

# **Evaluatie actief bodembeheer Krimpenerwaard**

## **Fase I, verkennend onderzoek landbouwkundige risico's**

**D. Boels**

**A.J. Zweers**

**Alterra-rapport 145**

**Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2001**

## REFERAAT

Boels, D. en A.J. Zweers, 2001. *Evaluatie actief bodembeheer Krimpenerwaard; Fase I, verkennend onderzoek landbouwkundige risico's*. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 145. 57 blz. 10 fig.; 4 tab.; 24 ref.

Van twee typen verdachte categorieën dempingen zijn parameters voor de kansverdeling van het landbouwkundig risico afgeleid uit gemeten bodem- en grassamenstelling. De noodzakelijke steekproefomvang voor het toekomstig onderzoek bij een zekerheid van 90% en een absolute fout van 5% is 100 steekmonsters per dempingcategorie en 25 bij een fout van 10%. Deze aantallen zijn 60 en 15 bij een absolute fout van respectievelijk 5 en 10% in de berekende landbouwkundige risico's en een zekerheid van 80%.

Behalve voor cadmium en zink is geen relatie gevonden tussen gehalten in gras en de bodem. Kwik en lood spelen een rol bij shredder, voor bouw en sloopafval zijn dat cadmium en lood. Het kopergehalte is incidenteel problematisch voor schapen maar niet voor rundvee. Aanbevolen is om landbouwkundige risico's te toetsen aan zowel de veevoedernorm als de Warenwetnorm.

Verdacht dempingmateriaal wordt in het algemeen niet verwijderd, maar afgedekt met een laag schone grond, afkomstig uit het gebied zelf. De samenhang tussen herverontreiniging vanuit verdacht dempingmateriaal als gevolg van capillaire opstijging, bioturbatie, vertrapping van de zode door vee en insporende werk- en voertuigen en de dikte van de afdeklaag is bepaald met van een daartoe ontwikkeld model en aan literatuur ontleende parameters. Geconcludeerd is dat een afdeklaag (leeflaag) van 0,3 – 0,35 m grond toereikend is, onder voorwaarde dat het organische stof gehalte in de bodem niet afneemt.

Trefwoorden: afdeklaag, bouw- en sloopafval, capillaire opstijging, insporing, landbouwkundig risico, shredder, steekproefomvang, turbatie, vertrapping zode

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door NLG 40,00 (€ 18,-) over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-Rapport 145. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2001 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,  
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.  
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: postkamer@alterra.wag-ur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra is de fusie tussen het Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (IBN) en het Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC). De fusie is ingegaan op 1 januari 2000.

## **Inhoud**

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	11
2 Opzet en doelstelling onderzoek	13
2.1 Te verifiëren aannamen	13
2.2 Doelstelling onderzoek	14
2.3 Opzet onderzoek	15
3 Resultaten	19
3.1 Bodem en graskwaliteit	19
3.2 Turbatie	21
3.2.1 Turbatie door wormen	22
3.2.2 Turbatie door insporing en vertrapping	24
3.3 Benadering veilige laagdikte	29
3.3.1 Uitgangspunten voor de simulaties	31
3.3.2 Simulatie resultaten	32
4 Conclusies	37
Literatuur	41

## ***Bijlagen***

1 Zware metalen gehalte in grond en gras (minimum, maximum, gemiddeld gehalte, en onder- en bovengrens van het 90% betrouwbaarheidsinterval van een log-normale verdeling); per locatie 10 plekken	43
2 Relatie gehalte in gras en grond	47
3 Spreiding in gehalte rundervier (% van warenwetnorm)	49
4 Turbatie door vertrapping van de zode en insporende werk- en voertuigen	51



## **Woord vooraf**

In opdracht van de Stichting Beheer Krimpenerwaard (SBK) en de Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht (SKB) is een verkennend onderzoek uitgevoerd. Dit onderzoek maakt deel uit van het verificatieonderzoek zoals geformuleerd in het Bodembeheerplan voor de Krimpenerwaard en richt zich specifiek op de benadering van landbouwkundige risico's van verdachte dempingen en het (lange termijn) effect van generieke maatregelen (aanbrengen leef- of afdeklaag).

Het onderzoek is begeleid door een commissie die als volgt is samengesteld:  
Dr. D. van der Eijk (Prov. Zuid-Holland), Dr. J. van Eijkeren (RIVM), Ing. A.E. Tielens (SBK, DLG), Ing. P. Stadt (SBK, DLG, opvolger Tielens), Van de Leemkule (DLG- Zuid-Holland) en Dr. Ir. S.W. Moolenaar (IWACO).



## Samenvatting

In de Krimpenerwaard komen ca. 4000 verdachte dempingen voor die een potentieel risico betekenen voor de landbouw. In het hier gepresenteerd onderzoek is van twee typen dempingmateriaal (shredder en bouw & sloopafval met afdeklagen zonder bijmenging) de variatie van het landbouwkundig risico bepaald op basis van gemeten bodem- en grassamenstelling en dikte van de afdeklaag. Uit de metingen is gebleken dat behoudens voor de metalen cadmium en zink geen relatie bestaat tussen het gehalte in de bodem en in gras. Het landbouwkundig risico van dempingen is berekend door aan te nemen dat vee altijd op dempingen graast. Het risico is uitgedrukt in de verhouding tussen de dagelijkse inname van verontreiniging door grazend vee en de maximale dagelijkse inname waarbij het meest kritisch product (rundernier) nog juist aan de eisen van de Warenwet voldoet. Alleen in gevallen waarin de dikte van de afdeklaag zeer gering is, blijkt een landbouwkundig risico op dempingen met shredder te bestaan en bij uitzondering op dempingen met bouw & sloopafval. Ook is uit dit onderzoek gebleken dat de landbouwkundige risico's van cadmium, lood en kwik voor respectievelijk 88, 47 en 70% wordt bepaald door het gehalte in gras.

De metalen cadmium, kwik en lood zijn potentiële veroorzakers van risico's op dempingen met shredder; op dempingen met bouw- en sloopafval zijn dat de metalen lood en cadmium. Koper is een potentieel risico voor schapen, maar niet voor rundvee. Ook op de referentielocaties overschrijden enkele metingen maximale waarden voor kwik (~30% van de metingen) en cadmium (~10%).

Op grond van de variantie in landbouwkundige risico's is aanbevolen om de steekproefomvang voor het vast stellen van landbouwkundige risico's op andere categorieën dempingen te baseren op een maximaal toelaatbare absolute afwijking van het landbouwkundig risico. Accepteert men bij een zekerheid van 90% een afwijking van 5%, dan dient de steekproefomvang per dempingcategorie 100 stuks te bedragen, terwijl dit aantal 25 dient te zijn indien men een absolute afwijking van 10% accepteert. Zou 80% zekerheid voldoende zijn dan daalt de omvang van de steekproef tot resp. 60 en 15. Ook is aanbevolen om eerst een aantal te bemonsteren locaties te loten en daarna een aantal te bemonsteren plekken. Bemonsteringskosten kan men reduceren door per locatie mengmonsters samen te stellen.

Verdacht dempingmateriaal wordt in het algemeen niet verwijderd, maar afgedekt met een laag schone, uit het gebied afkomstige grond. De dikte van die laag dient voldoende te zijn om ook op de lange termijn landbouwkundige risico's uit te sluiten. Herverontreiniging van een schone afdeklaag is denkbaar en vindt z'n oorzaak in capillaire opstijging, bioturbatie (omzetting van de toplaag door bodemorganismen, voornamelijk regenwormen), vertrapping van de zode door vee en insporende werken voertuigen.

Uit een literatuuronderzoek is gebleken dat regenwormen jaarlijks een laagje grond van 0,5 tot 6 mm aan maaiveld brengen. De laag waaruit dit materiaal afkomstig is, is (globaal) afgeleid uit gepubliceerde metingen van C14 gehaltes van bodems en lijkt beperkt tot enkele decimeters.

Turbatie door insporende werk- en voertuigen en vertrapping van de zode door vee, is afgeleid uit een theoretische beschrijving van de processen. De vertaling van de daarbij optredende locale grondverplaatsing naar een gemiddelde ruimtelijk effect is gebaseerd op het verwacht aantal dagen waarop zich situaties voordoen waarin vertrapping en insporing optreden en verder op het grasland gebruikssysteem. Dit aantal dagen is met behulp van een simulatiemodel afgeleid uit de onderschrijdingsfrequentie van een bepaalde karakteristieke waarde van de vochtspanning in de toplaag. Voor het graslandgebruikssysteem dat in de Krimpenerwaard gangbaar is en waarbij 50% van het areaal wordt gebruikt voor ruwvoerderwinning, de andere helft voor beweiding en het vee elke 7 dagen wordt omgeweid, is afgeleid dat gemiddeld jaarlijks op 4% van het graslandareaal vertrapping en op nog eens 4% van het areaal grasland diepe insporing voorkomt. Vertrapping leidt tot mengeffecten in de bovenste 0,25 m van de bodem en in de bovenste 0,5 m bij insporende werk- en voertuigen.

Met behulp van de ontwikkelde modellen waarin alle mengeffecten zijn opgenomen, is de invloed van dempingmateriaal op het cadmiumgehalte van gras en de afdeklaag berekend. Het landbouwkundig risico is daaruit afgeleid.

Als gidsparameter bij de bepaling van de veilige en duurzame dikte van afdekklagen is cadmium gekozen en shredder als meest verdacht dempingmateriaal. Onder de zware metalen is cadmium relatief mobiel, terwijl in tegenstelling tot de overige zware metalen de opname van cadmium door gras evenredig is met het gehalte in de bodem. De invloed van dempingmateriaal is gedefinieerd als de verhouding tussen het verschil tussen het berekend cadmium gehalte van gras en het cadmium gehalte bij afwezigheid van demping materiaal en het verschil tussen het cadmium gehalte in gras bij afwezigheid van een afdeklaag op demping materiaal en het gehalte bij afwezigheid van demping materiaal.

Berekeningen laten zien dat de invloed van dempingmateriaal voornamelijk als gevolg van turbatie in de loop der jaren toeneemt, maar dat het absoluut niveau van het landbouwkundig risico als gevolg van uitspoeling afneemt. Een laagdikte van 0,3 tot 0,35 m op shredder lijkt ook op de lange termijn (100 jaar) veilig.

De berekende samenhang tussen dikte van de afdeklaag en invloed van demping materiaal op cadmium-gehaltes in gras is vergeleken met een samenhang die was afgeleid uit gemeten gehaltes en laagdiktes. De metingen laten zien dat de variatie in die samenhang erg groot is bij geringe diktes (< 0,15 m), maar dat de spreiding gering is bij grotere diktes. De berekende samenhang bleek een conservatieve benadering van de gemeten samenhang en is daarom een betrouwbaar resultaat.



Aanbevolen is om nader onderzoek te doen van landbouwkundige risico's op dempingen met ander demping materiaal.

Ook is aanbevolen om de benaderde effecten van turbatie nader te onderbouwen in een gericht onderzoek.

Tot slot is aanbevolen om gelet op een maaiveldsdaling van ca. 0,25 m per eeuw in de Krimpenerwaard, de effecten van afbraak van organische stof (veroorzaker van maaiveldsdaling) op de landbouwkundige risico's en mobiliteit van verontreiniging nader te analyseren.



# 1 Inleiding

In het Bodembeheerplan voor de Krimpenerwaard is voor de ca. 4000 verdachte dempingen een aanpak uitgewerkt, die voor dempingen met een landbouwfunctie (veehouderij) neerkomt op het realiseren van een (schone) afdeklaag op verdacht demping materiaal. Bij de opstelling van het bodembeheerplan is aangenomen dat landbouwkundige risico's ontbreken als toelaatbare gehalten van ruwvoerders niet worden overschreden en de gehalten van de bodem in de toplaag onder de zogenaamde "LAC-sigitaal waarden" liggen. Op grond van kwalitatieve en deels kwantitatieve informatie zijn dempingen in vier categorieën ingedeeld, waarvan twee categorieën als verdacht zijn aangemerkt. Een vijfde categorie bevat dempingen waarover geen informatie bestaat. In het bodembeheerplan is vastgelegd dat aannamen ten aanzien van o.a. landbouwkundige risico's, bodemkwaliteitseisen en de juistheid van de indeling in categorieën geverifieerd moeten worden. Het recentelijk onderzoek van Boels et al., 2000, geeft hiervoor al een aanzet. In dat onderzoek is een methode ontwikkeld voor de benaderingen van landbouwkundige effecten van dempingen en is een modellen pakket samengesteld om de veiligheid en duurzaamheid te beoordelen van afdekklagen, gezien vanuit het oogpunt van herverontreiniging van de afdeklaag vanuit het demping materiaal via capillaire opstijging. Grond- en gewasonderzoek werd uitgevoerd op enkele dempingen met shredder en bouw- en slooafval met afdekklagen die onverdacht waren en dikker dan wel dunner dan 0,30 m. Daartoe waren op elke demping 10 steken (en grasmonsters) genomen en waren monsters genomen van de grond en gras midden op het aangrenzend perceel (referentie). Van deze 10 monsters is van elk monster de helft bewaard en de andere helft gebruikt voor de samenstelling van mengmonsters voor verdere chemische analyse. De analyse resultaten zijn gebruikt om de aannamen in het Bodembeheerplan te toetsen en als invoergegeven voor het modellenpakket. Dit onderzoek bouwt daarop voort en beoogt gegevens te verkrijgen voor de bepaling van de spreiding in gemeten gehalten op basis waarvan een definitief bemonsteringsplan kan worden opgesteld voor dempingen met andere materialen. In dit onderzoek zijn een aantal dempingen uit het eerder onderzoek geselecteerd waarvan alle 10 monsters (grond, gras) per demping chemisch zijn geanalyseerd. Ook is een literatuuronderzoek ingesteld naar effecten van regenworm activiteiten op verplaatsing van grond in de afdeklaag en is een theoretisch model opgezet voor de benadering van effecten van vertrapping van de zodelaag door vee en insporing van werk- en voertuigen op menging van afdeklaag met demping materiaal.



## 2 Opzet en doelstelling onderzoek

### 2.1 Te verifiëren aannamen

Dempingen in de Krimpenerwaard zijn ingedeeld in verdachte en onverdachte dempingen en zijn geordend op basis van de aard van het dempingmateriaal en de aard en dikte van de afdeklaag (tabel 1, Bodembeheerplan).

Tabel 1 Indeling dempinglocaties in groepen (vgl. Bodembeheerplan Krimpenerwaard)

Groep	Deklaag	Dempingmateriaal	Vermoed percentage
A	Verdacht of < 0,3 m	Verdacht	77
B	Onverdacht	Verdacht	9
C	Verdacht	Onverdacht	0
D	Onverdacht	Onverdacht	14

Een demping is verdacht wanneer als gevolg van opname van verontreinigingen door gewassen deze daarvan zelf nadelig effecten ondervinden (Broekema) of in de voedselketen gezondheidsrisico's opleveren voor de consument (mens en dier). Tot landbouwkundige risico's behoren ook de onvermijdelijke ingestie van verontreinigde grond door grazend vee (Landbouwadvisiecommissie, 1991) en drenking vanuit eventueel verontreinigd oppervlaktewater. Daarnaast rekent men de aanwezigheid van scherp of grof afval in de bovengrond tot landbouwkundige risico's ("fysieke risico's") indien beweiding en noodzakelijke (grond)bewerkingen als mestinjectie en herinzaai van gras of de eventuele teelt van andere voedergewassen niet mogelijk is zonder dat verwonding van vee of schade aan landbouwwerktuigen ontstaat.

In het bodembeheerplan zijn milieuhygiënische eisen geformuleerd waarvan is aangenomen dat als daaraan is voldaan, er ook geen landbouwkundige risico's bestaan. Deze eisen betreffen:

- gras en eventueel andere veevoedergewassen die worden geteeld op de gedempte sloten, dienen geschikt te zijn als veevoeder. Veevoeder dient zonder beperkingen bruikbaar en verhandelbaar te zijn (veevoedernorm).
- grasland dient geschikt te zijn voor beweiding (koeien, schapen, geiten, paarden) (geen fysieke belemmeringen, Warenwetnorm);
- Slootwater dient geschikt te zijn voor veedrenking en eventueel beregening.

Aangenomen is dat geen fysieke belemmeringen worden ondervonden op verdacht dempingmateriaal met een (onverdachte) deklaag van meer dan 0,30 m. Dempingmateriaal dat mogelijk fysieke belemmeringen veroorzaakt betreft: bouw en sloopafval, huishoudelijk afval, industrieel- en bedrijfsafval, shredder, lompen en scheepsafval. Indien veehouders een dunnere afdeklaag acceptabel vinden om fysieke belemmeringen te ondervangen, is dit ook toegestaan.

Ten aanzien van de veevoedernormen is aangenomen dat als daaraan zou zijn voldaan, vlees- en melkproducten zouden voldoen aan de warenwetnormen.

De aannamen ten aanzien van landbouwkundige risico's hebben betrekking op de verwachte overschrijding van bodemkwaliteitseisen bij aanwezigheid van verdacht materiaal. Daarbij gaat het om de volgende aannamen:

1. onverdacht dempingmateriaal levert geen fysieke en milieuhygiënische risico's op;
2. verdacht dempingmateriaal met een afdeklaag met een dikte van tenminste 0,30 m en vrij van verdachte bijmengingen levert geen fysieke en milieuhygiënische risico's op;
3. een deklaag dunner dan 0,3 m vormen fysieke risico's op dempingen bestaande uit: bouw- en sloopafval, huishoudelijk afval, industrieel en bedrijfsafval, shredder en lompen of scheepsafval;
4. de veevoedernorm biedt voldoende bescherming om overschrijding van warenwetnormen in veehouderijproducten te voorkomen, indien vee alleen gras / veevoedergewas consumeert ;
5. inname van verontreinigde grond zou te samen met grasconsumptie op verdachte slootdempingen tot gezondheidseffecten bij het vee kunnen leiden en tot overschrijding van veevoedernormen. (Milieuhygiënisch verdachte slootdempingen zijn sloten gedempt met de in tabel 1 genoemde verdachte materialen of baggerspecie, met een afdeklaag dunner dan 0,30 m of een afdeklaag met verdachte bijmengingen).

Boels et al. 2000, hebben aangetoond dat het voldoen aan de veevoedernorm, nog geen garantie is dat ook is voldaan aan de warenwetnorm. In dit onderzoek worden daarom de eisen van de Warenwet als richtsnoer gebruikt voor de beoordeling van risico's.

## **2.2 Doelstelling onderzoek**

Voorafgaand aan dit onderzoek is een methode ontwikkeld voor de beoordeling van landbouwkundige risico's. Daartoe zijn verschillende programma's geïntegreerd voor berekening van transport van water en stoffen in de (onverzadigde) bodem, opname van stoffen door gras en herverontreiniging van schone afdekklagen vanuit het onderliggend demping materiaal. De Krimpenerwaard is daarbij als casus gebruikt (Boels et al. 2000). Het onderhavig onderzoek is daarop een vervolg en beoogt:

- inzicht te verkrijgen in de spreiding van concentraties van verontreiniging en diktes van afdekklagen op individuele dempingen met het oog op:
- inzicht te verkrijgen in de omvang van steekproeven op grond waarvan dempingcategorieën met een zekere betrouwbaarheid als verdacht dan wel onverdacht kunnen worden aangemerkt;
- inzicht in de samenhang tussen maximale beschikbaarheid van verontreiniging in de bodem en de betekenis hiervan voor opname in gras;
- verkrijgen van gekwantificeerd inzicht in de aard en invloed van turbatie op de veiligheid en duurzaamheid van (schone) afdekklagen op verdacht dempingmateriaal (literatuuronderzoek en modelberekeningen).

## 2.3 Opzet onderzoek

Het onderzoek behelst de volgende aspecten:

- 1 verkennend onderzoek van de verdeling van concentraties van zware metalen in grond en gras op afdekklagen van dempingen;
- 2 vertalen van gemeten gehalten in grond en gras naar landbouwkundige risico's en bepalen van gemiddelden en ruimtelijke variantie van dit risico op grond waarvan de omvang van steekproeven kan worden bepaald;
- 3 literatuuronderzoek van turbatie door (1) wormen, (2) vertrapping van de zode door vee en (3) insporing van wielen van landbouw werk- en voertuigen;
- 4 aanpassen van de modellen en modelinvoer om effecten van turbatie op herverontreiniging van (schone) afdekklagen te kunnen berekenen.

### **ad 1**

Het onderzoek is beperkt tot dempingen met een afdeklaag van > 30 cm (onverdacht) en < 30 cm (verdacht) op shredder en bouw en sloopafval. Er is gekozen voor afdekklagen zonder bijmengingen omdat deze op grond van vermoede chemische kwaliteit als onverdacht worden aangemerkt. Deze dempingen staan model voor de voorgestane maatregelen op verdachte dempingen: het aanbrengen van afdekklagen > 30 cm op verdacht dempingmateriaal. Hiervoor is met name gekozen omdat de vraag urgent is of een dikte van > 30 cm veilig is. Op dit moment sluit SBK (Stichting Beheer Kimpenerwaard) namelijk al volop contracten af voor beheer van verdachte dempingen en baseert de financiële gevolgen daarvan op de aanname dat een schone afdeklaag van 30 cm een veilige en duurzame oplossing biedt voor de functie landbouw.

Van elke combinatie dempingmateriaal en afdeklaag zijn twee locaties geselecteerd. Op tien plekken per locatie is een grondbemonstering uitgevoerd van de volgende lagen:

- a de eerste 5 cm van de afdeklaag (toplaag);
- b de onderste 5 cm van de afdeklaag;
- c de bovenste 5 cm van het demping materiaal.

De bemonstering was reeds in het voorgaand onderzoek uitgevoerd, zodat hier kon worden volstaan met chemische analyses. Op de monsterplekken is de dikte van de afdeklaag gemeten en zijn ook grasmonsters verzameld.

Bij de keuze van de te analyseren parameters van de grond- en gewasmonsters is rekening gehouden met het gebruik van de resultaten. Voor de beoordeling van landbouwkundige risico's sec, kan worden volstaan met de bepaling van het totaal gehalte. Bij de beoordeling van duurzaamheid van saneringsoplossingen speelt enerzijds de totale uitloogbare hoeveelheid onder natuurlijke omstandigheden ('maximale beschikbaarheid) een rol, anderzijds de uitloogsnelheid, waarbij het gehalte van de bodemoplossing van belang is. Deze laatste hangt samen met de maximale beschikbaarheid en parameters als pH, activiteit in de oplossing etc..

Voor de keuze van analyse parameters en extracties zij verwezen naar Boels et al., 2000. Voor dit onderzoek zijn alleen gehalten van zware metalen bepaald. Organische verontreinigingen zijn buiten beschouwing gelaten omdat deze op een enkele uitzondering na niet of amper door gewassen worden opgenomen.

De voorbehandeling van grondmonsters bestaat uit het verwijderen van zichtbare grove bijmengingen zoals glas, puin, koperdraad, spijkers etc. De grondresten worden gedroogd en vervolgens verkleind in een vijzel. Uit de verkleinde kluiten zijn, voorzover nog zichtbaar aanwezig, grove bijmengingen verwijderd. Het materiaal is vervolgens gezeefd over een 2 mm zeef. De gezeefde fractie is gebruikt voor de chemische analyses.

### **ad 2**

Op basis van eerder onderzoek is landbouwkundig risico bij de gebruiksvorm grasland gedefinieerd als het overschrijden van het maximum gehalte volgens de Warenwet van een of meer zware metalen in de nier van een standaard koe. Uitgangspunten voor de risicobenadering zijn:

- 1 koeien grazen altijd op dempingen (beleidsstandpunt Provincie Zuid-Holland);
- 2 het opgenomen ruwvoer is uitsluitend afkomstig van gras van de demping;
- 3 de ruwvoeropname bedraagt 15 kg ds per dag per standaard koe;
- 4 de standaard koe neemt, gelet op ontwateringstoestand in de Krimpenerwaard, dagelijks 1 kg standaard grond in (~0,7 liter);
- 5 een gemiddelde factor mag worden gehanteerd voor de overdracht van verontreiniging in het voer naar nier;
- 6 vee wordt altijd uit het oppervlakte water gedrenkt;
- 7 het gevoeligste voor verontreiniging is de nier van een volwassen koe van meer dan 5 jaar oud met een lichaamsgewicht van 600 kg en een jaarlijkse melkgift van 7000 kg melk.

De dagelijkse inname van verontreiniging door de standaard koe wordt bepaald op grond van gemeten samenstelling van gras, grond en oppervlakte water. Deze dagelijkse inname wordt vergeleken met een dagelijks ingenomen hoeveelheid waarbij de Warenwetnorm voor rundernier net niet wordt overschreden (= toelaatbare inname).

Het werkelijk risico wordt uitgedrukt als de verhouding tussen de werkelijke dagelijkse inname en de toelaatbare dagelijkse opname. Een verhouding van 1 (of 100%) betekent een dagelijkse inname van verontreiniging waarbij de warenwetnorm net niet wordt overschreden. Een waarde groter dan 1 (of 100%) betekent dat de warenwetnorm zal worden overschreden en een waarde kleiner dan 1 (of 100%) dat er geen risico's bestaan (Boels et al. 2000).

Voor elke locatie is voor elke bemonsteringsplek (10 monsterplekken per locatie) het aldus gedefinieerd landbouwkundig risico berekend op basis van gemeten grond en gras samenstelling. Per dempingtype wordt het gemiddeld risico berekend en de variantie. Beoordeeld is of er mogelijk een ruimtelijke samenhang bestaat tussen de risico's. Afhankelijk van die uitkomst zal een steekproefbenadering worden gekozen en de steekproefomvang indicatief worden bepaald.

### **ad 3**

Dit aspect betreft een literatuuronderzoek van grondverplaatsing door regenwormen waarmee wordt getracht inzicht te krijgen in de omvang en herkomst van grond (diepte



onder maaiveld) die door wormen aan maaiveld wordt gebracht. Grondverplaatsing door vertrapping van de zode door vee en insporende werk- en voertuigen wordt afgeleid uit de theoretische, aan de grondmechanica ontleende beschrijving van een in de grond geduwde wigvormig lichaam. Deze beschrijving is gebaseerd op een berekening van krachten langs glijvlakken (afschuifvlakken) voor het moment waarop het evenwicht net niet is verstoord en er juist geen grondverplaatsing optreedt. Insporing van wielen of vertrapping van de zode is echter een dynamisch proces waarbij wel grond wordt verplaatst. De grondverplaatsing zal zich voltrekken langs de glijvlakken, die als het ware een stelsel stroomlijnen voorstellen. Het dynamisch proces, inclusief grondverplaatsing, kan nu worden opgevat als een opeenvolging van bezwijksituaties, gevolgd door een (geringe) grondverplaatsing langs de glijvlakken en een nieuw evenwicht. Daarna ontstaan weer nieuwe glijvlakken waarin bezwijking optreedt etc. Deze benadering geeft inzicht in de grootte van het neer-, zij- en opwaarts grondtransport onder een insporend wiel of een hoef van een koe.

De aldus benaderde grondverplaatsing is lokaal. Vertaling van deze grondverplaatsing naar een grondverplaatsing per oppervlakte- en een tijdseenheid vindt plaats door de gemiddelde fractie van het areaal grasland te berekenen waarop jaarlijks vertrapping (en insporing) optreedt. Deze fractie wordt afgeleid uit een, met modellen berekende, kansverdeling van het aantal weide- en werkdagen waarop de zode vertrappingsgevoelig is (of gevoelig voor diepe insporingen) voor een het grasland gebruikssysteem dat in veenweidegebieden gangbaar is (omweidingsschema) (Van Wijk en Feddes, 1986; Hackten Broeke, 2000).

#### **ad 4**

In voorgaand onderzoek is een model afgeleid voor de berekening van het verloop van de concentratie van verontreiniging in een demping. Daarbij is de chemische samenstelling van het dempingmateriaal en afdeklaag en verder de dikte van de afdeklaag variabel. In de berekeningen wordt rekening gehouden met neerslag, een niet uniforme wateropname door graswortels, verdeling van verontreiniging over de vaste en vloeibare fase volgens een Freundlich-benadering, empirisch benaderde coëfficiënten voor de "Freundlich functie", en opname van verontreiniging door de graswortels in opgeloste vorm tegelijk met de vocht opname uit de bodem. Ook wordt rekening gehouden met de toevoer van verontreiniging naar de bodem via stalmest, kunstmest en atmosferische depositie. De afvoer van verontreiniging vindt plaats via opname door gras en uitspoeling naar de diepe ondergrond. Met deze modellen kan via berekening van de samenhang tussen de dikte van de schone afdeklaag en landbouwkundige risico's, de veilige (en duurzame) dikte van schone afdeklaag op elke type demping- en afdek materiaal worden bepaald.

In dit onderzoek is de verplaatsing van verontreiniging in het bodemprofiel door turbatie, in de modellen ingebouwd en is het verloop van de risico's bij verschillende diktes van de schone afdeklaag berekend.



### 3 Resultaten

#### 3.1 Bodem en graskwaliteit

Een nader onderzoek van variatie in de bodem- en graskwaliteit is uitgevoerd op vier dempingen met shredder en bouw & sloopafval en verschillende diktes van de afdeklaag. Op elke locatie waren in een eerder onderzoek (Boels et al. 2000) bemonsteringen uitgevoerd, maar nog geen analyses van de afzonderlijke plekken (10 stuks per locatie). De resultaten zijn in bijlage 1 weergegeven. De spreiding van de gehalten is zeer groot. De gehalten van zware metalen in gras zijn in verband gebracht met de gehalten in de bodem (bijlage 2). Daaruit blijkt dat behalve voor de metalen cadmium en zink, geen samenhang bestaat tussen gehalten in de bodem en de bovengrondse delen van gras. Voor de beoordeling van landbouwkundige risico's betekent dit dat zowel gras als bodem bemonsterd moeten worden. Tevens betekent dit dat als gras aan voedernormen voldoet, daarmee geen zekerheid is gekregen dat dan ook de gehalten in de bodem voldoende laag zijn. Toetsing aan meerdere normen is derhalve nodig.

Op basis van gemeten gehalten in gras en grond in de bovenste 5 cm van de afdeklaag is het landbouwkundig risico berekend voor cadmium (tabel 2) en voor de overige metalen (lood, kwik), waarvoor de Warenwet normen vermeldt (bijlage 3).

Tabel 2 Cadmiumgehalte van rundernier (% van Warenwetnorm)

Monsterplek	B & S > 30	Shr > 30	B & S < 30	Shr < 30
1	4.64	13.83	37.50	96.56
2	7.38	62.87	21.85	94.08
3	20.28	36.40	10.73	16.85
4	46.10	37.78	149.44	20.55
5	29.24	44.85	24.84	20.85
6	18.69	23.22	13.18	26.70
7	29.21	38.99	23.23	45.94
8	20.74	82.13	37.87	45.86
9	39.20	126.46	23.51	60.55
10	24.09	26.21	17.57	42.51
Gemiddeld	23.96	49.27	35.97	47.05
Variantie	164.202	1123.68	1668.7	842.6317

B & S = bouw en sloopafval

> 30 = onverdachte afdeklaag > 30 cm

Shr. = shredder

< 30 = onverdachte afdeklaag > 30 cm

Uit tabel 2 blijkt dat de cadmiumgehalten van rundernier slechts bij uitzondering boven de Warenwetnorm (=100%) uitstijgen. Berekend is verder dat de risico's van cadmium voor 88% worden veroorzaakt door gehalten in gras. Voor de metalen lood en kwik zijn deze percentages respectievelijk 47 en 70% op dempingen. Op referentielocaties bepaalt het cadmium- en kwikgehalte in gras voor 89 resp. 47% het niveau van het berekend risico.

De variantie (som van de kwadraten van de afwijking tov. het gemiddelde) is vrij groot.

Enkele individuele gehalten in rundernier overschrijden de Warenwetnorm. In tabel 3A is het percentage van de waarneming vermeld met overschrijding van de Warenwetnorm.

Tabel 3A Percentage van de waarnemingen met runderniergehaltes groter dan de Warenwetnorm

Demping	Cadmium	Lood	Kwik
Referentie	8	0	33
B&S, > 30 cm	0	22	0
B&S, < 30 cm	10	10	0
Shr, ~ 30 cm	10	10	10
Shr, < 30 cm	0	65	55

Blijkens tabel 3A overschrijdt 8% van de metingen op referentielocaties het toelaatbaar geacht gehalte in gras en bodem. Een zelfde patroon treft men op de dempingen aan. Overschrijding van de Warenwetnorm, is wisselend bij lood en kwik. Het percentage uitschieters op de referentielokaties voor kwik ligt in de buurt van de uitschieters op dempingen met shredder. Lood en kwik zijn dus problematisch op dempingen met shredder die slechts een dunne afdeklag bezitten.

Tabel 3B Percentage van de waarnemingen met gehalten in gras boven de veevoedernorm

Metaal	Veevoedernorm (mg/kg)	Dempingtype			
		B&S > 30 cm	B&S < 30 cm	Shr ~ 30 cm	Shr < 30 cm
Kwik	0.1	0	0	0	10
Arseen	2.0	0	0	0	0
Zink	250.0	0	0	20	20
Koper	20.0	0	10	10	20
Lood	40.0	0	0	0	0
Cadmium	2.0	0	10	0	0

Toetsing aan de Veevoedernorm (tabel 3B) laat zien dat de metalen cadmium en koper een rol spelen bij bouw- en sloopafval, terwijl de metalen zink en kwik dat op demping met shredder doen. De waarden voor koper in tabel 3B hebben betrekking op normen voor schapen. Voor runderen ligt de norm hoger (35 mg/kg ds) en wordt op geen enkele demping overschreden.

Het doel van het verificatieonderzoek is om het gemiddeld landbouwkundige risico van dempingscategorieën met een zekere nauwkeurigheid te schatten en daarvoor is een steekproef van voldoende omvang nodig. De omvang van de steekproef wordt bepaald door de spreiding van de gehalten. Voor de berekening van deze spreiding wordt uitgegaan van de spreiding in het cadmiumgehalte. Dit metaal, wordt in deze studie gezien als een gidsparameter, hoewel de ermee samenhangende effecten afwezig of verwaarloosbaar zijn (zie § 3.3.1).

De variatie in de runderniergehaltes (tabel 3A) doet vermoeden dat deze geen ruimtelijke samenhang bezitten. Dit vermoeden wordt nog versterkt door de waarschijnlijkheid dat dempingen niet erg systematisch zijn uitgevoerd en de

herkomst van het demping materiaal zeer divers is. Voor de berekeningen van de steekproefomvang van toekomstig onderzoek kan worden uitgegaan van een (globaal gemiddelde) ruimtelijke variantie van de risico's binnen categorieën van ca. 1000 (risico uitgedrukt in %). De daarbij behorende standaard deviatie bedraagt ca 30 %.

Uitgangspunt voor de bepaling van steekproefgrootte is om in eerste instantie vast te stellen of er sprake is van een ongewenst effect van dempingen en in tweede instantie de betrouwbaarheid daarvan in beeld te brengen. Daarbij wordt uitgegaan van een enkelvoudig aselechte steekproef en de eis dat met 90% kans de relatieve fout in het gemiddeld runderniergehalte (als percentage van de Warenwetnorm) niet groter mag zijn dan 0.05 of 0.1 (5 of 10%). Het benodigd aantal monsters is berekend volgens De Gruijter (2000). Deze berekening toont aan dat het aantal monsters per dempingcategorie 100 of 25 moet zijn als de absolute fout in het berekend gemiddeld runderniergehalte niet groter mag zijn dan 5 respectievelijk 10%. Zou men daarentegen eisen dat met een kans van 80% deze fout binnen die grenzen ligt, dan zijn 60 en 15 steekmonsters voldoende bij een absolute fout kleiner dan 5% respectievelijk 10%.

Deze aantallen betreffen steekmonsters (grond plus gras). Om dit aantal te realiseren dienen per categorie een zeker aantal dempingen te worden geselecteerd en per demping een aantal zeker aantal steekmonsters. Het bemonsteringsplan kan op basis van een tweetrapssteekproef worden opgezet. In eerste trap loot men voor elke dempingcategorie een aantal dempingen (met kansen evenredig aan het oppervlakte van dempingen) en in de tweede trap loot men voor de reeds geselecteerde dempingen een aantal monsterplekken. Voor de begroting van kosten kan worden uitgegaan van vijf dempingen per categorie. Reductie van analysekosten kan worden verkregen door per demping mengmonsters uit de steekmonsters samen te stellen. Dit is geoorloofd, omdat in het verkennend onderzoek is aangetoond dat analyse van mengmonsters, mits goed gemengd, vrijwel hetzelfde resultaat geven als het gemiddelde van de analyseresultaten van individuele monsters.

Bij de bepaling van de steekproefomvang kan worden uitgegaan van 8 typen dempingmateriaal en twee typen afdekragen (onverdacht en < 30 cm, en > 30 cm). Van elke combinatie worden in principe 5 herhalingen geselecteerd. Het aantal te bemonsteren dempingen komt dan neer op  $5 \times 8 \times 2 = 80$  dempingen (8 typen verdacht dempingmateriaal, 5 herhalingen en 2 typen afdekraag).

Op elke monsterplek zal minstens (1) de dikte van de afdekraag worden gemeten, (2) de bovenste 5 cm van de afdekraag, (3) bovenste 5 cm van het demping materiaal en (4) gras bemonsterd dienen te worden.

### **3.2 Turbatie**

Onder turbatie verstaat men transport van grond in verticale richting die wordt veroorzaakt door bodemdieren (bioturbatie), insporende wielen en grondbewerking ('antropogene' turbatie) en vertrapping van de zode door grazend vee. Daarbij kan een zekere menging ontstaan. In de Krimpenerwaard komt hoofdzakelijk

melkveehouderij voor. De daarin voorkomende turbatie wordt veroorzaakt door regenwormen, vertrapping van de zodelaag door grazend vee in perioden met een slechte draagkracht, graslandvernieuwing (incidenteel) waarbij de bestaande zode wordt gefreesd (of geploegd), mestinjectie en insporende wielen van werktuigen - en transportmiddelen (opraapwagens, giertanks, trekkers etc.). De effecten van de verschillende vormen van turbatie worden gekwantificeerd in termen van een gemiddelde jaarlijkse grondverplaatsing tussen (hypothetische) bodemlagen en de mengingsgraad die daarbij voorkomt. Het resultaat is verandering van de concentratie van verontreiniging in de onderscheiden bodemlagen.

Turbatie kan een rol spelen bij herverontreiniging van schone afdekkingen op verdacht demping materiaal, als de kans bestaat dat dit materiaal bij mengeffecten is betrokken. En als die kans aanwezig is zal dat gevolgen hebben voor de dikte van de aan te brengen schone afdekking.

### **3.2.1 Turbatie door wormen**

Van belang bij turbatie door regenwormen is (1) de dikte van de laag grond die jaarlijks op het maaiveld wordt gedeponneerd en (2) de diepte waarop en de hoeveelheid waarin wormen grond innemen en deze daarna aan maaiveld uitscheiden.

Verschillende soorten regenwormen komen op verschillende dieptes in de bodem voor en vreten zich soms letterlijk een weg door de bodem. Welke soorten hoofdzakelijk voorkomen en in welke aantallen hangt af van factoren zoals bodemgebruik, bodemsamenstelling, zuurgraad, grondwater regime etc. Tot de soorten die tot vrij grote diepte gangen graven behoort *Lumbricus terrestris*. Deze graaft soms tot meer dan een meter diep, maar maakt meestal niet erg veel gangen. Andere soorten daarentegen zoals bijvoorbeeld de *Allolobophora caliginosa*, maken wel aanzienlijk meer gangen dan de *L. terrestris* maar bewegen zich hoofdzakelijk in ondiepe lagen (tot enkele decimeters). Andere soorten zoals bijvoorbeeld *O. cyaneum* neemt een tussenpositie in en graaft meestal niet dieper dan 0,5 m.

In perioden met een ruim voedselaanbod op het maaiveld graven wormen zoals de *L. terrestris*, nauwelijks gangen. Maar zodra dat aanbod schaars wordt, stappen ze over op het consumeren van de organische stof in de bodem en graven weer gangen. De uitwerpselen worden meestal op het maaiveld gedeponneerd en zijn, vooral als ze veel grond bevatten, duidelijk waarneembaar (wormhoopjes). Soorten als *L. terrestris*, *A. nocturna* en *A. longa* staan daarvoor bekend (Edwards, 1972).

Aan de hand van ophoping van grond rond zwerfkeien schatte Darwin (1881, geciteerd door Edwards, 1972) dat wormen in de Engelse graslanden jaarlijks 19 – 40 ton uitwerpselen op het maaiveld deponeren, wat overeen komt met een laag grond van ca. 5 mm. Guild, 1955 (eveneens geciteerd door Edwards, 1972), berekend een jaarlijkse hoeveelheid van 27 ton voor een ander weiland, terwijl Kollmansperger, 1943, voor Duitse omstandigheden uitkomt op 5 tot 7 ton per ha per jaar. Muller en

Bucking, 1989, hebben de verstoringseffecten in de bodem door bodemdieren ook gemeten. Zij plaatsten daartoe kleine keramische plaatjes op het maaiveld van 45 verschillende habitats in Zuidwest Duitsland en volgden de verplaatsing van deze plaatjes in zowel verticale als horizontale richting gedurende 5 – 9 groeiseizoenen. Verplaatsing in horizontale richting bleek verwaarloosbaar, terwijl de verticale verplaatsing, die voornamelijk aan regenwormen werd toegeschreven, gemiddeld 2 mm per jaar bedroeg. Uit de gerefereerde onderzoeken kan worden geconcludeerd dat wormen op permanent begroeide gronden een laag grond van 0,6 tot 5 mm naar het oppervlak brengen.

Uit de geraadpleegde literatuur is geen inzicht verkregen in de herkomst (diepte onder maaiveld) van de grond die wormen op het maaiveld deponeren. Wel kan uit datering van de organische stof ( $^{14}\text{C}$ -gehalte) een indruk worden verkregen van de laag waaruit regenwormen grond naar boven brengen. De  $^{14}\text{C}$ -gradient zal gering zijn van bodems die over een grote diepte is gehomogeniseerd, terwijl de gradient groot is op bodems met homogenisatie over een geringe diepte. Scharpenseel et al., 1986, hebben van bodems die zijn ontstaan boven een Parendzina en een Epipedon de ouderdom van de organische stof in verschillende bodemlagen onderzocht. Ook hebben deze auteurs om te toetsen van welke diepte het voedsel van wormen afkomstig is, het  $^{14}\text{C}$ -gehalte van de koolstof in het lichaam van wormen gemeten die op verschillende dieptes waren verzameld. Uit de dateringen van de organische stof in de bodem bleek de ouderdom van de bodemlagen zeer sterk met de diepte toe te nemen. Daaruit kan worden afgeleid dat hoewel homogenisering in de bovenste decimeters niet onwaarschijnlijk is, er zeker geen significante homogenisering over grotere dieptes is opgetreden. Verder bleek dat de koolstof in wormenlichamen van een zeer recente bron afkomstig was (plantaardig materiaal aan maaiveld), hetgeen er op duidt dat deze hoofdzakelijk aan maaiveld foerageren.

Om effecten van turbatie te kwantificeren is uit gegevens van Giani en Helmers, 1996, de verwachte verdeling van Ce-137 in de bodem 10 jaar na de fall-out van dit radioactief element na de Chernobyl ramp berekend indien bioturbatie uitsluitend verantwoordelijk zou zijn voor die verdeling. De berekening is uitgevoerd met gegevens van een 'Distric Gleysol' (10% lutum, 63% < 2 :m). Aangenomen is dat de wormen jaarlijks een laagje grond van 0,2 cm aan maaiveld brengen, dat afkomstig is uit de bovenste 15 cm van het bodemprofiel en daaruit uniform wordt ontgraven. Vergelijking van de berekende verdeling van cesium in de bodem als gevolg van alleen bioturbatie (fig. 1) met de gemeten verdeling 10 jaar na de ramp, laat zien dat er ook transport in de waterfase moet zijn opgetreden. De gegevens van voornoemde auteurs zijn ontoereikend om dat aandeel te kwantificeren.

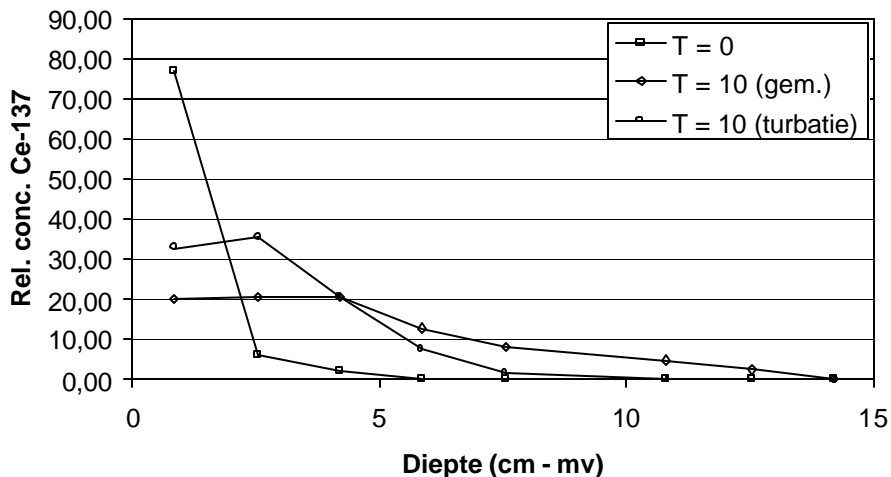


Fig 1. Berekende Ce-137 verdeling in de boden ('Gleysol') op grond van alleen bioturbatie en gemeten verdeling door Giani en Helmers, 1996. ( $T = 0$ : direct na de outfall,  $T = 10$ : 10 jaar na de outfall)

Voor de Krimpenerwaard, waar geen diepe grondwaterstanden voorkomen in de winterperiode (grondwatertrap II en maximaal III), mag worden aangenomen dat de wormen zich voornamelijk in de bovenste decimeters ophouden. Uitgangspunt voor de bioturbatieberekeningen is een laag van 0,15 meter waaruit wormen uniformverdeeld over de diepte grond opnemen en aan maaiveld uitscheiden. Verder wordt aangenomen dat wormen jaarlijks een laag grond van 2 mm op het maaiveld deponeren. Aanbevolen wordt dit in de volgende fase van het onderzoek nader te onderzoeken.

### 3.2.2 Turbatie door insporing en vertrapping

Turbatie door insporing en vertrapping van de zode vindt plaats als de draagkracht van de bodem tijdelijk onvoldoende is om het gewicht van de koe of voertuig zonder insporing of inprent te dragen. Door insporing neemt het contact oppervlak geleidelijk toe en daardoor het draagvermogen van wiel of hoef. Het draagvermogen is het product van contactoppervlak en draagkracht van de bodem. De draagkracht van de bodem neemt in het algemeen toe naarmate de insporing toeneemt en hangt voorts nauw samen met de vochttoestand. Natte, verzadigde bodems hebben een veel geringere drachtkracht dan droge bodems. Insporing en vertrapping kan dus alleen optreden na (overvloedige) regenval. Er bestaan empirische relaties tussen (grens-)draagkracht en vochttoestand van de bodem. Deze toestand wordt meestal uitgedrukt in de vochtspanning ( $\sim$  waterspanning in de onverzadigde zone). De hoeveelheid verplaatste grond bij insporing en vertrapping is evenredig met de insporings- of inprentdiepte en de breedte van het wiel of diameter van de hoef. In veenweidegebieden met een vaak geringe draagkracht stemt men de bandbreedte, bandspanning en wiellast af op de gemiddelde omstandigheden in de periode waarin



werkzaamheden worden uitgevoerd. Als op deze gronden insporing plaats vindt, waarbij nog juist gereden kan worden, blijft de insporingsdiepte meestal beperkt tot 0,1 m. Bij grotere insporingen blijft men domweg steken. Aangezien men bij vee geen invloed heeft op de diameter van de hoof, probeert men ernstige vertrapping te voorkomen door het vee in het voorjaar later in te scharen en in het najaar weer eerder op stal te zetten dan in gebieden met een gemiddeld betere draagkracht. Desalniettemin is insporing en vertrapping in de meer extremere situaties niet te vermijden.

### ***Insporing***

Turbatie door werk- en voertuigen en vertrapping van de zode door vee is het gevolg van grondverplaatsing en is een complex proces. De grond direct onder wielen of hoeven wordt als het ware in de bodem geperst en verplaatst daarbij een hoeveelheid grond in neerwaartse, zijdelingse en opwaartse richting. De baan die denkbeeldige grondpartikeltjes tijdens insporing volgen, kan worden beschreven met de theorie van plastisch bodemgedrag. Deze theorie gaat uit van een statische toestand en geldt voor het moment waarop juist beweging zal ontstaan (bezwijkmoment). De hier behandelde processen hebben echter een dynamisch karakter. Om de bestaande theorie te kunnen gebruiken nemen we aan dat insporing kan worden opgevat als een reeks opeenvolgende bezwijktoestanden. Na elk bezwijkmoment waarbij de insporing of intrapping een beetje toeneemt, treedt weer een statisch moment in. Tussen de opeenvolgende schijnbare evenwichtstoestanden wordt aangenomen dat de hoeveelheid grond die bij het insporingsincrement in het geding is, langs (glij)vlakken wordt verplaatst waar vooraf aan het insporingsincrement juist evenwicht van krachten heerste. Om het proces rekenkundig te vereenvoudigen vatten we het insporingsproces op als een twee dimensionaal proces ('strip belasting'). Het wiel (of hoof) heeft een beperkte breedte, maar de lengte van het contactvlak is 'oneindig'. Daarmee is insporing gereduceerd tot de indringing van een oneindig lange stugge strip. De verdeling van krachten onder en naast die strip en de vorm van de glijvlakken kan nu met de benadering van Prandtl, 1921, worden beschreven (zie bijlage 4 voor uitvoerige beschrijving).

De laagdikte waarin grondverplaatsing optreedt is voor de Krimpenerwaard te schatten met: [insporingsdiepte (of diepte hoof-inprent) + 3,3 keer de halve wielbreedte (of halve hoefdiameter)]. Vertrapping door vee leidt tot grondverplaatsing en dus tot een zekere menging in een bodemlaag van ca 25 cm. Door insporende werk- en voertuigen speelt grondverplaatsing zich af in een laag van meer dan 0,4 m.

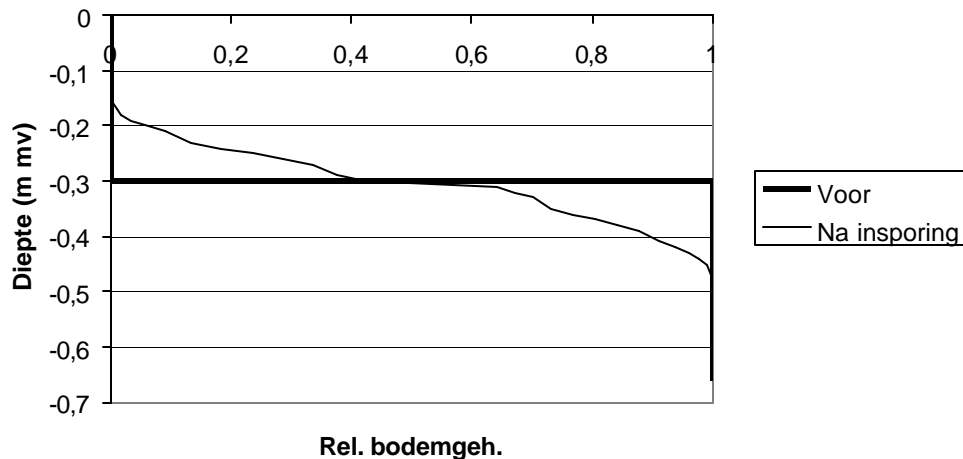


Fig.3a Relatief effect van turbatie op de verdeling van verontreiniging in dempingsmateriaal over de afdeklaag en demping materiaal. Aanvankelijk lag een laag schone grond van 0,3 m met relatief gehalte van 0 op een verontreinigde ondergrond met gehalte 1. Menging van beide lagen is opgetreden in de bodem van 0,15 tot 0,45 m - mv.

Het effect van turbatie door insporende wielen (of vertrapping) wordt in een aantal stappen berekend. De eerste stap betreft de berekening van de verplaatsing van grond onder en naast de hoef of wiel. Als gevolg van deze verplaatsing wordt een 2-dimensionale verdeling van gehalten verkregen. De tweede stap betreft de omrekening van de 2-dimensionale concentratieverdeling naar een 1-dimensionale verdeling. Daarbij is aangenomen dat de grond die naast het wiel of hoef boven het oorspronkelijk maaiveld is komen te liggen, bij graslandverzorging (slepen) wordt afgeschraapt en volledig gemengd in het wielspoor of hoefinprent wordt gedeponeerd. De bodem wordt nu opgebouwd gedacht uit verschillende (horizontale) lagen. Het gemiddeld gehalte in die laag wordt berekend als het gewogen gemiddelde gehalte in die laag over een breedte gelijk aan de halve wiel-, of hoefbreedte plus de strook naast het wiel / hoef waar grond omhoog is gewerkt.

Het aldus berekend effect van turbatie (insporing 10 cm) is gedemonstreerd in fig. 3a. In dit voorbeeld is het relatieve gehalte in de afdeklaag van 0,3 m gelijk aan nul gesteld en in de laag daaronder ('demping materiaal') gelijk aan een (1). Deze figuur laat zien dat tengevolge van insporing een hoeveelheid grond uit de afdeklaag in het demping materiaal wordt geperst, terwijl een hoeveelheid grond uit het demping materiaal in de afdeklaag wordt geperst.

Vertrapping veroorzaakt een minder diepgaande grondbeweging, maar leidt wel tot een zekere menging in de toplaag (fig. 3b). Om dat te illustreren is uitgegaan van een hoefinprent van 10 cm op een bodemprofiel met een aanvankelijk relatief gehalte nul in de laag tot ca. 0,15 m onder maaiveld en een relatief gehalte, 1, in de lagen daaronder. De verdeling van het relatief gehalte is berekend in een bodemvolume dat geheel analoog aan dat bij insporing is bepaald. Uit de berekeningen blijkt dus dat een zekere homogenisering plaats vindt in de laag van 0,05 tot 0,25 m onder maaiveld.

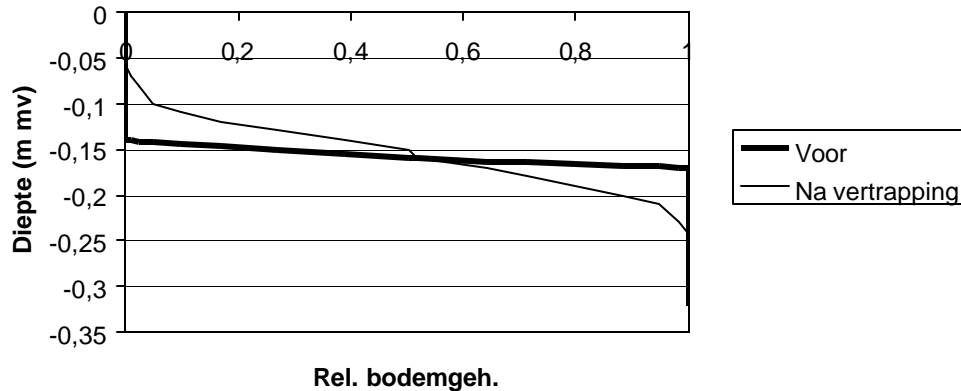


Fig 3b Effect vertrapping op verandering concentratieverdeling in de bodem

### **Vertaling naar een ruimtelijk effect**

De grondverplaatsing die bij deze vorm van turbatie voorkomt is plaatselijk en komt jaarlijks niet in dezelfde mate voor. De fractie van het totaal areaal waarop insporingsrisico bestaat is afhankelijk van de aard van de bewerking, de breedte van de banden en de wielafstand. Maatgevend in dit verband is het uitrijden van mest met een injecteur. Dit apparaat heeft bandbreedtes van 0,5 tot 0,7 m en een wielafstand van ca. 1,8 m. Van het areaal dat daadwerkelijk wordt bereiden, wordt daarom ca. 50% met sporen belegd. Bij vertrapping van de zode is de veedichtheid van belang en verder de duur van de vertrappingsgevoelige toestand van de zode en de fractie van het areaal dat wordt beweide gedurende de periode waarin vertrapping kan optreden. Die fractie hangt samen met het graslandgebruikssysteem. Voor de Krimpenerwaard wordt er van uit gegaan dat 50% van het areaal nodig is voor voor ruwvoederwinning ten behoeve van de stalperiode. Het overig deel wordt beweide volgens een systeem waarbij het vee om de 7 dagen wordt verweide (Hack-ten Broek). De fractie van het areaal waarop op een zekere willekeurig moment vee is ingeschaard wordt berekend met  $0,5 \times 7 / (\text{gemiddeld aantal weide dagen})$ .

Insporing en vertrapping treden pas op wanneer de draagkracht van de bodem onvoldoende is. Dat is het geval wanneer de vochttoestand een voor de draagkracht specifieke grens overschrijdt. De vochtspanning wordt daarbij als karakteristieke parameter gehanteerd. Op gronden zoals in de Krimpenerwaard voorkomen is een vochtspanning van minder dan  $-50$  mBar nodig voor een voldoende draagkracht voor vee en ca.  $-60$  tot  $-70$  mbar voor zwaardere werk- en voertuigen (Van Wijk en Feddes, 1986). Vertrapping treedt dus op wanneer (1) de grenswaarde van de kritische vochttoestand is overschreden en (2) er op dat moment wordt gereden of vee is ingeschaard.

De verdeling van het aantal dagen per jaar waarop de draagkracht wordt overschreden, is afgeleid uit een simulatie van het verloop van de vochtspanning in de bodem met behulp van het SWATR-model. Het verwacht aantal dagen waarop

gemiddeld vertrapping optreedt wordt gelijk gesteld aan de verwachtingswaarde van het aantal weidedagen dat geringer is dan het gemiddeld aantal.

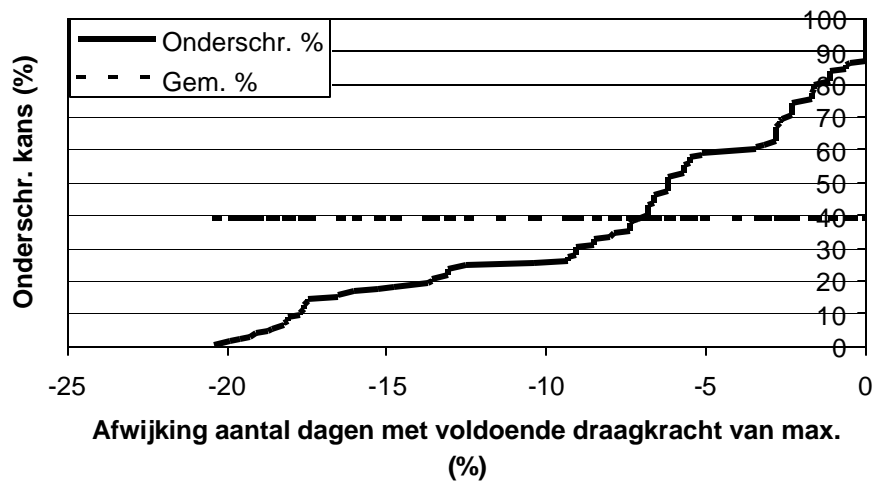


Fig. 4 Brekende onderschrijdingskans van het aantal dagen met voldoende draagkracht in de Krimpenerwaard (100% ~ 180 dagen per jaar)

In fig. 4 zijn de berekeningen van het aantal dagen met voldoende draagkracht voor 126 combinaties van profielopbouw en weersgesteldheid (9 verschillende jaren, 14 verschillende profielen) als een cumulatieve kansverdeling weergegeven. Het gemiddeld aantal dagen bedraagt 92,3% (= 165 dagen) van het maximum aantal en wordt in 40% van de gevallen niet gehaald (onderschreden). De standaard deviatie van het gemiddelde bedraagt 2,2 %. Het aantal dagen met voldoende draagkracht dat hoort bij de ondergrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval bedraagt 88% van het maximum (= 158 dagen).

Uit deze kansverdeling is de kansdichtheid van het aantal dagen berekend met een voldoende draagkracht. Dit aantal is uitgedrukt als percentage van het maximum aantal en in klassen ingedeeld (fig. 5).

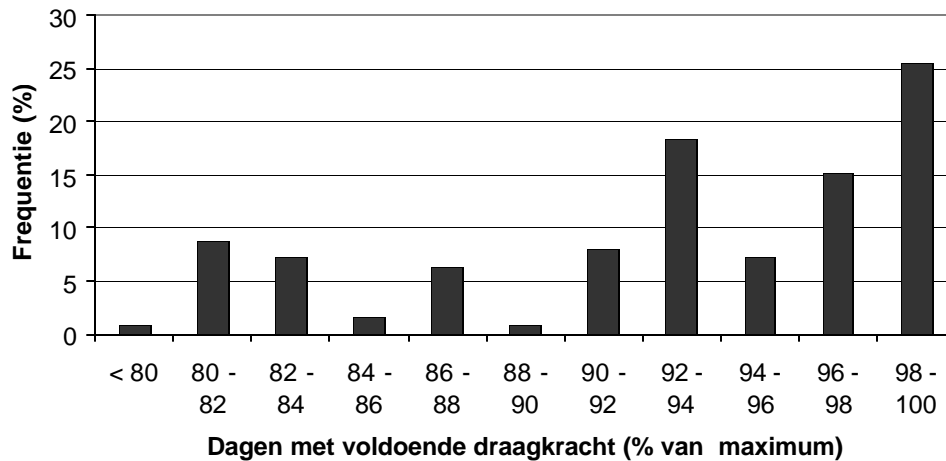


Fig. 5 Klasseindeling van dagen met voldoende draagkracht in de Krimpenerwaard

Uit de kansdichtheid (frequentie) is afgeleid dat de gemiddelde kans op vertrapping 24,8% bedraagt (ruwweg 1 keer per 4 jaar). De gemiddelde duur van de toestand waarin vertrapping optreedt (verwachtingswaarde) is de som van de producten van kansdichtheid van een bepaalde klasse en het verschil tussen het gemiddeld aantal weidedagen in die klasse en het gemiddelde aantal dagen met voldoende draagkracht. De aldus berekende gemiddelde duur van vertrappingsgevoelige perioden bedraagt ca 4 dagen per jaar. Als we aannemen dat het beweide areaal na twee dagen volledig is vertrappt en vee dan wordt omgeweid, is het gemiddeld vertrappt areaal jaarlijks  $4/2 * \{0,5 \times 7 / 165\} \times 100\% = 4\%$ . Voor bewerkingen die een grotere draagkracht vereisen, is dit percentage waarschijnlijk van dezelfde orde van grootte.

Overigens zij opgemerkt, dat wanneer de ontwateringssituatie slechter is dan gebruikelijk voor grasland (zoals in 'natuur-grasland'), het aantal dagen met voldoende draagkracht veel geringer is en de kans op vertrapping aanzienlijk groter. Of dat ook leidt tot een gemiddeld groter areaal vertrappt grasland, zal afhangen van het al dan niet anticiperen van de ondernemer op draagkrachtsveranderingen door vee tijdig en tijdelijk op stal te zetten. Turbatie kan daar meer effect hebben.

### 3.3 Benadering veilige laagdikte

De dikte van een leeflaag (of afdeklaag) op een verontreinigde bodem wordt bepaald door de kans op aanvoer van verontreiniging vanuit dempingmateriaal naar de wortelzone gepaard gaande met opname van de verontreiniging door het gewas en grazend vee. De dikte dient zodanig te worden gekozen, dat bij gegeven bewortelingsdiepte en grondgebruik, de verontreiniging in het dempingmateriaal geen invloed mag hebben op de kwaliteit van het gewas, en er geen ontoelaatbare landbouwkundige risico's ontstaan.

Verontreiniging kan zoals hiervoor uiteen is gezet, door verschillende mechanismen worden verplaatst:

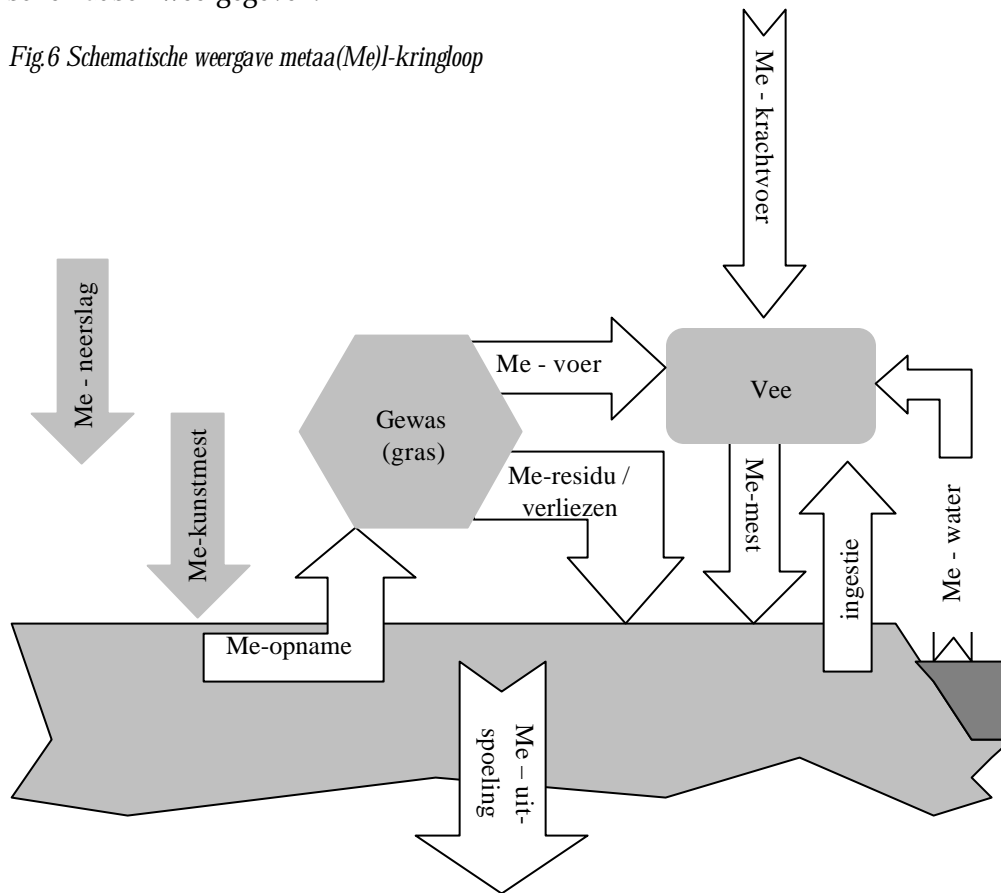
- 1 in opgeloste vorm via vochttransport in de bodem (op- en neerwaartse richting);

- 2 via de route: opname door wortels uit diepere bodemlagen, transport naar bovengrondse delen van de planten (gras), opname gras door vee, uitscheiding in mest en gier door vee, uitrijden (verspreiden) van (stal)mest en gier over het grasland.
- 3 als bulk transport via grondverplaatsing (grondbewerking, insporing, vertrapping, wormen / bodemdieren)

In dit onderzoek is aangenomen dat de aanvoer van nieuw organisch materiaal het verlies door afbraak compenseert (NB: deze veronderstelling is aanvechtbaar en dient nader te worden onderzocht).

De kringloop van zware metalen zoals in de simulatie wordt gevolgd is in fig. 6 schematisch weergegeven.

Fig.6 Schematische weergave metaal(Me)-kringloop



In het rekenmodel is de bodem opgebouwd uit een aantal hypothetische lagen, waarvan het gehalte van het metaal in een willekeurige bodemlaag,  $i$ , op tijdstip  $t + \Delta t$  wordt berekend uit de massabalans van het metaal. We definiëren:

$$\begin{aligned}
 M(i, t) &= C_d(i, t) * \{C_d(i, t) + a * K * \Delta t\} * d && [= \text{massa op tijdstip } t] \\
 Q_{in}(i, t) &= C_d(i-1, t) * F_{in} * \Delta t && [= \text{instroom}] \\
 Q_{out}(i, t) &= C_d(i, t) * F_{out} * \Delta t && [= \text{uitstroom}] \\
 \text{Sink}(i, t) &= e * C_d(i, t) * S * \Delta t && [= \text{opname door gras}]
 \end{aligned}$$

$$M(i, t + \Delta t) = M(i, t) + Q_{in}(i,t) + In_{ext}(i,t) - Q_{out}(i,t) - Sink(I,t)$$

[=massa op tijdstip  $t + \Delta t$ ]

en:

$$Cd(i, t + \Delta t) = M(i, t + \Delta t) / [\{\Delta t + a \cdot K_f\} \cdot d]$$

Hierin is:

- a – activiteitcoëfficiënt
- Cd – concentratie cadmium in oplossing (mmol/l)
- d – laagdikte (dm)
- e – overdrachtsfactor bodem – gewas (< 1)
- F - fluxen (in en uit(out)) (dm/dag)
- S - wateropname door plant uit die laag (dm/d)
- In\_ext – input metaal vanuit externe bron (mmol/d/dm<sup>2</sup>)
- K – partitie-coëfficiënt =  $K_f(aCd)^{N_f}$
- $K_f$  – Freundlich constante
- $N_f$  – exponent in Freundlich vergelijking
- $\Delta$  – volume vochtgehalte (-)
- $\rho$  – droog volume gewicht bodem

De Freundlich constante  $K_f$  wordt na elke tijdstap opnieuw berekend daar deze samenhangt met zowel de activiteit van Ca als van cadmium in de bodemoplossing.

### 3.3.1 Uitgangspunten voor de simulaties

Cadmium is gekozen als gidsparameter omdat dit metaal in tegenstelling tot de andere zware metalen door gras in een hoeveelheid wordt opgenomen die evenredig is met het bodemgehalte. Daarnaast is cadmium mobieler dan de metalen lood en kwik, die als problematisch gelden bij dempingen met shredder. Arseen is niet gekozen omdat dit geen problematisch metaal bleek en het gehalte in gras geen relatie heeft met het gehalte in de bodem. Voor de benadering van de veilige dikte van de afdeklaag is uitgegaan van gebruik van de bodem voor rundveehouderij met een veebezetting van 2,5 gve per ha (Thijs, 1990). Alle stalmest die het bedrijf zelf produceert, wordt ook op het bedrijf uitgereden. Deze bemesting vult men aan met kunstmest. Fosfaat wordt in een hoeveelheid van 100 kg zuivere P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per ha toegediend, waarvoor 220 kg meststof nodig is. Verder is aangenomen dat de jaarlijkse drogestof opbrengst van grasland 12 ton per ha bedraagt. Bij de gekozen veebezetting wordt snijmaïs aangekocht op basis van 2 kg per gve per dag. De belasting van de bodem met cadmium is dus afkomstig van gras, snijmaïs, kunstmest en atmosferische depositie. Aanvoer van cadmium uit het oppervlaktewater is verwaarloosbaar klein, en wordt genegeerd (Boels et al., 2000).

Beweidingsverliezen worden eveneens genegeerd. Daarvoor in de plaats wordt aangenomen dat de hoeveelheid cadmium die gras opneemt, volledig via de stalmest terug komt op het land. In deze simulatie wordt overigens uitgegaan van het gemiddelde Cd-gehalte van gras op de referentielocaties (“gebiedsgemiddelde”).

Het effect van turbatie op de concentratieverdeling wordt een keer per jaar bepaald. Daartoe vindt eerst berekening plaats van de concentratieverandering door uitspoeling en capillaire opstijging. Daarna wordt de verandering van de concentratieverdeling berekend door turbatie. De concentratieverdeling waarmee het daaropvolgend jaar wordt gerekend is een gewogen gemiddelde van de verdeling voor en na turbatie. Het gehalte in een zekere laag voor turbatie telt voor 96% mee en dat na turbatie voor 4%.

### **Samenvatting invoergegevens**

Uit de voornoemde gegevens is een set invoergegevens gekozen ten behoeve van de simulatie van het stoftransport in de afdeklaag.

	Afdeklaag	Dempingmateriaal
pH	5.3	6,2
CEC	1.01	1,12 eq/kg
Klei	26	9%
Calcium	155	385 mg/l
EC	592	1295
Cd-bodemvocht	4,3	12,6 µg/l
Netto neerslag	650 mm/j	
Gewasverdamping	350 mm/j	
Capillaire aanvoer naar wortelzone	50 mm/j	
Effectieve bewortelingsdiepte	0,25 m (niet uniforme wortel activiteit)	
Cd-aanvoer (g/ha/j)		
* stalmest/gras	0,8 – 7,6 (gem. 3,2)	
* stalmest (snijmaïs)	0,055	
* kunstmest (fosfaat)	6,0	
* atmosferische depositie	1,2	
Totale cadmium aanvoer (g/ha/j)	8,1 (min.)- 10,4 (gem.) - 14,8 (max.)	
Bioturbatie	2 mm grond jaarlijks naar maaiveld, afkomstig uit 0,15 m en uniform onttrokken;	
Vertrapping	hoefdiameter 0,15 m, hoef inprent 0,15 m, jaarlijks 4% vertrappt areaal. Hoek inwendige wrijving 10 graden.	
Insporing	wielbreedte 0,45 m, insporingsdiepte 0,2 m, jaarlijks 4% areaal met diepe sporen. Hoek inwendige wrijving 10 graden.	

### **3.3.2 Simulatie resultaten**

Simulaties van verplaatsing van cadmium in de bodem en opname door gras zijn uitgevoerd voor verschillende diktes van de afdeklaag. Deze wordt veilig genoemd, wanneer de invloed van dempingmateriaal afwezig is. Berekeningen zijn uitgevoerd voor (1) een situatie waarin geen afdeklaag aanwezig is; deze geldt voor de situatie met maximale invloed en (2) een situatie waarbij geen dempingmateriaal aanwezig is en geldt voor een situatie zonder invloed van verontreinigingen. De dikte van de afdeklaag is in stappen van 5 cm vergroot en voor elke situatie is het verloop van de verdeling van de verontreiniging in de bodem gedurende 100 jaar berekend.



$$Invloed = \frac{Cd(act) - Cd(ref.)}{Cd(max) - Cd(ref.)} \times 100\%$$

De invloed van demping materiaal wordt uitgedrukt als de verhouding tussen de opgenomen hoeveelheid cadmium door gras bij een zekere dikte van de afdeklaag (Cd(act)) en de maximale opname wanneer geen afdeklaag aanwezig is (Cd(max)). Op deze concentraties wordt de concentratie in de referentie situatie in mindering gebracht. Deze verhouding wordt uitgedrukt als een percentage en kan dus variëren van 0 tot 100%, waarbij 0% staat voor geen invloed van het demping materiaal en 100% voor maximaal effect. Deze effecten staan los van de grootte van het landbouwkundig risico. In figuur 7 is de invloed van demping materiaal op de Cd-opname weergegeven voor een situatie zonder turbatie-effecten. Uit deze figuur is nu af te leiden dat de invloed van dempingmateriaal altijd afwezig is bij laagdiktes van minstens 0,3 m. De landbouwkundige risico's voor het metaal cadmium blijven onder de toelaatbare grenswaarde. Uit deze figuur blijkt ook dat uitspoeling van cadmium uit de toplaag vrijwel wordt gecompenseerd door de jaarlijkse aanvoer. De invloed van demping materiaal verandert bij dunnere afdeklaagen vrijwel niet, hetgeen betekent dat de voorraden erg groot zijn. De invloed die op tijdstip T = 0 is berekend kan dus worden gezien als de invloed in situaties zonder turbatie.

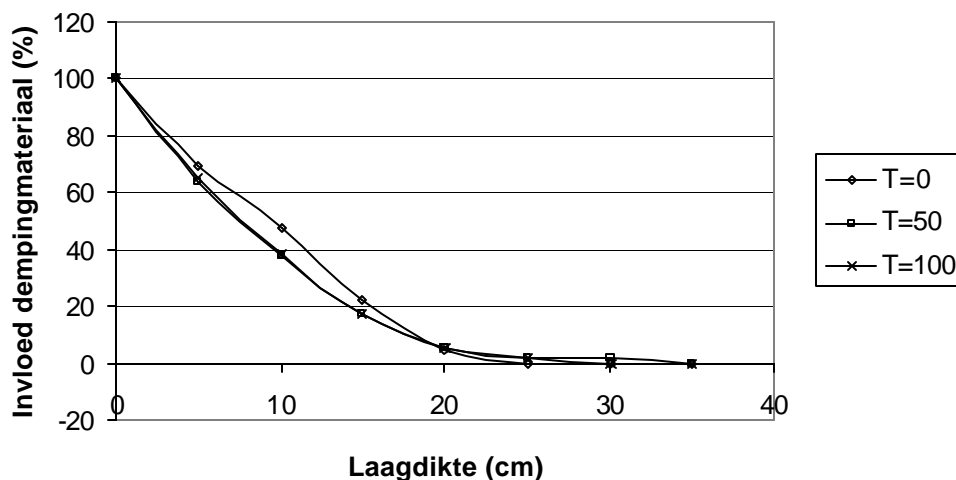


Fig 7 Invloed dempingmateriaal op cadmiumopname door gras bij verschillende diktes van de afdeklaag op verschillende tijdstippen na aanbrengen (geen verlies van organische stof en geen turbatie)

De invloed van dempingmateriaal is vervolgens berekend voor situaties waarin wel alle vormen van turbatie aanwezig zijn. Deze resultaten zijn in tabel 3 (inclusief landbouwkundige risico's) en fig. 8 weergegeven.

Uit tabel 4 blijkt dat het absoluut niveau van het landbouwkundig risico van cadmium na verloop van tijd afneemt, maar de invloed van dempingmateriaal op de opname van

cadmium door gras daarentegen toeneemt (zie ook fig. 8). Dat verschijnsel kan volledig aan de gevolgen van turbatie worden toegeschreven. Afname van landbouwkundige risico's zijn het gevolg van afname van de gehalten in de toplaag, terwijl toename van de invloed van dempingmateriaal het gevolg is van verhoogde gehalten in het onderste deel van de wortelzone waardoor de opname door gras toeneemt.

Tabel 4 Samenhang dikte schone afdeklaag en invloed demping resp. landbouwkundige risico's (~cadmiumgehalte rundernier als percentage van Warenwetnorm) bij aanwezigheid van turbatie

Laagdikte (cm)	Invloed dempingmateriaal (%)			Landbouwkundig risico (%)		
	T=0	T=50	T=100 j	T=0	T=50	T=100 j
0	100	100	100	75	45	37
5	69	78	82	32	42	35
10	47	58	64	31	38	33
15	22	41	48	31	35	31
20	6	27	34	31	32	29
25	0	16	23	31	29	27
30	0	9	15	31	28	26
35	0	0	1	31	25	24

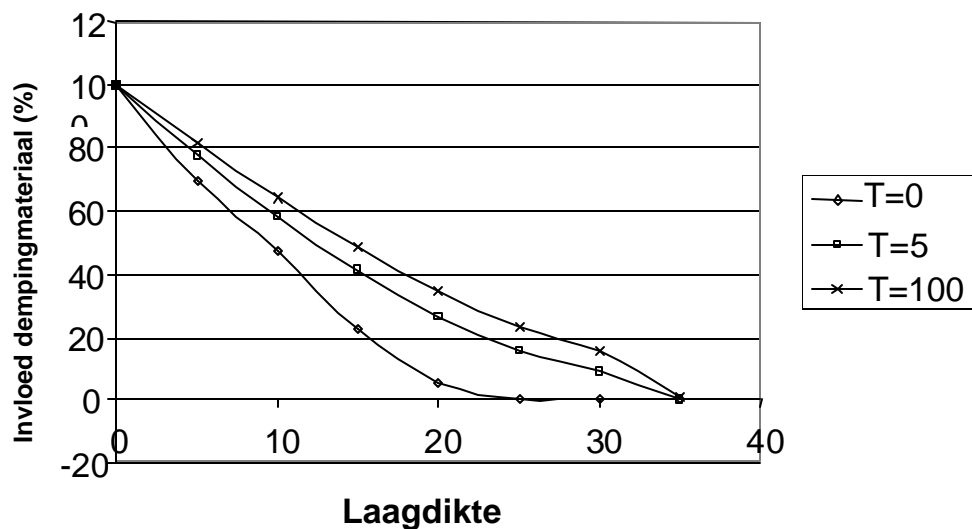


Fig. 8 Berekende invloed van het dempingmateriaal shredder op de opname van cadmium door gras bij verschillende diktes van de afdeklaag (inclusief turbatie)

Op grond van deze berekeningen en de daaraan ten grondslag liggende uitgangspunten, kan men echter wel concluderen dat een laag van 0,3 – 0,35 m afdekgrond toereikend lijkt.



afgebeeld van de simulaties voor een periode van 50 jaar. Deze periode is gekozen omdat de leeftijd van de onderzochte dempingen niet bekend is, maar waarschijnlijk tussen 20 en 30 jaar ligt.

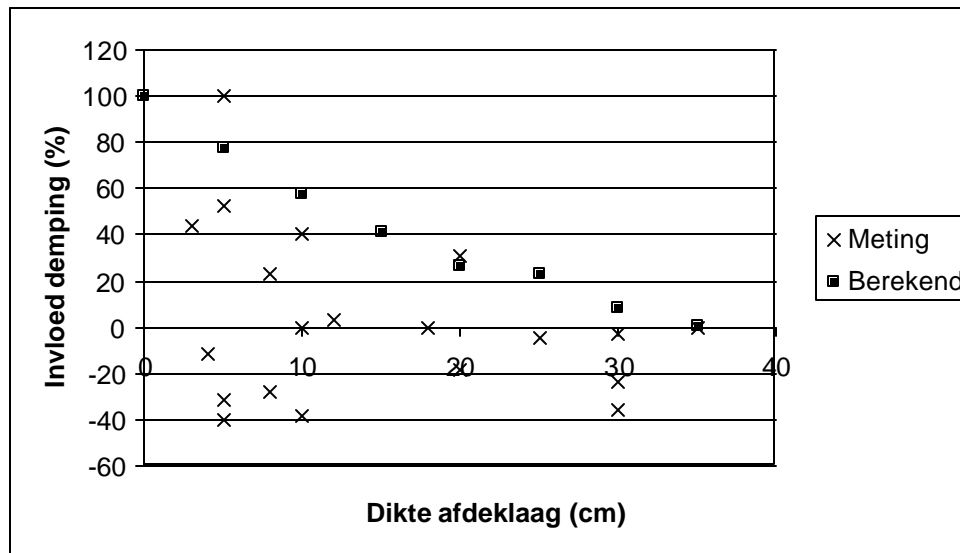


Fig 10 Berekende en uit metingen afgeleide invloed van demping materiaal (shredder) op het cadmium gehalte van gras.

De invloed van dempingmateriaal op het cadmiumgehalte in gras heeft volgens de metingen een zeer grote spreiding. Los van mogelijke lokale bodemverschillen (organische stof, pH, klei gehalte, activiteit bodemoplossing) zijn ook de diverse vormen van turbatie daarop van invloed. De berekende invloed lijkt een maximale invloed te representeren en geeft dus een conservatief beeld. Uit deze vergelijking kan ook worden geconcludeerd dat de gebruikte overdrachtsfactor van cadmium in het bodemvocht naar bovengrondse delen van gras een maximum waarde is. De berekende invloed van dempingmateriaal is dus een maximale invloed, waardoor de conclusies aan de veilige kant zitten. Geconcludeerd kan worden dat de simulatie een betrouwbare informatie geeft over de veilige dikte van de afdeklaag.

## 4 Conclusies

### ***Relatie gehalten bodem-gras***

Uit het onderzoek kan worden afgeleid dat er behoudens voor de metalen cadmium en zink geen significante relatie bestaat tussen gehalten van zware metalen in de bodem en in gras. Voor beoordeling van landbouwkundige risico's dient men derhalve zowel de grond als gewas te analyseren.

### ***Landbouwkundige risico's***

Uit de metingen is gebleken dat de metalen cadmium en koper een rol spelen bij bouw- en sloopafval, terwijl de metalen zink en kwik dat op demping met shredder doen. Enkele metingen duiden op te hoge kopergehalten in gras en bodem voor schapen, terwijl de grenswaarde van koper voor rundvee op geen enkele demping wordt overschreden. Op dempingen worden landbouwkundige risico's van cadmium, lood en kwik worden voor respectievelijk 88, 47 en 70% bepaald door gehalten in gras. Op de referentie lokaties bepalen cadmium en kwik in gras het berekend niveau van de risico's voor 89 en 48% respectievelijk. Modelberekeningen laten daarentegen zien dat landbouwkundige risico' van cadmium overwegend (~98%) door gehalten in de bodem worden bepaald. Het is raadzaam om landbouwkundige risico's zowel op de veevoedernorm als de Warenwetnorm te baseren.

### ***Omvang steekproeven tbv. verificatieonderzoek***

De steekproefomvang voor het verifiëren van aannamen ten aanzien van risico's van verdachte dempingen is afhankelijk van de eis t.a.v. de absolute fout die men wil of mag tolereren en de zekerheid dat deze niet wordt overschreden. Een absolute fout van 5% van het landbouwkundig risico vereist ca. 100 steekmonsters per dempingcategorie met een zekerheid van 90%, terwijl bij een absolute fout van 10% met 25 steekmonsters kan worden volstaan. Zou men met een zekerheid van 80% genoeg nemen dan zijn er 60 resp. 15 steekmonsters nodig.

### ***Omvang te analyseren monsters tbv verificatie-onderzoek***

Het aantal te analyseren steekmonsters in het verificatieonderzoek kan worden verlaagd door per locatie mengmonsters samen te stellen. Binnen (nog nader te bepalen) grenzen is er een trade off tussen enerzijds het aantal te onderzoeken dempingen per categorie en anderzijds het aantal te nemen steekmonsters per locatie.

### ***Turbatie***

Gebleken is dat in de literatuur beperkte informatie aanwezig is over kwantitatieve gegevens van turbatie door regenwormen. De laag grond die jaarlijks als gevolg van graafactiviteit aan maaiveld wordt gebracht, varieert van 0,5 tot 5 mm. Onbekend is echter de diepte vanwaar die grond afkomstig is. Uit de literatuur omtrent C-14 dateringen van organische stof in de bodem, kon worden afgeleid dat de laagdikte waarin bioturbatie plaats vindt, beperkt blijft tot enkele decimeters.

De laagdikte die in het geding is bij turbatie door vee (vertrapping van de zode) blijft volgens de ontwikkelde theoretische benadering beperkt tot ca. 25 cm. De dikte van de bodemlaag waarin enige grondverplaatsing optreedt door diep insporende wielen van werk- en voertuigen, is dan 0,4 m. Turbatie door vertrapping van de zode en insporing leidt meer tot verplaatsing van de grond dan tot menging. Voor de hier gevolgde gebiedsbenadering is deze verplaatsing om pragmatische redenen vertaald in een zekere menging.

Uit de berekening van het gemiddeld aantal dagen waarop jaarlijks een vertrappingsgevoelige situatie aanwezig is, is afgeleid dat op 4% van het grasland areaal jaarlijks vertrapping optreedt. Voor insporende werk- en voertuigen blijft dit areaal onder de 5%.

### ***Veilige en duurzame afdeklaag op verdacht demping materiaal***

De invloed van dempingmateriaal is berekend aan de hand van het gedrag van cadmium in de bodem. Cadmium dient daarbij als een gidsparameter. Deze invloed is gedefinieerd als de verhouding tussen de werkelijk (berekende) opgenomen hoeveelheid cadmium door gras en de opname (uit dempingmateriaal) bij afwezigheid van een afdeklaag. Deze hoeveelheden zijn gecorrigeerd voor de opname in de referentie situatie. Gebleken is dat de invloed na verloop van tijd toeneemt, terwijl het niveau van het landbouwkundige risico in absolute zin afneemt als gevolg van (enige) uitspoeling van cadmium uit de toplaag. Als men enige beïnvloeding accepteert, maar wel eist dat landbouwkundig risico's ook op de lange termijn afwezig blijven, is een dikte van 30 cm van de afdeklaag toereikend. Eist men daarentegen volledige afwezigheid van deze invloed, dan zullen de afdeklaagen minstens 35 cm moeten zijn. De berekeningen zijn getoetst aan metingen en geconcludeerd is dat de berekeningen een betrouwbare informatie geven over de veilige laagdikte. Overigens is uit de metingen gebleken dat er op dempingen met bouw- en sloopafval geen samenhang bestaat tussen cadmium gehalten in de bodem en gras en dikte van de afdeklaag op dit dempingmateriaal.

### ***Aanbeveling:***

- 1 Hoewel gebleken is dat landbouwkundige risico's vrijwel ontbreken op twee typen dempingen met een onverdachte afdeklaag van ca 30 cm, wordt aanbevolen deze verificatie ook voor de overige dempingen uit te voeren. Ook wordt aanbevolen om daarbij dempingen te betrekken met verdachte bijmengingen (fysiek risico aanwezig) om uitsluitel te krijgen of op die dempingen eventueel met een dunnere afdeklaag zou kunnen worden volstaan vanuit het oogpunt van risico's die voortvloeien uit de chemische verontreiniging van die lagen. Het argument daarvoor is dat hoewel het bodembeheerplan ook voor die dempingen uitgaat van een afdeklaag van 30 cm, het de eigenaren wel toestaat een dunnere laag aan te brengen wanneer dat vanuit het oogpunt van fysieke belemmeringen geen bezwaar is.
- 2 Indien geen invloed van dempingmateriaal op de opname door gras wordt getolereerd, zullen de diktes van de afdeklaag mogelijk meer dienen te bedragen dan 30 cm. Om te bepalen welke dikte dan nodig is, is meer feitelijke informatie nodig omtrent de omvang van turbatie. In dat geval wordt aanbevolen dit vast te

stellen op basis van een gecontroleerde proef en van waarnemingen omtrent de ruimtelijke verdeling van regenwormen in de Krimpenerwaard.

- 3 In de hier gepresenteerde berekeningen is aangenomen dat er geen netto afbraak van organische stof en dus ook geen maaiveldsdaling optreedt. De werkelijkheid is echter anders (maaiveldsdaling van ca. 25 cm per eeuw in de Krimpenerwaard). Aanbevolen wordt om deze te kwantificeren en de invloed daarvan op de dikte van de afdeklaag en de mobiliteit van verontreinigingen te onderzoeken.





## Literatuur

Boels, D., A.J.Zweers, J.G. te Beest, P.F.A.M. Römken en J. Bril, 2000. Evaluatie actief Bodembeheer Krimpenerwaard. Een methode voor de verificatie van landbouwkundige risico's; Tussenrapport fase I. Wageningen, Programma Geïntegreerd Bodemonderzoek (PGBO), Rapporten PGBO deel 34.

Broekema J.W. Bodemverontreiniging en voedingsgewassen. Den Haag, Provincie Zuid-Holland, Provinciale Waterstaat, Afd. Milieu. (~1983)

Darwin, C., 1881. The formation of vegetable mould through the action of worms, with observations of their habits. London, Murray. 326 pp.

Edwards, C.A. and J.R. Lofty, 1972. Biology of Earthworms. London, Chapman and Hall Ltd. 283 pp.

Fleming, G.A., 1985. Soil ingestion by grazing animals; A factor in sludge-treated grassland. In: R.D. Davis, H. Heani and P.L. Hermite (eds). Factors influencing sludge utilisation practices in Europe. Elsevier Applied Science Publishers 43-50

Giani, L. and H. Helmers, 1997. Migration of Cesium-137 in typical soils of North Germany ten years after the Chernobyl accident. Z. Pflanzenernaehr. Bodenk., 160: 81-83

Guild, W.J. Mc. L., 1955. Earthworms and soilstructure. In: Soil Zoology, D.K.Mc. E. Kevan (ed.) London, Butterworths. pp. 83-98.

Gruijter, J.J. de, 2000. Sampling for spatial inventory and monitoring of natural resources. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 070, ISSN 1566-7197, 80 pag.

Hack-ten Broek, M.J.D., 2000. Nitrate leaching from dairy farming on sandy soils. Case studies for experimental farm De Marke. Thesis Wageningen University. ISBN 90-5808-244-x

Herlin, H.H and I. Andersson, 1996. "Soil ingestion in farm animals; A review". Sweden, Lund, Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. Agric. Biosystems and Technology. Report 105

Hinton, T.G., J.M. Stoll and L. Tobler, 1995. Soil contamination of plant surfaces from grazing and rainfall interactions. J. Environ. Radioactivity 29:11-26

Hooft, W.F. van, 1995. Risico's voor de volksgezondheid als gevolg van blootstelling van runderen aan sporenelementen bij beweiding. Bilthoven, RIVM, Rapport 693810001. 123 p

Kollmansperger, G., 1943. The Oligochaeta of the Bellinchen Region. Inaugural dissertation. Dillingen (Saargebiet).

Landbouwadvisiecommissie milieukritische stoffen, Werkgroep verontreinigde gronden, LAC, 1991. Den Haag, Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Directoraat-Generaal Landelijke Gebieden en Kwaliteitszorg.

Muller, S. und W. Bucking, 1989. Bioturbation im Waldboden. Zusammenfassung der Messergebnisse in suddeutschen Bannwäldern. Mitteilung des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung.

Pilotproject Krimpenerwaard, 1998. Bestuursovereenkomst, Bodembeheerplan, Achtergronddocument. Stolwijk, Stichting Beheer Krimpenerwaard.

Prandtl, L., 1921. Über die Eindringungsfestigkeit (härte) plastischer Baustoffe und die Festigkeit von schneiden. Z. für angew. Mathematik u. Mechanik 1, 1:15-21.

Projectgroep Veterinaire Milieuhygiëne, 1997. Veterinaire Milieuhygiënewijzer. Veterinaire Inspectie van de Volksgezondheid.

Provincie Zuid-Holland, 1999. Verontreinigde neerslag in Zuid-Holland 1998. Den Haag, Provincie Zuid-Holland, Directie Water en Milieu, Afd. Lucht, Veiligheid en Geluid. 134 p.

RIVM / KNMI, 1989. Landelijkmeetnet Regenwatersamenstelling. Meetresultaten 1988. De Bilt, KNMI, publ. 156-11; Bilthoven, RIVM, rapport 228703012.

Scharpenseel, H.W., K. Tsutsuki, P. Becker-Heidmann und J. Freytag, 1986. Untersuchungen zur Kohlenstoffdynamik und Bioturbation von Mollisolen. Z. Pflanzenernaehr. Bodenk., 149: 582-597

Thijs, H.M.E., 1990. Resultaten van het Bedrijfsmodellen-Onderzoek Krimpenerwaard. Utrecht, Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, Landinrichtingsdienst, Mededelingen 195. ISSN: 0920-8992.

Wijk, A.L.M. van and R.A. Feddes, 1986. Simulating effects of soil type and drainage on arable crop yield. In: A.L.M. van Wijk and J.G. Wesseling (eds.). Agricultural Water Management. Proceedings Symposium on Agricultural Water Management, Arnhem, 18-21 June, 1985. Balkema Rotterdam, pp. 97-112

Wösten, J.H.M., M.H. Bannink en J. Beuving, 1987. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: De Staringreeks. Wageningen, DLO-Staring Centrum, ICW-rapport 18, STIBOKA-rapport 1932.

**Bijlage 1 Zware metalen gehalte in grond en gras (minimum, maximum, gemiddeld gehalte , en onder- en bovengrens van het 90% betrouwbaarheidsinterval van een log-normale verdeling); per locatie 10 plekken**

Locatie	Metaal	Grond (mg/kg ds)						Gras(mg/kg ds)					
		Min.	Max.	Gem.	Ondergr.	Bovengr.	Mengm.	Min.	Max.	Gem.	Ondergr.	Bovengr.	Mengm.
Ref-3	Hg			0.289			(PGBO-studie)			0.099			(PGBO-studie)
3-1	Hg	0.137	0.340	0.221	0.126	0.386		0.008	0.044	0.018	0.008	0.043	
Ref-4	Hg			0.391						0.023			
4-1	Hg	0.184	2.531	0.454	0.106	1.940		0.007	0.083	0.029	0.004	0.198	
Ref-5	Hg			0.525						0.049			
5-1	Hg	0.217	0.294	0.249	0.201	0.309		0.028	0.076	0.040	0.024	0.066	
Ref-6	Hg			13.881						0.108			
6-1	Hg	0.293	17.288	2.490	0.194	31.981		0.010	0.135	0.042	0.030	0.059	
Ref-3	As			10.460						1.087			
3-1	As	5.643	14.381	8.053	4.230	15.330		0.349	1.801	0.908	0.351	2.347	
Ref-4	As			12.112						1.200			
4-1	As	4.730	17.227	8.324	3.957	17.511		0.055	1.733	#N/A	#N/A	#N/A	
Ref-5	As			10.216						0.528			
5-1	As	4.974	12.855	6.723	4.052	11.156		0.000	1.120	#N/A	#N/A	#N/A	
Ref-6	As			17.315						0.912			
6-1	As	3.813	40.522	13.946	4.209	46.209		0.115	1.906	0.567	0.061	5.228	
Ref-3	Cr			49.612			54.9			6.429			1.830
3-1	Cr	19.700	58.806	28.759	14.469	57.162	33.4	0.952	13.541	3.205	0.455	22.583	2.470
Ref-4	Cr			50.996			53.5			4.118			2.220
4-1	Cr	24.470	70.810	37.697	20.802	68.314	34.7	0.793	48.297	2.981	1.113	7.982	2.000
Ref-5	Cr			42.735			43.5			1.473			1.180
5-1	Cr	18.937	38.460	25.171	14.666	43.201	25.8	1.112	22.566	3.175	2.118	4.760	2.640
Ref-6	Cr			45.708			51.1			2.203			2.710
6-1	Cr	15.193	203.990	62.495	14.143	276.159	91.4	0.791	37.074	7.028	0.201	245.892	0.990

Locatie	Metaal	Grond (mg/kg ds)						Gras(mg/kg ds)					
		Min.	Max.	Gem.	Ondergr.	Bovengr.	Mengm.	Min.	Max.	Gem.	Ondergr.	Bovengr.	Mengm.
Ref-3	Zn			165.971			165.4			62.314			35.000
3-1	Zn	82.323	322.691	141.462	64.929	308.204	147.2	53.746	149.752	75.048	53.318	105.634	47.700
Ref-4	Zn			178.227			161.2			59.800			41.800
4-1	Zn	154.779	6364.751	451.370	51.434	3961.097	1019.7	61.006	410.486	135.691	18.629	988.360	106.700
Ref-5	Zn			168.752			206.6			34.416			24.300
5-1	Zn	140.766	516.857	232.530	100.731	536.778	237.2	35.957	103.509	51.386	30.679	86.069	49.600
Ref-6	Zn			237.180			249.2			78.446			67.000
6-1	Zn	280.134	11118.186	1350.766	167.261	10909	3045.7	154.309	332.436	210.526	194.549	227.815	134.400
Ref-3	Cu			62.346			61.8			12.961			10.250
3-1	Cu	27.035	65.688	41.375	24.765	69.125	42.1	7.732	14.450	11.818	10.005	13.961	9.940
Ref-4	Cu			55.367			54.4			18.082			13.310
4-1	Cu	40.099	406.987	114.622	25.120	523.025	158.6	11.358	20.184	15.670	8.802	27.898	12.880
Ref-5	Cu			69.538			95.1			8.188			7.020
5-1	Cu	38.075	317.770	84.745	19.254	372.997	90.1	8.990	23.364	12.470	9.407	16.530	10.070
Ref-6	Cu			104.404			96.3			11.764			8.170
6-1	Cu	36.380	3570.471	384.426	26.217	5636.943	943.6	4.482	36.382	10.977	4.195	28.723	5.670
Ref-3	Ni			31.139			32.8			16.038			2.190
3-1	Ni	16.212	35.429	21.895	13.621	35.197	22.1	0.308	2.940	#N/A	#N/A	#N/A	1.650
Ref-4	Ni			28.768			31.1			0.594			1.220
4-1	Ni	23.282	62.675	34.551	18.266	65.356	35.5	0.000	36.527	#N/A	#N/A	#N/A	1.950
Ref-5	Ni			28.209			26.1			0.000			1.200
5-1	Ni	17.006	43.132	21.630	12.261	38.158	23.5	1.142	10.387	#N/A	#N/A	#N/A	9.830
Ref-6	Ni			31.218			35.5			0.409			16.680
6-1	Ni	13.449	573.175	68.233	8.952	520.095	128.2	0.887	41.807	#N/A	#N/A	#N/A	1.380

Locatie	Metaal	Grond (mg/kg ds)						Gras(mg/kg ds)					
		Min.	Max.	Gem.	Ondergr.	Bovengr.	Mengm.	Min.	Max.	Gem.	Ondergr.	Bovengr.	Mengm.
Ref-3	Pb			68.399			69.9			1.890			
3-1	Pb	35.813	201.432	78.634	23.576	262.271	70.5	0.000	10.998	#N/A	#N/A	#N/A	
Ref-4	Pb			91.207			79.8						
4-1	Pb	52.648	469.106	144.625	31.679	660.252	180.1	0.000	4.340	#N/A	#N/A	#N/A	
Ref-5	Pb			98.977			108.7						
5-1	Pb	56.659	308.046	86.164	26.544	279.693	101.1	0.192	37.683	#N/A	#N/A	#N/A	
Ref-6	Pb			211.533			193.2			2.795			
6-1	Pb	70.291	2871.858	533.649	64.231	4433.709	994	0.884	8.225	2.810	2.183	3.619	
Ref-3	Cd			1.107			< 3.15			0.096			0.070
3-1	Cd	0.437	0.893	0.647	0.441	0.951	< 3.15	0.023	0.355	0.139	0.072	0.269	0.250
Ref-4	Cd			0.977			< 3.15			0.435			0.120
4-1	Cd	0.422	6.395	1.079	0.162	7.176	< 3.15	0.100	0.862	0.298	0.067	1.320	0.300
Ref-5	Cd			1.054			< 3.15			0.060			0.210
5-1	Cd	0.338	5.292	0.986	0.184	5.293	< 3.15	0.062	1.072	0.183	0.080	0.416	0.110
Ref-6	Cd			1.066			< 3.15			0.116			0.410
6-1	Cd	1.023	9.680	3.278	0.937	11.474	4.61	0.074	0.597	0.225	0.123	0.414	0.360

Ref. = referentielocatie

Ondergr. = gehalte ondergrens 90% betrouwbaarheidsinterval (log-normale verdeling)

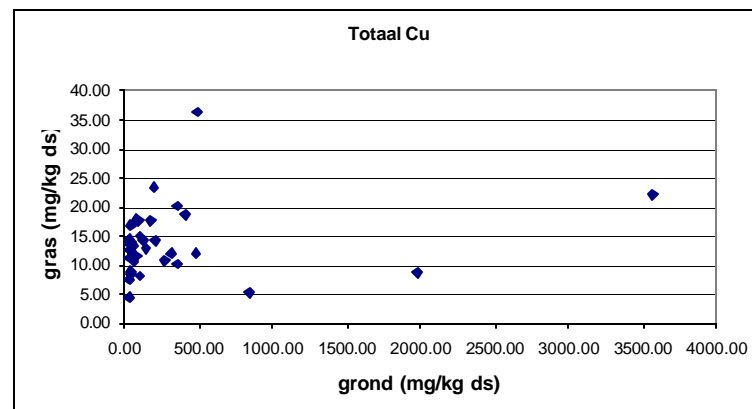
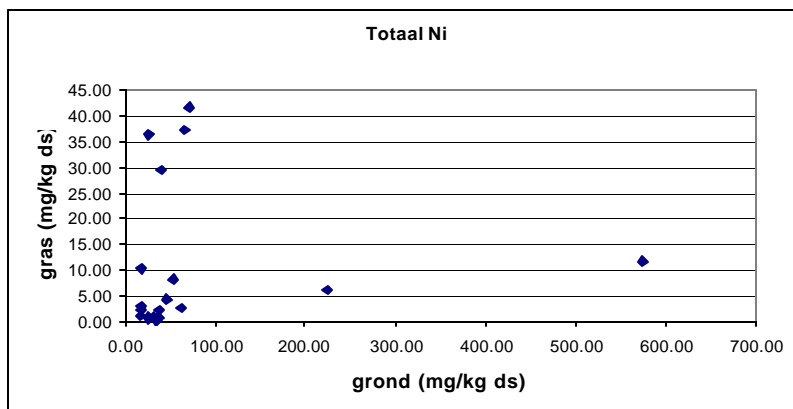
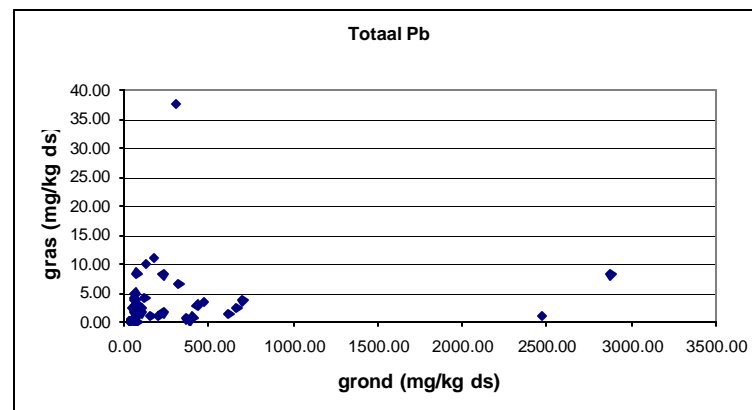
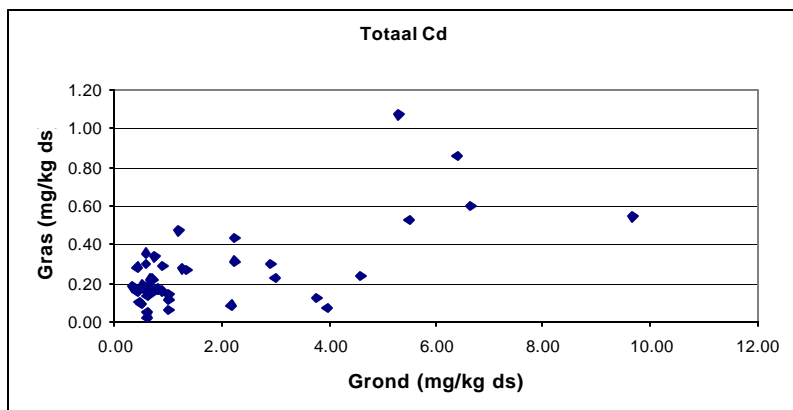
3-1 = demping 3, laag 1 (0 -0,05 m -mv)

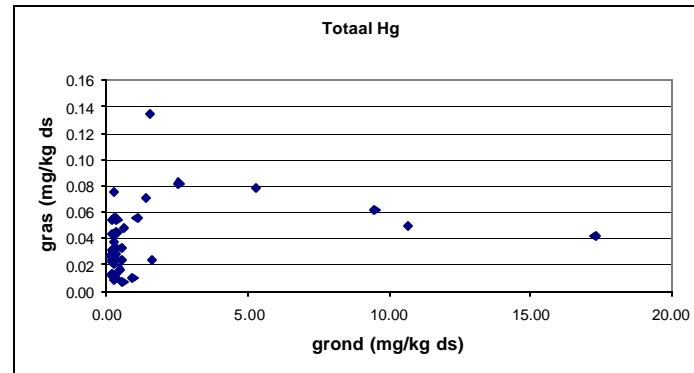
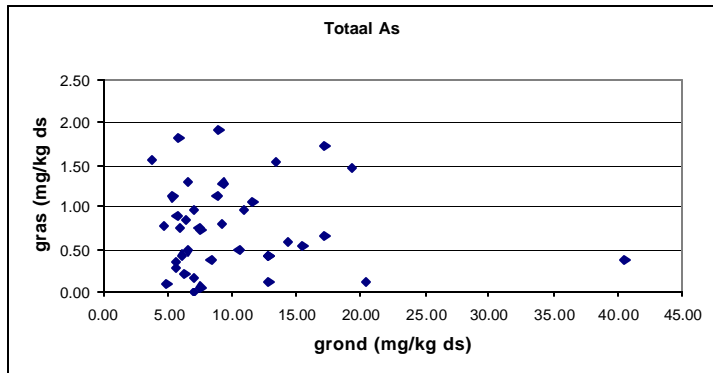
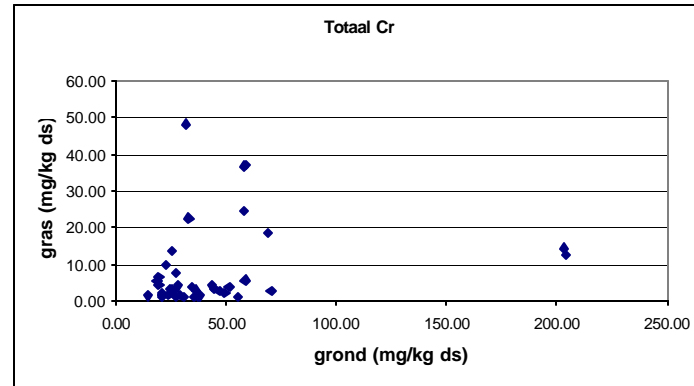
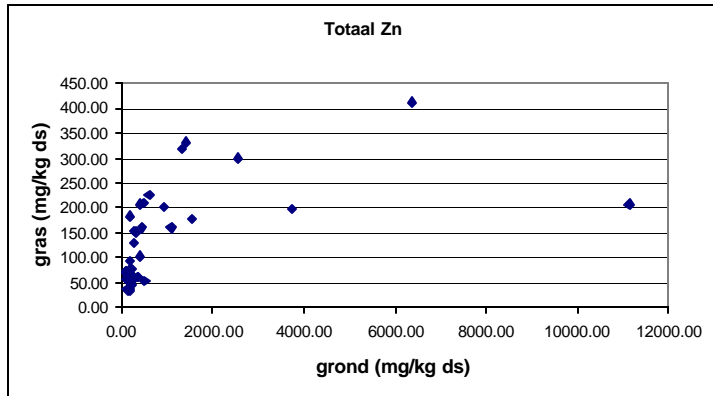
Bovengr. = gehalte bovengrens 90% betrouwbaarheidsinterval

#N/A = minstens een meting ontbreekt in de reeks



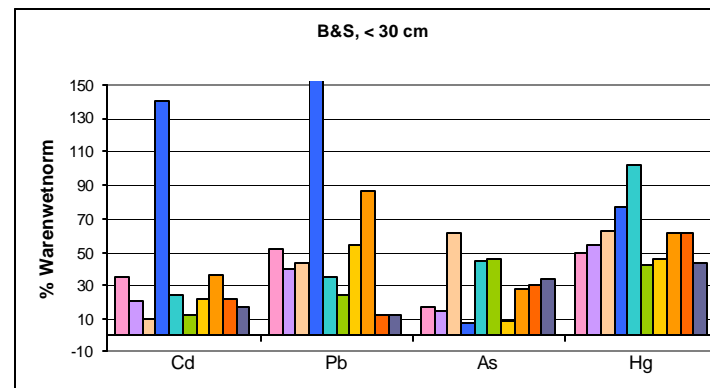
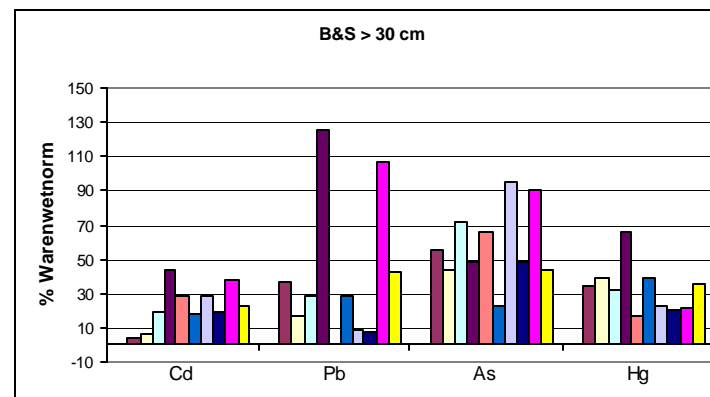
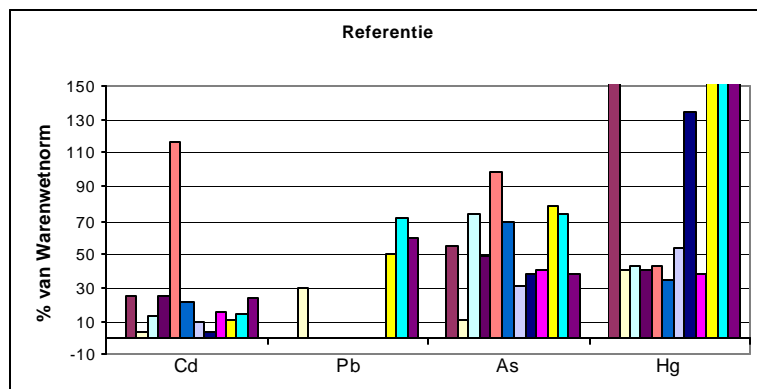
## Bijlage 2 Relatie gehalte in gras en grond

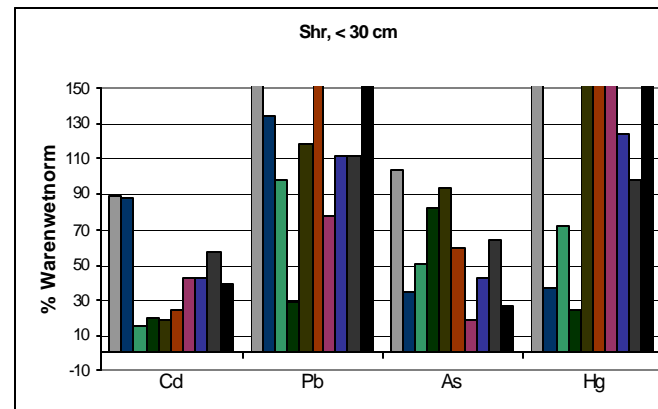
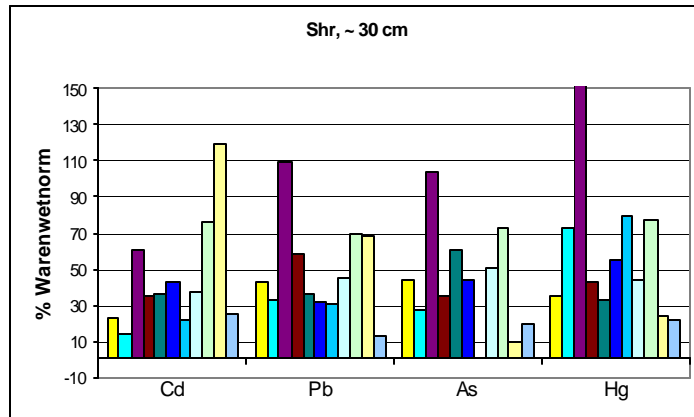






### Bijlage 3 Spreiding in gehalte rundernier (% van warenwetnorm)





## **Bijlage 4 Turbatie door vertrapping van de zode en insporende werk- en voertuigen**

Turbatie door werk- en voertuigen en vertrapping van de zode door vee is het gevolg van grondverplaatsing en is een complex proces. De grond direct onder wielen of hoeven wordt als het ware in de bodem geperst en verplaatst daarbij een hoeveelheid grond in neerwaartse, zijdelingse en opwaartse richting. De baan die denkbeeldige grondpartikeltjes tijdens insporing volgen kan worden beschreven op basis van een plastisch bodemgedrag. Aangenomen wordt dat insporing kan worden opgevat als een reeks opeenvolgende toestanden waarin het evenwicht van krachten juist verloren gaat (bezwijktoestand) en na een kleine insporingsincrement weer wordt hervonden. Tussen de opeenvolgende denkbeeldige evenwichtstoestanden wordt aangenomen dat de hoeveelheid grond die bij het insporingsincrement in het geding is, langs glijvlakken wordt verplaatst waarin vooraf aan het insporingsincrement juist evenwicht van krachten heerste. Om het proces rekenkundig te vereenvoudigen vatten we het insporingsproces op als een twee dimensionaal proces ('strip belasting'). Het wiel (of hoef) heeft een beperkte breedte, maar de lengte van het contactvlak is 'oneindig'. Daarmee is insporing gereduceerd tot de indringing van een oneindig lange stugge strip. De verdeling van krachten onder en naast die strip en de vorm van de glijvlakken kan nu met de benadering van Prandtl, 1921, worden beschreven.

Insporing is dus gereduceerd tot twee elkaar afwisselende processen: het ene proces betreft de verplaatsing van een zeker volume grond dat als een visceuze vloeistof langs schuif- of glij vlakken (soort stroombanen) stroomt . Het tweede proces is de inzakking van het wiel ('oneindig' lange strook) over een zekere incrementele waarde in de bodem, waarbij geen grondverplaatsing meer optreedt, maar wel een nieuw evenwicht van krachten optreedt met nieuwe glijvlakken.

Het grondgedrag wordt in deze benadering beschreven volgens Coulomb:

$$t = c + s \operatorname{tg}(f)$$

- t afschuifspanning (Pa)
- c cohesie (Pa)
- s normaalspanning op glijvlak (Pa)
- f hoek van inwendige wrijving.

Volgens Prandtl, 1921, kunnen onder de belaste strip die net niet in de grond wegzakt (statische situatie) een aantal zones worden onderscheiden. De eerste zone betreft een wigvormig grondlichaam waarvan de schuine zijkanten een hoek van  $(B/4 + N/2)$  maakt met het vlak onder het wiel.

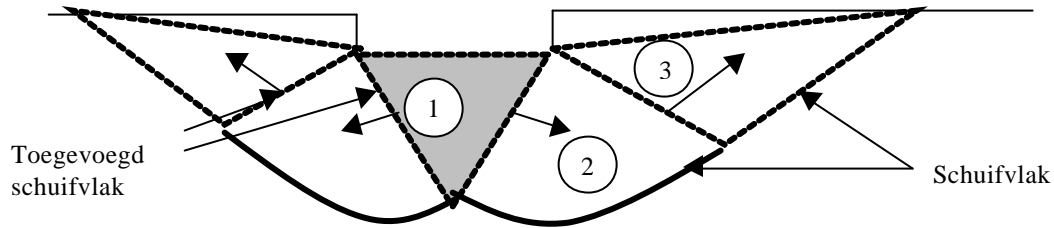


Fig. 2 Schematische weergave van schuifvlakken onder een wiel of hoef op het bezwijkmoment (naar Prandtl, 1921)

Deze wig (zone 1) duwt de grond zijdelings weg langs een glijvlak met een gekromd oppervlak (zone 2, fig. 2). Tenslotte duwt de grondmassa tegen zone 3, die weer een wigvorm heeft (zone 3). De hoek tussen het meest vlak liggend vlak en de rechte schuin naar beneden hellende vlakken bedraagt  $(B/4 - N/2)$ .

In zone 2 (gekromde glijvlakken) neemt de grootte van de hoofdspanningen af. De eerste hoofdspanning maakt een hoek  $\phi$ , het omhullende glijvlak. De voerstraal die het omhullende glijvlak beschrijft kan worden beschreven met:

$$r(\phi) = r(0) e^{g \tan(\phi)}$$

en

$$r(0) = \frac{b}{\cos(45 + \frac{\phi}{2})}$$

Hierin is:

$\phi$  - hoek tussen de voerstraal  $r(\phi)$  en het schuinvlak van zone 1.

$\phi$  hoek van inwendige wrijving

$b$  halve wielbreedte (m)

$r(\phi)$  voerstraal met oorsprong in  $(b, I)$

$I$  insporingsdiepte

$r(0)$  lengte schuinvlak van grondwig in zone 1

$\phi$  hoek tussen voerstraal en schuinvlak van grondwig in zone 1

Een insporingsincrement,  $\phi I$ , veroorzaakt een grondverplaatsing langs glijvlakken en kan worden omgezet in een verplaatsing in x- en y-richtig. Deze verplaatsingen zullen voor de verschillende zones worden beschreven.

### Zone 1

De grondverplaatsing,  $V(x)$  resp.  $V(y)$ , in deze zone kent slechts één richting en is het gevolg van het wegdrücken van een grondwig in neerwaartse richting door het insporend wiel:

$$V(x) = 0$$

en

$$V(y) = \Delta I$$

Deze zone is gedefinieerd door:

$$I = y < I + b \operatorname{tg}(B/4 + N/2)$$

$$0 = x < b - (y - I) \cotg(B/4 + N/2).$$

en  $I = ? ? I$

### **Zone 2**

De verplaatsing langs het glijvlak dat met een voerstraal met oorsprong in  $(b, I)$  beschreven kan worden, wordt afgeleid uit het verplaatst volume grond bij een insporingsincrement  $(= b \times ? I)$  en de lengte van het toegevoegd schuifvlak dat samenvalt met de voerstraal,  $r(?)$ :

$$V(\mathbf{g}) = \frac{b \times \Delta I}{r(\mathbf{g})} = \frac{\cos(45 + \frac{\mathbf{f}}{2})}{e^{\mathbf{g} \operatorname{tg}(\mathbf{f})}} \Delta I$$

Hiervoor geldt  $y: 0 = ? = p/2$ . In een bepaald punt  $(x, y)$ , waar het toegevoegd glijvlak een hoek  $?$  maakt met het vlak  $r(0)$ , is de verplaatsing in de x-richting:

$$V(x) = V(\mathbf{g}) \sin\left(\frac{p}{4} + \frac{\mathbf{f}}{2} + \mathbf{g}\right)$$

en in de y-richting:

$$V(y) = V(\mathbf{g}) \cos\left(\frac{p}{4} + \frac{\mathbf{f}}{2} + \mathbf{g}\right)$$

Zone 2 is begrensd door:

$$0 = s(?) < b \exp(? \operatorname{tg} \mathbf{f}) \cos^{-1}(B/4 + N/2) \text{ voor } 0 = ? < p/2$$

$$\{b - s(?) \cos(B/4 + N/2)\} < x < \{b - s(?) \cos(3/4B + N/2)\}$$

$$y = I + (x - b) \operatorname{tg}(B/4 + N/2 + ?)$$

### **Zone 3**

De verplaatsing in zone 3 betreft zowel de verplaatsing in het gebied begrensd door de tweede grondwig als de grondmassa tussen deze wig en maaiveld.

De zone wordt opgesplitst in twee delen om de begrenzingen mathematisch te kunnen beschrijven. De zone 3a is begrensd door de verticale wand van het wielspoor, het linker schuin naar rechts lopend vlak van de tweede wig, de vertikaal door de top van de deze wig en het maaiveld. Zone 3b wordt begrensd door de vertikaal door de top van de tweede wig, het maaiveld en het rechter schuinvlak van de (rechter) grondwig.

In beide deelgebieden is de verplaatsing in elk punt even groot:

$$V(x) = V\left(\frac{p}{2} + e\right) \sin\left(\frac{f}{2} + \frac{3p}{4} + e\right)$$

$$V(y) = V\left(\frac{p}{2} + e\right) \cos\left(\frac{f}{2} + \frac{3p}{4} + e\right)$$

Het gebied waar de voornoemde verplaatsing voor is gegeven, is begrensd door:

#### **Zone 3a**

$$b = x < \{b + b \cdot \exp((p/2 + e) \operatorname{tg} f) \cdot \cos^{-1}(B/4 - N/2) \cdot \sin(p/4 + f/2 + e)\}$$

$$0 = y < I + (x - b) \operatorname{cotg}(p/4 + f/2 + e)$$

#### **Zone 3b**

$$[b + b \cdot \exp((p/2 + e) \operatorname{tg} f) \cdot \cos^{-1}(B/4 - N/2) \cdot \sin(p/4 + f/2 + e)] = x <$$

$$b \{1 + \exp((p/2 + e) \operatorname{tg} f) \cdot \cos^{-1}(B/4 - N/2) \cdot \sin(p/4 + f/2 + e)\} +$$

$$\exp((p/2 + e) \operatorname{tg} f) \cdot \cos^{-1}(B/4 - N/2) \cos(p/4 - f/2 + e)]$$

en

$$y = \sin(p/4 - f/2 + e) [x - b - b \cdot \exp((p/2 + e) \operatorname{tg} f) \cdot \cos^{-1}(B/4 - N/2) \cdot \sin(p/4 + f/2 + e)]$$

Voor zone 3 geldt:  $0 < e < (B/4 - N/2)$

De totale grondverplaatsing door insporende wielen wordt berekend door voor elk insporensincrement,  $\Delta I$ , de bijbehorende incrementale verplaatsing in de x- en y-richting in denkbeeldige roosterpunten van de twee-dimensionale doorsnede te berekenen. Ook de nieuwe verdeling van verontreiniging in de bodem onder en rond het

wielspoor wordt berekend. Het spoor zelf zal als gevolg van graslandverzorging (slepen, rollen) na verloop van tijd weer worden opgevuld met grond die tijdens spoorvorming boven het oorspronkelijke maaiveld was geperst. De concentratie van de grond waarmee het spoor wordt opgevuld, is gelijk aan de gemiddelde concentratie van die grond.

Insporing leidt tot lokale verandering van de verdeling van de verontreiniging in de bodem. Het effect daarvan op de gemiddelde verdeling van verontreiniging in de bodem op een demping wordt afgeleid uit deze lokale verontreiniging en de wielafstand (Wb). Het bodemprofiel wordt opgedeeld in denkbeeldige laagjes van  $\Delta y$  m. De lagen worden weer opgedeeld in kolommen van  $\Delta x$  m breed. Het aantal lagen is NI-1, de maximale diepte is D1 en het aantal kolommen is Nkol-1.

We definiëren :

$$\Delta x = \frac{1}{2} Wb / \{Nkol-1\}$$

$$\Delta y = D1 / \{NI-1\}$$

De maximale diepte wordt berekend volgens:

$$Dl = I + \frac{b \cdot \cos(f)}{\cos\left(\frac{p}{4} + \frac{f}{2}\right)} e^{\left(\frac{p}{4} + \frac{f}{2}\right) \cdot tg(f)}$$

De concentratie van een bepaalde stof in cel (i,j) is C(i,j). Als wordt uitgegaan van een gelijk droogvolume gewicht in elke laag, dan wordt de gemiddelde nieuwe concentratie van een stof na insporing, c(i), in laag i, berekend volgens:

$$C(i)_{nieuw} = (\Delta x / Wb) \cdot \varphi \cdot C(i,j) ; j = 1, \dots, Nkol ; I = 1, \dots, NI$$

De turbatie van een enkele insporing of inprenting van een hoef wordt berekend door aan te nemen dat het spoor of het gat dat ontstond met materiaal uit de toplaag wordt opgevuld bij de graslandverzorging (rollen, slepen). Aangenomen wordt dat het vulmateriaal afkomstig is van het omhoog gewerkt maaiveld naast het spoor of hoefinprent.

