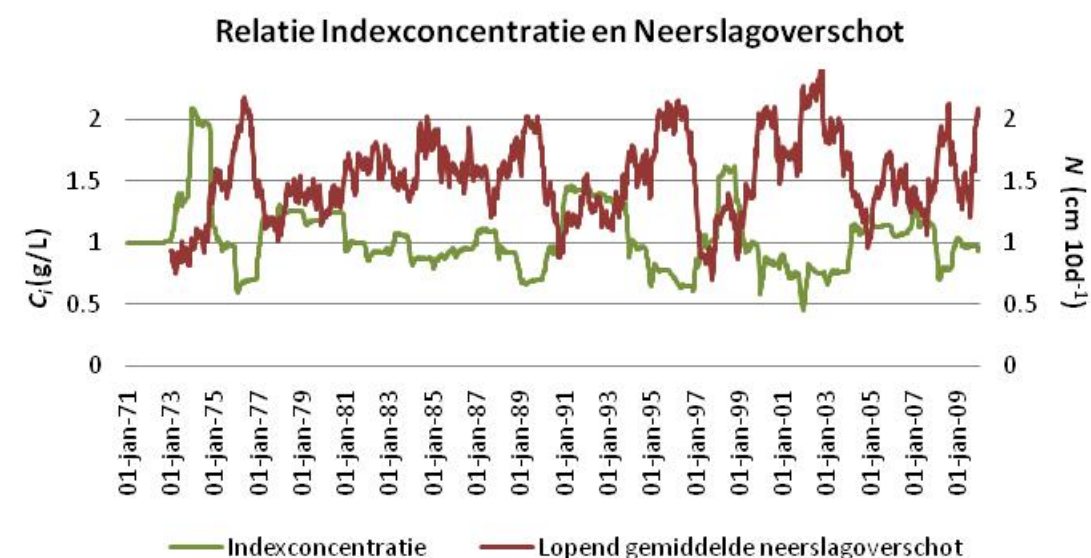
De gemiddelde tracerconcentratie in de bovenste meter van het grondwater in de modelresultaten is de indexconcentratie. Om deze te berekenen wordt door middel van een postprocessor de benodigde informatie (drukhoogtes en concentraties) gelezen uit het algemene ONZAT-uitvoerbestand (Output.dat) en het gewogen gemiddelde berekend van de tracerconcentratie in alle modellagen met een berekende drukhoogte tussen de 0 en 100 cm. Uit de drukhoogtes in Output.dat wordt eveneens door middel van postprocessing de grondwaterstand, die niet door ONZAT als aparte uitvoervariabele wordt weggeschreven, afgeleid.

3.2 Resultaten

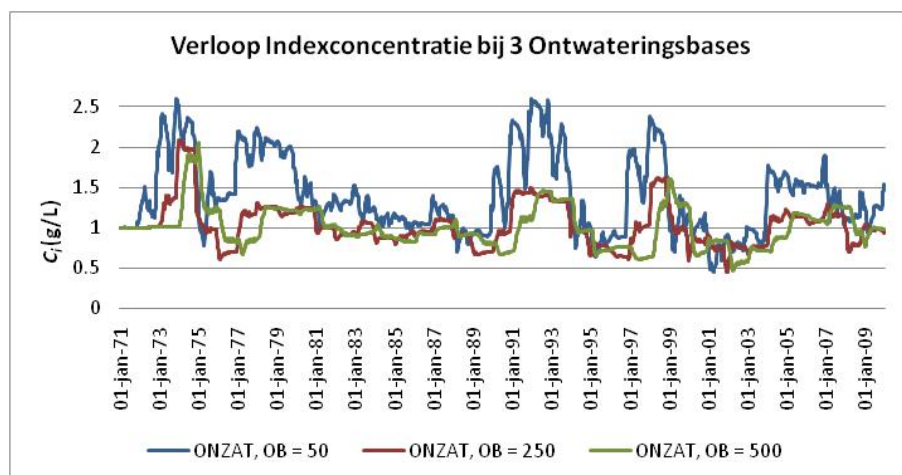
Figuur 3-2 geeft het resultaat van de berekening van de indexconcentratie voor de periode 1971-2009 bij een ontwateringsbasis van 250 cm –mv. Omdat de indexconcentratie de mate van verdunning van een constante tracerdosis in het bovenste grondwater aangeeft, zijn de indexconcentraties lager na een periode van grotere neerslagoverschotten en hoger na een periode van kleinere neerslagoverschotten. Om dit te illustreren is in Figuur 3-2 tevens het lopende gemiddelde van het actuele neerslagoverschot weergegeven, waarbij gemiddeld is over de periode die loopt van twee jaar terug tot één jaar terug. Uit het sterke omgekeerde verband tussen het aldus berekende gemiddelde neerslagoverschot en de indexconcentratie, zoals te zien is in Figuur 3-2, blijkt dat het neerslagoverschot met een vertraging van een tot twee jaar doorwerkt in de stofconcentraties van de bovenste meter van het grondwater (bij deze ontwateringsbasis).

Figuur 3-3 geeft ter illustratie voor drie verschillende ontwateringsbases (100, 250 en 500 cm –mv) de resultaten van ONZAT die zijn verkregen door ONZAT op bovenstaande manier te parametriseren. Duidelijk is te zien dat door invloed van menging door dispersie en diffusie de variatie in meteorologische condities minder sterk doorwerkt bij diepere ontwateringsbases. Ook wordt de vertraging van de doorwerking groter. Een gedetailleerdere uiteenzetting over de reactie van de indexconcentratie op het neerslagoverschot en de invloed van de ontwateringsbasis

en bemonsteringsdiepte en -methode op de indexconcentraties wordt gegeven door Rozemeijer et al. (2003).



Figuur 3-2 Het met ONZAT gemodelleerde verloop van de indexconcentratie en het lopende gemiddelde van het neerslagoverschot, bij een ontwateringsbasis (OB) van 250 cm -mv. Het getoonde lopende gemiddelde van het neerslagoverschot op een bepaalde datum betreft het gemiddelde neerslagoverschot over de periode tussen twee jaar voor die datum en één jaar voor die datum.

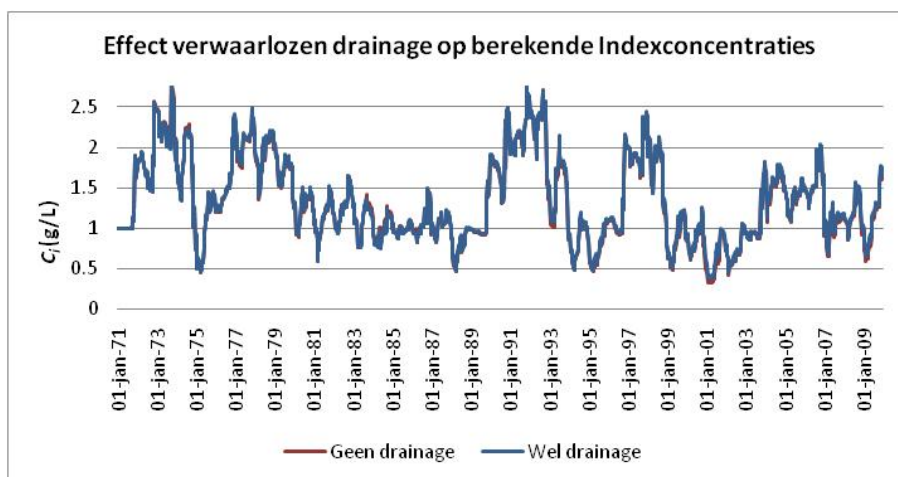


Figuur 3-3 Het door ONZAT berekende verloop van de indexconcentratie bij drie verschillende dieptes van de ontwateringsbasis (OB).

Een vermeldenswaardige observatie bij het bestuderen van de ONZAT-scenario's is dat, hoewel er in de tot op heden voor indexconcentratieberekeningen gehanteerde modelopzet een oppervlaktewater is gedefinieerd waarnaar laterale afstroming kan plaatsvinden, dit oppervlaktewater nauwelijks een functie heeft. Bij de hoogste ontwateringsbasis (OB = 50 cm), waarbij de meeste laterale drainage wordt gegenereerd, bedraagt de cumulatieve laterale drainage over de periode 1997 – 2009 32 cm. Tegenover een cumulatief neerslagoverschot over dezelfde periode van 1748 cm is deze laterale flux praktisch gezien verwaarloosbaar. Het is dan ook geen verrassing dat het wegnemen van de mogelijkheid van laterale drainage in

het ONZAT-model nagenoeg geen effect sorteert op de berekende indexconcentraties (zie Figuur 3-4).

De reden voor het verwaarloosbare effect van de drainage is de hoge drainagebasis (20 cm -mv) zoals die in het gehanteerde model is gespecificeerd. Het model genereert alleen drainage als de grondwaterstand boven de 20 cm -mv komt. Zelfs voor OB = 50 cm -mv zijn dit extremen die niet vaak en slechts gedurende zeer korte perioden optreden.



Figuur 3-4 Indexconcentraties zoals berekend voor OB = 50 cm -mv, voor een scenario met en een scenario zonder drainage.

4 Reproductie van de indexconcentratieberekeningen met HYDRUS

4.1 Methode

Op een met hoofdstuk 3 vergelijkbare manier wordt hier beschreven hoe HYDRUS-1D is geparametriseerd om een model te verkrijgen dat een zo groot mogelijke gelijkennis vertoont met de manier waarop in het ONZAT-model de indexconcentraties worden berekend. De modelinvoer zelf wordt gegeven in Bijlage 2.

4.1.1 *Neerslag, interceptie en potentiële evapotranspiratie*

De neerslag- en verdampingsgegevens voor invoer in HYDRUS-1D zijn, enerzijds voor het gemak en anderzijds ter maximalisatie van de overeenkomst tussen de ONZAT- en HYDRUS-berekeningen, ontleend aan de uitvoer van ONZAT. De uitvoerstep in ONZAT bedraagt tien dagen. Hoewel in HYDRUS-1D gevraagd wordt om neerslag- en verdampingsfluxen ($L T^{-1}$) en deze eenheid ook door ONZAT om de tien dagen werd weggeschreven, kan de flux niet direct overgenomen worden in HYDRUS-1D, omdat de stressperioden in de twee modellen niet overeenkomen. In ONZAT lopen de stressperioden gelijk met de data waarop de KNMI-gegevens beschikbaar waren (de 1ste, 11de en 21ste van de maand). In HYDRUS-1D lopen de stressperioden gelijk met de uitvoerstep van ONZAT en bedragen deze dus altijd exact tien dagen. Dit betekent dat de actuele flux zoals weggeschreven door ONZAT niet altijd voor de gehele stressperiode geldig is. Als deze waarden overgenomen worden in HYDRUS-1D, ontstaan er waterbalansverschillen tussen de twee modellen. Daarom is gebruik gemaakt van de door ONZAT weggeschreven *toename van de neerslag sinds de laatste uitvoertijd*. Deze waarde geldt steeds voor de afgelopen periode van tien dagen. Door te delen door tien wordt dan de correcte, voor de HYDRUS-1D stressperiode geldige neerslagflux ($L T^{-1}$) verkregen.

In ONZAT kan alleen gewerkt worden met een opgegeven referentieverdamping in combinatie met gewasfactoren. HYDRUS en SWAP kennen geavanceerdere concepten om de potentiële transpiratie en evaporatie te berekenen, maar het gebruik van deze methoden leidt onherroepelijk tot verschillen in de waterbalans ten opzichte van de ONZAT-berekeningen. Om de waterbalansen van de HYDRUS-berekeningen zo goed mogelijk overeen te laten komen met de waterbalansen van de ONZAT-berekeningen is ervoor gekozen om de door ONZAT berekende potentiële transpiratie en evaporatie te gebruiken als invoer voor HYDRUS (methode c in Paragraaf 2.2.2). Op deze manier worden de ONZAT- en HYDRUS-berekeningen uitgevoerd met dezelfde atmosferische randvoorwaarden.

Zoals gezegd in Hoofdstuk 2 is modellering van interceptie met HYDRUS-1D alleen mogelijk als de bovenrandvoorwaarde door HYDRUS-1D zelf berekend wordt aan de hand van meteorologische parameters (bijvoorbeeld Penman-Monteith, Hargreaves, oftewel methode a uit Paragraaf 2.2.2). Nu we voor methode c uit Paragraaf 2.2.2 hebben gekozen, is de berekening van interceptie door HYDRUS niet meer mogelijk. Om deze discrepantie het hoofd te bieden staan twee mogelijkheden open:

- zowel in ONZAT als in HYDRUS-1D de interceptie verwaarlozen;
- de door ONZAT berekende interceptie verwerken met de atmosferische randvoorwaarden in HYDRUS-1D.

De eerste optie is het gemakkelijkst. De interceptie is echter een belangrijke hydrologische term en het verwaarlozen ervan zou resultaten opleveren die sterk verschillen van de ONZAT-resultaten waar op dit moment mee gewerkt wordt voor de correctie van de nitraatmetingen. Om geen concessies te hoeven doen aan de oorspronkelijke ONZAT-berekeningen is daarom gekozen voor de laatste optie.

Allereerst dient in dat geval de interceptie te worden afgetrokken van de precipitatie. De interceptie vermindert immers rechtstreeks de voor transpiratie beschikbare hoeveelheid neerslag. Daarnaast dient de potentiële transpiratie vermindert te worden met de door ONZAT berekende interceptieverdamping, alvorens het als invoer aan HYDRUS-1D aangeboden wordt. De energie die gebruikt wordt voor de verdamping van het interceptiewater is namelijk niet meer beschikbaar voor transpiratie. Deze 'truc' is in dit geval toegestaan, omdat in het model aangenomen wordt dat eerst al het interceptiewater verdampt, alvorens transpiratie plaats kan vinden. Bovendien wordt aangenomen dat er geen evaporatie vanuit de bodem plaatsvindt. Alle interceptieverdamping resulteert dan een op een in verminderde potentiële transpiratie. In formulevorm:

$$P \text{ (Invoer HYDRUS-1D)} = P_{net} \text{ (uitvoer ONZAT)}$$

$$T_p \text{ (Invoer HYDRUS-1D)} = T_p \text{ (uitvoer ONZAT-preprocessor, Invoer ONZAT)} - E_i \text{ (uitvoer ONZAT)}$$

Vergelijking 4-1

waarbij:

$$P_{net} = \text{de netto neerslag} = P(\text{KNMI}) - E_i - S_i \text{ (L T}^{-1}\text{);}$$

$$E_i = \text{de actuele interceptieverdamping (L T}^{-1}\text{);}$$

$$S_i = \text{de bergingsverandering in het interceptiereservoir (L T}^{-1}\text{).}$$

4.1.2 *Berekening wortelgroei en actuele transpiratie*

In hoofdstuk 2 is al beschreven dat in HYDRUS-1D een ander wortelgroeimodel is geïmplementeerd dan in ONZAT. Gebruik van dit wortelgroeimodel zou resulteren in een andere ontwikkeling van de wortelzonedikte in de tijd dan gemodelleerd wordt met ONZAT. HYDRUS-1D biedt echter ook de mogelijkheid om de wortelzonedikte rechtstreeks tijdsafhankelijk op te geven. De door ONZAT berekende ontwikkeling van de dikte van de wortelzone kan dus opgelegd worden aan de HYDRUS-1D-berekeningen. Hier is dan ook voor gekozen.

Dit leidt echter direct tot een volgende discrepantie met ONZAT: nu de wortelzonedikte tijdsafhankelijk opgegeven wordt, implementeert HYDRUS-1D automatisch een ingebouwde wateropnameverdelingsfunctie. Waar in ONZAT dus voor $b(z)$ Vergelijking 2-9 geldt, zitten we in HYDRUS-1D nu vast aan Vergelijking 2-11. Al met al betekent dit dat de wateropnameverdeling niet volledig consistent gemaakt kan worden met het ONZAT-concept.

Doordat in hoofdstuk 3 de macht α in de reductiefunctie $R(h)$ (Vergelijking 2-10) op 1,0 is gesteld (zie Paragraaf 3.1.3), is er een reductiefunctie verkregen die exact nagebootst kan worden met het in HYDRUS-1D geïmplementeerde Feddesmodel.

4.1.3 *Hydraulische eigenschappen van de bodem*

Om nog niet geheel opgehelderde redenen werd bij invoer van de oude Staringreeks in tabelvorm (θ - h - en θ - K -tabellen) geen convergentie bereikt. Hier spelen wellicht dezelfde problemen een rol als genoemd in Paragraaf 3.1.4. Voor de hydraulische eigenschappen van de bodem is daarom gebruik gemaakt van de mogelijkheid die HYDRUS-1D biedt om de met de oude Staringreeks gepubliceerde Van Genuchtenparameters in te voeren.

4.1.4 Randvoorwaarden waterstroming

De in ONZAT toegepaste Cauchy-onderrandvoorwaarde van een diepe aquifer met een bepaalde stijghoogte in combinatie met een weerstand kent geen evenbeeld in HYDRUS-1D.

Als onderrandvoorwaarde voor de waterstroming is gekozen voor de Cauchyvoorwaarde van stroming in de richting van horizontale drains door middel van implementatie van de Hooghoudtvergelijking (optie 7 uit Paragraaf 2.5.2.2). Hiermee wordt niet in de modelkolom zelf horizontale stroming ingevoerd, maar wordt wel de drainageflux die het resultaat is van een (in dit geval hypothetisch) drainagebuizensysteem opgelegd aan de onderrand. Van alle in HYDRUS-1D beschikbare opties voor de onderrand is de optie van drainage naar horizontale drains de meest flexibele, aangezien de onderrandvoorwaarde in dit geval door middel van kalibratie van de drainageparameters naar de gewenste situatie gebracht kan worden, in dit geval de onderrandvoorwaarde zoals opgelegd in ONZAT. Deze parameters zijn:

1. de z-coördinaat van het drainagesysteem z_d (L);
2. de z-coördinaat van de ondoorlatende laag z_{ol} (L);
3. de afstand tussen de drainbuizen d_d (L);
4. de horizontale verzadigde doorlatendheid van de bodem boven de drainbuizen $K_{h,s}$ ($L T^{-1}$);
5. de intree weerstand van de drainbuizen C_3 (T);
6. de natte doorsnede w (L).

Voor elke ontwateringsbasis is getracht de onderrandvoorwaarde door middel van kalibratie zo te parametriseren dat de modelresultaten (in dit geval het grondwaterstandsverloop) goed overeenkomen met de modelresultaten van ONZAT bij dezelfde ontwateringsbasis.

De z-coördinaat van het drainagesysteem is hierbij steeds gesteld op de diepte van de ontwateringsbasis. De horizontale doorlatendheid $K_{h,s}$ van de bodem boven de drainbuizen is gesteld op drie maal de verticale verzadigde doorlatendheid K_s zoals opgegeven in de Van Genuchtenparameters; dit is een in grondwatermodellering veel gebruikte ratio. De modelresultaten vertonen relatief weinig gevoeligheid voor de intree weerstand C_3 en deze is daarom vastgezet op tien dagen. De diepte van de ondoorlatende laag z_{ol} is vastgesteld op 25 meter; verdere verdieping van deze laag heeft nauwelijks effect meer op de modelresultaten, terwijl ondiepere liggingen tot minder goede overeenkomsten met de ONZAT-resultaten leiden.

Daarmee blijven de drainafstand d_d en de natte doorsnede w over als te kalibreren parameters. Verhoging van w heeft echter een soortgelijk effect op het gemodelleerde grondwaterstandsverloop als verkleining van d_d . Het heeft dus niet veel zin om beide parameters tegelijkertijd te schatten, temeer omdat de parameterwaarden in het model geen fysieke betekenis hebben (Rozemeijer et al., 2003) en we er dus geen realistische ranges aan kunnen toekennen. Om deze reden is besloten om alleen d_d (de parameter waar het grondwaterstandsverloop het meest gevoelig voor is) te kalibreren en de natte doorsnede vast te stellen op 50 cm. Tabel 4-1 geeft de parametrisatie van de onderrandvoorwaarde voor de verschillende ontwateringsbases.

Tabel 4-1 Parametrisatie van de afwatering naar horizontale drains voor de verschillende ontwateringsbases.

Parameter	OB = 100	OB = 250	OB = 500
z_d	-100	-250	-500

Z_{ol}	-2500	-2500	-2500
d_d	4000	10.000	17.000
Kh,s	76,1	76,1	76,1
C_3	10	10	10
w	50	50	50

4.1.5 Transport

In analogie met de ONZAT-preprocessor wordt de aan HYDRUS-1D geleverde invoerwaarde voor de concentratie in de neerslag berekend door een dagelijkse gift van 0,01 gram te delen door de neerslaghoeveelheid. Bij de hierbij te hanteren neerslaghoeveelheid dient rekening gehouden te worden met het feit dat de in HYDRUS-1D gehanteerde neerslag P verkregen is vanuit P_{net} , die is opgebouwd volgens $P_{net} = P(KNMI) - E_i - S_i$ (zie Vergelijking 4-1), en dat S_i geen effect heeft op de concentratie. Om de juiste concentratie te berekenen die als invoer kan dienen voor HYDRUS-1D moet de stofgift van 0,01 g/d dus gedeeld worden door een neerslaghoeveelheid van $P_{net} + S_i$ (ofwel $P(KNMI) - E_i$) in plaats van door P_{net} :

$$C_p = D / (P_{net} + S_i) \text{ als } P_{net} \geq 0,01$$

$$C_p = D / P_{LB} \text{ als } P_{net} < 0,01$$

Vergelijking 4-2

Voor de onderrand is gekozen voor een 'zero-gradient'-randvoorwaarde. De twee andere opties die in HYDRUS-1D beschikbaar zijn, zijn niet werkbaar, omdat dan de concentratie op de onderrand of de concentratie in het uittredende water opgegeven moet worden. Overigens wordt met deze keuze een afwijkende randvoorwaarde geïmplementeerd ten opzichte van ONZAT. ONZAT kent namelijk geen 'zero gradient'-randvoorwaarde. De in ONZAT gebruikte Cauchyvoorwaarde is echter niet beschikbaar in HYDRUS-1D (zie hoofdstuk 2).

Voor de droge bulkdichtheden van de boven- en ondergrond ρ_b , de dispersielengte L_{dis} en de diffusiecoëfficiënt in vrij water D_w zijn dezelfde waarden gebruikt als in de ONZAT-berekeningen.

Voor de tortuositeitsparameter τ geldt dat zowel de formulering van Millington-Quirk als die van Moldrup niet volledig in overeenstemming te brengen is met het tortuositeitsconcept in ONZAT (zie Hoofdstuk 2). Omdat, volgens de Hydrus-1D-handleiding, Millington-Quirk beter presteert voor zandgronden dan Moldrup, wordt hier voor Millington-Quirk gekozen om de tortuositeit te berekenen. Bijkomend voordeel is dat deze keuze in overeenstemming is met de SWAP-modellering in Hoofdstuk 5, aangezien in SWAP alleen de Millington-Quirkformulering gekozen kan worden.

4.1.6 Postprocessing van modelresultaten

De drukhoogte en stofconcentraties worden door HYDRUS-1D per uitvoertijdstap weggeschreven in het bestand OBS_NODE.dat. Uit deze informatie worden de indexconcentraties berekend, op dezelfde manier als in ONZAT.

4.2 Resultaten

Figuur 4-1 vergelijkt voor de drie verschillende ontwateringsbases het gemodelleerde grondwaterstandsverloop van HYDRUS-1D en ONZAT. Terwijl voor de twee diepere ontwateringsbases beide modellen nagenoeg dezelfde resultaten geven, kon voor OB = 100 cm -mv het met ONZAT gemodelleerde grondwaterstandsverloop niet met HYDRUS-1D gereproduceerd worden (bij OB = 50 cm -mv werd zelfs geen convergentie bereikt in HYDRUS-1D). Het

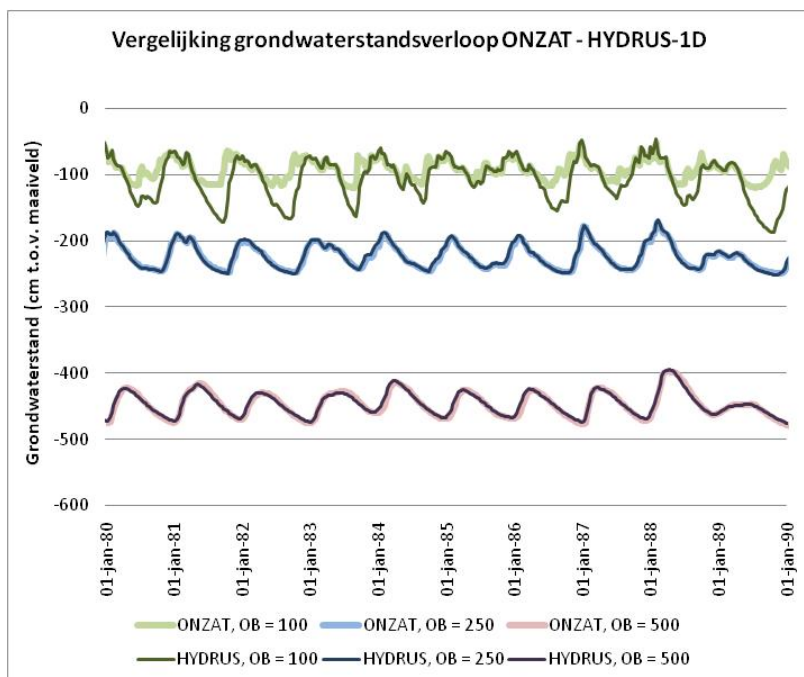
voornaamste verschil is dat in de zomer de grondwaterstand in HYDRUS-1D te ver wegzakt.

De oorzaak voor deze discrepantie moet gezocht worden in het feit dat in HYDRUS-1D niet dezelfde onderrandvoorwaarden voor waterstroming gedefinieerd kunnen worden als in ONZAT. Hoewel in HYDRUS-1D gekozen was voor de onderrandvoorwaarde van 'laterale stroming naar horizontale drains' vanwege de grote flexibiliteit, schiet deze flexibiliteit toch tekort om de onderrandfluxen van ONZAT goed na te kunnen bootsen. De kern van het probleem wordt gevormd door het feit dat bij de ontwateringsbasis van 100 cm –mv periodiek een opwaartse kwel flux over de modelrand optreedt, doordat de opgegeven stijghoogte in de diepe aquifer hoger is geworden dan de stijghoogte in de modelkolom (zie Figuur 4-2). Geen van de onderrandvoorwaarden in HYDRUS-1D kan opwaartse kwel fluxen over de onderrand simuleren. Met de voor de HYDRUS-1D-berekeningen gekozen randvoorwaarde neemt de flux over de onderrand af tot nul als de grondwaterstand onder het drainageniveau is weggezakt, terwijl in ONZAT in deze perioden opwaartse aanvoer van water plaatsvindt, waardoor de grondwaterstand minder ver wegzakt dan in de HYDRUS-1D-berekeningen.

Het is interessant om de gemodelleerde actuele transpiratie (T_a) tussen de twee modellen te vergelijken, enerzijds omdat er een verschillend concept is gehanteerd voor de wortelverdelingsfunctie en anderzijds omdat het de enige nog onbesproken term van de waterbalans is (zie ook Tabel 4-2). Het verloop van de actuele transpiratie wordt getoond in Figuur 4-3. Bij alle ontwateringsbases is het verschil tussen de met ONZAT en de met HYDRUS-1D gemodelleerde transpiratie minimaal. De verschillende concepten resulteren dus niet in noemenswaardige verschillen. Daarnaast resulteert ook de 'zero-gradient'-onderrandvoorwaarde in HYDRUS-1D en de daaruit volgende diepe wegzakking van de grondwaterstand in de zomermaanden niet in significante verschillen in de berekening van de transpiratie. Het vochtgehalte in de wortelzone wordt niet voldoende door de aan- of afwezigheid van de kwelterm beïnvloed om een effect op T_a te veroorzaken.

Tabel 4-2 Waterbalanstermen in het ONZAT- en HYDRUS-1D-model. B = Berging

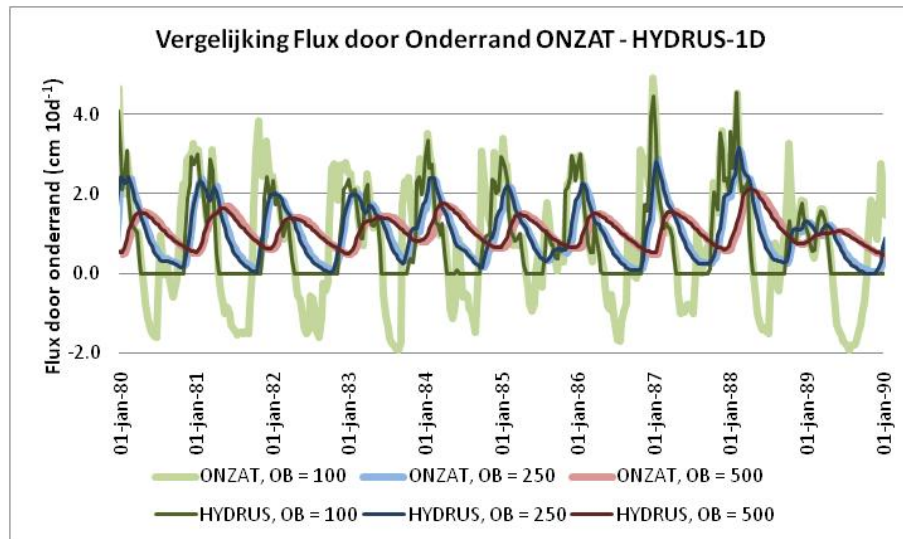
ONZAT		HYDRUS-1D	
<u>IN</u>	<u>UIT</u>	<u>IN</u>	<u>UIT</u>
P	E_I	$P - E_I$ (ONZAT)	T_a
Q_{bot} (indien > 0)	T_a		Q_{bot}
	Q_{bot} (indien < 0)		
	B		B



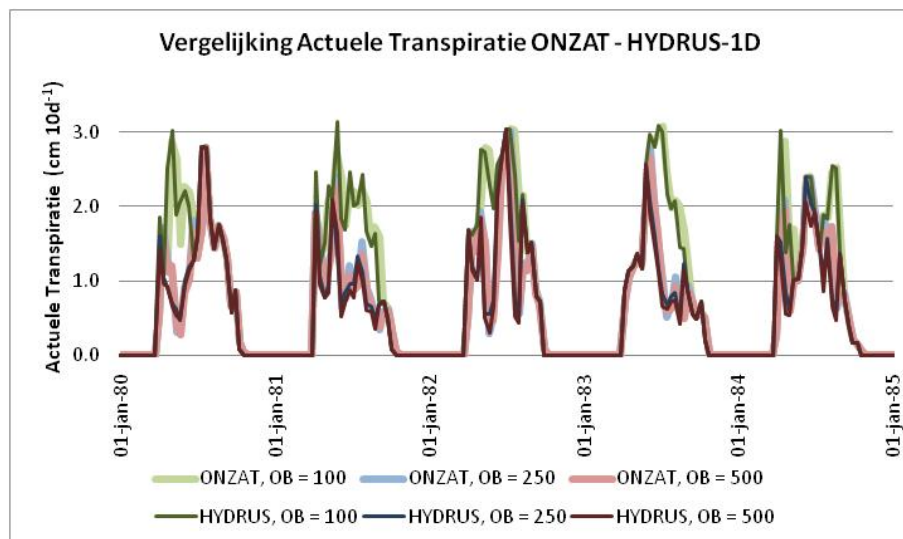
Figuur 4-1 Vergelijking van het gemodelleerde grondwaterstandsverloop (omwille van de overzichtelijkheid van de figuur beperkt tot de periode 1980-1989) tussen ONZAT en HYDRUS-1D, voor drie verschillende ontwateringsbases.

Figuur 4-4 geeft tenslotte een vergelijking tussen het met ONZAT en HYDRUS-1D berekende verloop van de indexconcentratie. Er is sprake van een goede match tussen de twee modellen, zelfs voor de ondiepe ontwateringsbasis waarbij het verschil in onderrandvoorwaarde resulteerde in een afwijkend grondwaterstandsverloop. Mogelijke reden voor de ongevoeligheid van de indexconcentratie voor de flux door de onderrand en het grondwaterstandsverloop zijn deze:

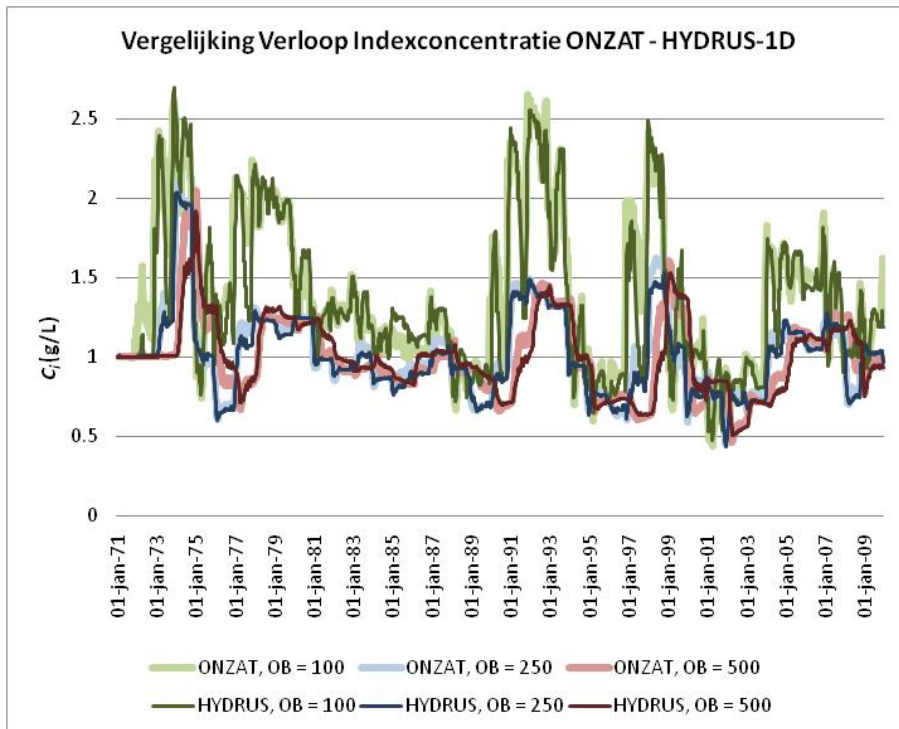
- De onderrand is voldoende ver verwijderd van de bovenste meter van het grondwater, zodat het via de onderrand inkomende water (met vaste concentratie van 1,0 g/L) nooit deze bovenste meter bereikt.
- Het wegzakken van de grondwaterstand in de zomer is niet dramatisch, waardoor de gemiddelde grondwaterstand niet sterk wordt verlaagd. Anders zou er in ieder geval een vertraging plaatsvinden in de doorwerking van c_p in de indexconcentratie.
- De waterbalans over een jaar wordt niet of nauwelijks beïnvloed, getuige het feit dat de grondwaterstand in HYDRUS-1D, ondanks de diepe wegzakking in de zomer, in de winter steeds weer het niveau bereikt dat ook door ONZAT wordt gemodelleerd. De kwelflux in de zomer wordt in ONZAT grotendeels gecompenseerd door een sterkere neerwaartse flux in de winter. Het verschil in cumulatieve flux over de onderrand blijft tussen de twee modellen daarom klein, en daarmee het verschil in waterbalans over langere perioden. Dit geldt niet alleen voor het modeldomein als geheel, maar ook voor de bovenste meter van het grondwater.



Figuur 4-2 Vergelijking van de gemodelleerde flux over de onderrand (1980-1989) tussen ONZAT en HYDRUS-1D, voor drie verschillende ontwateringsbases. Een negatieve flux is een neerwaartse flux (het model uit), een positieve flux is een opwaartse kwelflux (het model in).



Figuur 4-3 Vergelijking van de gemodelleerde actuele transpiratie (1980-1984) tussen ONZAT en HYDRUS-1D, voor drie verschillende ontwateringsbases.



Figuur 4-4 Vergelijking van het verloop van de berekende indexconcentratie tussen ONZAT en HYDRUS-1D voor drie verschillende ontwateringsbases.

5 Reproductie van de indexconcentratieberekeningen met SWAP

5.1 Methode

Hieronder wordt de parametrisatie van SWAP ten behoeve van de berekeningen van de indexconcentraties besproken. De parametrisatie is hierbij onderverdeeld in dezelfde categorieën als gehanteerd in Hoofdstuk 2 tot en met 4. De invoerbestanden van SWAP zijn gegeven in Bijlage 3.

5.1.1 Neerslag, interceptie en potentiële evapotranspiratie

SWAP vraagt om dagelijkse waarden voor de meteorologische randvoorwaarden. De ONZAT-berekeningen zijn daarentegen op decadebasis uitgevoerd, en in- en uitvoer zijn daarom alleen per tien dagen beschikbaar. Net zoals bij HYDRUS-1D is ook bij de SWAP-berekeningen de ONZAT-uitvoer gebruikt als SWAP-invoer om de SWAP-modellering zo consistent mogelijk te maken met de ONZAT-berekeningen. De omwerking van ONZAT-uitvoer naar SWAP-invoer is uitgevoerd op een manier die vergelijkbaar is met de in Paragraaf 4.1.1 voor HYDRUS-1D beschreven methode. In een extra stap zijn de aldus verkregen invoerwaarden echter nog teruggeschaald naar dagwaarden.

De potentiële evapotranspiratie is met methode c uit Paragraaf 2.2.3 berekend. Deze methode sluit het beste aan bij de opzet van de ONZAT-berekeningen, waarin eveneens gebruik gemaakt wordt van een opgegeven referentie-evapotranspiratie (de Penman/openwater-referentie-evapotranspiratie) in combinatie met gewasfactoren.

Vanwege de afwijkende interceptieconcepten is er ook bij SWAP voor gekozen om de interceptie 'uit te zetten' (SWINTER = 0 in Part 9 van invoerbestand <crop>.crp, zie 0) en hier de neerslag en de potentiële transpiratie voor te corrigeren. Net zoals bij de HYDRUS-1D-berekeningen wordt voor de precipitatie in SWAP weer P_{net} uit de ONZAT-berekeningen genomen. Ook dient de potentiële transpiratie weer te worden aangepast. De in de modelinvoer opgegeven potentiële referentie-evapotranspiratie (in dit geval de openwater-referentieverdamping E_0 zoals berekend met Penman en aangeleverd door het KNMI) wordt intern in SWAP vermenigvuldigd met F_{gewas} om de potentiële evapotranspiratie voor het betreffende gewas te berekenen. De juiste potentiële transpiratie, dat wil zeggen met aftrek van de actuele, door ONZAT berekende interceptieverdamping, wordt derhalve verkregen door niet E_0 op te geven, maar E_0^* :

$$E_0^* = (E_0 / F_{gewas}) - (E_i / F_{gewas}) \quad \text{Vergelijking 5-1}$$

De interne vermenigvuldiging van E_0^* met F_{gewas} levert dan immers $E_0 - E_i$, wat precies de hoeveelheid potentiële transpiratie geeft die ook aan ONZAT en HYDRUS-1D is opgelegd (bij $E_p = 0$).

In Paragraaf 2.2.3 bleek al dat in SWAP de potentiële transpiratie T_p en potentiële evaporatie E_p niet afzonderlijk opgegeven kunnen worden, omdat de opsplitsing altijd intern plaatsvindt. Bij de ONZAT-berekeningen werd aangenomen dat de potentiële evaporatie vanuit de bodem altijd nul is. In SWAP is dit bereikt door de Soil Cover Fraction (SCF) permanent op 1 te zetten. Volgens Vergelijking 2-4 levert dit $E_0 = 0$.

5.1.2 *Berekening wortelgroei en actuele transpiratie*

De dikte van de wortelzone is in SWAP opgegeven als functie van de 'Development Stage' (DVS), die zelf als lineair toenemend in de tijd is opgegeven. Evenals bij HYDRUS-1D werd de tijdsafhankelijke dikte van de wortelzone ontleend aan de ONZAT-uitvoer. Omdat het in SWAP niet mogelijk is een van jaar tot jaar variabel verloop van de wortelgroei op te geven, is vanuit de ONZAT-resultaten een over de jaren 1971-2009 gemiddeld verloop van de wortelzonedikte gedestilleerd en is dit gemiddelde verloop gebruikt voor de parametrisatie van de wortelzonedikte als functie van het DVS in SWAP.

Wat de wortelverdelingsfunctie betreft, kan in SWAP, in tegenstelling tot in HYDRUS-1D, Vergelijking 2-9 ($b(z) = \text{overal } 1$) wel ingevoerd worden. In SWAP kan de relatieve worteldichtheid in tabulaire vorm opgegeven worden als functie van de relatieve diepte in de wortelzone. Op die manier is de wortelverdelingsfunctie dus een stationaire functie van de diepte in de wortelzone. Door de relatieve worteldichtheid invariant te maken van de diepte wordt verkregen dat de actuele vochtonttrekking gelijkmatig over de wortelzone wordt verdeeld.

Wat betreft de reductiefunctie kan, net zoals in HYDRUS-1D, ook in SWAP een lineaire versie van Feddes geïmplementeerd worden voor volledige consistentie met de ONZAT-berekeningen (indien in ONZAT $\sigma = 1,0$). SWAP kent exact dezelfde implementatie van Feddes als HYDRUS-1D.

5.1.3 *Hydraulische en transporteigenschappen van de bodem*

De hydraulische eigenschappen van de bodem zijn wederom opgegeven in de vorm van de Van Genuchtenparameters.

5.1.4 *Randvoorwaarden waterstroming*

Dezelfde Cauchyrandvoorwaarde als geïmplementeerd in ONZAT kan gekozen worden in SWAP (flux door de onderkant van het domein afhankelijk van de stijghoogte in een diepe aquifer). De parametrisatie van deze stijghoogte en de weerstand van de aquitard zijn exact gelijk aan de parametrisatie van ONZAT voor de verschillende ontwateringsbases.

5.1.5 *Transport*

In de huidige officiële versie van SWAP (versie 3.2) is het niet mogelijk om de bovenrandconcentraties (in dit geval de concentraties in de neerslag) variabel in de tijd op te geven. SWAP vraagt in de invoer om een constante waarde voor deze parameter. Daarom is omwille van dit onderzoek de code van SWAP aangepast.

In de aangepaste versie van SWAP kan door middel van een toegevoegde 'switch', genaamd SWCPRE, gekozen worden tussen drie verschillende methoden ter berekening van de concentratie in de precipitatie c_p :

1. SWCPRE = 1: constante, opgegeven waarde voor c_p (de oorspronkelijke SWAP-functionaliteit);
2. SWCPRE = 2: toediening van een constante dosis aan de neerslag (overeenkomend met de ONZAT-functionaliteit; implementatie van Vergelijking 3-4).
3. SWCPRE = 3: opgave van c_p samen met de meteorologische invoergegevens.

Normaliter kunnen de indexconcentratieberekeningen in SWAP uitgevoerd worden met SWCPRE = 2. Voor de vergelijkende berekeningen is dat echter niet mogelijk. In ONZAT is de concentratie in het neerslagwater zoals die volgt na toediening van

de dosis namelijk nog onderhevig aan interceptieverdamping. In de HYDRUS-1D- en SWAP-berekeningen van dit en het vorige hoofdstuk wordt interceptie daarentegen niet expliciet gemodelleerd, maar verrekend met de hoeveelheid neerslag en potentiële transpiratie. Een constante dosis kan daarom nooit resulteren in dezelfde concentratie van het water dat de bodem bereikt als in ONZAT het geval is. Daarom is voor dit hoofdstuk SWCPRE = 3 toegepast, waarbij de tijdsafhankelijke c_p op dezelfde manier is berekend als voor de tijdsafhankelijke randvoorwaarden van HYDRUS-1D (zie Paragraaf 4.1.5).

Wat betreft de onderrandvoorwaarde voor transport biedt SWAP, zoals gezegd, geen keuze. De geïmplementeerde Cauchyvoorwaarde kent ook geen door de gebruiker te beïnvloeden parameters.

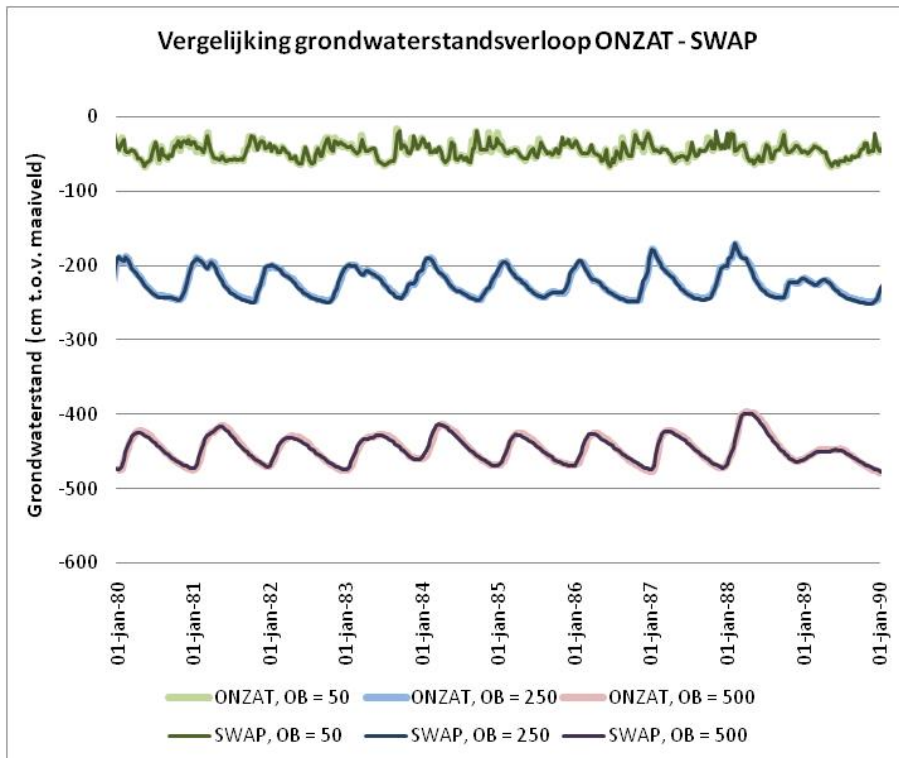
De transportparameters L_{dis} , ρ_b en D_w hebben weer dezelfde waarden als in de ONZAT-berekeningen.

5.1.6 *Postprocessing van modelresultaten*

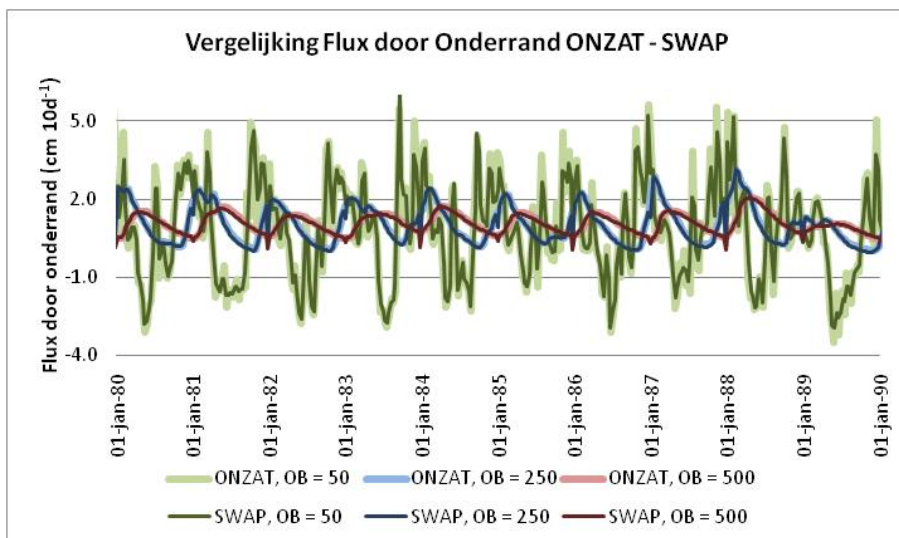
De drukhoogte en stofconcentraties worden door SWAP per uitvoertijdstap weggeschreven in het bestand Result.vap. Uit deze informatie worden de indexconcentraties berekend, op dezelfde manier als in ONZAT, door middel van een hiertoe geschreven postprocessor.

5.2 **Resultaten**

Figuur 5-1 toont een vergelijking tussen het met ONZAT en met HYDRUS-1D gemodelleerde grondwaterstandsverloop. Het is duidelijk dat de mogelijkheid die SWAP biedt om eenzelfde onderrandvoorwaarde te kiezen als geïmplementeerd in ONZAT, ervoor gezorgd heeft dat nu ook voor de ondiepe ontwateringsbasis van 50 cm -mv het grondwaterstandsverloop van ONZAT gereproduceerd kan worden. Het verloop van de SWAP-onderrandflux is dan ook nagenoeg identiek aan dat van ONZAT (zie Figuur 5-2).



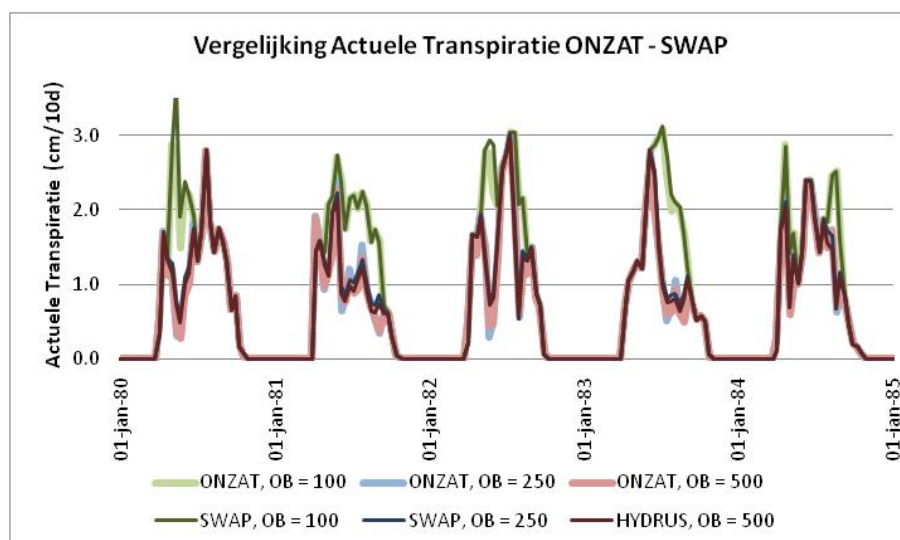
Figuur 5-1 Vergelijking tussen het gemodelleerde grondwaterstandsverloop (1980-1989) met ONZAT en met SWAP, voor drie verschillende ontwateringsbases.



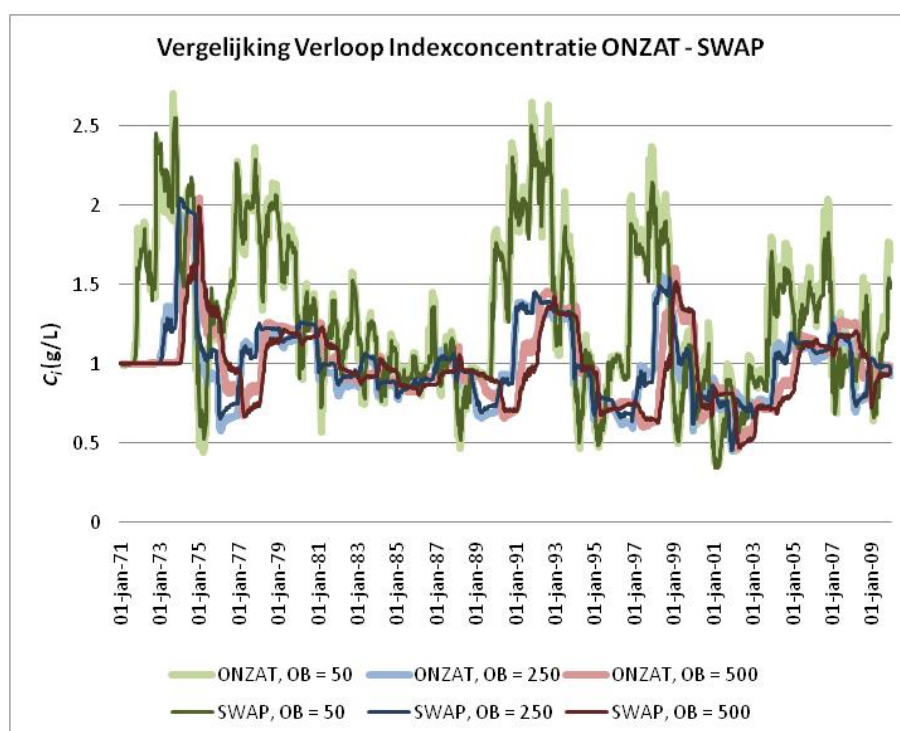
Figuur 5-2 Vergelijking tussen de gemodelleerde flux over de onderrand (1980-1989) met ONZAT en met SWAP, voor drie verschillende ontwateringsbases. Een negatieve flux is een neerwaartse flux (het model uit), een positieve flux is een opwaartse kwel flux (het model in).

Figuur 5-3 geeft de vergelijking tussen de door ONZAT en SWAP gemodelleerde actuele transpiratie. Net als bij HYDRUS-1D leiden ook de conceptuele verschillen in SWAP ten aanzien van de wortelverdeling niet tot noemenswaardige verschillen in de berekening van de actuele transpiratie.

Figuur 5-4 geeft tenslotte een vergelijking tussen de met ONZAT en met SWAP gemodelleerde indexconcentraties. De modelresultaten van ONZAT en SWAP zijn sterk overeenkomstig.



Figuur 5-3 Vergelijking van de gemodelleerde actuele transpiratie (1980-1984) tussen ONZAT en SWAP, voor drie verschillende ontwateringsbases.



Figuur 5-4 Vergelijking van het verloop van de berekende indexconcentratie tussen ONZAT en HYDRUS-1D voor drie verschillende ontwateringsbases.

6 Modelkeuze, migratie en gevoeligheidsanalyse

6.1 Keuze voor vervanger voor ONZAT-model

De modelberekeningen worden tot op heden uitgevoerd met het simulatiemodel ONZAT (Van Drecht, 1985; OECD, 1989). Buiten het RIVM wordt ONZAT echter nauwelijks toegepast en bovendien wordt ONZAT niet meer doorontwikkeld. Daarom is onderzoek gedaan naar alternatieve modellen met een wijder verbreide toepassing; in eerste instantie voor de berekening van de indexconcentraties, maar ook voor andere toepassingen waar in de toekomst behoefte aan kan zijn.

De modelinstrumentaria die in Nederland het meest gebruikt worden voor eendimensionaal verzadigd/onverzadigd water- en stoftransport door de bovenste meters van de bodem: dit zijn HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2005, 1998) en SWAP (Kroes et al., 2008). Deze twee modellen zijn dan ook in dit onderzoek vergeleken en getest op geschiktheid voor de vervanging van ONZAT. HYDRUS-1D is en wordt ontwikkeld door de University of California Riverside en vindt vooral toepassing in de universitaire en onderzoekswereld. SWAP is en wordt ontwikkeld door Wageningen Universiteit en Researchcentrum en is sterker dan HYDRUS-1D gericht op de praktijk van het waterbeheer.

HYDRUS-1D is niet geschikt gebleken als vervanger voor ONZAT. HYDRUS-1D geeft nagenoeg dezelfde resultaten als ONZAT in geval er gerekend wordt met diepere grondwaterstanden (diepe onderwateringsbasis). Echter voor ondiepere grondwaterstanden (ondiepe onderwateringsbasis) kan het met ONZAT gemodelleerde grondwaterstandsverloop niet met HYDRUS-1D gereproduceerd worden. Bijvoorbeeld bij een ontwateringsbasis van 50 cm -mv werden geen resultaten verkregen met HYDRUS-1D (geen convergentie bereikt).

Bij HYDRUS-1D zakken de grondwaterstanden in de zomer dieper weg dan bij ONZAT. De oorzaak voor dit verschil is dat in HYDRUS-1D niet op dezelfde wijze de waterstroming gedefinieerd kan worden als in ONZAT. Het is niet mogelijk om in HYDRUS-1D opwaartse kwel fluxen vanuit de diepere grondwaterlagen te simuleren. In de ONZAT-berekeningen treedt wel opwaartse kwel op bij een ondiepere ontwateringsbasis. Bij de HYDRUS-1D-berekeningen neemt de flux over de onderrand af tot nul als de grondwaterstand onder het drainageniveau is weggezakt, terwijl in ONZAT in deze perioden opwaartse aanvoer van water plaatsvindt, waardoor de grondwaterstand minder ver wegzakt dan in de HYDRUS-1D-berekeningen.

Met SWAP kunnen de ONZAT-resultaten van de indexconcentratieberekeningen goed gereproduceerd worden. Daarom is SWAP gekozen als vervanger van ONZAT voor de berekening van indexconcentraties.

6.2 Migratie naar SWAP

SWAP wordt in tegenstelling tot ONZAT veelvuldig ingezet in het Nederlandse waterbeheer. Daarbij komt dat voor SWAP een parametrisatie van grasland beschikbaar is, zoals die wordt gehanteerd in het landsdekkende hydrologie- en nutriëntentransportmodel STONE. Een uitgangspunt van dit hoofdstuk is dat de in STONE gehanteerde modelconcepten en de parametrisatie daarvan state-of-the-art zijn voor landsdekkende toepassingen. Naast een migratie van ONZAT naar SWAP

wordt daarom tevens de migratie naar deze nieuwe parametrisatie volbracht en bestudeerd.

In dit hoofdstuk wordt bekeken in hoeverre de nieuwe modelconcepten en -parametrisatie de indexconcentraties beïnvloeden. Indien een (ten opzichte van ONZAT) veranderd modelconcept leidt tot sterke veranderingen in het patroon van indexconcentraties, kan dat aanleiding zijn om in een vervolgstudie aanvullend onderzoek te verrichten naar deze concepten/parametrisaties en de invloed ervan op de correcties van de grondwaterkwaliteitsmetingen. Indien een veranderd concept nauwelijks invloed heeft op de indexconcentraties, kan geconcludeerd worden dat een nadere gevoeligheidsanalyse op de parametrisatie van dit concept niet nodig is. Hetzelfde geldt voor modelconcepten die in SWAP/STONE hetzelfde zijn als in ONZAT en waarvoor sinds de ontwikkeling van ONZAT dus blijkbaar geen betere alternatieven ontwikkeld zijn; de huidige context is niet de plaats om aan deze concepten te tornen.

6.3 Methode

Waar in Hoofdstuk 5 de ONZAT-concepten nog zoveel mogelijk gehandhaafd werden, worden deze nu vervangen door de SWAP/STONE-concepten en -parametrisaties. Daarnaast worden nog enkele additionele aanpassingen bekeken die in overweging genomen zouden kunnen worden voor de praktijk van de indexconcentratieberekeningen. Het SWAP-model van Hoofdstuk 5, dat de ONZAT-resultaten van hoofdstuk 3 goed reproduceerde, dient hierbij als uitgangspunt. Dit model wordt hieronder het *basismodel* genoemd. Achtereenvolgens worden de in Tabel 6-1 genoemde SWAP/STONE-concepten/parametrisaties alsmede de additionele aanpassingen in dit basismodel geïntroduceerd. Steeds worden de voorgaande wijzigingen daarbij in stand gehouden, zodat stapsgewijs gemigreerd wordt naar het vernieuwde model. Tabel 6-1 geeft de namen van de resulterende modellen weer, waar hieronder naar zal worden gerefereerd.

Tabel 6-1 De verschillende modelvarianten

SWAP/STONE-concept toegevoegd voor modelonderdeel:	Resulteert in model met de naam:
Interceptie	1_B_I
Gewasgroei	2_B_IG
Wateropname	3_B_IGW
Verdeling evapotranspiratie	4_B_IGWV
Additionele aanpassingen	
Specifiek station	5_B_IGWVS
Dagwaarden voor meteorologische invoer	6_B_IGWVSD
Penman-Monteith verdamping	7_B_IGWVSDM

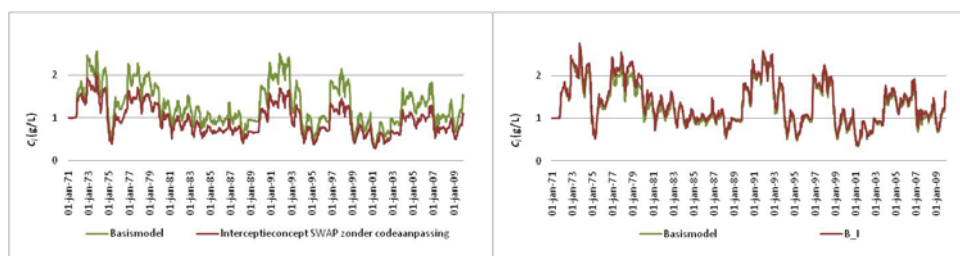
ad 1. Interceptie: Het ONZAT-concept van interceptie (zie Paragraaf 2.2.1) wordt vervangen door het SWAP-concept van interceptie (zie Paragraaf 2.2.3).

Ten opzichte van het basismodel (hoofdstuk 5) is de modelinvoer nu op de volgende punten gewijzigd:

- De neerslag- en verdampingsinvoer zijn niet meer gecorrigeerd voor de door ONZAT berekende interceptie en interceptieverdamping.
- De bovenrandvoorwaarde voor transport wordt berekend door een constante dosis van 1 mg/d toe te voegen aan de bruto neerslag (SWCPRE = 2, zie Paragraaf 5.1.5 en 0).

- In het invoerbestand <gewas>.crp wordt ervoor gekozen om interceptie te berekenen volgens Von Hoyningen-Hüne (1983) en Braden (1985) (SWINTER = 1, zie 0).

Voor een correcte implementatie van de interceptie was een additionele aanpassing aan de broncode van SWAP noodzakelijk. In SWAP wordt namelijk aangenomen dat de opgegeven stofconcentraties voor het neerslagwater gelden voor de netto neerslag, na interceptieverdamping. Doordat echter, in analogie met de opzet van de ONZAT-berekeningen, de toegediende dosis dient te gelden voor de *bruto* neerslag, en dit ten behoeve van de indexconcentratieberekeningen ook zo is geïmplementeerd in SWAP (zie Paragraaf 5.1.5, toevoeging van de optie SWCPRE = 2), zou zonder verdere aanpassing van de broncode de interceptieverdamping effectief leiden tot verlies van stof, omdat de stofconcentratie in het neerslagwater niet wordt aangepast. Dit resulteert in lagere indexconcentraties (Zie Figuur 6-1, linkerfiguur). Om ervoor te zorgen dat geen stof het systeem verlaat, wordt nu in de broncode van SWAP de hoeveelheid stof in het interceptiewater (dat in SWAP altijd volledig verdampt, ongeacht de potentiële verdamping) opgeteld bij de dosis van de volgende tijdstap. Figuur 6-1 (rechterfiguur) laat zien dat deze codeaanpassing leidt tot nagenoeg dezelfde indexconcentraties als berekend worden met interceptie volgens het SWAP-concept.



Figuur 6-1 Illustratie van de verlaging van de berekende indexconcentraties als gevolg van het stofverlies in SWAP (linkerfiguur) en de verbetering van de berekening na codeaanpassing (rechterfiguur).

ad 2. Gewasgroei: De in hoofdstuk 5 gehanteerde parametrisatie van de gewasgroei (gras) wordt vervangen door de STONE-parametrisatie voor permanent gras (www.swap.alterra.nl, zie ook Kroes et al., 2001).

Het verschil in concept voor de gewasgroei tussen de ONZAT-berekeningen en de STONE-parametrisatie van permanent gras is dat voor de ONZAT-berekeningen wordt aangenomen dat er buiten het groeiseizoen geen gewasverdamping plaatsvindt. Dit wordt bereikt door de dikte van de wortelzone buiten het groeiseizoen op nul te zetten. In het groeiseizoen vindt transpiratie en wortelgroei plaats.

In de STONE-parametrisatie van permanent gras heeft de wortelzone het hele jaar door een constante dikte. Er kan dus het in het gehele jaar transpiratie plaatsvinden. Of dat ook gebeurt, hangt af van de potentiële evapotranspiratie die afhankelijk is van de weersomstandigheden.

Dit veranderde concept voor gewasgroei heeft op twee plaatsen consequenties voor de modelinvoer:

- In bestand <Gewas>.crp wordt de lengte van de gewascyclus (LCC) op 366 dagen gezet in plaats van 200 dagen (zie 0).
- In bestand <Gewas>.crp wordt de wortelzonedikte (RD), die als functie van het ontwikkelingsstadium opgegeven dient te worden, constant op 30 cm gezet, in

plaats van hiervoor het groeimodel van ONZAT over te nemen zoals in het basismodel (zie 0).

ad 3. Wateropname: De parametrisatie van de Feddesfunctie zoals gehanteerd in hoofdstuk 5 wordt vervangen door de parametrisatie van deze functie zoals voor gras door Alterra is samengesteld.

Deze aanpassing grijpt aan op het invoerbestand <Gewas>.crp, Part 7 (zie 0).

ad 4. Opsplitsing evapotranspiratie: In hoofdstuk 5 wordt aangenomen dat er geen verdamping vanuit de bodem plaatsvindt en wordt de evaporatie op nul gesteld door de *SCF* op 1 te zetten in de modelinvoer (<gewas>.crp) (waarom dit de evaporatie op nul stelt, wordt uitgelegd in Paragraaf 2.2.2). In de STONE-parametrisatie van permanent gras wordt evaporatie wel mogelijk geacht. In deze parametrisatie wordt de verdeling van de verdampingsenergie over transpiratie en evaporatie berekend aan de hand van de *LAI* (Leaf Area Index) in plaats van de *SCF* (zie ook Paragraaf 2.2.2). Deze *LAI* heeft in de STONE-parametrisatie de waarde 3,0, wat er volgens Vergelijking 2-4 op neerkomt dat zo'n 10 procent van de straling toch de bodem bereikt (bij een stralingsextinctiecoëfficiënt r van 0,75). Dit houdt in dat een deel van de actuele verdamping nu, naast de watergehalten in de wortelzone, tevens afhankelijk wordt gesteld van het vochtleverend vermogen van de bovengrond.

Deze aanpassing van het model grijpt in de modelinvoer aan op het invoerbestand <gewas>.crp (zie 0).

ad 5. Specifiek station. Tot nu toe zijn de gebruikte weersgegevens gemiddelde waarden voor één weersdistrict zoals berekend door het KNMI. Hier nemen we de weersgegevens van één specifiek station binnen het weersdistrict (weerstation De Kooij). Deze berekening is daarmee exemplarisch voor de ruimtelijke heterogeniteit in neerslag en verdamping en het effect daarvan op de indexconcentraties. Deze berekening is echter vooral een opstap voor de hierna volgende berekeningen, waarin de overstap op dagwaarden voor weer en verdamping en op de Penman-Monteithberekening wordt gemaakt. De hiervoor benodigde gegevens zijn niet beschikbaar voor de weersdistricten. Voor de individuele stations zijn ze echter wel op dagbasis beschikbaar via de KNMI-website.

In model 5_B_IGWVS wordt nog gerekend met decadewaarden. Daartoe zijn de dagwaarden gemiddeld over decaden en is bovendien de Makkinkverdamping teruggerekend naar de Penman/openwater-referentieverdamping. Daarmee is het enige verschil met model 4_B_IGWV de herkomst van de weersgegevens en zijn de methode van berekening en de parametrisatie verder identiek.

ad 6. Dagwaarden voor meteorologische invoergegevens. In model 6_B_IGWVSD wordt overgeschakeld op dagwaarden voor de meteorologische variabelen. Het KNMI stelt de benodigde dagwaarden (in dit geval voor neerslag en Makkinkreferentieverdamping) beschikbaar via zijn website. Via een preprocessor zijn deze waarden voor het weerstation De Kooij ingelezen en verwerkt tot een SWAP-invoerbestand in het juiste formaat. Hierbij is de Makkinkverdamping omgerekend naar Penman/openwater-referentieverdamping (*1,25) en zijn de gewasfactoren in het bestand <gewas>.crp op 0,8 gehouden.

Bij de overstap van decadewaarden naar dagwaarden is het noodzakelijk om het in ONZAT gehanteerde concept voor de omgang met lage neerslagsommen (zie Paragraaf 3.1.6) te verlaten. Indien gerekend wordt met decadewaarden, is het niet bereiken van P_{LB} zeldzaam, maar in geval van dagwaarden komt het uiteraard veelvuldig voor dat P_{LB} niet bereikt wordt. Indien het ONZAT-concept (Vergelijking 3-4) gehandhaafd zou worden, zou vaker kunstmatig neerslag toegevoegd moeten

worden om P_{LB} te bereiken. Dit zou resulteren in een significante verlaging van de gemiddelde indexconcentratie. In de SWAP-berekeningen wordt daarom anders omgegaan met zeer lage neerslaghoeveelheden. In plaats van Vergelijking 3-4 geldt nu:

$$P_{LB} = 0,001$$

$$c_p = 0 \text{ en } P = P \text{ als } P = 0$$

$$c_p = D/P \text{ en } P = P \text{ als } P \geq P_{LB}$$

$$c_p = D/P_{LB} \text{ en } P = P \text{ als } P < P_{LB}$$

Vergelijking 6-1

Indien $P < P_{LB}$ is de concentratie die aan het neerslagwater wordt meegegeven (D/P_{LB}) nu te laag om de juiste stofgift voor de betreffende dag te bereiken (D/P). Daarom wordt het restant ($D - (D/P_{LB}) * P$) toegevoegd aan de dosis voor de volgende dag.

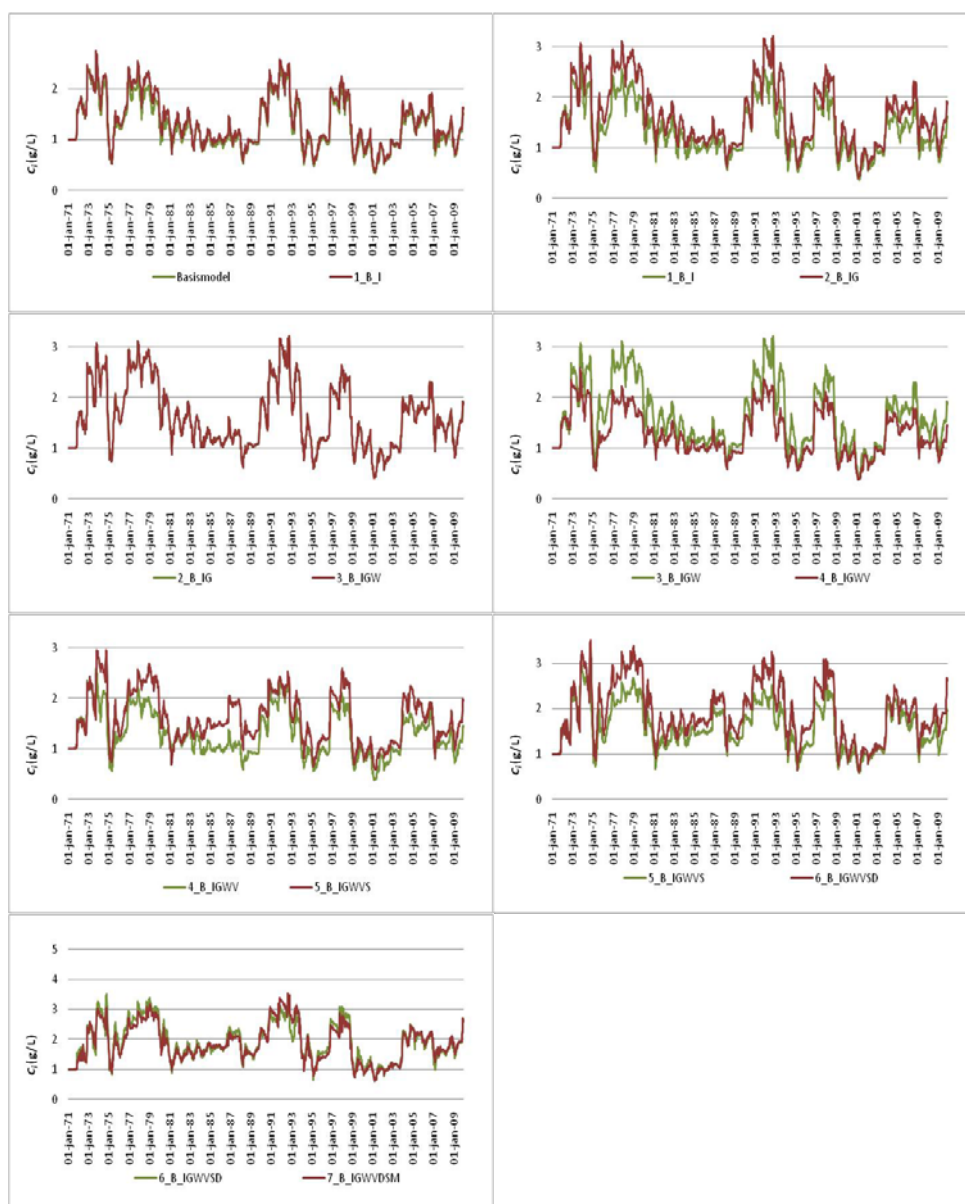
ad 7. Penman-Monteith. De laatste stap is de vervanging van de Makkinkreferentieverdamping door de Penman-Monteith-referentieverdamping. De hiervoor benodigde meteorologische invoervariabelen (minimum temperatuur, maximum temperatuur, etmaalgemiddelde temperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid en straling) stelt het KNMI op dagbasis beschikbaar via de website. Deze invoervariabelen zijn met behulp van een preprocessor ingelezen en verwerkt tot een SWAP-meteoinvoerbestand. De door het KNMI gepubliceerde relatieve luchtvochtigheid is hierbij omgerekend naar de door SWAP benodigde absolute luchtvochtigheid. Op basis van deze variabelen berekent SWAP zelf de Penman-Monteith-referentieverdamping.

6.4 Resultaten

Het effect van de introductie van het SWAP-concept voor interceptieverdamping is reeds hierboven getoond in Figuur 6-1. Na de hierboven beschreven aanpassing in de broncode geeft het SWAP-concept voor interceptie nagenoeg dezelfde resultaten als het ONZAT-concept.

Figuur 6-2 toont de invloed van alle overige, in de vorige paragraaf beschreven, concept- en parametrisatiewijzigingen. De vervanging van de parametrisatie van de gewasgroei (model 2_B_IG) resulteert in hogere indexconcentraties. De aanwezigheid van een constante wortelzone gedurende het gehele jaar in plaats van een zich ontwikkelende wortelzone gedurende 200 dagen van het jaar leidt tot een hogere gemiddelde verdamping en daardoor tot hogere concentraties in de grondwateraanvulling.

De veranderde parametrisatie van de Feddesfunctie (model 3_B_IGW) heeft geen enkel effect op de indexconcentraties. De opsplitsing van de potentiële evapotranspiratie in evaporatie en transpiratie via de LAI, in plaats van de aanname dat bodemverdamping niet optreedt (model 4_B_IGWV), resulteert in gemiddeld lagere indexconcentraties. De reden hiervoor is dat bij de onderzochte ontwateringsbasis het verschil tussen de potentiële en actuele transpiratie een stuk kleiner is dan het verschil tussen de potentiële en actuele evaporatie. De bodem kan aan een groot deel van de evaporatievraag niet voldoen, terwijl het gewas wel grotendeels kan voldoen aan de transpiratievraag. Toekenning van een deel van de potentiële evapotranspiratie aan evaporatie leidt in dit geval dus tot een lagere netto verdamping.

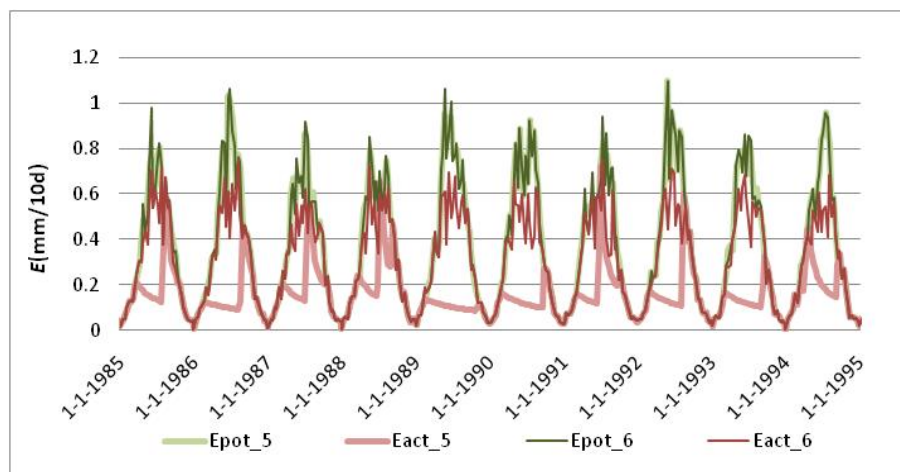


Figuur 6-2 Effect van het vervangen van de 'ONZAT-parametrisatie' door de 'STONE-parametrisatie' van het referentiegewas gras op de indexconcentraties. Ontwateringsbasis = 50 cm -mv. Weersdistrict = 1.

Het vervangen van de gemiddelde weersgegevens voor weersdistrict 1 door de gegevens afkomstig van het weersstation De Kooij (model 5_B_IGWVS) levert gemiddeld hogere indexconcentraties op. De reden is simpelweg dat het kuststation De Kooij droger is dan gemiddeld over het weersdistrict, terwijl de verdamping lichtelijk hoger is. Dit resultaat toont aan dat de ruimtelijke variatie in neerslag en verdamping binnen en tussen weersdistricten een aanzienlijke invloed kan hebben op de indexconcentraties en dat deze dus significant kunnen afwijken wanneer andere gegevens gebruikt worden.

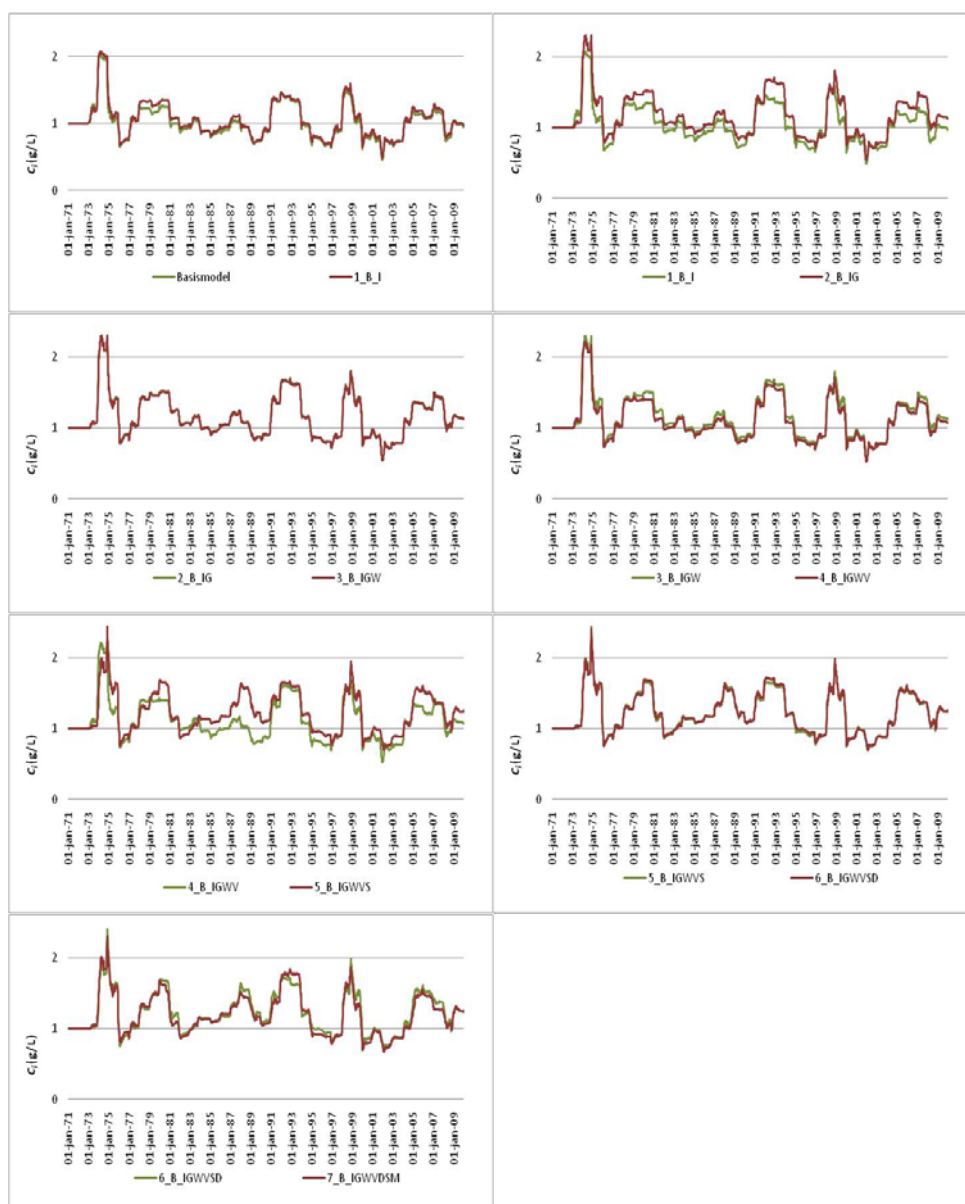
Als de decadewaarden voor neerslag en verdamping vervangen worden door dagwaarden (model 6_B_IGWVSD), levert dit gemiddeld hogere indexconcentraties op. Bij vergelijking van de waterbalansen van model 5_B_IGWVS en 6_B_IGWVSD blijkt dat dit toegeschreven kan worden aan een hogere actuele bodemverdamping

bij het rekenen met dagwaarden; alle andere termen van de waterbalans lopen in beide modellen gelijk op. Figuur 6-3 laat zien dat de bodemverdamping vooral plaatsvindt bij een erg natte toplaag, ofwel na erg natte perioden. Bij een droger wordende toplaag neemt de hydraulische doorlatendheid van de toplaag onevenredig snel af en daarmee de verdamping vanuit de bodem. Bij het gebruik van decadewaarden treden erg natte omstandigheden in de toplaag minder vaak op, waardoor de gemiddelde actuele bodemverdamping gereduceerd wordt.



Figuur 6-3 Illustratie van de verminderde actuele bodemverdamping in geval van weersinvoer van decadewaarden in plaats van dagwaarden. De berekeningen zijn uitgevoerd zonder interceptie. Epot_5 en Eact_5 = respectievelijk potentiële en actuele evaporatie, model 5_B_IGWVS. Epot_6 en Eact_6 = idem, voor model 6_B_IGWVSD.

Overstappen van de Makkinkreferentieverdamping op de Penman-Monteith-referentieverdamping levert beduidend hogere indexconcentraties op, omdat de Penman-Monteith-referentieverdamping gemiddeld zo'n 5 procent hoger ligt dan de Makkinkreferentieverdamping. Het is bekend dat Penman-Monteith hogere referentieverdampingswaarden geeft dan Makkink (Droogers, 2009). Om dezelfde potentiële verdamping te verkrijgen moet het gewas dus anders geparаметriseerd worden. Voor het verkrijgen van de figuur voor model 7_B_IGWVSDPM, waarin de indexconcentraties op hetzelfde niveau liggen als verkregen met model 6_B_IGWVSD, moest een gewasfactor van 0,9 aangenomen worden.



Figuur 6-4 Effect van het vervangen van de 'ONZAT-parametrisatie' door de 'STONE-parametrisatie' van het referentiegewas gras op de indexconcentraties. Ontwateringsbasis = 250 cm -mv. Weersdistrict = 1.

In Figuur 6-4 worden de resultaten gegeven van dezelfde berekeningen als getoond in Figuur 6-2, maar dan voor een diepere ontwateringsbasis (250 cm -mv). Wat aan deze resultaten opvalt, is dat bij deze diepere ontwateringsbasis de overstap op SWAP-concepten/parametrisaties een veel kleinere invloed heeft op de indexconcentraties dan bij de ondiepe ontwateringsbasis, waar via het effect op de bodemverdamping een relatief grote invloed te zien is. Dit is het resultaat van het feit dat de transpiratie nu in veel hogere mate beperkt wordt door de beschikbare hoeveelheid bodemvocht in de wortelzone. In een dergelijke situatie gaat een toekenning van een deel van de potentiële evapotranspiratie aan bodemverdamping veel minder ten koste van de totale actuele evapotranspiratie. Het rekenen met decadewaarden voor neerslag en verdamping heeft bij deze diepere ontwateringsbasis minder effect, omdat de verminderde bodemverdamping die dit

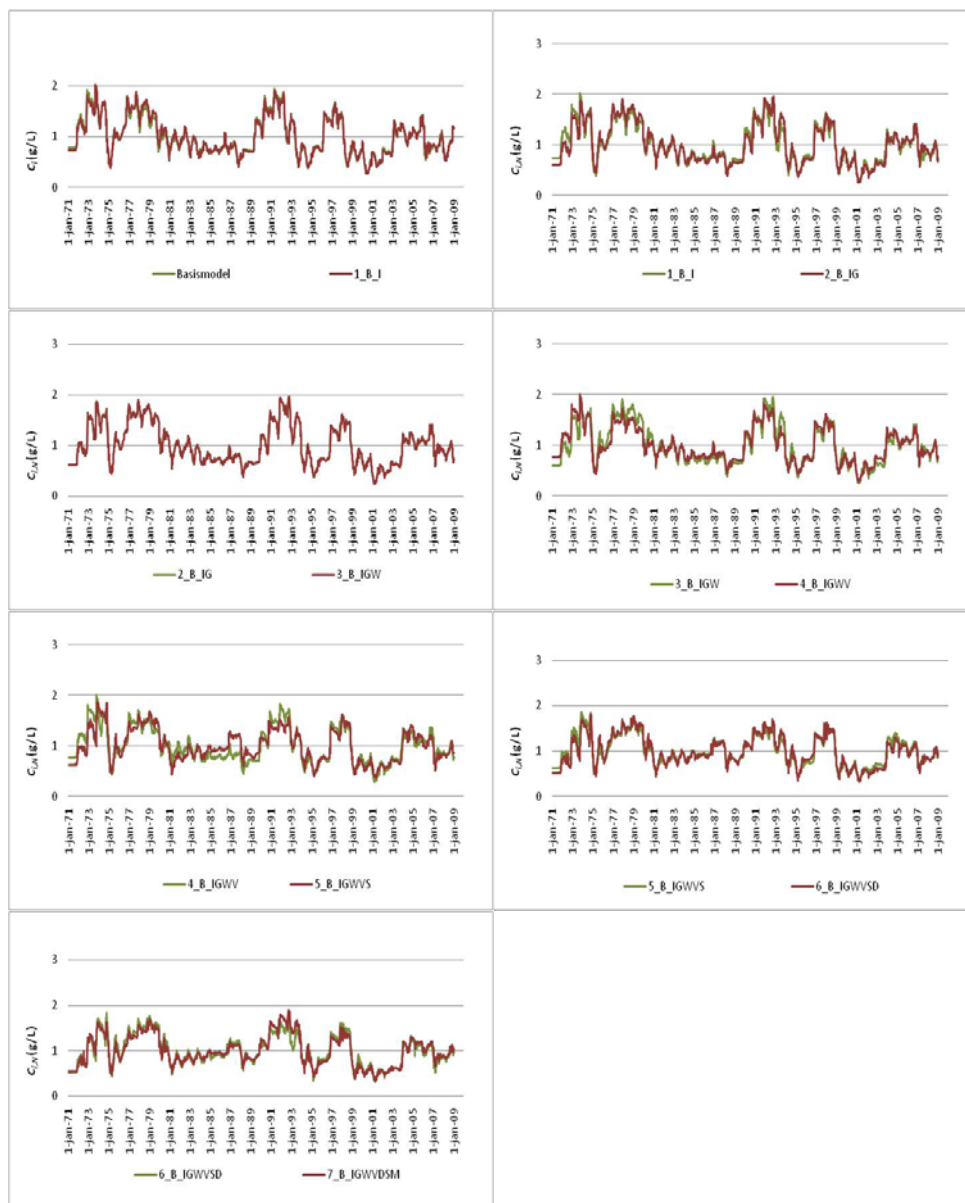
tot gevolg heeft nu sterker gecompenseerd wordt door een toename van de transpiratie.

De STONE-parametrisatie van de gewasgroei, die aangrijpt op de *actuele* evapotranspiratie, heeft evenals de overstap op een specifiek weerstation ook bij deze diepere ontwateringsbasis een groot effect op de indexconcentraties.

Tot nu toe zijn als modelresultaten steeds de indexconcentraties getoond en zijn de verschillen bekeken en verklaard die in deze indexconcentraties ontstaan indien modelconcepten en/of invoer gewijzigd worden. Uiteindelijk dienen de berekende indexconcentraties als invoer voor het regressiemodel dat de gecorrigeerde nitraatconcentraties berekent. In dit lineaire regressiemodel zullen twee reeksen van indexconcentraties, waarvan de ene gelijk is aan een vermenigvuldiging van de andere met een constante, precies dezelfde resultaten geven. Hetzelfde geldt voor twee reeksen waarvan de ene gelijk is aan de andere plus een constante. Het is daarom belangrijk te bekijken wat het effect van de modelaanpassingen is op de genormaliseerde indexconcentratie, waarmee hier bedoeld wordt de indexconcentratie gedeeld door de gemiddelde indexconcentratie van de reeks. Alleen als modelaanpassingen leiden tot (significante) veranderingen in de berekende genormaliseerde indexconcentraties kan dat significant andere gecorrigeerde nitraatconcentraties opleveren.

Figuur 6-5 laat daarom een genormaliseerde versie zien van Figuur 6-2. Het is duidelijk dat de aangepaste modellering slechts een vrij gering effect heeft op de genormaliseerde indexconcentraties. Dit geeft dus aan dat de verdamping vrij lineair reageert op de aangebrachte modelaanpassingen, en er weinig verschil is in hoe droge en natte perioden met de modelaanpassingen doorwerken in de indexconcentratie. De modelaanpassingen sorteren in relatief droge jaren een vergelijkbaar relatief effect op de verdamping als in relatief natte jaren. Het bovenstaande geldt niet voor de overstap naar de weersgegevens van een specifiek station, omdat dan het patroon van afwisseling tussen droge en natte perioden zelf wordt veranderd, wat uiteraard resulteert in een veranderd patroon van indexconcentraties. Het effect van de overstap naar de weersgegevens van een specifiek station op de genormaliseerde indexconcentraties is daarom groter (zie Figuur 6-5, vergelijking tussen model 4_BGWV en 5_BGWVS).

In de genormaliseerde versie van Figuur 6-3 (niet getoond) zijn de effecten uiteraard nog kleiner, omdat de effecten op de ongenormaliseerde indexconcentraties al veel kleiner waren bij deze diepere ontwateringsbasis. De overgang naar de weersgegevens van een specifiek station vormt hier weer een uitzondering op: het effect op de genormaliseerde indexconcentraties is daar vrij groot.



Figuur 6-5 Effect van het vervangen van de 'ONZAT-parametrisatie' door de 'STONE-parametrisatie' van het referentiegewas gras op de genormaliseerde indexconcentraties. Ontwateringsbasis = 50 cm -mv. Weersdistrict = 1.

6.5 Definitief migratiemodel

Bij de migratie van ONZAT naar SWAP wordt er voorlopig de voorkeur aan gegeven om vast te houden aan de huidige weersdistricten, aangezien de effecten van wijzigingen hierin beter eerst apart kunnen worden onderzocht. Voor deze districten zijn gemiddelde dagwaarden van neerslag en verdamping niet eenvoudig beschikbaar. Daarnaast zijn goede ruimtelijke interpolatiemethoden voor Penman-Monteith-referentieverdamping allesbehalve uitgekristalliseerd (Droogers, 2009+ Schuurmans en Droogers, 2009). Daarom is er voorlopig voor gekozen de indexconcentraties te berekenen volgens het model 4_B_IGWV, waarin de nieuwe gewasgroeiparametrisatie en een verdeling van de potentiële ET_{ref} in transpiratie en bodemverdamping als belangrijkste veranderingen ten opzichte van het ONZAT-model zijn opgenomen, maar waarin net als met ONZAT gewerkt wordt met over de

weersdistricten gemiddelde decadewaarden van de Makkinkreferentieverdamping (met gewasfactor $F_{\text{gewas}} = 0,8$).

Bijlage 4 geeft een overzicht van de resultaten voor de nieuwe indexconcentratieberekeningen volgens model 4_B_IGWV voor een selectie van weersdistricten en ontwateringsbases. Ter vergelijking zijn de oorspronkelijke ONZAT-resultaten ook gegeven. Te zien is dat bij een ontwateringsbasis van 50 cm -mv de SWAP-resultaten gemiddeld iets onder die van ONZAT liggen, bij een ontwateringsbasis van 100 cm -mv de resultaten vergelijkbaar zijn, en bij diepere ontwateringsbases de SWAP-resultaten boven die van ONZAT komen te liggen. Dit is het resultaat van de tegengestelde werking van de nieuwe gewasgroeiparametrisatie (resultierend in hogere indexconcentraties) en de opsplitsing van ET_{ref} in transpiratie en evaporatie op basis van de LAI (resultierend in lagere indexconcentraties). Bij een ondiepe ontwateringsbasis is het laatstgenoemde effect sterker dan het eerstgenoemde effect (zie ook Figuur 6-2). Dit effect neemt om bovengenoemde redenen echter sterk af met de diepte van de ontwateringsbasis. Het effect van de aangepaste gewasgroeiparametrisatie neemt minder snel af met de diepte van de ontwateringsbasis, doordat deze aanpassing aangrijpt op de actuele, in plaats van de potentiële verdamping. Bij diepere ontwateringsbases wordt het effect van de nieuwe gewasgroeiparametrisatie daardoor groter dan het effect van de opsplitsing van ET_{ref} in transpiratie en evaporatie op basis van de LAI (zie ook Figuur 6-4).

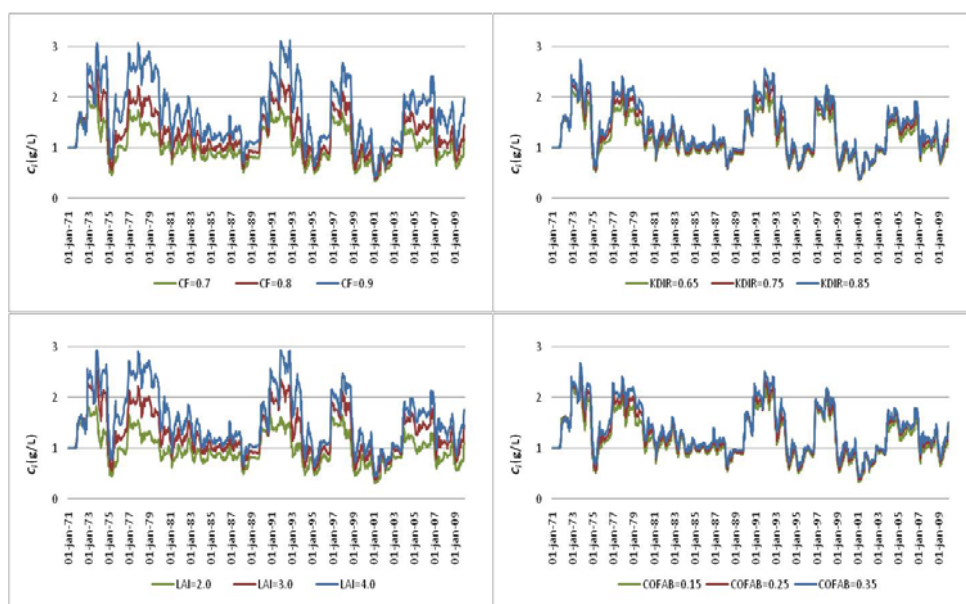
Tevens is te zien dat er een klein faseverschil optreedt als er grotere verschillen in indexconcentraties tussen ONZAT en SWAP zijn. Dit faseverschil is, net als het verschil in concentratieniveaus, het resultaat van de hogere verdamping in SWAP. Hierdoor neemt de gemiddelde verticale grondwaterstromingssnelheid af en reageert de concentratie in de bovenste meter van het grondwater trager op het neerslagoverschot.

Zoals op basis van de kleine verschillen in de berekende genormaliseerde indexconcentraties tussen het ONZAT-model en het migratiemodel is te verwachten, heeft toepassing van de met het migratiemodel berekende indexconcentraties in het variantieanalyse/regressiemodel geen statistisch significante verschillen opgeleverd ten opzichte van eerdere resultaten (verkregen met de met het ONZAT-model berekende indexconcentraties). Met beide reeksen indexconcentraties werd een vrijwel gelijk deel van de variantie in de metingen verklaard door weersinvloeden.

6.6 Nadere gevoeligheidsanalyse op het definitieve migratiemodel

6.6.1 Verdampingsgerelateerde modelparameters

Deze paragraaf gaat in op de gevoeligheid van de indexconcentraties op een aantal verdampingsgerelateerde modelparameters. Om een idee te krijgen van deze gevoeligheid worden (bescheiden) aanpassingen van de betreffende parameters toegepast, waarna het model opnieuw wordt doorgerekend. Hier wordt de gevoeligheid van het model voor de parameters r (de gewasafhankelijke stralingsextinctiecoëfficiënt), LAI (Leaf Area Index), F_{gewas} (de gewasfactor) en a_i (de empirische interceptiecoëfficiënt) getest. De toegepaste parameteraanpassingen zijn binnen redelijke grenzen gehouden, zodat de parameterwaarden realistisch bleven. De gevoeligheidsanalyse is voor twee verschillende ontwateringsbases uitgevoerd, te weten OB=50 en OB=250 cm -mv. De resultaten worden getoond in Figuur 6-6.



Figuur 6-6 Gevoeligheidsanalyse op, met de klok mee en startend vanaf linksboven, de gewasfactor, de extinctiecoëfficiënt, de empirische interceptiecoëfficiënt in Von Hoyningen-Hüne (1983) en Braden (1985) en de Leaf Area Index. OB = 50 cm -mv. Diepere ontwateringsbases geven lagere gevoeligheden.

De vier eerstgenoemde parameters betreffen alle parameters die betrekking hebben op de verdamping (hetzij interceptie-, hetzij gewas-, hetzij bodemverdamping). Omdat de onzekerheden van deze parameters niet zijn gekwantificeerd (en ook niet gekwantificeerd kunnen worden), zijn de gehanteerde aanpassingen van deze parameters niet onderling te vergelijken. Hetzelfde geldt daarom voor de gevoeligheden zoals getoond in Figuur 6-6. Men zou echter uit de resultaten kunnen afleiden dat een kleine aanpassing van de LAI en de gewasfactor al snel leidt tot significant andere waarden van de indexconcentraties, terwijl dat voor de extinctie- en interceptiecoëfficiënt veel minder het geval is.

Verder is het opvallend dat de gevoeligheid voor deze verdampingsgerelateerde parameters zich, in absolute zin, vooral steeds manifesteert in de reactie van de indexconcentratie op droge perioden. In droge perioden speelt de verdamping een relatief grotere rol in de waterbalans dan in natte perioden; een bepaalde hoeveelheid extra verdamping heeft dan een groter effect op de indexconcentratie.

De gevoeligheid voor r , LAI, F_{gewas} en a_i dempt uit met de diepte. Dit heeft te maken met het feit dat bij diepere ontwateringsbases de actuele transpiratie achterblijft bij de potentiële transpiratie. De potentiële transpiratie is dan veel minder beperkend dan bij ondiepere ontwateringsbases, waardoor parameteraanpassingen die aangrijpen op de hoeveelheid potentiële transpiratie minder effect hebben op de waterbalans.

Zoals in de vorige paragraaf is gemeld, is het in de huidige context vooral van belang in hoeverre de *genormaliseerde* indexconcentraties gevoelig zijn voor de modelparameters. Het blijkt dat zowel voor OB = 50 cm als voor OB = 250 cm de genormaliseerde indexconcentratie ongevoelig is voor de hier onderzochte parameters. Deze resultaten worden hier niet getoond, omdat dit zou neerkomen op het veelvuldig presenteren van (min of meer) dezelfde grafiek. De conclusie kan hier getrokken worden dat, hoewel de stoftransportmodellering gevoelig is voor enkele modelparameters, de methode voor de weerscorrectie van gemeten

nitraatconcentraties waar de transportmodellering onderdeel van is, ongevoelig is voor de hier onderzochte modelinstellingen.

6.6.2 *Enkele overige parameters*

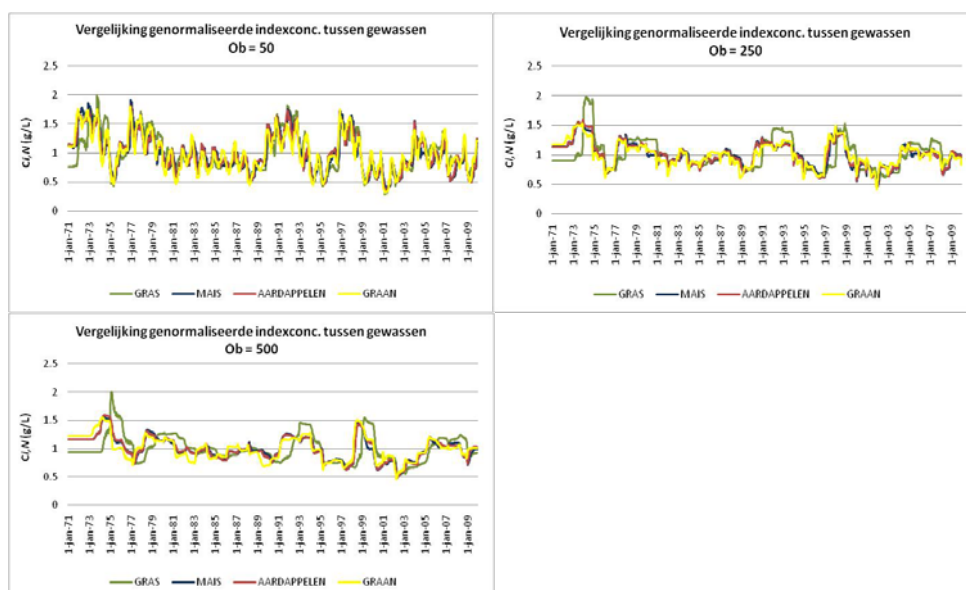
Rozemeijer et al. (2003) hebben eerder al de dispersielengte L_{dis} en de diffusiecoëfficiënt D_w aan een gevoeligheidsanalyse onderworpen. De dispersielengte is afhankelijk van bodemeigenschappen, de afstand waarover de stroming optreedt en de stromingssnelheid. Vooral de afhankelijkheid van de bodemeigenschappen maakt deze parameter variabel en onzeker. Vanwege de aanname van een homogeen bodemprofiel wordt in de indexconcentratieberekeningen een lage waarde voor D_L aangenomen. De diffusiecoëfficiënt D_{dis} is stofafhankelijk, maar omdat voor de indexconcentratieberekeningen een hypothetische stof wordt gemodelleerd, moet hiervoor een hypothetische en dus per definitie onzekere waarde worden aangenomen.

Op basis van hun berekeningen hebben Rozemeijer et al. (2003) geconcludeerd dat de indexconcentratie vrij gevoelig is voor L_{dis} en weinig gevoelig voor D_w . De gevoeligheid voor L_{dis} geldt ook voor de genormaliseerde indexconcentraties, omdat dispersie leidt tot een afvlakking van de pieken en dalen in het indexconcentratieverloop. Dat effect houdt ook na normalisatie stand.

6.6.3 *Invloed van keuze voor het gewas*

Tot op heden worden de indexconcentraties altijd berekend voor de combinatie gras op zand. Ook metingen afkomstig van percelen met een ander gewas of ander bodemtype worden gecorrigeerd met behulp van indexconcentraties die met een gras-op-zandmodel berekend zijn. In deze paragraaf wordt bekeken in hoeverre de aanname van een andere gewastype de indexconcentraties kan beïnvloeden.

Voor deze vergelijking is gebruik gemaakt van de door Alterra online (www.swap.alterra.nl) beschikbaar gemaakte SWAP-gewasvoerbestanden (.crp-bestanden) voor maïs, aardappelen en graan. Hierbij is voor maïs en aardappelen een groeiseizoen (van opkomst tot oogst) aangenomen dat loopt van 1 mei tot en met 15 oktober. Voor graan is een groeiseizoen aangenomen dat loopt van 1 april tot en met 31 juli. De resultaten van de vergelijking worden weergegeven in Figuur 6-7. Deze figuur toont de genormaliseerde indexconcentraties.



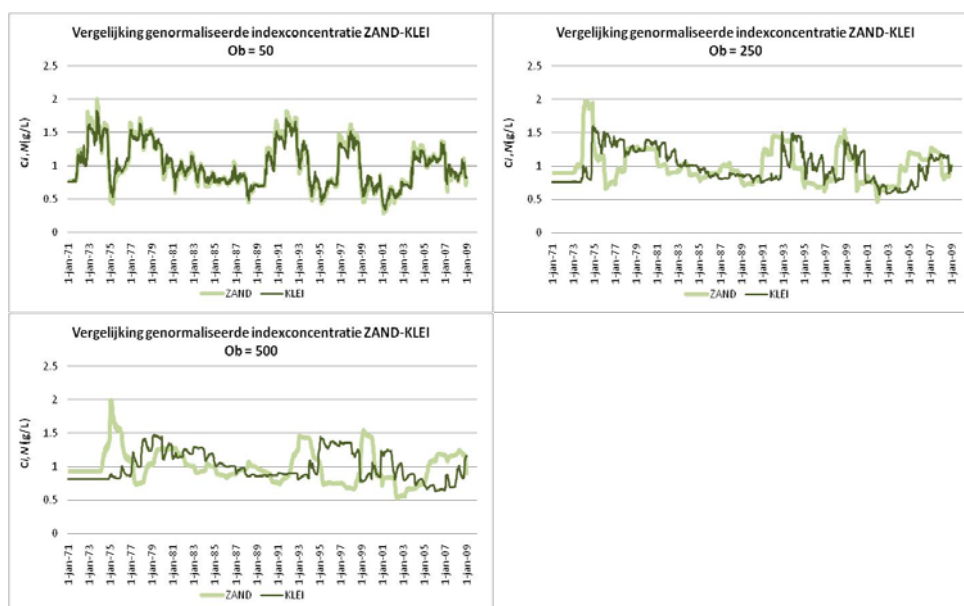
Figuur 6-7 Vergelijking van het verloop van de genormaliseerde indexconcentratie tussen de gewassen gras, maïs, aardappelen en graan.

Wat opvalt, is dat er wel duidelijke verschillen zijn tussen de reeks van indexconcentraties voor gras en de overige reeksen, maar dat de reeksen voor maïs, aardappelen en graan onderling weinig verschil vertonen. De belangrijkste verklaring hiervoor is het veel langere groeiseizoen van gras, waardoor gras over het gehele jaar genomen ook meer verdampt. De overige gewassen verdampen in een kortere periode (4-5 maanden), waarbij de maximale verdampingsnelheid echter wel veel hoger ligt dan die van gras. Het sterk afwijkende verdampingspatroon tussen gras enerzijds en de andere gewassen anderzijds, in combinatie met het feit dat het gras in totaal (veel) meer verdampt, leidt tot een duidelijk afwijkend indexconcentratieverloop. De verschillen in totale verdamping en verdampingspatroon tussen de overige gewassen zijn veel zwakker.

Dit resultaat geeft een aanwijzing dat, bij een eventueel te maken onderscheid in gewastype bij de berekening van indexconcentraties, het afdoende kan zijn onderscheid te maken in grasland enerzijds en bouwland anderzijds. In een vervolgstudie zal dieper worden ingegaan op de mogelijkheden de variatie in nitraatconcentraties beter te verklaren door onderscheid te maken in gewastypen.

6.6.4 Invloed van keuze voor het bodemtype

Figuur 6-8 laat zien wat de invloed op de (genormaliseerde) indexconcentraties kan zijn, indien er voor de berekening van indexconcentraties onderscheid gemaakt wordt naar bodemtype. Rozemeijer et al. (2003) hebben eerder al een grote ongevoeligheid geconstateerd, wanneer onderscheid gemaakt wordt tussen verschillende typen zandbodems (alle geparametriseerd aan de hand van de Staringreeks). Daarom wordt hier alleen gekeken naar het mogelijke effect van de vervanging van de tot nu toe gehanteerde parametrisatie voor zand door een klei-parametrisatie. Ter illustratie is hier het voorbeeld genomen van een kleiige boven- en ondergrond, waarbij voor de parametrisatie van de hydraulische karakteristieken de Van Genuchtenparameters zijn genomen die de Staringreeks geeft voor bouwstenen B10 en O11 (Wösten et al., 2001). De vervanging van deze Van Genuchtenparameters is de enige aanpassing aan het model.



Figuur 6-8 Vergelijking van het verloop van de genormaliseerde indexconcentratie tussen de bodemsoorten zand (Staringreeks bouwstenen B1 in combinatie met O1) en klei (Staringreeks bouwstenen B10 in combinatie met O11), voor drie verschillende ontwateringsbases (OB = 50, OB = 250 en OB = 500 cm).

De resultaten in Figuur 6-8 geven aan dat een andere keuze van bodemtype een grote invloed kan hebben op de indexconcentraties, en dus wellicht ook op de weerscorrectie van de nitraatconcentraties.

De Van Genuchtenparameters beïnvloeden de vorm van de retentiecurve (zie paragraaf 2.4.2, Vergelijking 2-13 tot en met 2-15). Daarmee beïnvloeden deze parameters onder andere de berging en dus ook de snelheid waarmee het infiltrerende water door de onverzadigde zone beweegt. Dit heeft invloed op het verloop van de indexconcentraties. Met een gevoeligheidsanalyse (waarvan de resultaten hier niet grafisch getoond worden) is nagegaan welke parameters de grootste invloed hebben.

De (genormaliseerde) indexconcentraties zijn ongevoelig voor aanpassingen van de hydraulische doorlatendheid bij verzadiging (K_s). Dit is toe te schrijven aan de dominante invloed van de gekozen onderrandvoorwaarde van het model, die de gemiddelde grondwaterstand op haar plek houdt. De onderrandvoorwaarde (gradiënt tussen de vaste stijghoogte van de diepe aquifer en de berekende stijghoogte op de onderrand van het model, in combinatie met een weerstand) vormt de beperkende factor voor de verticale waterbeweging. De onderrandvoorwaarde zorgt voor een geringe watervraag (bij ondiepere ontwateringsbases ook wateraanvoer), die gemakkelijk door de doorlatendheid van de bodem geleverd/verwerkt kan worden. Zolang de doorlatendheid van de bodemkolom de watervraag kan leveren die ontstaat vanuit deze randvoorwaarde, zal de waarde van die doorlatendheid van ondergeschikt belang zijn. Als de doorlatendheid te laag is, wordt de bodemkolom als het ware drooggetrokken: er wordt een grondwaterstand berekend die lager is dan de onderrand en dat conflicteert met de opgelegde onderrandvoorwaarde. SWAP geeft dan een foutmelding en stopt de berekening. In het tussentraject is de modelberekening wel gevoelig voor de doorlatendheden in de bodemkolom. De invloed van K_s op de waterbeweging is dan van dezelfde orde als de invloed van de randvoorwaarden.

De genormaliseerde en ongenormaliseerde indexconcentraties zijn eveneens ongevoelig voor realistische aanpassingen van het residueel vochtgehalte (θ_r). In de Staringreeks komen voor θ_r alleen waarden voor θ_r van 0,0, 0,1 en 0,2 voor. Het verschil tussen deze waarden is te klein om effect te hebben op het verloop van de indexconcentraties. Ook voor de turtuositeitsparameter (l) geldt dat realistische aanpassingen slechts een zeer beperkt effect hebben op de genormaliseerde indexconcentraties.

Anders is het voor de overige Van Genuchtenparameters: het vochtgehalte bij verzadiging (θ_s), de inverse van de luchtintreewaarde (a) en de poriëgrootteverdelingsindex (n). Realistische aanpassingen van deze parameters kunnen een voldoende groot effect hebben op de retentiecurve om een duidelijke invloed te hebben op de genormaliseerde indexconcentraties. Een vergroting van θ_s geeft uiteraard een grotere berging en daardoor langere reistijden naar het bovenste grondwater. Daardoor laat een vergroting van θ_s een vertraging zien van de reactie van de indexconcentraties op het weer. Een verkleining van a of n vergroot eveneens het watervasthoudend vermogen met daardoor een tragere respons van de indexconcentraties op het weer. De spreiding van θ_s , a , en n tussen de verschillende bouwstenen in de Staringreeks is voldoende groot om in deze gevoeligheidsanalyse een zichtbaar effect te geven op het verloop van de indexconcentraties.

Het grote effect van de vervanging van de Van Genuchtenparameters voor zand (Staringreeks bouwstenen B1 en O1) door die voor klei (bouwstenen B10 en O11) op de indexconcentraties is daarmee vooral het gevolg van de gevoeligheid van de berekening voor de Van Genuchtenparameters θ_s , a en n . Vergeleken met de zandgrond heeft de kleigrond voor beide bouwstenen een lagere waarde voor zowel a en n , en bovendien een hogere waarde voor θ_s voor de ondergrond (de waarde voor de bovengrond is gelijk). Al deze parameterwijzigingen werken ten opzichte van de zandbodem vertragend op het transport door de onverzadigde zone, doordat de hoeveelheid water die in de onverzadigde zone vastgehouden kan worden, vergroot wordt. Daardoor is het gesommeerde resultaat van de overgang van de zandbodem B1-O1 naar de kleibodem B10-O11 een vrij grote vertraging van de reactie van de indexconcentratie op het neerslagoverschot.

In een vervolgstudie zal dieper ingegaan worden op de mogelijkheden om de variatie in nitraatconcentraties beter te verklaren door onderscheid te maken in bodemtypen.

7 Conclusies

SWAP is beter geschikt dan HYDRUS-1D om ONZAT te vervangen voor het uitvoeren van de indexconcentraties. HYDRUS-1D mist de flexibiliteit om een Cauchy-onderrandvoorwaarde op te leggen waarbij een opwaartse flux over de onderrand gesimuleerd kan worden. Met de opties voor onderrandvoorwaarden die HYDRUS-1D biedt, kan het grondwaterstandsverloop dat met ONZAT berekend wordt, niet nagebootst worden.

Om SWAP geschikt te maken voor het uitvoeren van de indexconcentratieberekeningen zijn echter wel een aantal aanpassingen aan de code noodzakelijk. Deze betreffen:

- Het toevoegen van de mogelijkheid om een constante dosis stof aan de neerslag toe te voegen. In origineel SWAP is het alleen mogelijk om een in de tijd constante *concentratie* aan de neerslag toe te kennen.
- Het doorschuiven van de dosis stof naar de volgende tijdstap indien er geen of slechts een hele lage hoeveelheid neerslag valt.
- Het aan de dosis van de volgende tijdstap toevoegen van de hoeveelheid stof die in de huidige tijdstap met het verdampen van interceptiewater 'verdwijnt', doordat SWAP aanneemt dat de stofconcentratie in de neerslag geldt voor de netto neerslag (na interceptie) in plaats van de bruto neerslag.

Dankzij de publieke beschikbaarheid van de broncode van SWAP en de heldere structuur ervan waren de bovenstaande aanpassingen eenvoudig voor de huidige studie door te voeren.

De STONE-parametrisatie van SWAP-berekeningen voor grasland is op een aantal punten belangrijk anders dan de in de huidige ONZAT-berekeningen gehanteerde parametrisatie. De belangrijkste verschillen zijn:

- In STONE is het grasland permanent, met een constante dikte van de wortelzone en een constante LAI, terwijl in de ONZAT-berekeningen het gras alleen van de 100ste tot de 300ste dag van het jaar aanwezig is, met een gedurende deze periode groeiende wortelzone. Indien de parametrisatie van STONE op dit punt wordt overgenomen, leidt dat tot een gemiddeld hogere verdamping en daardoor tot hogere indexconcentraties bij alle ontwateringsbases.
- In STONE wordt de potentiële evapotranspiratie opgesplitst in potentiële transpiratie en potentiële evaporatie (bodemverdamping), terwijl in de ONZAT-berekeningen aangenomen wordt dat er geen bodemverdamping plaatsvindt. Indien de STONE-implementatie op dit punt wordt overgenomen, leidt dat bij ondiepe ontwateringsbases tot een gemiddeld lagere verdamping en daarmee tot lagere indexconcentraties. Bij diepere ontwateringsbases dempt het effect uit.

Andere verschillen zijn te vinden in de parametrisatie van de verdampingsreductiefunctie en het interceptieconcept, maar het effect van deze verschillen op de indexconcentraties is gering. Hetzelfde geldt voor de overstap van de oude Staringreeks (Wösten et al., 1987) naar de nieuwe Staringreeks/Van Genuchtenparameters.

- Het rekenen met dagwaarden van meteorologische invoer in plaats van decadewaarden leidt bij een ondiepe ontwateringsbasis tot een hogere bodemverdamping, doordat de erg natte omstandigheden waaronder veel bodemverdamping optreedt, niet meer uitgemiddeld worden over langere perioden. Hierdoor zijn bij ondiepe ontwateringsbases de berekende indexconcentraties hoger wanneer met dagwaarden gewerkt wordt. Bij diepere ontwateringsbases dempt het netto effect hiervan uit, doordat de transpiratie toeneemt.
- Het effect op de indexconcentraties van een overstap op Penman-Monteith-referentieverdamping is gering. Doordat Penman-Monteith jaargemiddeld zo'n 10 procent hoger ligt dan Makkink, dient hiervoor wel gecorrigeerd te worden via het gebruik van geschikte gewasfactoren. In Nederland is nog weinig ervaring opgedaan met Penman-Monteith in combinatie met gewasfactoren, omdat Makkink lang de regerende verdampingsberekeningsmethode is geweest. Het verzamelen van literatuurgegevens omtrent gewasfactoren voor Penman-Monteith is een aanbeveling uit een recente studie in opdracht van de STOWA (Droogers, 2009). Indien het referentiegewas wordt aangehouden, ligt de referentieverdamping jaargemiddeld echter ongeveer 10 procent hoger dan de Makkinkreferentieverdamping. Het referentiegewas voor Makkink is dus anders dan het referentiegewas voor Penman-Monteith.
- De met de overgang van ONZAT naar SWAP doorgevoerde veranderingen in modelconcepten en parametrisaties sorteren slechts een gering effect op de *genormaliseerde* indexconcentraties, en daardoor een niet significant effect op het deel van de variatie in de metingen dat aan weersinvloeden toegeschreven kan worden.
- De indexconcentraties zijn gevoelig voor de keuze van het gewas en de bodemsoort, en het onderscheid naar gewas en bodemtype kan dus belangrijk zijn voor de weerscorrecties. Daarbij moet opgemerkt worden dat de resultaten voor maïs, aardappelen en graan onderling veel minder sterk verschillen dan wanneer deze resultaten vergeleken worden met de resultaten voor grasland. Bij verdere differentiatie van de concentratie-indexberekeningen naar landgebruik is het daarom mogelijk dat volstaan kan worden met een onderscheid tussen grasland en bouwland.

Referenties

- Boumans, L.J.M. en B. Fraters (2011) Nitraatconcentraties in het bovenste grondwater van de zandregio en de invloed van het mestbeleid. Visualisatie afname in de periode 1992 tot 2009. RIVM Rapport 680717020.
- Boumans, L.J.M., G. van Drecht, B. Fraters, T. de Haan, W. de Hoop (1997). Effect van neerslag op nitraat in het bovenste grondwater onder landbouwbedrijven in de zandgebieden; gevolgen voor de inrichting van het Monitoringnetwerk effecten mestbeleid op Landbouwbedrijven (MOL). Bilthoven, RIVM Rapport 714831002.
- Braden, H. (1985). Ein Energiehaushalts- und Verdunstungsmodell for Wasser und Stoffhaushaltsuntersuchungen landwirtschaftlich genutzter Einzugsgebiete. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*, 42, 294-299.
- CHO-TNO (1987). Evaporation and weather. Proceedings of Technical Meeting 44.
- Droogers, P. (2009). Verbetering bepaling actuele verdamping voor het strategisch waterbeheer definitiestudie. STOWA rapport 2009-11. Utrecht, STOWA.
- Hendriks, B., L.J.M. Boumans (2002). Neerslagcorrectiemethode voor provinciale nitraatgegevens. Onderzoek naar de mogelijkheid om de correctiemethode van het RIVM, waarbij nitraatconcentraties in het bovenste grondwater van landbouwgronden gecorrigeerd worden voor weersinvloeden, aan te passen voor de provinciale meetnetten. Interprovinciaal Overleg (IPO). (http://www.ipo.nl/sites/default/files/documents/neerslagcorrectiemethode_voor_provinciale_nitraatgegevens.pdf)
- Hoffman, G. J., and M. Th. van Genuchten (1983). Soil properties and efficient water use: Water management for salinity control. In: H. M. Taylor, W. R. Jordan, and T. R. Sinclair (eds.), *Limitations and Efficient Water Use in Crop Production*, Am. Soc. Of Agron., Madison, WI, pp. 73-85.
- Hopmans, J.W., and J.N.M. Stricker (1989). Stochastic analysis of soil water regime in a watershed, *J. Hydrology*, 105, 57-84.
- Kroes, J.G., J.C. van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks en C.M.J. Jacobs (2008). SWAP version 3.2. Theory description and user manual. Alterra-rapport 1649.
- Kroes, J.G., P.J.T. van Bakel, J. Huygen, T. Kroon en R. Pastoors (2001). Actualisatie van de hydrologie voor STONE 2.0. Alterra-rapport 298.
- Massop, H.Th.L., P.J.T. van Bakel, J.G. Kroes, A. Tiktak & W. Werkman (2005). Op zoek naar de 'ware' neerslag en verdamping; Toetsing van de met het STONE 2.1-instrumentarium berekende verdamping aan literatuurgegevens en aan regionale waterbalansen, en de gevoeligheid van het neerslagoverschot op de uitspoeling van nutriënten. Alterra rapport 1158. Wageningen, Alterra.
- OECD (1989). Compendium of environmental exposure assessment methods for chemicals. *OECD Environ. Monogr.* 27:181-188.
- Ritchie, J.T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8, 1204-1213.
- Rozemeijer, J.C., B. van der Grift, N.G.F.M. van Aa en H.P. Broers (2003). De correctie van grondwaterkwaliteitsmetingen voor de invloed van variaties in neerslag- en verdampingshoeveelheden. TNO-rapport 03-184-C. TNO-NITG, Utrecht.

- Šimůnek, J., M. Th. van Genuchten, and M. Šejna (2005). The Hydrus-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 3.0, HYDRUS Software Series 1, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, CA.
- Šimůnek, J., M. Šejna, and M. Th. van Genuchten (1998). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 1.0. IGWMC - TPS - 70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- Schuurmans, J.M. en P. Droogers (2009). Penman-Monteith referentieverdamping: inventarisatie beschikbaarheid en mogelijkheden tot regionalisatie. Future Water rapport 86. Wageningen, Future Water.
- Van Drecht, G. (1985). Toetsing van model ONZAT m.b.v. meetgegevens uit het hydrologisch proefgebied "Hupselse Beek". Bilthoven, RIVM rapport 847211001.
- Von Hoyningen-Hüne, J., 1983. Die Interception des Niederschlags in landwirtschaftlichen Beständen. Schriftenreihe des DVWK 57, 1-53.
- Vogel, T., M.Th. van Genuchten en M. Císlerová (2000). Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. Advances in Water Resources 24, pp. 133-144.
- Von Hoyningen-Hüne (1983). Die Interception des Niederschlags in landwirtschaftlichen Beständen. Schriftenreihe des DVWK 57, 1-53.
- Werkgroep Landbouwkundige Aspecten (LAGO) (1984). Landbouwkundige aspecten van grondwateronttrekking. CoGroWa, Utrecht.
- Walsum, P.E.V. van, A.A. Veldhuizen, P.J.T. van Bakel, F.J.E. van der Bolt, P.E. Dik, P. Groenendijk, E.P. Querner, M.F.R. Smit (2004). SIMGRO 5.0.1, Theory and model implementation. Alterra-rapport 913.1. Wageningen.
- Wösten, J.H.M., M.H. Bannink en J. Beuven. 1987. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland; de Staringreeks. STIBOKA rapport 1932 (ICW rapport 18). Wageningen.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman en J. Stolte (1994). Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van bodem- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 1994. SC-DLO Technisch Document 18. Wageningen.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman, W.J.M. de Groot en J. Stolte (2001). Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van bodem- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 2001. Alterra-rapport 153. Wageningen.

Bijlage 1 Invoer van het ONZAT-model

Deze bijlage geeft de invoer van het in hoofdstuk 3 gehanteerde ONZAT-model, voor OB = 50 cm -mv. Deze invoer is identiek aan de invoer van het ONZAT-model dat op dit moment bij het RIVM gebruikt wordt voor de indexconcentratieberekeningen ten behoeve van de correctie van nitraatmetingen in het kader van het LMM. Dat geldt niet voor de waarde voor a in Figuur B1-1, waar in hoofdstuk 3 de waarde 1,0 voor wordt gehanteerd, terwijl in het oorspronkelijke model voor a de waarde 0,5 is gekozen. Zie ook Paragraaf 3.1.3.

De in dit rapport besproken parameters worden hieronder in blauw aangegeven. Parameters en instellingen die geen functie hebben in de indexconcentratieberekeningen (bijvoorbeeld doordat zij betrekking hebben op modelopties die niet gebruikt worden), zijn grijs gemaakt.

start-file voor onzat

15000 10	simulation time, time step output
1	on/off switch for writing the time dependent boundary values
1	on/off switch for writing the profiles of H_p , etc.
0.001	maximum (absolute) breakoff error for pressure head
0.001	maximum relative breakoff error for pressure head
1.e-30	breakoff error to avoid instability around zero !
20 10	maximum normal and extra iterations
5 1.5	minimum iterations and multiplication factor timestep
20 0.5	maximum iterations and multiplication factor timestep
0.06 0.3	minimum and maximum time step
0 -50	soil surface level, initial hydr. head lower bound
50	C_1 (flow resistance of the aquifer)
0	N_{sw} (number of ditches)
20	Z_{bed} (depth of ditches below soil surface level, N_{sw} values)
20	C_2 (drainage resistance)
-100	$\phi_{sw,0}$ (initial surface water level)
1	on/off switch for calculating steady state flow
0.	initial extraction rate roots
0.0	initial infiltration flux soil surface
0.1	initial steady state flow rate in column (downward positive)
0.001	maximum relative error in initial steady state flow rate
1.0	infiltration capacity
1.0	maximum storage of water on the soil surface
0	on/off switch irrigation model
11	irrigation interval
2.5	irrigation gift
0.05	minimum reduction of transpiration (treshold value before irrigation)
-310 -16000	h_3 and h_4 (reduction point and wilting point (pressure head))
1.0	a (power reduction function)
0.5	maximum extraction intensity of roots
10 50	$L_{R,MIN}$ and $L_{R,MAX}$ (minimum and maximum rootzone depth)
1.0	f_g (growing factor rootzone)
100 300 365	n_{start} and n_{end} (start and end time growing season) and increment
1	on/off switch for calculating transport
0	uptake-fraction of solutes

Figuur B1-1 Het ONZAT-invoerb Bestand Start.dat zoals gebruikt in de ONZAT-berekening van hoofdstuk 3 voor scenario OB = 50 (ontwateringsbasis = 50 cm -mv).

z	K-Hp	Th-Hp	Hpchem.prop		c₀
0	1	1	0	1	1
10	1	1	0	1	1
20	1	1	0	1	1
30	1	1	0	1	1
40	1	1	0	1	1
50	1	1	0	1	1
60	101	101	0	101	1
70	101	101	0	101	1
80	101	101	0	101	1
90	101	101	0	101	1
100	101	101	0	101	1
110	101	101	0	101	1
120	101	101	0	101	1
130	101	101	0	101	1
140	101	101	0	101	1
150	101	101	0	101	1
160	101	101	0	101	1
170	101	101	0	101	1
180	101	101	0	101	1
190	101	101	0	101	1
200	101	101	0	101	1
210	101	101	0	101	1
220	101	101	0	101	1
230	101	101	0	101	1
240	101	101	0	101	1
250	101	101	0	101	1
260	101	101	0	101	1
270	101	101	0	101	1
280	101	101	0	101	1
290	101	101	0	101	1
300	101	101	0	101	1

Figuur B1-2 Het ONZAT-invoerbestand Profile.dat in de ONZAT-berekening van hoofdstuk 3 voor scenario OB = 50 (ontwateringsbasis = 50 cm -mv). Per knooppunt wordt de diepte z gegeven, de referentiecode voor het bodemtype (deze referentiecode komt terug in de invoerbestanden K_Hp.dat en Th_Hp.dat (databases met de Staringreeks, hier niet gegeven) en Chemo.dat, de initiële drukhoogte en de initiële stofconcentratie.

```

soiltype 1      header
1 0            soil type reference code, nr. of Sc-Cw pairs adsorption isotherm (NP)
1200000 0 0     $\rho_b$  (dry bulk density), half-life time in water, half-life time adsorbed
1.0 0.5 0.5 5.0  $D_w$   $a$   $b$   $L_{dis}$ 
soiltype 101   header
101 0         soil type reference code, nr. of Sc-Cw pairs adsorption isotherm (NP)
1600000 0 0     $\rho_b$  (dry bulk density), half-life time in water, half-life time adsorbed
1.0 0.5 0.5 5.0  $D_w$   $a$   $b$   $L_{dis}$ 

```

Figuur B1-3. Het ONZAT-invoerbestand Chemo.dat zoals gebruikt in de ONZAT-berekening van hoofdstuk 3 voor scenario OB = 50 (ontwateringsbasis = 50 cm -mv).

```

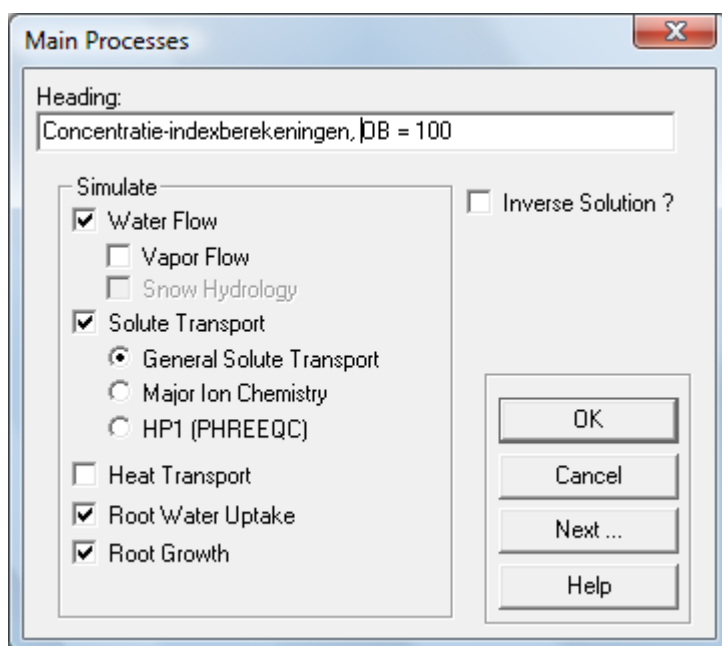
1971 2009      start resp. end year of simulation
0.1            $I_{MAX}$  (max. capacity of interception reservoir)
0.0           $F_{red}$ 
2            vegetation reference code
-50          $\phi_{aquifer}$ 
1 -100       surface_water_levels
0 0 0 0      concentration boundaries (cwprec,cwirr,cwaq,cwslt)
0 0.1 0      application-day,  $D$  (dose), dose (water)

```

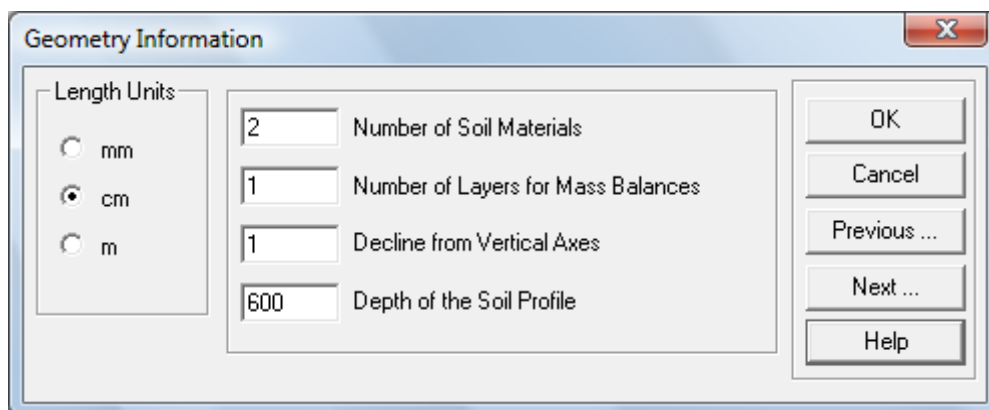
Figuur B1-4. Het invoerbestand Bound.dat van de ONZAT-preprocessor Bound zoals gebruikt in de ONZAT-berekening van hoofdstuk 3 voor scenario OB = 50 (ontwateringsbasis = 50 cm -mv). De 'vegetation reference code' komt terug in het Bound-invoerbestand Coverfac.dat met tijdsafhankelijke gewasfactoren en verwijst op die manier naar het uit dat bestand in te lezen gewasstype.

Bijlage 2 Invoer van het HYDRUS-1D-model

Deze bijlage geeft de invoer weer van het HYDRUS-1D-model zoals gehanteerd voor de berekeningen van hoofdstuk 4. HYDRUS-1D kent een zeer gebruiksvriendelijk Graphical User Interface (GUI). Hieronder wordt getoond hoe deze GUI is ingevuld voor de berekeningen van hoofdstuk 4, voor OB = 100 cm -mv.

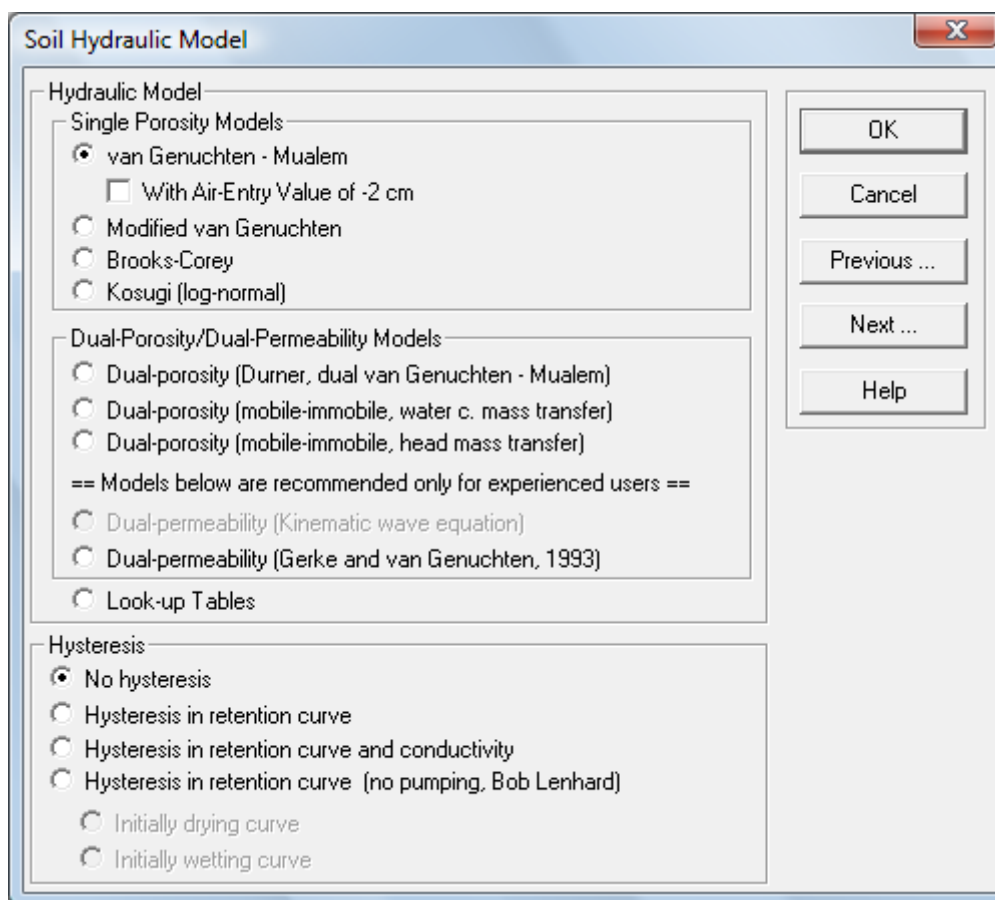


Figuur B2-1 Dialoogvenster voor de keuze van de te simuleren processen in de GUI van HYDRUS-1D. Voor het berekenen van de indexconcentraties is het simuleren van waterstroming, eenvoudig stoftransport, vochtopname door de wortels en wortelgroei noodzakelijk.



Figuur B2-2 Dialoogvenster voor het opgeven van de geometrie van het model in de GUI van HYDRUS-1D. In de indexconcentratieberekeningen worden twee bodemtypes onderscheiden, een boven- en een ondergrond. Het aantal lagen voor massabalansen is een uitvoeroptie. Er wordt een verticale bodemkolom gemodelleerd, vandaar dat de afwijking van de verticale as (opgegeven als cosinus van de hoek tussen de modelkolom en de verticaal) 1 is.

Figuur B2-3 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor het opgeven van de tijdseenheid, tijdsdiscretisatie en informatie met betrekking tot hoe de tijdsafhankelijke randvoorwaarden ingevoerd worden. De gesimuleerde periode 1971-2009 bestaat uit 14240 dagen. De tijdsafhankelijke randvoorwaarden worden niet uit meteorologische informatie door HYDRUS-1D zelf berekend, maar worden in de modelinvoer opgegeven. De stressperiode in de HYDRUS-1D-berekeningen is tien dagen, wat betekent dat er gegevens voor 1424 stressperioden nodig zijn.



Figuur B2-4 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor de keuze van het bodemhydraulische model. Zoals beschreven in hoofdstuk 4 wordt voor de bodemhydraulische eigenschappen het Van Genuchten–Mualemmodel gebruikt en wordt geen hysteresis gesimuleerd. Het gebruik van de optie van de 'Air-Entry Value of -2 cm' wordt in de HYDRUS-1D-handleiding aanbevolen voor bodems met een fijne textuur. Voor deze discussie wordt verwezen naar de handleidingen van HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 2005) en SWAP (Kroes et al., 2008).

Mat	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	l
1	0.02	0.43	0.0234	1.801	23.41	0
2	0.01	0.36	0.0224	1.951	15.22	0

Soil Catalog: Neural Network Prediction: Temperature Dependence:

Buttons: OK, Cancel, Previous ..., Next ..., Help

Figuur B2-5 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor de invoer van de Van Genuchtenparameters θ_r , θ_s , S_e , K_s , l en n .

Upper Boundary Condition:

- Constant Pressure Head
- Constant Flux
- Atmospheric BC with Surface Layer
- Atmospheric BC with Surface Run Off
- Variable Pressure Head
- Variable Pressure Head/Flux

Lower Boundary Condition:

- Constant Pressure Head
- Constant Flux
- Variable Pressure Head
- Variable Flux
- Free Drainage
- Deep Drainage
- Seepage Face; $h =$
- Horizontal Drains

Initial Condition:

- In Pressure Heads
- In Water Contents

Atmospheric BC:

- Input PET and LAI

Buttons: OK, Cancel, Previous, Next, Help

1 Max h at Soil Surface

Figuur B2-6 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor de keuze van de randvoorwaarden voor waterstroming. De hier getoonde keuzes worden alle toegelicht in hoofdstuk 4. Met 'Max h at Soil Surface' wordt de in hoofdstuk 2 geïntroduceerde variabele h_{MAX} bedoeld.

Horizontal Drains Boundary Condition X

Drained System

- Homogeneous profile, drain on top of impervious layer
- Homogeneous profile, drain above impervious layer
- Heterogeneous profile, drain at interface between both soil layers
- Heterogeneous profile, drain in bottom layer
- Heterogeneous profile, drain in top layer

Drainage Parameters

Coordinate of the bottom of drainage	<input type="text" value="-100"/>	<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Previous"/> <input type="button" value="Next"/> <input type="button" value="Help"/>
Coordinate of the impervious layer	<input type="text" value="-2500"/>	
Drain spacing	<input type="text" value="4000"/>	
Horizontal Ks above drain	<input type="text" value="76.1"/>	
Entrance resistance into drains/ditches	<input type="text" value="10"/>	
Wet Perimeter	<input type="text" value="50"/>	

Figuur B2-7 Dialoogvenster van de GUI van HYDRUS-1D voor de keuze en parametrisatie van de drainagerandvoorwaarde naar horizontale drains. De drainageparameters zijn, van boven naar onder, de in hoofdstuk 4 geïntroduceerde variabelen z_d , z_{ol} , d_d , $K_{h,sr}$, C_3 en w .

Solute Transport

Time Weighting Scheme

- Explicit Scheme
- Crank-Nicholson Scheme
- Implicit Scheme

Space Weighting Scheme

- Galerkin Finite Elements
- Upstream Weighting FE
- GFE with Artificial Dispersion

Mass Units: Stability Criterion:

Dependence on Environmental Factors

- Temperature Dependence of Transport and Reaction Parameters
- Water Content Dependence of Transport and Reaction Parameters

Nonequilibrium Solute Transport Models

- Equilibrium Model
- One-site sorption model (Chemical Nonequilibrium)
- Two-site sorption model (Chemical Nonequilibrium)
- Two Kinetic Sites Model (Particle Transport Using Attachment/Detachment, Chemical Nonequilibrium)
- Two Kinetic Sites Model (Based on Filtration Theory, Chemical Nonequilibrium)
- Dual-Porosity (Mobile-Immobile Water) Model (Physical Nonequilibrium)
- Dual-Porosity Model with Two-Site Sorption in the Mobile Zone (Physical and Chemical Nonequilibrium)
- Dual-Permeability Model (Physical Nonequilibrium)
- Dual-Permeability Model with either Immobile Water in the Matrix or Kinetic Sorption (Physical and Chemical Nonequilibrium)

Iteration Criteria - Only for Nonlinear Problems

- Absolute Concentration Tolerance
- Relative Concentration Tolerance
- Maximum Number of Iteration

Tortuosity

- Use Tortuosity Factor
- Millington & Quirk
- Moldrup

Number of Solutes:

Pulse Duration:

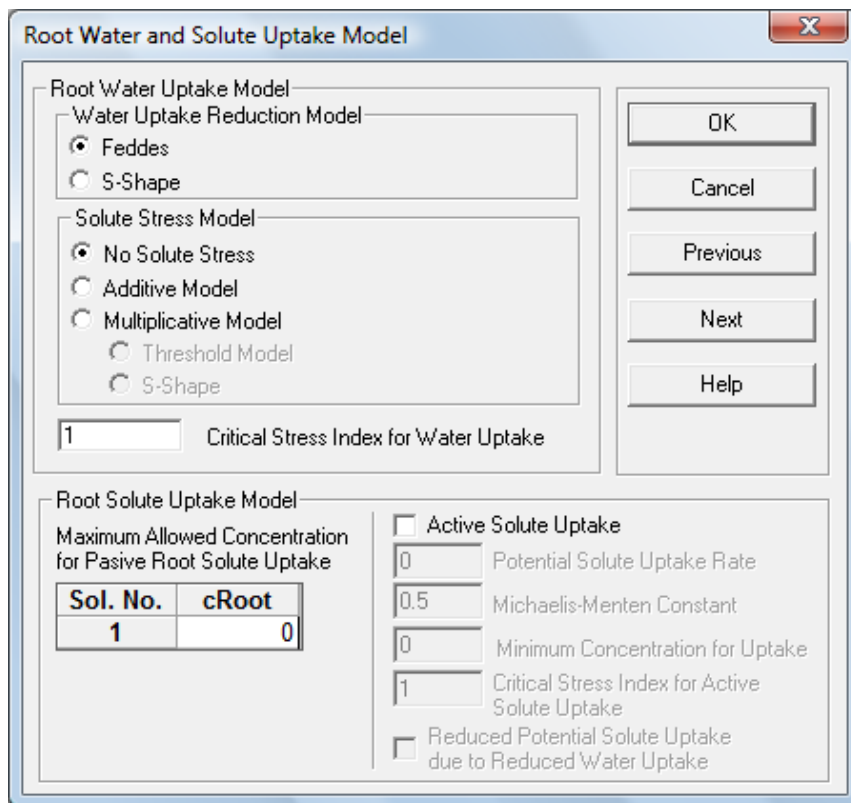
OK
Cancel
Previous ...
Next ...
Help

Figuur B2-8 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor enkele algemene keuzes ten aanzien van de transportberekening. Het stabiliteitscriterium betreft het product van het Pecletgetal en het Courantgetal, waarvoor de waarde 2 wordt aanbevolen door Simunek et al. (2005).

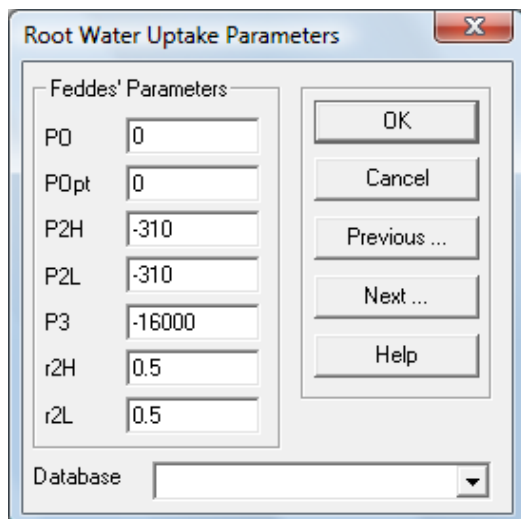
Soil Specific Parameters:					Solute Specific Parameters:		
Mat	Bulk.D.	Disp.	Frac = 1	Thlm = 0	Sol	Difus. W.	Difus. G.
1	1200000	5	1	0	1	1	0
2	1600000	5	1	0			

Figuur B2-9 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor invoer van de transportparameters. 'Bulk.D.' = ρ_b (droge bulkdichtheid), 'Disp.' = D_L (dispersielengte) en 'Difus. W.' = D_w (diffusiecoëfficiënt in vrij water). 'Frac' en 'Thlm' doen er in ons geval van conservatief transport niet toe en staan als default op resp. 1 en 0. Er wordt tevens geen transport in de gasfase gesimuleerd, dus 'Difus. G.' is ook irrelevant.

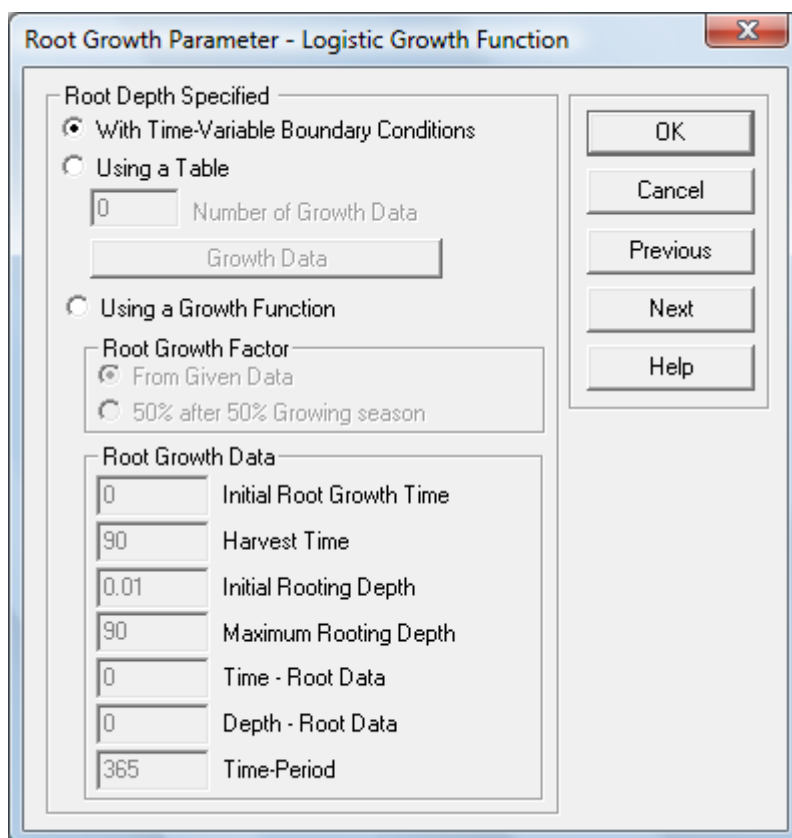
Figuur B2-10 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor de keuze van de randvoorwaarden voor transport. De gemaakte keuzes worden besproken in hoofdstuk 4.



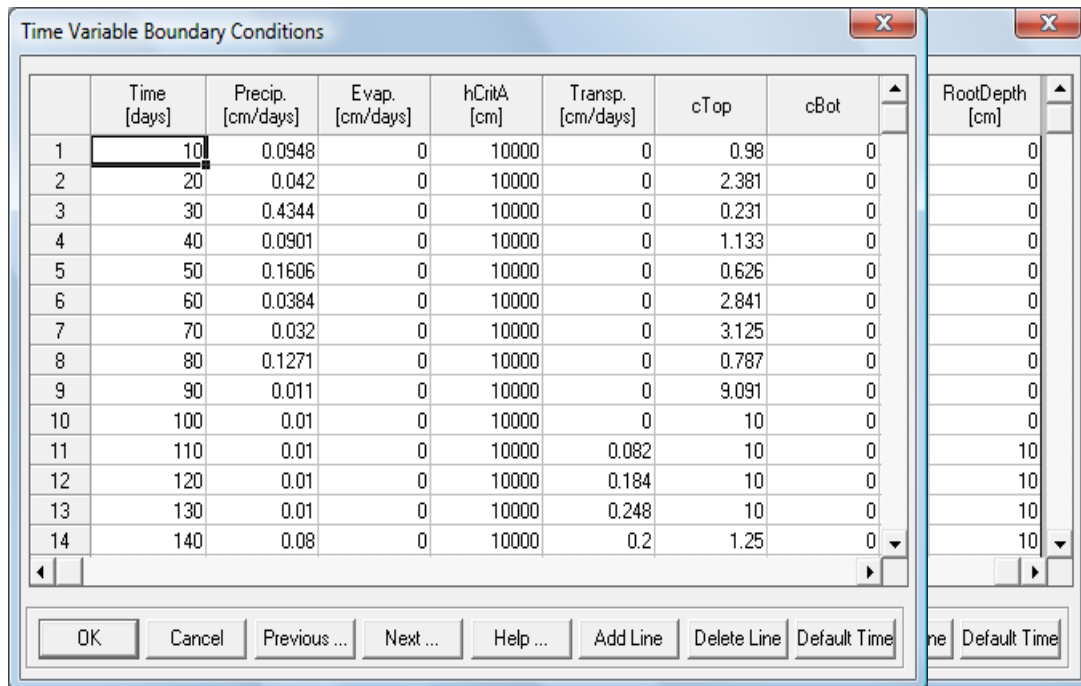
Figuur B2-11 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor enkele keuzes met betrekking tot water- en stofopname door wortels. De keuze voor Feddes' formulering van de reductiefunctie wordt hier gemaakt. In de indexconcentratie-berekeningen wordt geen osmotische stress meegenomen en wordt geen stof opgenomen door de wortels.



Figuur B2-12 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor het opgeven van Feddes' parameters. In de nomenclatuur van dit rapport: $P0 = h_1$, $POpt = h_2$, $P2H = P2L = h_3$, $P3 = h_4$. Het onderscheid tussen $P2H$ en $P2L$ en de parameters $r2H$ en $r2L$ zijn alleen relevant, indien men h_3 afhankelijk wil maken van de potentiële transpiratiesnelheid. Dit is niet het geval in de berekeningen van dit rapport.



Figuur B2-13 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor de invoer van de wortelgroeiparameters. Omdat in de HYDRUS-1D-berekeningen in dit rapport de wortelzonedikte aangeleverd wordt vanuit ONZAT, wordt geen wortelgroei gesimuleerd. De wortelzonedikte wordt meegegeven met de tijdsafhankelijke randvoorwaarden (zie Figuur B2-14).



Figuur B2-14 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor de invoer van de tijdsafhankelijke randvoorwaarden. Van links naar rechts worden de eindtijd van de stressperiode, P , E_p , h_{CritA} , T_p , C_{pre} , C_{bot} en L_R opgegeven, waarbij h_{CritA} de drukhoogte is waaronder reductie van de transpiratie plaatsvindt, en C_{bot} er in onze berekeningen niet toe doet, omdat gebruik gemaakt wordt van een 'zero gradient'-randvoorwaarde. Het is niet duidelijk waarom HYDRUS-1D na de hierboven gemaakte keuzes hier nog om invoer van C_{bot} vraagt.

	z	h	Root	Axz	Bxz	Dxz	Mat	Lay	Temp	Conc
1	0	-83.18	1	1	1	1	1	1	20	1
2	1	-83.17	1	1	1	1	1	1	20	1
3	2	-83.15	1	1	1	1	1	1	20	1
4	4	-83.12	1	1	1	1	1	1	20	1
5	6	-83.08	1	1	1	1	1	1	20	1
6	8	-83.04	1	1	1	1	1	1	20	1
7	10	-82.99	1	1	1	1	1	1	20	1
8	15	-82.83	1	1	1	1	1	1	20	1
9	20	-82.6	1	1	1	1	1	1	20	1
10	25	-82.31	1	1	1	1	1	1	20	1
11	30	-81.93	1	1	1	1	1	1	20	1
12	35	-81.44	1	1	1	1	1	1	20	1
13	40	-80.85	1	1	1	1	1	1	20	1
14	45	-80.12	1	1	1	1	1	1	20	1
15	50	-79.25	1	1	1	1	1	1	20	1

Figuur B2-15 Dialoogvenster in de GUI van HYDRUS-1D voor de opmaak van het bodemprofiel (ook automatisch te genereren met behulp van een in de GUI van HYDRUS-1D ingebouwde 'Graphical Editor'). Van links naar rechts worden opgegeven de diepte z , de initiële drukhoogte h , de wortelverdelingsfunctie b , schalingsfactoren A_{xz} , B_{xz} en D_{xz} (niet relevant voor huidige berekeningen), het bodemtype, de lagen voor de massabalansen (zie Figuur B2-2), de temperatuur (niet relevant voor de huidige berekeningen) en de initiële concentratie C_0 .

Bijlage 3 SWAP-invoer

Deze bijlage geeft de invoerbestanden zoals gebruikt voor de berekeningen in hoofdstuk 5. In blauw wordt uitleg gegeven over de modelinvoer. In rood is aangegeven welke veranderingen aan deze invoer zijn aangebracht ter verkrijging van het definitieve migratiemodel zoals beschreven in hoofdstuk 6.

Main input file .SWP

```

*** GENERAL SECTION ***
*****
Part 2: Simulation period
TSTART = 01-jan-1971 ! Start date of simulation run, give day-month-year, [dd-
mmm-yyyy]
TEND   = 26-dec-2009 ! End date of simulation run, give day-month-year, [dd-
mmm-yyyy]
*****
*** METEOROLOGY SECTION ***
*****
General data

* File name
METFIL = 'Wageningen_new' ! File name of meteorological data without extension
.YYY, [A200]
      ! Extension is equal to last 3 digits of year, e.g. 003 denotes year 2003

* Use of reference evapotranspiration data from meteorological file instead of basic
data
SWETR = 1          ! Switch, use reference ET values of meteo file [Y=1, N=0]

* Use of detailed meteorological records for both ET and rainfall (< 1 day) instead
of daily values
SWMETDETAIL = 0    ! Switch, use detailed meteorological records of both ET and
rainfall
                  ! [Y=1, N=0]

SWRAIN = 0        ! Switch for use of actual rainfall intensity (only if
SWMETDETAIL = 0):
                  ! SWRAIN = 0: Use daily rainfall amounts
                  ! SWRAIN = 1: Use daily rainfall amounts + mean intensity
                  ! SWRAIN = 2: Use daily rainfall amounts + duration
                  ! SWRAIN = 3: Use short time rainfall intensities, as supplied in
separate file

*****
*** CROP SECTION ***
*****
Part 1: Crop rotation scheme during simulation period

* Specify information for each crop (maximum MACROP):
* CROPSTART = date of crop emergence, [dd-mmm-yyyy]

```

* CROPEND = date of crop harvest, [dd-mmm-yyyy]
 * CROPNAME = crop name, [A40]
 * CROPFIL = name of file with crop input parameters without extension .CRP, [A40]
 * CROPTYPE = type of crop model: simple = 1, detailed general = 2, detailed grass = 3

CROPSTART	CROPEND	CROPNAME	CROPFIL	CROPTYPE
01-jan-1971	31-dec-1971	'Gras'	'Gras'	1
01-jan-1972	31-dec-1972	'Gras'	'Gras'	1
01-jan-2008	31-dec-2008	'Gras'	'Gras'	1
01-jan-2009	31-dec-2009	'Gras'	'Gras'	1

* End of table

[Uitleg: de indexconcentratieberekeningen worden uitgevoerd voor permanent grasland](#)

Part 2: Fixed irrigation applications

* Switch for fixed irrigation applications

SWIRFIX = 0 ! SWIRFIX = 0: no irrigation applications are prescribed
 ! SWIRFIX = 1: irrigation applications are prescribed

*** SOIL WATER SECTION ***

Part 1: Initial soil moisture condition

SWINCO = 1 ! Switch, type of initial soil moisture condition:

! 1 = pressure head as function of depth is input
 ! 2 = pressure head of each compartment is in hydrostatic equilibrium
 ! with initial groundwater level
 ! 3 = read final pressure heads from output of previous Swap simulation

* If SWINCO = 1, specify (maximum MACP):

* ZI = soil depth, [-10000..0 cm, R]

* H = initial soil water pressure head, [-1.d10..1.d4 cm, R]

ZI	H
-0.	-74.11
-1.	-73.84
-2.	-73.55

| tussenliggende gegevens weggelaten
 | om ruimte te besparen!

-580.	482.88
-590.	492.88
-600.	502.88

* End of table

Part 2: Ponding, runoff and runoff

* Ponding

PONDMX = 1.0 ! In case of ponding, minimum thickness for runoff, [0..1000 cm, R]

[Uitleg: Dit is variabele \$h_{\max}\$ \(zie Paragraaf 2.5.1.3\).](#)

* Runoff

RSRO = 0.001 ! Drainage resistance for surface runoff [0.001..1.0 d, R]

RSROEXP = 1.0 ! Exponent in drainage equation of surface runoff [0.1..10.0 -, R]

* Runon

* Specify whether runon data are provided in extra input file

SWRUNON = 0 ! 0 = No input of runon data

! 1 = Runon data are provided in extra input file

Part 3: Soil evaporation

*

SWCFBS = 0 ! Switch for use of soil factor CFBS to calculate E_{pot} from E_{Tref}

! 0 = CFBS is not used

! 1 = CFBS is used

Uitleg: in de indexconcentratieberekeningen wordt evaporatie op nul gesteld. In dat geval zijn dus geen bodemfactoren nodig om de evaporatie af te leiden.

SWREDU = 0 ! Switch, method for reduction of potential soil evaporation:

! 0 = reduction to maximum Darcy flux

! 1 = reduction to maximum Darcy flux and to maximum Black (1969)

! 2 = reduction to maximum Darcy flux and to maximum Bo/Str. (1986)

Uitleg: : in de indexconcentratieberekeningen wordt evaporatie op nul gesteld. De keuze voor SWREDU is dus niet relevant

Part 4: Vertical discretization of soil profile

* Specify the following data (maximum MACP lines):

* ISOILLAY = number of soil layer, start with 1 at soil surface, [1..MAHO, I]

* ISUBLAY = number of sub layer, start with 1 at soil surface, [1..MACP, I]

* HSUBLAY = height of sub layer, [0.0..1000.0 cm, R]

* HCOMP = height of compartments in this layer, [0.0..1000.0 cm, R]

* NCOMP = number of compartments in this layer (= HSUBLAY/HCOMP),

[1..MACP, I]

ISOILLAY	ISUBLAY	HSUBLAY	HCOMP	NCOMP
1	1	2.0	1.0	2
1	2	8.0	2.0	4
1	3	40.0	5.0	8
2	4	550.0	10.0	55

* end of table

Part 5: Soil hydraulic functions

* Switch for Mualem - van Genuchten parameters or detailed tables:

SWSOPHY = 0 ! 0 = Mualem - van Genuchten parameters

! 1 = Detailed tables

* If SWSOPHY = 0, specify for each soil layer (maximum MAHO):

* ISOILLAY1 = number of soil layer, as defined in part 4 [1..MAHO, I]

* ORES = Residual water content, [0..0.4 cm³/cm³, R]* OSAT = Saturated water content, [0..0.95 cm³/cm³, R]

* ALFA = Shape parameter alfa of main drying curve, [0.0001..1 /cm, R]

* NPAR = Shape parameter n, [1..4 -, R]

- * KSAT = Saturated vertical hydraulic conductivity, [1.d-5..1000 cm/d, R]
- * LEXP = Exponent in hydraulic conductivity function, [-25..25 -, R]
- * ALFAW = Alfa parameter of main wetting curve in case of hysteresis, [0.0001..1 /cm, R]
- * H_ENPR = Air entry pressure head [-40.0..0.0 cm, R]

ISOILLAY1	ORES	OSAT	ALFA	NPAR	KSAT	LEXP	ALFAW	H_ENPR
1	0.02	0.43	0.0234	1.801	23.41	0.0	0.0454	-0.0
2	0.01	0.36	0.0224	2.286	15.22	0.0	0.0428	-0.0

* --- end of table

Uitleg: hier worden de Van Genuchten parameters opgegeven: ORES = θ_r , OSAT = θ_s , ALFA = α , NPAR = n , KSAT = K_s en LEXP = l . ALFAW is niet relevant omdat er geen hysteresis gesimuleerd wordt. Tot slot H_ENPR = h_e . Zie ook Paragraaf 2.4.2.

Part 6: Hysteresis of soil water retention function

* Switch for hysteresis:

SWHYST = 0 ! 0 = no hysteresis

! 1 = hysteresis, initial condition wetting

! 2 = hysteresis, initial condition drying

Part 7: Maximum rooting depth

RDS = 50.0 ! Maximum rooting depth allowed by the soil profile, [1..5000 cm, R]

Uitleg: RDS = $L_{R,MAX}$ (zie Paragraaf 2.3.1).

Part 8: Similar media scaling of soil hydraulic functions

SWSCAL = 0 ! Switch for similar media scaling [Y=1, N=0];

Uitleg: similar media scaling is, simpel gesteld, een methode om het effect van hysteresis te kunnen simuleren zonder dat men hoeft te beschikken over de 'main wetting curve'. De Staringreeks bijvoorbeeld bevat alleen 'main drying curves'. In de indexconcentratieberekeningen wordt geen hysteresis gesimuleerd. Deze optie wordt dan ook niet gebruikt.

* Part 9: Preferential flow due to macropores

SWMACRO = 0 ! Switch for macropore flow, [0..2, I]:

! 0 = no macropore flow

! 1 = macropore flow

* Part 10: Snow and frost

* Snow

SWSNOW = 0 ! Switch, calculate snow accumulation and melt, [Y=1, N=0]

* Frost

SWFROST = 0 ! Switch, in case of frost: reduce soil water flow, [Y=1, N=0]

*** LATERAL DRAINAGE SECTION ***

* Specify whether lateral drainage to surface water should be included

SWDRA = 1 ! Switch, simulation of lateral drainage:

! 0 = No simulation of drainage
 ! 1 = Simulation with basic drainage routine
 ! 2 = Simulation of drainage with surface water management

* If SWDRA = 1 or SWDRA = 2 specify name of file with drainage input data:
 DRFIL = 'Hupsel' ! File name with drainage input data without extension .DRA,
 [A16]

*** BOTTOM BOUNDARY SECTION ***

* Bottom boundary condition

SWBBCFILE = 0 ! Switch for file with bottom boundary conditions:
 ! SWBBCFILE = 0: data are specified in the .swp file
 ! SWBBCFILE = 1: data are specified in a separate file

* If SWBBCFILE = 0, select one of the following options:

! 1 Prescribe groundwater level
 ! 2 Prescribe bottom flux
 ! 3 Calculate bottom flux from hydraulic head of deep aquifer
 ! 4 Calculate bottom flux as function of groundwater level
 ! 5 Prescribe soil water pressure head of bottom compartment
 ! 6 Bottom flux equals zero
 ! 7 Free drainage of soil profile
 ! 8 Free outflow at soil-air interface

SWBOTB = 3 ! Switch for bottom boundary [1..8,-,I]

* SWBOTB = 3 Calculate bottom flux from hydraulic head in deep aquifer

* Switch to suppress vertical hydraulic resistance between model bottom and
 groundwater level

SWBOTB3RESVERT = 1 ! 0 = Include vertical hydraulic resistance
 ! 1 = Suppress vertical hydraulic resistance

[Uitleg: het gaat hier om het al dan niet meenemen van de tweede term in de
 noemer van Vergelijking 2-19 \(Paragraaf 2.5.2.3\). Zie daarom tevens de discussie
 bij deze vergelijking voor uitleg van de setting van SWBOTB3RESVERT. Omdat in
 ONZAT voor de berekening van de Cauchy onderrandvoorwaarde het
 stijghoogteverschil tussen de onderrand van het model en de diepe aquifer wordt
 genomen, wordt in ONZAT deze term niet meegenomen. Ook hier moet deze term
 daarom weggelaten worden.](#)

* Switch for numerical solution of bottom flux: 0 = explicit, 1 = implicit

SWBOTB3IMPL = 0 ! 0 = explicit solution (choose always when SHAPE
 < 1.0)
 ! 1 = implicit solution

* Specify:

SHAPE = 1.00 ! Shape factor to derive average groundwater level, [0.0..1.0 -, R]

HDRAIN = -0.0 ! Mean drain base to correct for average groundwater level, [-
 10000..0 cm, R]

RIMLAY = 50.0 ! Vertical resistance of aquitard, [0..10000 d, R]

[Uitleg: SHAPE en HDRAIN worden niet goed in de handleiding van SWAP uitgelegd,
 maar hebben te maken met de discrepantie tussen in het veld gemeten
 grondwaterstanden en de door SWAP berekende veldgemiddelde grondwaterstand,](#)

en de correctie hiervoor. Deze factoren zijn niet nodig voor de indexconcentratieberekeningen, maar moeten wel zo ingesteld worden dat SWAP geen correctie uitvoert. Dit is het geval bij SHAPE = 1.0 en HDRAIN = 0.0. RIMLAY = C_i (zie Paragraaf 2.5.2.1).

* Specify whether a sine function or a table are used to prescribe hydraulic head of deep aquifer:

SW3 = 2 ! 1 = sine function; 2 = table

* In case of table (SW3 = 2), specify date [dd-mmm-yyyy] and average hydraulic head

* HAQUIF in underlying aquifer [-10000..1000 cm, R]:

```

      DATE3  HAQUIF      ! (maximum MABBC records)
01-jan-1971  -50.0
26-dec-2009  -50.0

```

* End of table

Uitleg: HAQUIF = $\phi_{aquifer}$ zie Paragraaf 2.5.2.1). Tussen de opgegeven waarden in de tabel wordt lineair geïnterpoleerd. Door voor de begin- en einddatum dezelfde h_{gw} op te geven, wordt dus een constante waarde verkregen.

* An extra groundwater flux can be specified which is added to above specified flux

SW4 = 0 ! 0 = no extra flux; 1 = include extra flux

*** HEAT FLOW SECTION ***

* Part 1: Specify whether simulation includes heat flow

SWHEA = 0 ! Switch for simulation of heat transport, [Y=1, N=0]

*** SOLUTE SECTION ***

* Part 1: Specify whether simulation includes solute transport

SWSOLU = 1 ! Switch for simulation of solute transport, [Y=1, N=0]

* Part 2: Top boundary and initial condition

* Select one of the following options:

! 1 = use constant value for CPRE

! 2 = use application of a constant dose to arrive at CPRE

! 3 = CPRE is specified along with the time-dependent weather data

SWCPRE = 3 (2) ! Switch for top boundary concentration [1..3,-,I]

Uitleg: zie Paragraaf 5.1.5. voor de uitleg van de keuze voor SWCPRE = 3

* If SWCPRE = 1, Specify CPRE

CPRE = 0.0 ! Solute concentration in precipitation, [1..100 mg/cm³, R]

Uitleg: CPRE = C_{pre} (zie Paragraaf 2.6.2.1).

* If SWCPRE = 2, specify DOSE and PRLBDOSE

DOSE = 0.001 ! Dose to be applied to the precipitation, [0..100 mg, R]

PRLBDOSE = 0.001 ! Lower bound of precipitation amount below which to calculate CPRE

! from DOSE and PRLBDOSE instead of from DOSE and
rainfall amount,
! [0..1 cm, R]

- * If SWINCO = 1 or 2, list initial solute concentration CML [1..1000 mg/cm³, R]
- * as function of soil depth ZC [-10000..0 cm, R], max. MACP records:

ZC	CML
-0.0	1.0
-600.0	1.0

- * End of table

Uitleg: CML = C_0 (zie Paragraaf 2.6.2.2). Tussen de opgegeven waarden in de tabel wordt lineair geïnterpoleerd. Door voor de begin- en einddatum dezelfde C_0 op te geven, wordt dus een constante waarde verkregen.

- * Part 3: Miscellaneous parameters as function of soil depth

- * Specify for each soil layer (maximum MAHO)
- * ISOILLAY6 = number of soil layer, as defined in soil water section (part 4)
[1..MAHO, I]
- * LDIS = dispersion length, [0..100 cm, R]
- * KF = Freundlich adsorption coefficient, [0..100 cm³/mg, R]
- * BDENS = dry soil bulk density, [500..3000 mg/cm³, R]
- * DECPOT = potential decomposition rate, [0..10 /d, R]

ISOILLAY6	LDIS	KF	BDENS	DECPOT
1	5.00	0.000	1200.00	0.0
2	5.00	0.000	1600.00	0.0

- * --- end of Table

Uitleg: LDIS = L_{dis} (zie Paragraaf 2.6.1), BDENS = de droge bulkdichtheid ρ_b . KF en DECPOT doen niet ter zake in geval van het conservatieve transport in de indexconcentratieberekeningen.

- * Part 4: Diffusion constant and solute uptake by roots

DDIF = 1.0 ! Molecular diffusion coefficient, [0..10 cm²/day, R]
TSCF = 0.0 ! Relative uptake of solutes by roots, [0..10 -, R]

Uitleg: DDIF = D_w (zie Paragraaf 2.6.1). Door TSCF op 0 te zetten wordt verkregen dat de tracer niet door de plantenwortels wordt opgenomen.

- * Part 5: Adsorption

SWSP = 0 ! Switch, consider solute adsorption, [Y=1, N=0]

- * Part 6: Decomposition

SWDC = 0 ! Switch, consideration of solute decomposition, [Y=1, N=0]

- * Part 7: Solute residence in the saturated zone

SWBR = 0 ! Switch, consider mixed reservoir of saturated zone [Y=1, N=0]

- * Without mixed reservoir (SWBR = 0), specify:

CDRAIN = 1.0 ! solute concentration in groundwater, [0..100 mg/cm³, R]

Uitleg: SWAP biedt de mogelijkheid om de verzadigde zone te beschouwen als een perfect gemengd systeem, in plaats van de verdeling van de laterale fluxen

expliciet te verdelen over de verschillende modellagen. Deze optie is niet aanwezig in ONZAT en er wordt daarom hier ook niet voor gekozen. SWBR = 0 komt overeen met het in ONZAT gehanteerde modelconcept.

* End of the main input file .SWP!

Crop input file .crp

*** PLANT GROWTH SECTION ***

Part 1: Crop development

IDEV = 1 ! length of crop cycle: 1 = fixed, 2 = variable

* If fixed growth length (IDEV = 1), specify:

LCC = 200 (366) ! Length of the crop cycle [1..366 days, I]

Part 2: Light extinction

KDIF = 0.75 ! Extinction coefficient for diffuse visible light [0..2 -, R]

KDIR = 0.75 ! Extinction coefficient for direct visible light [0..2 -, R]

Uitleg: het product van KDIF en KDIR levert r , de gewasafhankelijke stralingsextinctiecoëfficiënt (zie Vergelijking 2-2 in Paragraaf 2.2.2). Met r wordt omgerekend van LAI naar SCF. Omdat in de berekeningen van Hoofdstuk 5 echter de SCF wordt opgegeven in de modelinvoer (op 1.0 om zo een potentiële evaporatie van 0 te verkrijgen, zie volgende invoeritem) hebben KDIF en KDIR in Hoofdstuk 5 geen functie.

Part 3: Leaf area index or soil cover fraction

SWGC = 2 (1) ! choice between LAI [=1] or soil cover fraction [=2]

* If SWGC = 1, list leaf area index [0..12 ha/ha, R], as function of dev. stage [0..2 -,R]:

* If SWGC = 2, list soil cover fraction [0..1 m2/m2, R], as function of dev. stage [0..2 -,R]:

* DVS LAI or SCF (maximum 36 records)

GCTB =

0.00 1.00 (3.00)

2.00 1.00 (3.00)

* End of table

Uitleg: In Hoofdstuk 5 wordt de SCF constant op 1.0 gesteld. Hiermee wordt geëffectueerd dat $E_p = 0$, zoals in de ONZAT-berekeningen. Zie Vergelijking 2-4 in Paragraaf 2.2.2. In Hoofdstuk 6 wordt gerekend met een opsplitsing van de potentiële evapotranspiratie in gewastranspiratie en bodemverdamping a.d.h.v. een tijdsafhankelijke LAI van 3.0.

Part 4: crop factor or crop height

SWCF = 1 ! choice between crop factor [=1] or crop height [=2]

* Choose crop factor if ETref is used, either from meteo input file (SWETR = 1) or with Penman-Monteith

* Choose crop height if Penman-Monteith should be used with actual crop height, albedo and resistance

DVS	CH	CF
0.0	1.0	1.0
2.0	175.0	1.0

* If SWCF = 1, list crop factor CF [0.5..1.5, R], as function of dev. stage DVS [0..2 -,R]:

* Part 5: rooting depth

* List rooting depth [0..1000 cm, R], as a function of development stage [0..2 -,R]:

* DVS RD (maximum 36 records)

RDTB =

0.00	0.00	(0.00 30.00)
0.99	0.00	(2.00 30.00)
1.00	10.00	(-)
1.10	10.00	(-)
1.20	10.00	(-)
1.30	10.00	(-)
1.40	10.04	(-)
1.50	11.34	(-)
1.60	14.34	(-)
1.70	17.44	(-)
1.80	20.73	(-)
1.90	24.09	(-)
2.00	27.34	(-)
2.10	30.54	(-)
2.20	33.62	(-)
2.30	36.63	(-)
2.40	39.40	(-)
2.50	41.84	(-)
2.60	43.90	(-)
2.70	45.55	(-)
2.80	46.69	(-)
2.90	47.48	(-)
3.00	48.02	(-)
3.01	0.00	(-)
3.65	0.00	(-)

* End of table

Uitleg: RD = L_R (zie Paragraaf 2.3).

* Part 7: soil water extraction by plant roots

*

* Switch for concept root water extraction:

swroottyp = 1	! 1 = Macroscopic concept (Feddes et al., 1978)
	! 2 = Microscopic concept (De Jong van Lier et al., 2008)

* if swroottyp = 1, specify:

HLIM1 = 0.0 ! No water extraction at higher pressure heads, [-100..100 cm, R]
 HLIM2U = 0.0 (-1.0) ! h below which optimum water extr. starts for top layer, [-1000..100 cm, R]
 HLIM2L = 0.0 (-1.0)! h below which optimum water extr. starts for sub layer, [-1000..100 cm, R]
 HLIM3H = -310.0 (-200.0)! h below which wat. upt. red. starts at high Tpot, [-10000..100 cm, R]
 HLIM3L = -310.0 (-800.0)! h below which water uptake red. starts at low Tpot, [-10000..100 cm, R]
 HLIM4 = -16000.0 (-8000.0)! No water extraction at lower pressure heads, [-16000..100 cm, R]
 ADCRH = 0.5 ! Level of high atmospheric demand, [0..5 cm/d, R]
 ADCRL = 0.1 ! Level of low atmospheric demand, [0..5 cm/d, R]

Uitleg: HLIM2U = HLIM2L = h_1 , POpt = h_2 , HLIM3H = HLIM3L = h_3 , HLIM4 = h_4 . Zie Paragraaf 2.3.2. Omdat in ONZAT geen waterstress wordt gemodelleerd moet hier HLIM1 = HLIM2 genomen worden. Het onderscheid tussen HLIM3H en HLIM3L, alsmede de parameters ADCRH en ADCRL zijn alleen relevant indien men h_3 afhankelijk wil maken van de potentiële transpiratiesnelheid. Dit is niet het geval in de berekeningen van dit rapport.

* Part 8: salt stress

* linear relation between ECsat and crop reduction

ECMAX = 20.0 ! ECsat level at which salt stress starts, [0..20 dS/m, R]

ECSLOP = 0.0 ! Decline of rootwater uptake above ECMAX [0..40 %/dS/m, R]

Uitleg: ONZAT kent geen mogelijkheden om osmotische stress te simuleren. Daarom moet in SWAP het effect van osmotische stress uitgezet worden. Dat gebeurt hier door ECLOP = 0 te kiezen (de afname van de wateropname is dan altijd 0%, en de waarde van ECMAX niet relevant meer).

* Part 9: interception

SWINTER = 0 (1) ! Switch for rainfall interception method:

! 0 = No interception calculated

! 1 = Agricultural crops (Von Hoyningen-Hune and Braden)

! 2 = Closed forest canopies (Gash)

Uitleg: Vanwege de afwijkende interceptieconcepten is ook bij SWAP ervoor gekozen om de interceptie 'uit te zetten' en hier de neerslag en de potentiële transpiratie voor te corrigeren (zie Paragraaf 5.1.1)

* Part 10: Root density distribution and root growth

* List relative root density [0..1 -, R], as function of rel. rooting depth [0..1 -, R]:

* Rdepth Rdensity (maximum 11 records)

RDCTB =

0.00 1.00

1.00 1.00

* End of table

Uitleg: Rdensity = b (wortelverdelingsfunctie). Zie ook Paragraaf 5.1.2.

*** IRRIGATION SCHEDULING SECTION ***

* Part 1: General

SCHEDULE = 0 ! Switch for application irrigation scheduling [Y=1, N=0]

* If SCHEDULE = 0, no more information is required in this input file!

* End of .crp file !

Drainage file .drn

*** BASIC DRAINAGE SECTION ***

* Part 0: General

DRAMET = 3 ! Switch, method of lateral drainage calculation:

* METHOD 1 = Use table of drainage flux - groundwater level relation

* METHOD 2 = Use drainage formula of Hooghoudt or Ernst

* METHOD 3 = Use drainage/infiltration resistance, multi-level if needed

SWDIVD = 1 ! Calculate vertical distribution of drainage flux in groundwater [Y=1, N=0]

* If SWDIVD = 1, specify anisotropy factor COFANI (horizontal/vertical saturated hydraulic

* conductivity) for each soil layer (maximum MAHO), [0..1000 -, R] :

COFANI = 1.0 1.0

Uitleg: met COFANI = 1 wordt een isotrope bodem verkregen, wat in overeenstemming is met het ONZAT-model van Hoofdstuk 3.

* Switch to adjust upper boundary of model discharge layer

SWDISLAY = 0 ! switch to adjust discharge layer [0,1,2, -, I]

*

* METHOD 3 - Part 3: Drainage and infiltration resistance (DRAMET = 3)

NRLEVS = 1 ! Number of drainage levels, [1..5, I]

Uitleg: in overeenstemming met het ONZAT-model van Hoofdstuk 3, wordt drainage naar 1 niveau gesimuleerd.

* Option for interflow in highest drainage level (shallow system with short residence time)

SWINTFL = 0 ! Switch for interflow [0,1, I]

Uitleg: in ONZAT kan geen interflow worden gesimuleerd. In SWAP dient deze optie dan ook uitgeschakeld te worden.

* Part 3a: Drainage to level 1

DRARES1 = 20. ! Drainage resistance, [10..1d5 d, R]

INFRES1 = 20. ! Infiltration resistance, [0..1d5 d, R]

SWALLO1 = 3 ! Switch, for allowance drainage/infiltration:

! 1 = Drainage and infiltration are both allowed

! 2 = Drainage is not allowed

! 3 = Infiltration is not allowed

Uitleg: DRARES1 = C₂ (zie Paragraaf 2.5.2.1). INFRES1 is niet relevant omdat met de switch SWALLO1 de mogelijkheid van infiltratie uitgezet wordt. In de ONZAT-

berekeningen van Hoofdstuk 3 vindt ook geen infiltratie vanuit het oppervlaktewater plaats.

* If SWDIVD = 1 (drainage flux vertically distributed), specify the drain spacing:
L1 = 20. ! Drain spacing, [1..1000 m, R]

ZBOTDR1 = -20.0 ! Level of drainage medium bottom, [-1000..0 cm, R]
SWDTYP1 = 2 ! Type of drainage medium: 1 = drain tube, 2 = open channel
Uitleg: ZBOTDR1 = Z_{bed} (zie Paragraaf 2.5.2.1).

* In case of open channel (SWDTYP1 = 2), specify date DATOWL1 [dd-mmm-yyyy] and channel

* water level LEVEL1 [cm, negative if below soil surface], maximum MAOWL records:

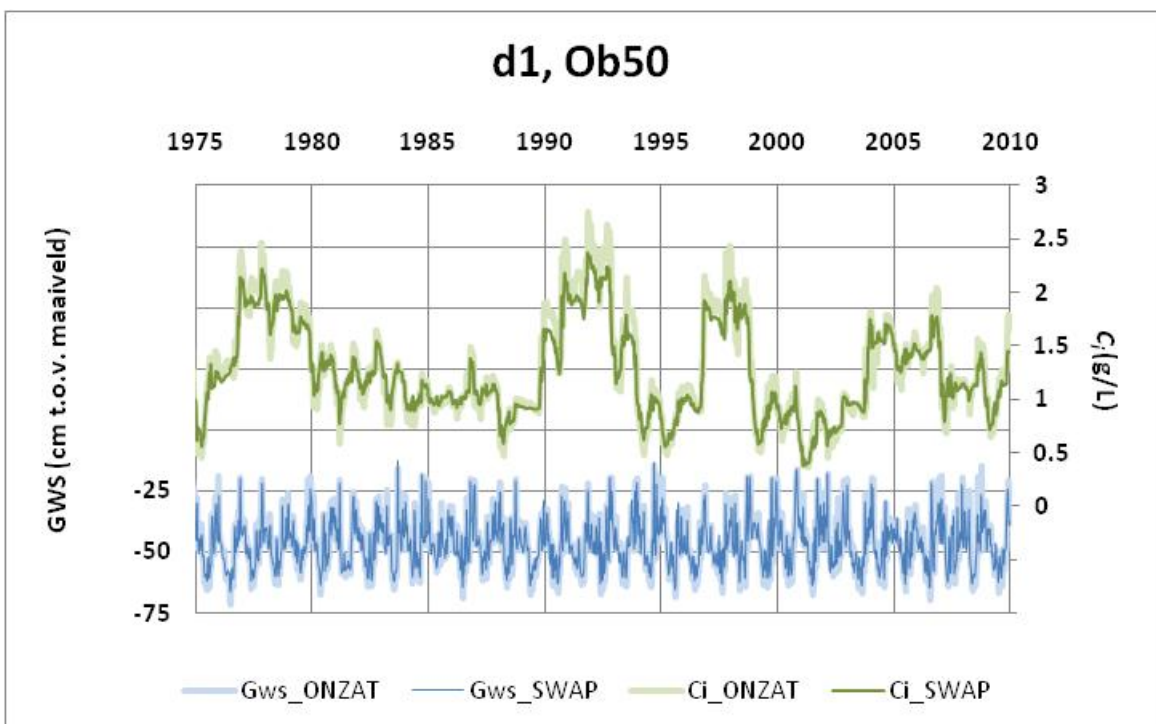
DATOWL1	LEVEL1
01-jan-1971	-100.0
31-dec-2009	-100.0

* End of table

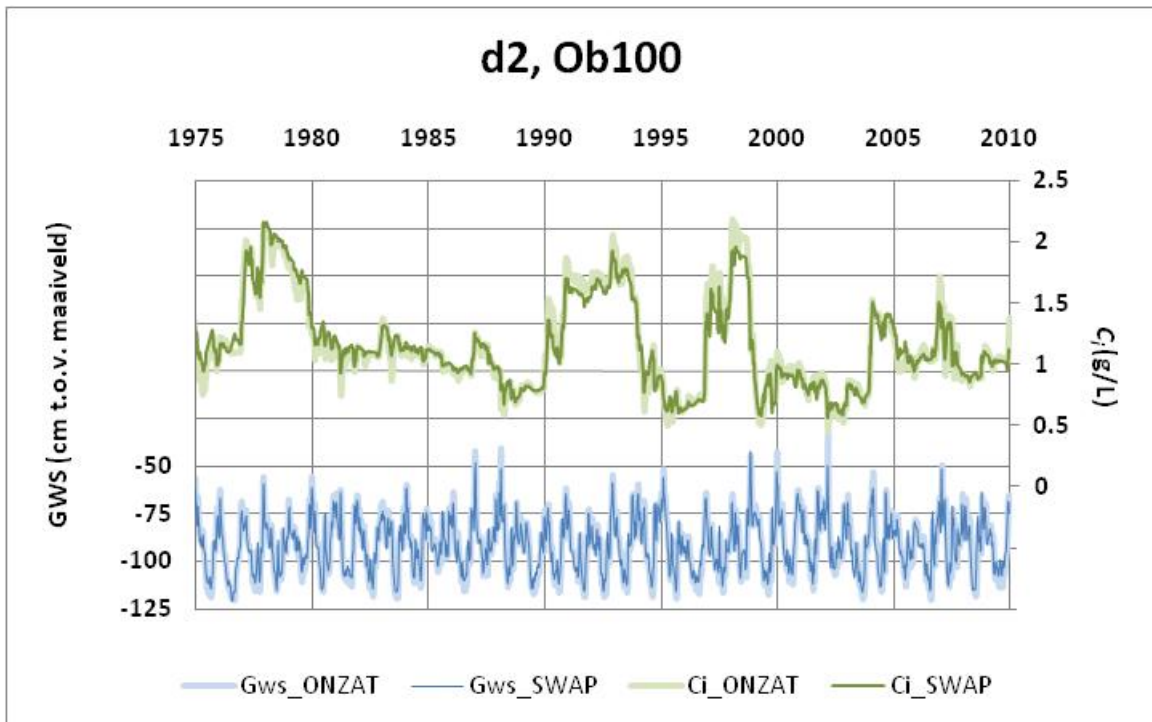
Uitleg: LEVEL1 = φ_{sw} (zie Paragraaf 2.5.2.1).

Bijlage 4 Definitieve SWAP-resultaten

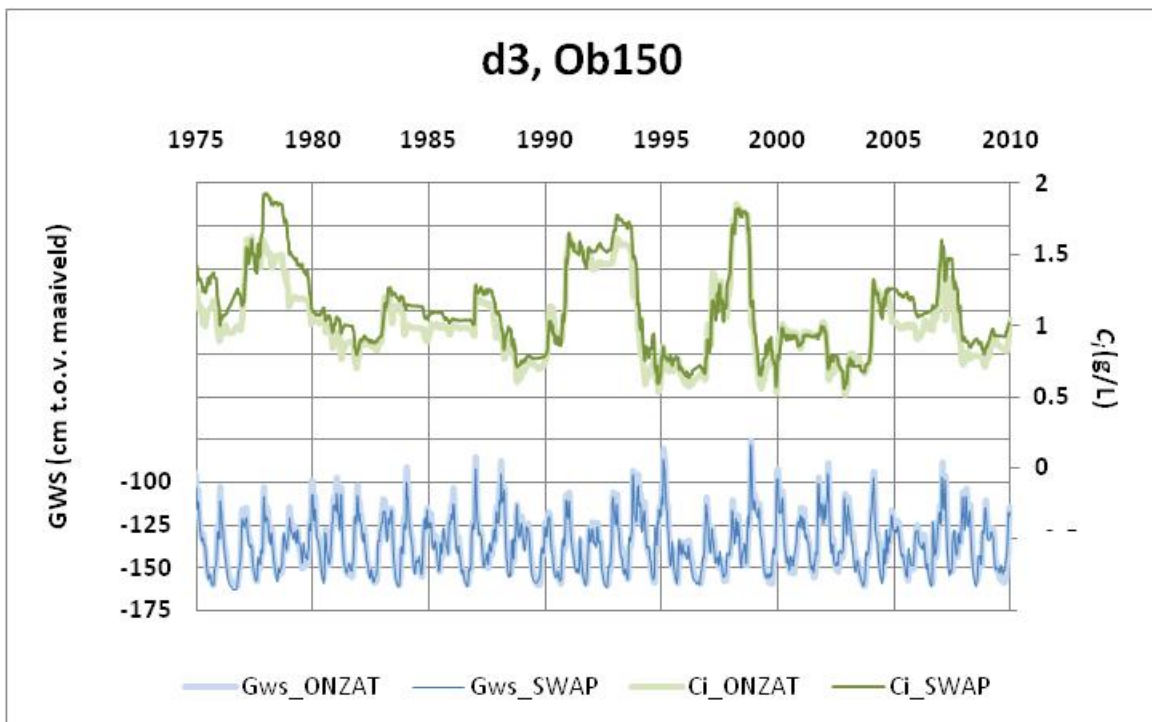
Deze bijlage geeft een overzicht van de resultaten voor de nieuwe indexconcentratieberekeningen volgens het definitieve migratiemodel (zie hoofdstuk 6) voor een selectie van KNMI-weersdistricten (d1-d15; zie paragraaf 3.2.2) en ontwateringsbases (OB, 50–500 cm -mv; zie paragraaf 3.1.5). In onderstaande figuren geldt: Gws = grondwaterstand, c_i = indexconcentratie.



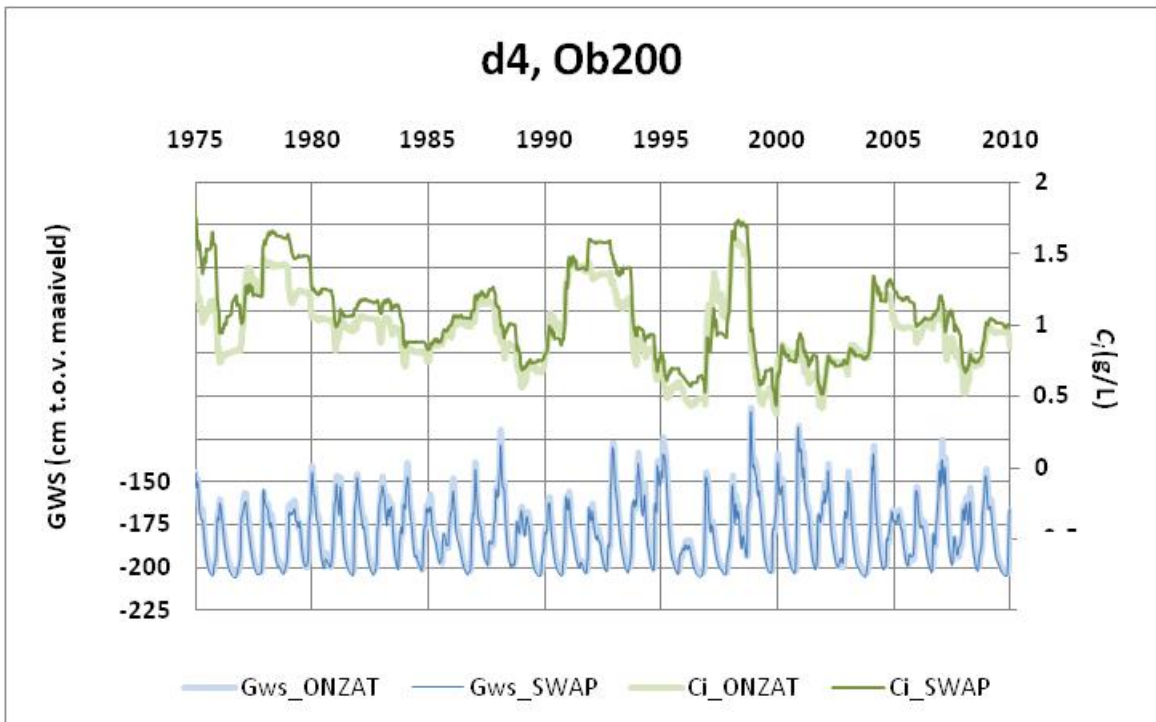
Figuur B4-1 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 1 en ontwateringsbasis 50 cm -mv.



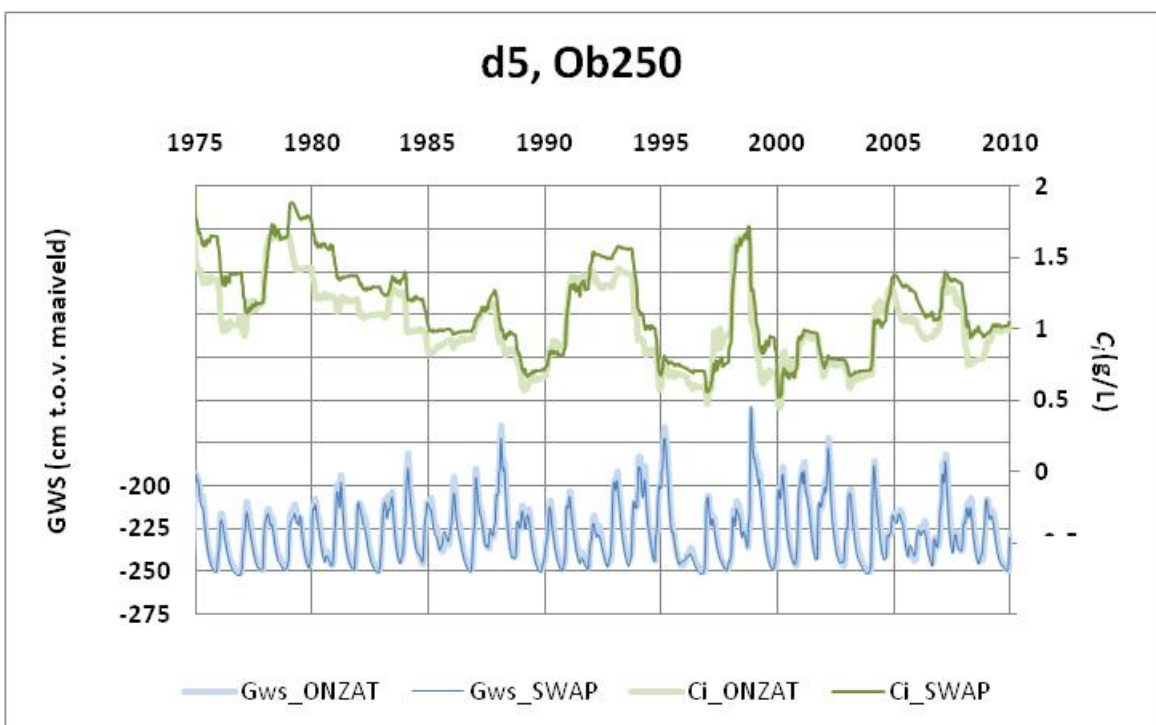
Figuur B4-2 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 2 en ontwateringsbasis 100 cm -mv.



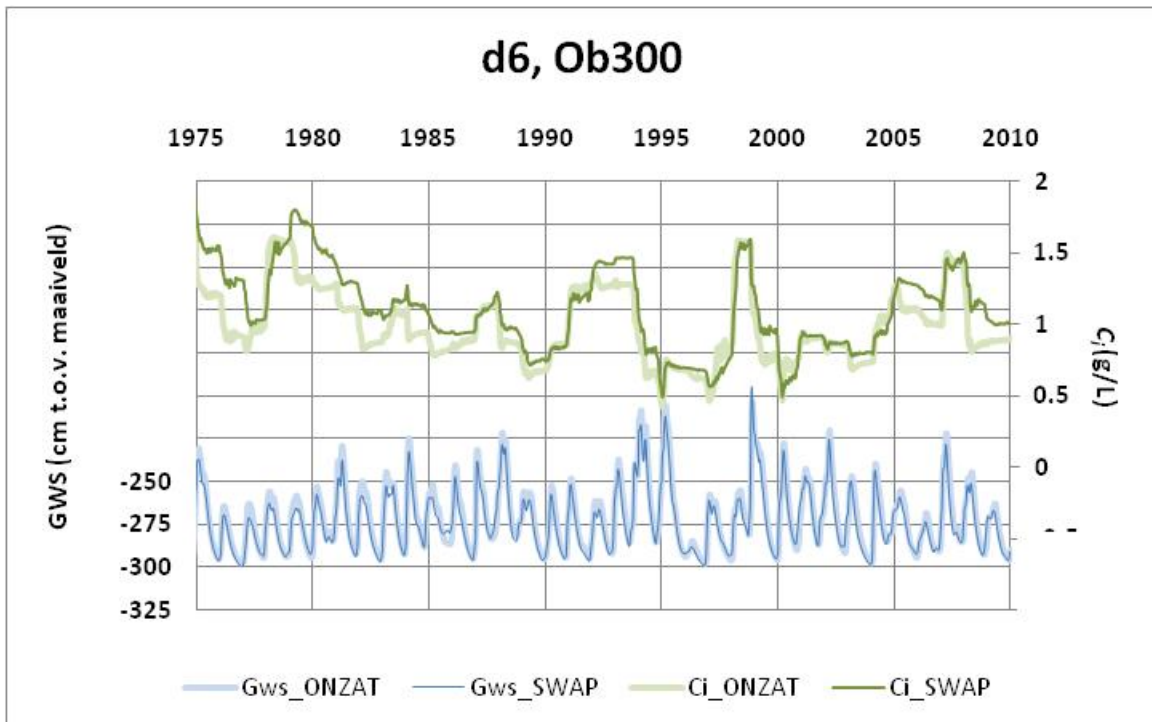
Figuur B4-3 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 3 en ontwateringsbasis 150 cm -mv.



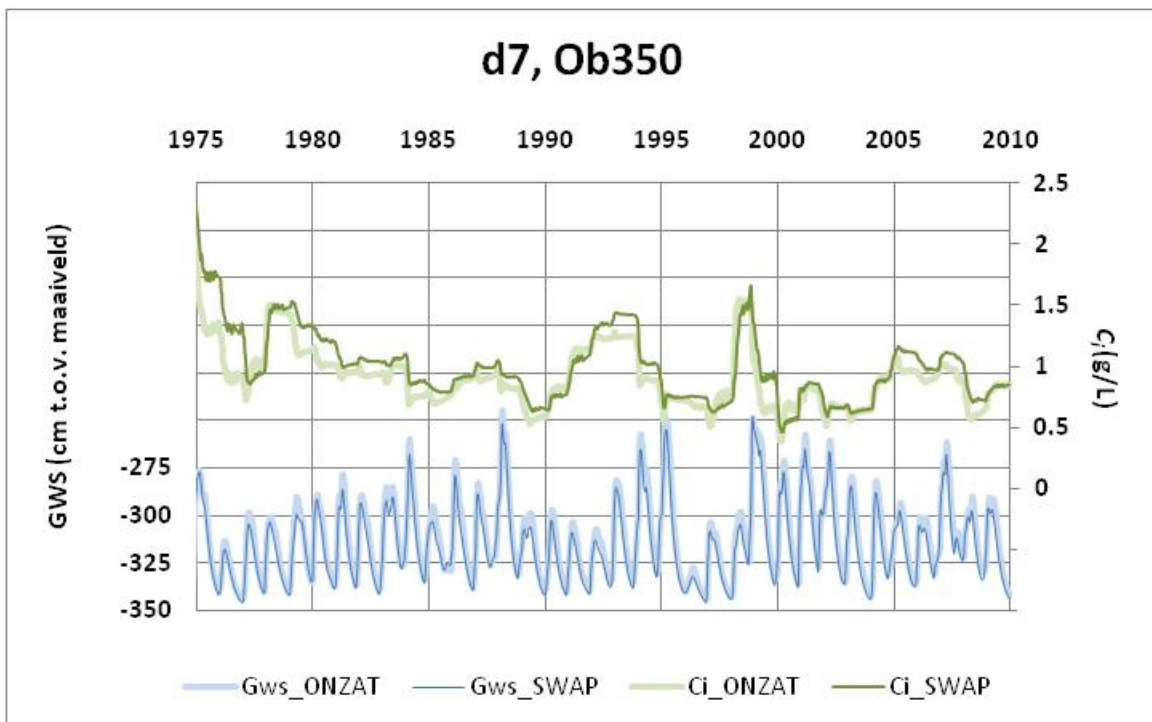
Figuur B4-4 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 4 en ontwateringsbasis 200 cm -mv.



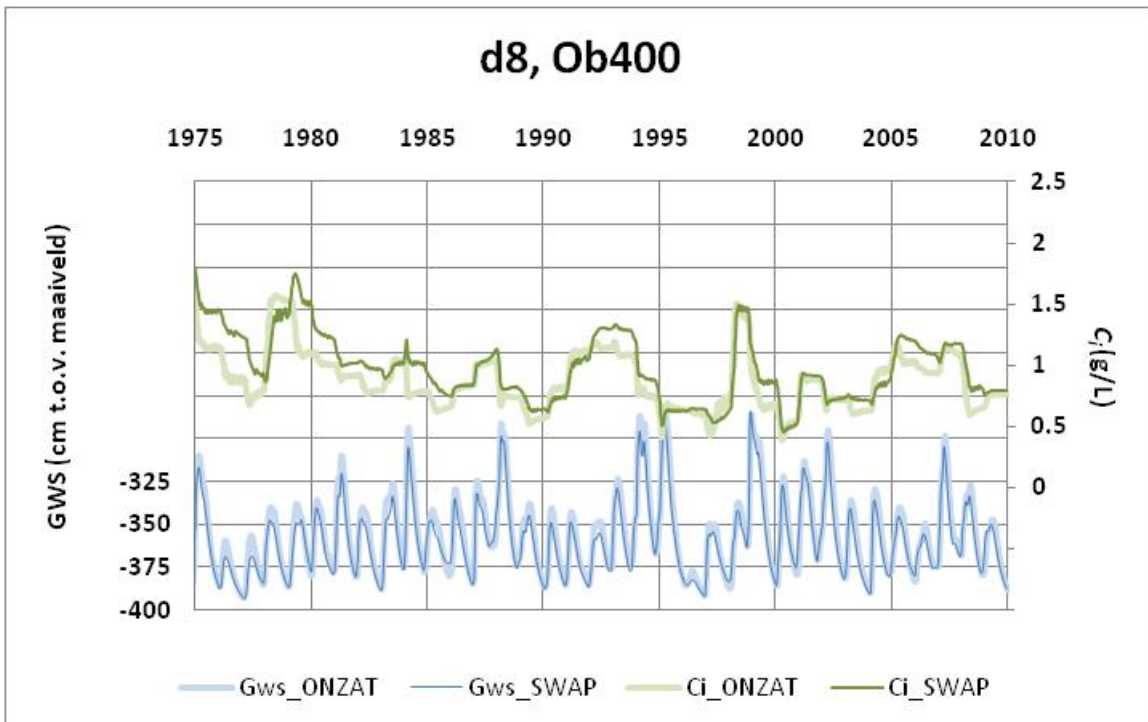
Figuur B4-5 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 5 en ontwateringsbasis 250 cm -mv.



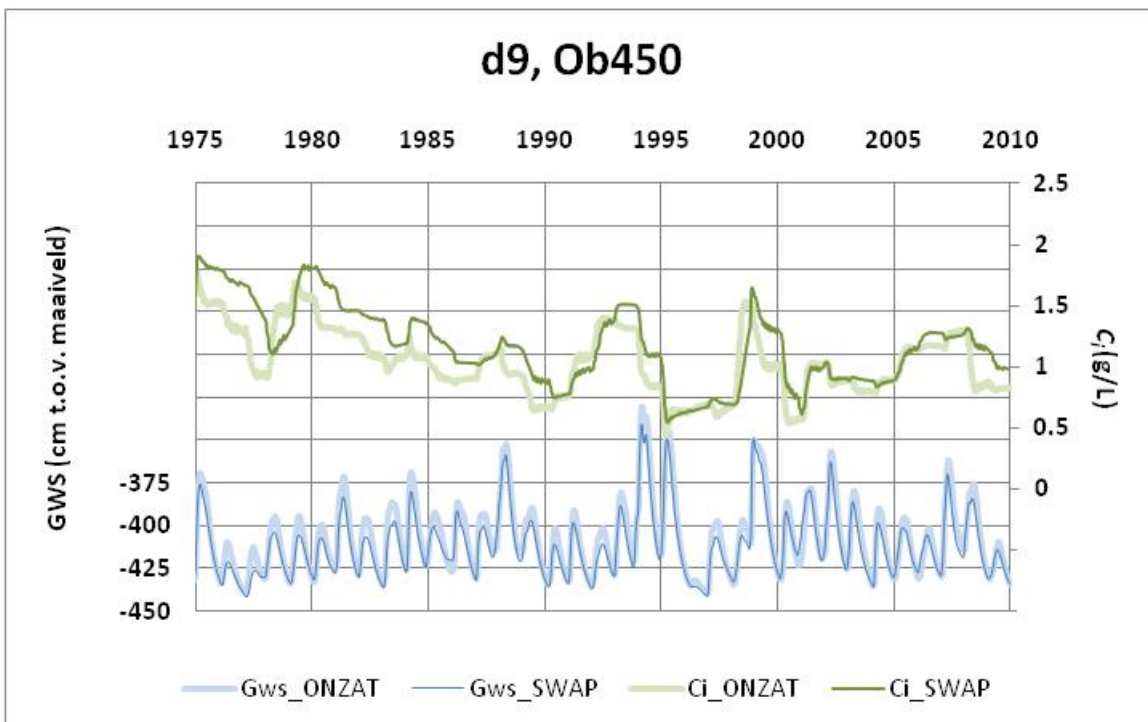
Figuur B4-6 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 6 en ontwateringsbasis 300 cm -mv.



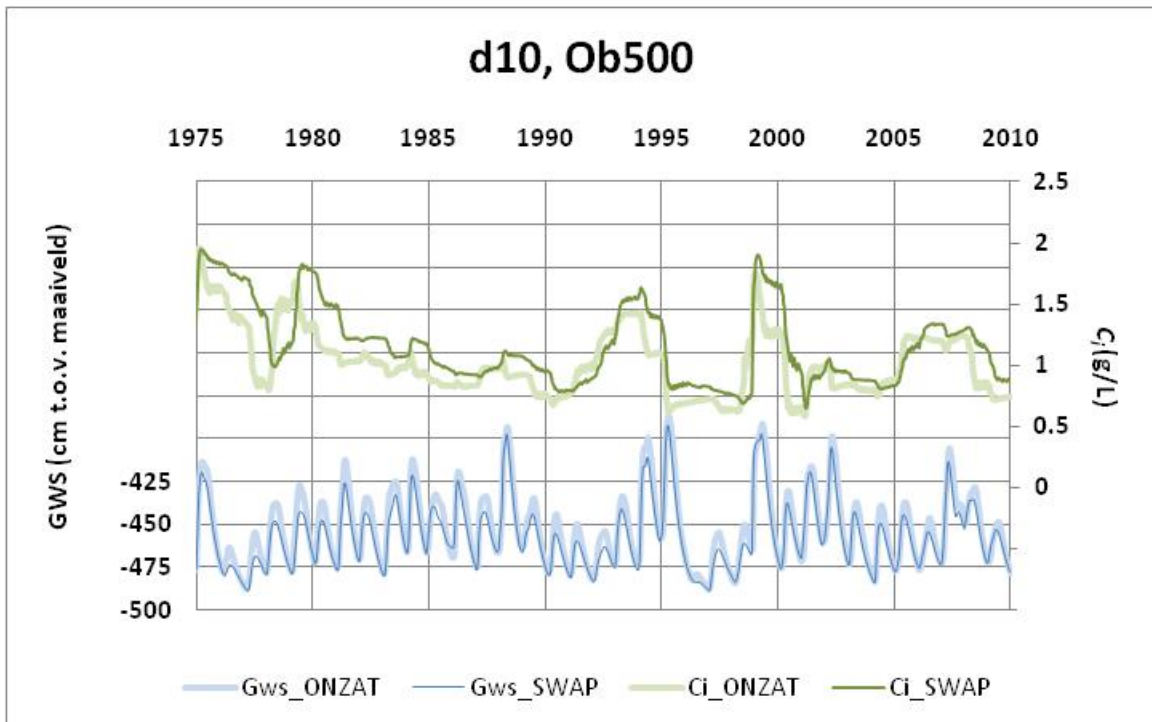
Figuur B4-7 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 7 en ontwateringsbasis 300 cm -mv.



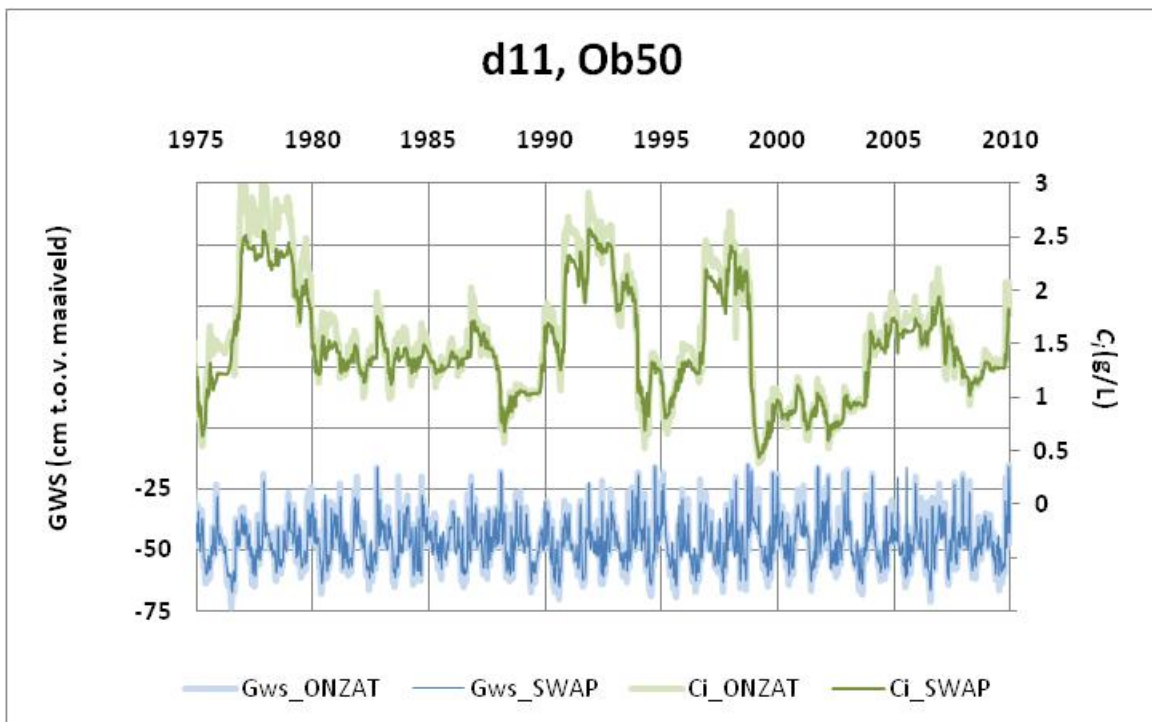
Figuur B4-8 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 8 en ontwateringsbasis 400 cm -mv.



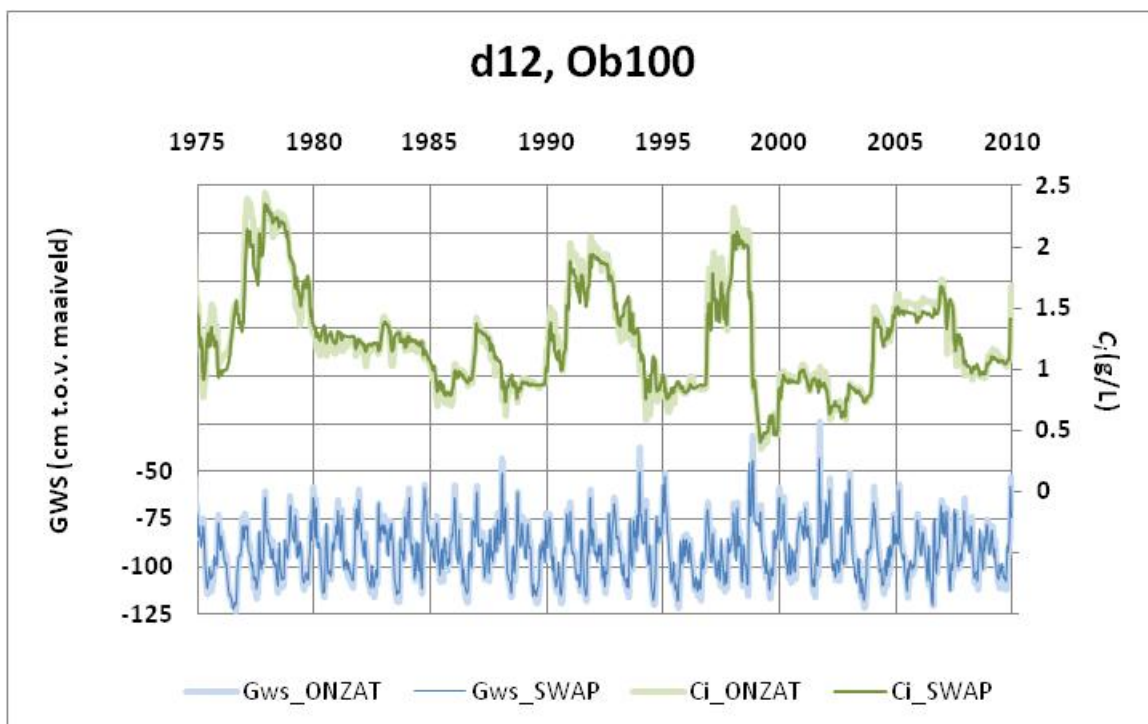
Figuur B4-9 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 9 en ontwateringsbasis 450 cm -mv.



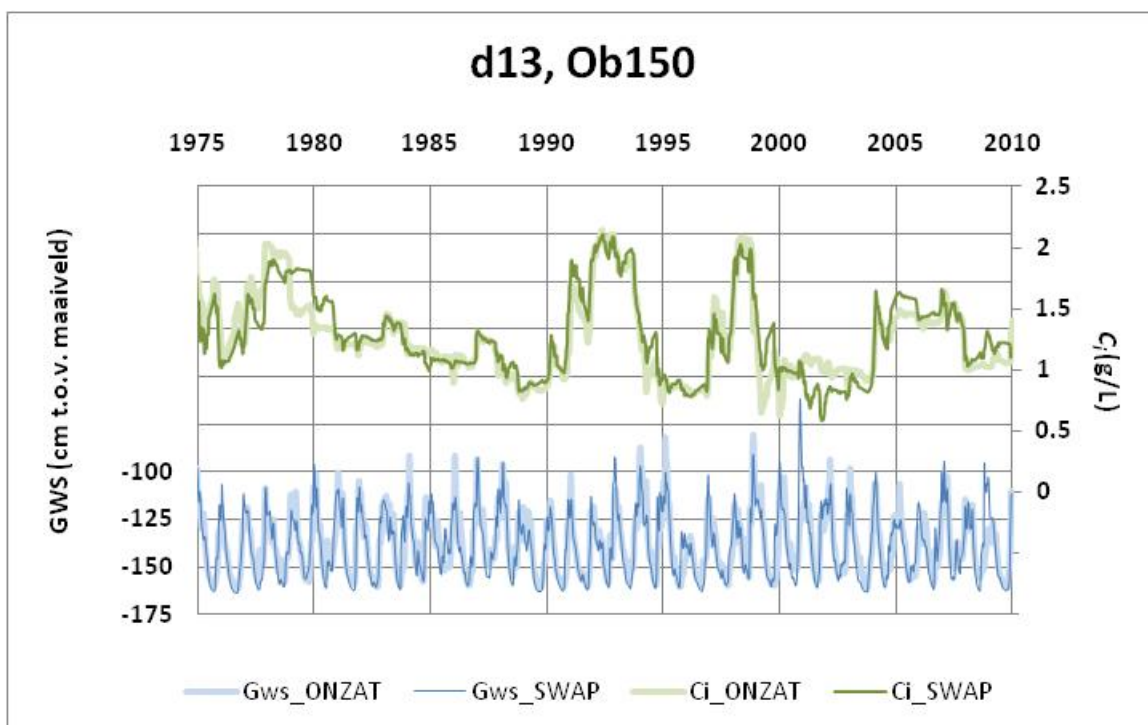
Figuur B4-10 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 10 en ontwateringsbasis 500 cm -mv.



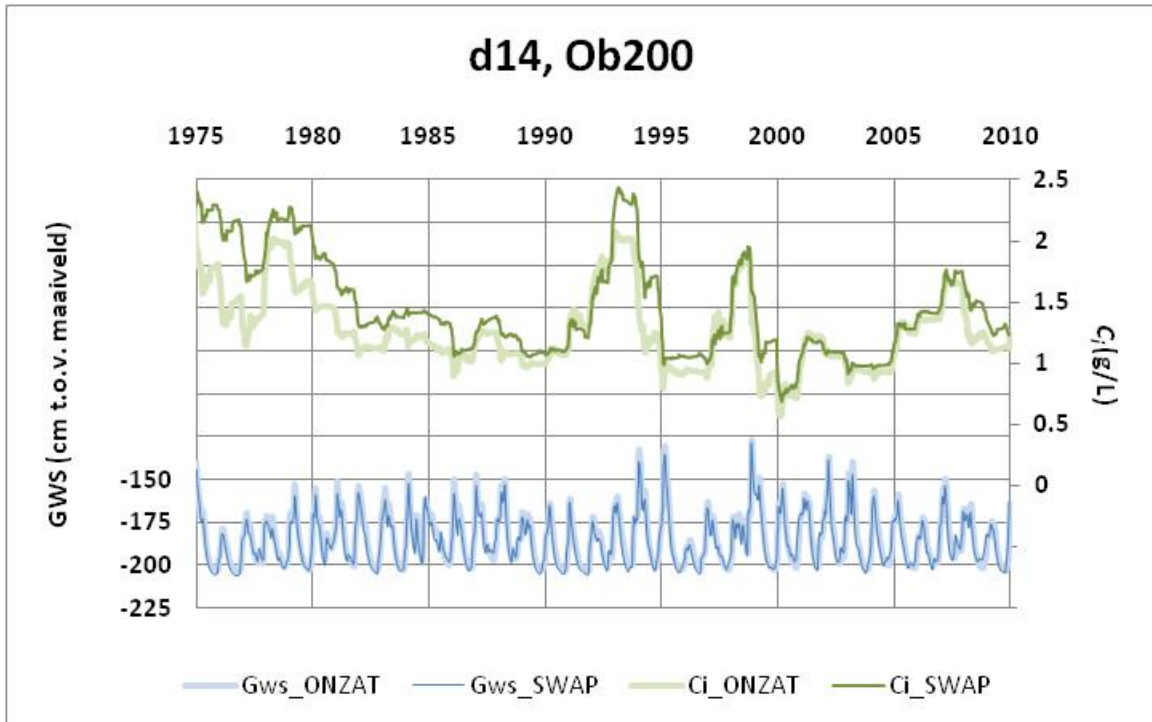
Figuur B4-11 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 11 en ontwateringsbasis 50 cm -mv.



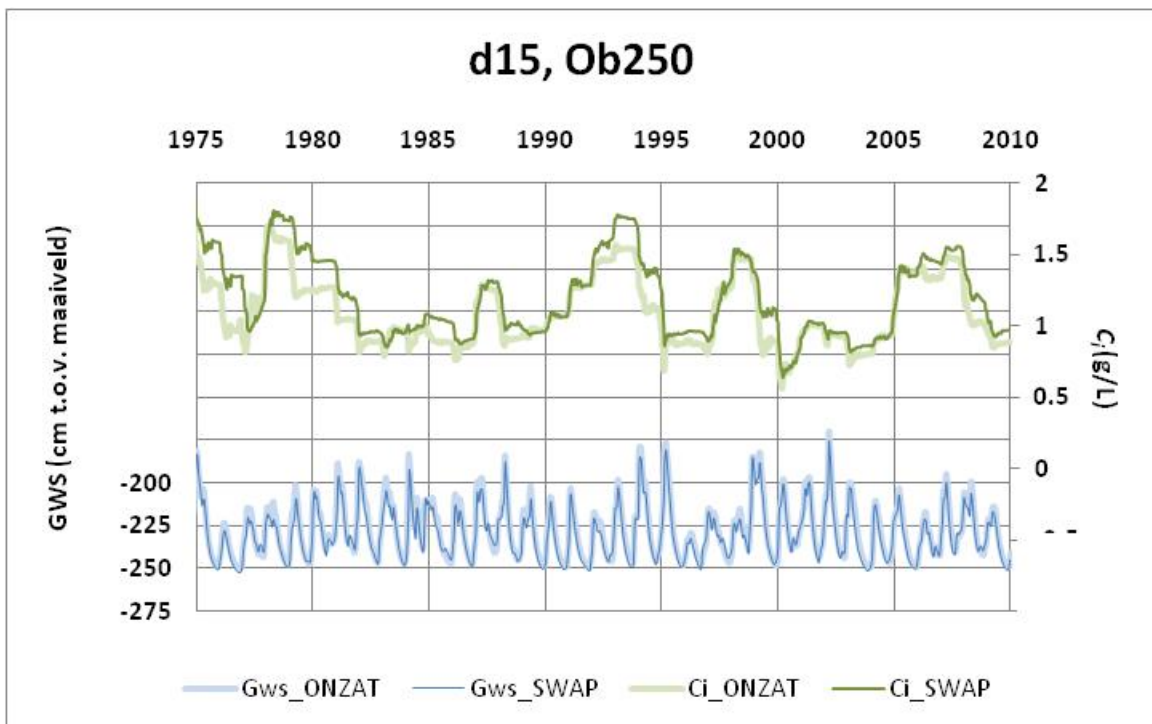
Figuur B4-12 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 12 en ontwateringsbasis 100 cm -mv.



Figuur B4-13 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 13 en ontwateringsbasis 150 cm -mv.



Figuur B4-14 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 14 en ontwateringsbasis 200 cm -mv.



Figuur B4-15 Verloop grondwaterstand (Gws) en indexconcentratie (ci) berekend met ONZAT en SWAP voor weersdistrict 15 en ontwateringsbasis 250 cm -mv.

.....
G.M.C.M. Janssen | B. Fraters | L.J.M. Boumans | A. Vrijhoef
.....

RIVM rapport 680717033/2013

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

november 2013

000086

