



ALTERRA

WAGENINGEN UR

Uit- en afspoeling van zware metalen uit landbouwbodems

Toetsing van modelberekeningen middels veldmetingen

L.T.C. Bonten

Alterra-rapport 1883, ISSN 1566-7197



Uit- en afspoeling van zware metalen uit landbouwbodems.

In opdracht van VROM

Uitspoeling van zware metalen uit landbouwbodems

Toetsing van modelberekeningen middels veldmetingen

L.T.C. Bonten

Alterra-Rapport 1883

Alterra, Wageningen, 2009

REFERAAT

Bonten, L.T.C., 2009. *Uitspoeling van zware metalen uit landbouwbodems; Toetsing van modelberekeningen middels veldmetingen*. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 1883. 66 blz.; 29 fig.; 14 tab.; 15 ref.

De zware metaalconcentraties zijn in veel oppervlaktewateren in Nederland te hoog. Uitspoeling uit bodems is een belangrijke bron van oppervlaktewaterbelasting. Uitspoeling wordt geschat met modelberekeningen. Dit onderzoek toetst de gebruikte modellen aan veldmetingen. Er is gekeken naar: i) de schematisatie van gehalten in de vaste fase, ii) de overdracht van de vaste fase naar het bodemvocht en iii) de overdracht van het bodemvocht naar het oppervlaktewater. De gehalten in de vaste fase worden goed voorspeld met uitzondering van de ondergrond en van nikkel. Ook bodemvochtconcentraties kunnen redelijk worden voorspeld, maar dit blijkt sterk afhankelijk van de gebruikte evenwichtsrelatie. Tenslotte, oppervlaktewaterconcentraties komen goed overeen met bodemvochtconcentraties en worden ook goed voorspeld vanuit de vaste fase waarbij de gehele modelketen is gebruikt. Variaties in oppervlaktewaterconcentraties kunnen worden verklaard en voorspeld door variaties in de hydrologie.

Trefwoorden: zware metalen, uitspoeling, oppervlaktewater, bodem, model, veldstudie, validatie

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.boomblad.nl/rapportenservice.

© 2009 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

Tel.: (0317) 480700; fax: (0317) 419000; e-mail: info.alterra@wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden veeleelvoudigd 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.

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	9
2 Het project “Bemestingvrije perceelsranden”	11
2.1 Achtergrond van het project	11
2.2 Meetopstelling	11
2.3 Meetlocaties	13
3 Methode voor toetsing van modelinstrumentarium	15
3.1 Inleiding	15
3.2 Modelberekeningen van uitspoeling	15
3.3 Metingen voor uitspoeling van zware metalen	17
3.3.1 Vaste fase van de bodem	17
3.3.2 Bodemvocht en grondwater	17
3.3.3 Oppervlaktewater	18
3.3.4 Oppervlakkige afspoeling	18
3.3.5 Waterbodem	18
4 Vergelijking modelberekeningen en metingen	21
4.1 Vaste fase van de bodem	21
4.2 Van vaste fase naar bodemvocht en grondwater	24
4.3 Van bodemvocht en grondwater naar het oppervlaktewater	26
4.4 Van vaste fase naar het oppervlaktewater	29
4.5 Retentie in de waterbodem	31
4.6 Oppervlakkige afspoeling	34
5 Conclusies en aanbevelingen	35
Literatuur	37
Bijlage 1 Berekeningsmethode van uitspoeling	39
Bijlage 2 Processen niet in uitspoelingsmodel	47
Bijlage 3 Analyseresultaten vaste fase	49
Bijlage 4 Analyseresultaten bodemvocht	53
Bijlage 5 Analyseresultaten oppervlaktewater	57
Bijlage 6 Meetopstelling oppervlakkige afspoeling	59
Bijlage 7 Hydrologisch model SWAP	61
Bijlage 8 Schematisatie zware metaalgehalten in veengronden	63
Bijlage 9 Analyseresultaten waterbodem	65

Samenvatting

In veel oppervlaktewateren in Nederland overschrijden de concentraties van zware metalen de geldende normen. Uitspoeling uit bodem vormt in het landelijk gebied een belangrijke bron van zware metalen. Dit geldt vooral voor landbouwbodems die sterk worden belast met zware metalen uit mest en kunstmest.

De totale uitspoeling uit bodems wordt momenteel geschat met behulp van modelberekeningen. Een probleem hierbij is dat de gebruikte modellen niet of nauwelijks zijn gevalideerd op veldschaal. Het doel van dit onderzoek is om de gebruikte modellen te toetsen middels veldmetingen. Hierbij wordt aangesloten bij het project “Bemestingsvrije perceelsranden”, waarin onderzoek wordt gedaan naar de effecten van bemestingvrije zones op de uit- en afspoeling van nutriënten. Daarnaast bevat dit rapport de resultaten van een onderzoek naar oppervlakkige afspoeling van zware metalen. Dit is een tot dusver niet gekwantificeerde, maar mogelijk wel belangrijke bron van zware metalen in het oppervlaktewater.

Voor de toetsing van de uitspoelingsmodellen is gekeken naar verschillende aspecten van de modellen, namelijk i) de schematisatie van metaalgehalten in de vaste fase van de bodem, ii) de overdracht van de vaste fase naar het bodemvocht en iii) de overdracht van het bodemvocht naar het oppervlaktewater. Daarnaast is gekeken naar mogelijke retentie van metalen in de waterbodem. Dit proces is vooralsnog niet in het model opgenomen.

Uit de vergelijkingen tussen metingen en berekeningen blijkt dat voor de bovengrond, met uitzondering van nikkel, model en metingen goed overeenkomen. Voor de ondergrond worden lokale of regionale variaties in gehalten niet goed meegenomen in model. Voor veengronden wordt soms een te geringe afname van de gehalten met de diepte berekend.

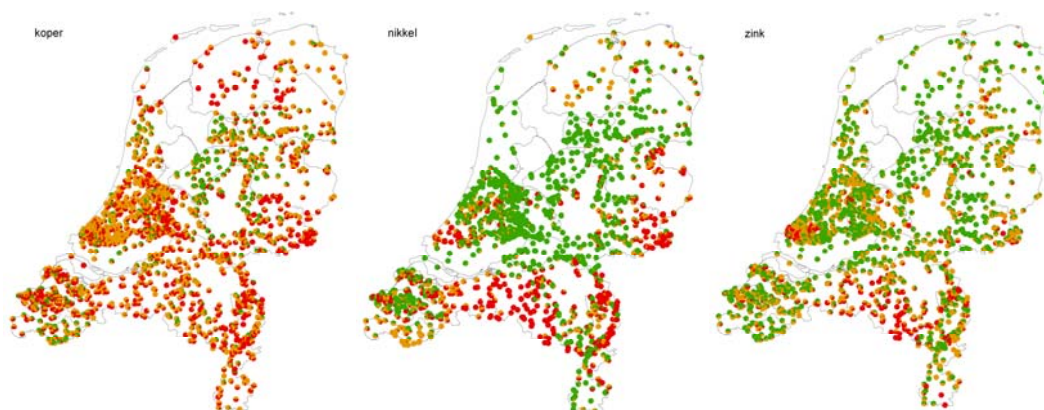
Verder, voor de overdracht van de vaste fase naar het bodemvocht is er een redelijke overeenkomst tussen de modelvoorspellingen en de gemeten concentraties. De modelvoorspellingen blijken sterk afhankelijk van de gebruikte evenwichtsrelatie. Bij de tot dusver gebruikte evenwichtsrelaties, wordt mogelijk een te kleine uitspoeling berekend.

Tenslotte, voor het transport vanuit bodemvocht naar het oppervlaktewater geldt dat de opgeloste concentraties goed overeenkomen met de concentraties in het bodemvocht. De concentraties in het oppervlaktewater blijken sterk afhankelijk van de grondwaterstand: hoge metaalconcentraties komen vooral voor bij hoge grondwaterstanden, doordat dan uitspoeling uit oppervlakkige bodemlagen met hogere gehalten optreedt. Uit het onderzoek naar retentie in de waterbodem blijkt dat de metaalgehalten in de waterbodem verhoogd zijn ten opzichte van de ondergrond. Er kan niet worden vastgesteld of deze verhoogde gehalten het gevolg zijn van retentie dan wel veroorzaakt worden door andere bronnen als oppervlakkige afspoeling en sedimentatie van zwevend materiaal.

1 Inleiding

Achtergrond

De concentraties van zware metalen overschrijden in veel oppervlaktewateren in Nederland de geldende normen. Vooral de concentraties van koper, nikkel en zink zijn in veel gebieden te hoog (zie Figuur 1.1).



Figuur 1.1 Metingen van concentraties van koper (links), nikkel (midden) en zink (rechts) in het oppervlaktewater voor de periode 2000-2005. Metingen met concentraties boven de norm (=MTR) in rood, tussen norm en verwaarloosbaar risico in oranje, en beneden verwaarloosbaar risico in groen.

In het landelijk gebied is uitspoeling uit de bodem een belangrijke, mogelijk zelfs de belangrijkste, bron van zware metalen in het oppervlaktewater (Bonten & Römkens, 2008). Vooral onder landbouwbodems kan de uitspoeling groot zijn, omdat deze bodems sterk belast worden met zware metalen in mest en kunstmest. Omdat uitspoeling uit de bodem naar het oppervlaktewater erg moeilijk direct te meten is, worden modellen gebruikt om deze uitspoeling te schatten.

Sinds 2004 berekent Alterra de uitspoeling van vijf zware metalen op landelijke schaal voor de Emissieregistratie (zie Alterra-rapporten 1044, 1340 en 1695). De Emissieregistratie verzamelt alle bronnen van emissies naar water, bodem en lucht. Verder zijn in 2008 scenarioberekeningen uitgevoerd om effecten van maatregelen op de waterkwaliteit te schatten (o.a. gevolgen van mestbeleid en vermindering van zware metalen in mest) (Bonten et al., 2008c). Tenslotte is op regionale schaal is voor een deel van de Nederlandse Kempen de uitspoeling van cadmium en zink berekend (Kroes et al., 2008).

Modelberekeningen van uitspoeling zijn dus een belangrijk instrument om de zware metaalbelasting van het oppervlaktewater te schatten. Hiermee zijn deze modellen ook een belangrijk aanknopingspunt voor beleid om aan te geven op welke bronnen beleid kan worden gevoerd en verder welke maatregelen effectief kunnen zijn om de oppervlaktewaterkwaliteit te verbeteren.

Het gebruikte uitspoelingsmodel bestaat uit een modelketen van geostatistische modellen, hydrologische modellen en uit laboratoriumexperimenten afgeleide geochemische modellen. De meeste onderdelen in de modelketen en ook de volledige modelketen zijn nog nauwelijks op veldschaal of regionale schaal gevalideerd. In 2008 is geprobeerd de berekende metaaluitspoeling te toetsen aan een aantal regionale stoffenbalansen van zware metalen in het oppervlaktewater. Deze toetsing was niet goed mogelijk omdat de onzekerheden in de beschikbare stoffenbalansen te groot waren. Een toetsing van het model is zeer belangrijk om de uitkomsten van de modelberekeningen te onderbouwen, draagvlak voor eventuele maatregelen te ontwikkelen, onzekerheden in de uitkomsten aan te geven en duidelijk te maken waar verbetering van het model mogelijk is.

In het project “Bemestingsvrije perceelsranden” wordt voor vijf locaties in Nederland met verschillende bodemtypes en landgebruik gedetailleerd veldonderzoek verricht naar de uitspoeling van N en P uit de bodem. De gekozen experimentele aanpak is zeer geschikt om ook uitspoeling van zware metalen te meten. In opdracht van VROM wordt daarom het model voor zware metaaluitspoeling getoetst, waarbij wordt aangesloten bij het project “Bemestingsvrije perceelsranden”.

Één mogelijk belangrijke transportroute van metalen naar het oppervlaktewater wordt tot op heden niet in de modelberekeningen meegenomen. Dit is oppervlakkige afspoeling van mest en bodemdeeltjes. Schattingen voor nutriënten geven aan dat de gemiddelde bijdrage van afspoeling tientallen procenten zou kunnen zijn van de totale belasting. De werkelijke bijdrage van afspoeling is echter tot nu toe nauwelijks gemeten in Nederland. Daarom wordt in het project “Verkenning zware metalenbelasting oppervlaktewater” (BO-05-004-09) onderzoek verricht naar de oppervlakkige afspoeling van zware metalen als route voor de oppervlaktewaterbelasting.

Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is om de berekeningsmethodes zoals die gebruikt worden voor de modellering van zware metaaluitspoeling te toetsen aan veldmetingen, aansluitend bij het project “Bemestingsvrije perceelsranden”. Daarnaast wordt het belang van oppervlakkige afspoeling als bron van zware metalen in het oppervlaktewater onderzocht.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 staat een korte beschrijving van het project ‘Bemestingsvrije perceelsranden’, waarbij ook de gebruikte meetopstellingen en de meetlocaties worden beschreven. Hoofdstuk 3 gaat in op methodes en metingen die gebruikt zijn om de modelberekeningen van uitspoeling te toetsen. In paragraaf 3.2 wordt nog een kort overzicht gegeven van de verschillende te toetsen modelonderdelen. De daadwerkelijke toetsing van de modelberekeningen staat in hoofdstuk 4, hierin worden de metingen vergeleken met de berekeningen. Tenslotte staan in hoofdstuk 5 de belangrijkste conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek.

2 Het project “Bemestingsvrije perceelsranden”

2.1 Achtergrond van het project

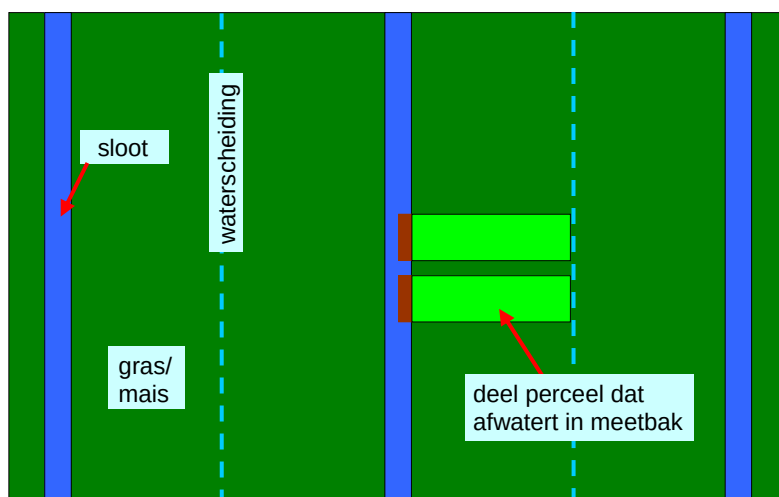
Het onderzoek naar de toetsing van het modelinstrumentarium voor zware metaaluitspoeling sluit aan bij het project “Bemestingsvrije perceelsranden”. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van dit project en een algemene beschrijving van de meetlocaties en meetopstellingen. Een gedetailleerde beschrijving van meetmethodes voor toetsing van de metaaluitspoeling staat in hoofdstuk 3. Het project “Bemestingsvrije perceelsranden” heeft als doel om de effecten van bemestingsvrije perceelsranden (BVPR) op de uitspoeling van nutriënten te kwantificeren voor Nederland door middel van veld-, literatuur- en modelonderzoek.

Een bemestingsvrije perceelsrand is een strook landbouwgrond direct langs de sloot (of andere waterloop) waar geen mest wordt toegediend. Het idee is dat door opname van nutriënten in deze strook of door vastlegging onder de strook de emissies van nutriënten naar het oppervlaktewater verminderen.

De reden voor het project “Bemestingsvrije perceelsranden” is dat de Europese Commissie overweegt deze BVPR's verplicht te stellen als maatregel om de belasting van het oppervlaktewatersysteem met nutriënten en andere contaminanten te verminderen. Echter, een aantal Nederlandse onderzoekers trekken de effectiviteit van deze maatregel in twijfel voor de meest voorkomende hydrologische omstandigheden in Nederland (Van Bakel et al., 2004; Noij, 2006). De EU is daarvan niet overtuigd en het Ministerie van LNV en VROM zijn daarom de verplichting aangegaan dit via veld-, literatuur- en modelonderzoek aan te tonen. Alterra voert dit onderzoek uit i.s.m. PPO, ASG en PRI.

2.2 Meetopstelling

Om de effectiviteit van BVPR's te meten wordt de afvoer van N en P van een perceel mét en een perceel zonder BVPR vergeleken. Figuur 2.1 geeft een algemene situatieschets van de meetlocaties weer. In dit project wordt gekeken naar de afvoer vanaf de waterscheiding (meestal midden van het perceel) naar de sloot (in feite tot aan midden van de sloot).

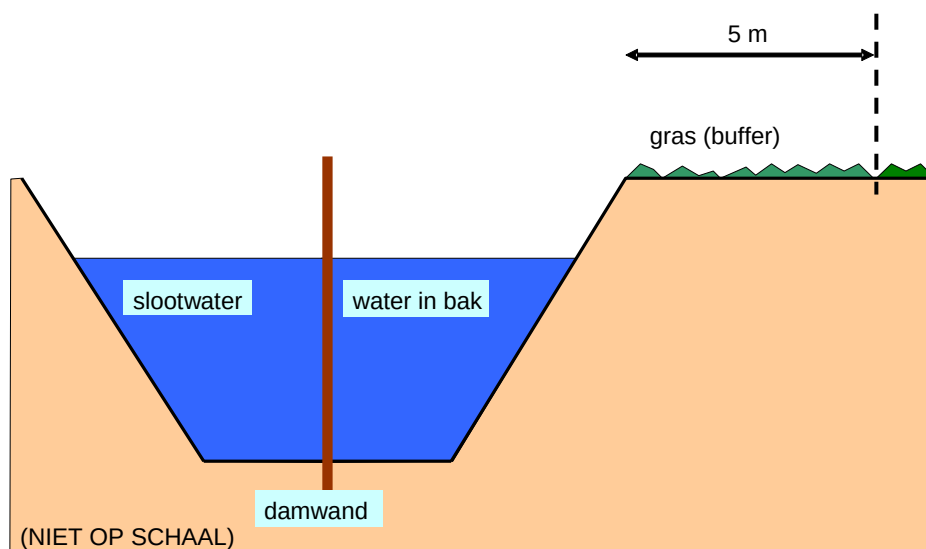
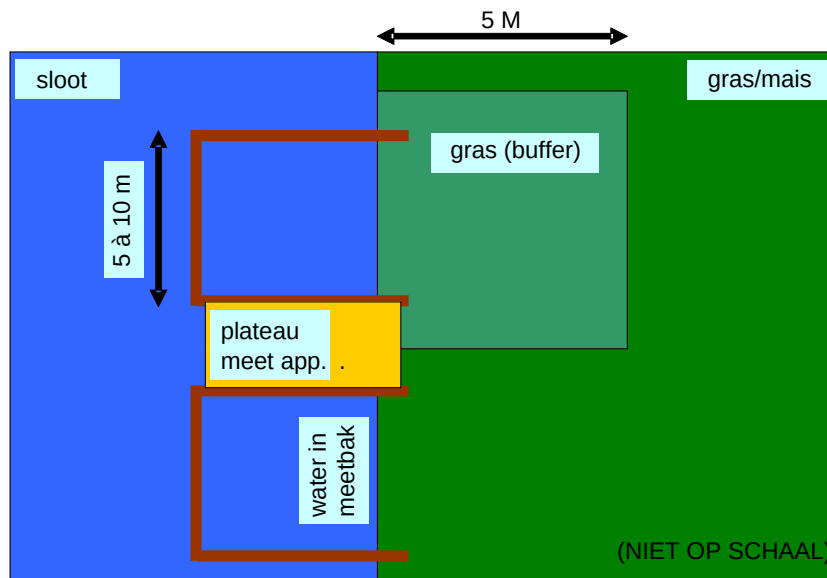


(NIET OP SCHAAL)

Figuur 2.1 Bovenaanzicht van meetopstelling in project 'Bemestingsvrije perceelsranden'

Figuur 2.2 laat in meer detail zien hoe de experimentele set-up er uit ziet. Er zijn 2 meetbakken, d.w.z. afgedamde stukken sloot, geïnstalleerd. De bak loopt vanaf het talud tot midden in de sloot. Naast één van de bakken is een bemestingsvrije perceelsrand (buffer) aangelegd. De buffer is op de meeste locaties 5 m breed en iets langer dan de lengte van de bakken (dit om wederzijds beïnvloeding van de behandelingen te minimaliseren). Tussen de twee meetbakken is een plateau waarop de meeste meetapparatuur staat. De afstand tussen de bakken bedraagt ca. 5 m.

De meetprocedure is als volgt. Onder normale omstandigheden is het slootpeil redelijk constant. Door de afvoer van het stuk perceel dat afwatert op de bak stijgt het waterpeil in de bak tot boven het slootpeil. Deze stijging wordt teniet gedaan door water vanuit de bak de sloot in te pompen. Dit water wordt bemonsterd om de afvoer van nutriënten te meten. Voor het meten van de zware metalenafvoer worden eenmaal per week de meetbakken en naastliggende sloot direct bemonsterd. Het opgepompte water wordt benedenstrooms geloosd (ten opzichte van de meest benedenstrooms gelegen meetbak). In enkele gevallen stijgt het slootpeil tot boven het niveau in de meetbakken. In dat geval zal bovenstrooms slootwater (ten opzichte van de meest bovenstrooms gelegen meetbak). worden ingepompt in de meetbak.



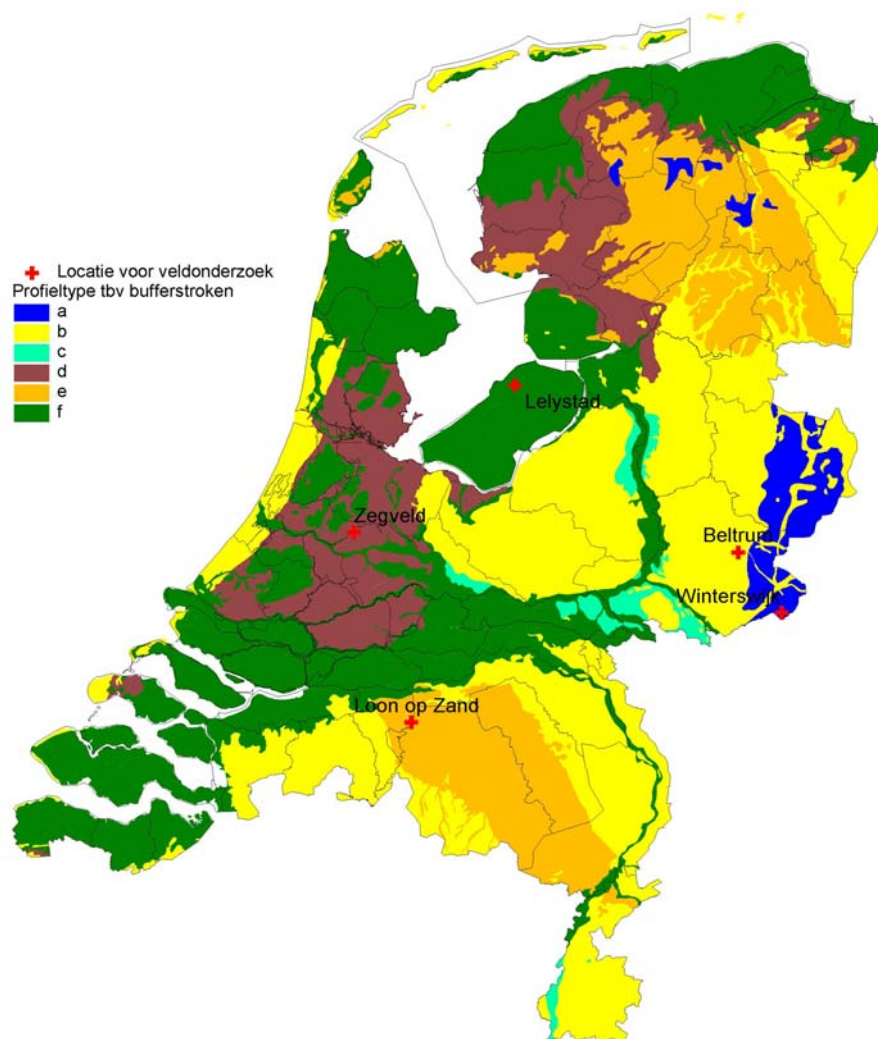
Figuur 2.2 Schematisch bovenaanzicht (boven) en dwarsdoorsnede van meetopstelling

2.3 Meetlocaties

De metingen zijn uitgevoerd op vijf verschillende locatie met verschil in bodemtype en hydrologisch profieltype. Figuur 2.3 geeft de ligging van de verschillende locaties en de verschillende profieltypen in Nederland weer. Er is geen meetlocatie in een gebied met profieltype c (diep grondwatersysteem afgedekt met slecht doorlatende deklaag), omdat het areaal van dit profieltype relatief gering is ten opzichte van de andere profieltypen.

Tabel 2.1 Bodemtype en landgebruik van de proeflocaties

Proeflocatie	Profieltype	Dominant bodemtype	Actueel landgebruik	Buisdrainage
Winterswijk	a ondiepe slecht doorlatende laag	zand	grasland	nee
Beltrum	b goed doorlatend profiel tot op grote diepte (zgn. open profiel)	zand	maïs	nee
Zegveld	d veenprofiel (zgn. Hollandprofiel)	veen	grasland	nee
Loon op Zand	e matig diep watervoerend pakket boven slecht doorlatende laag	zand	grasland	nee
Lelystad	f. dikke slechtdoorlatende deklaag (meestal gedraineerd)	klei	bouwland	ja



Figuur 2.3 Hydrologische profieltypen en locaties voor veldonderzoek

3 Methode voor toetsing van modelinstrumentarium

3.1 Inleiding

Voor de toetsing van het modelinstrumentarium worden zowel de afzonderlijke modelonderdelen getoetst als de hele modelketen. De modelonderdelen die getoetst worden zijn:

- de schematisatie van zware metaalgehalten in de vaste fase van de bodem;
- de overdracht van metalen van de vaste fase naar het bodemvocht/grondwater;
- het transport vanuit het bodemvocht/grondwater naar het oppervlaktewater.

De belangrijkste vragen die we met de toetsing trachten te beantwoorden zijn:

- Is het gebruikte modelinstrumentarium geschikt voor de berekening van uitspoeling van zware metalen uit bodems?
- Voor welke omstandigheden, bodemtypes, etc. komen de metingen overeen met de modelberekeningen?
- Wat zijn de belangrijkste onzekerheden in het huidige uitspoelingsmodel?

Verder kijken we in dit onderzoek naar de belangrijkste processen die niet zijn opgenomen in het uitspoelingsmodel, maar die wel invloed kunnen hebben op de uiteindelijke belasting van het oppervlaktewater vanuit bodems. Deze processen zijn:

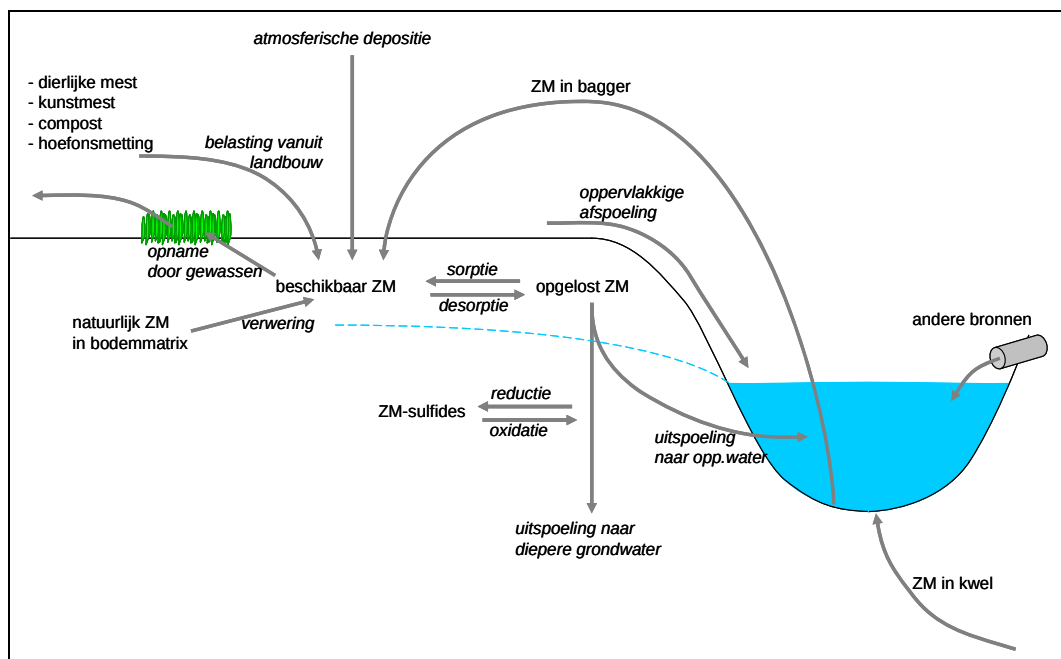
- oxidatie- en reductieprocessen in de bodem;
- oppervlakkige afspoeling;
- retentie in de waterbodem.

Hierbij trachten we een antwoord te geven op de vraag of en zo ja, in welke mate deze processen van invloed zijn op de belasting met zware metalen.

In onderstaande paragrafen gaan we in op het gebruikte uitspoelingsmodel en de verschillende onderdelen van dit model (paragraaf 3.2) en op de metingen waarmee de verschillende modelonderdelen worden getoetst (paragraaf 3.3).

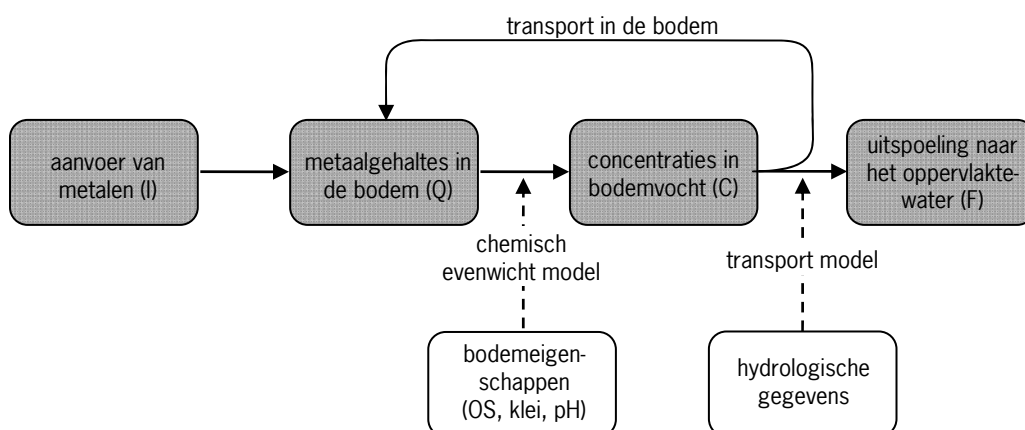
3.2 Modelberekeningen van uitspoeling

Een groot aantal processen bepaalt de emissies van zware metalen naar het oppervlaktewater. Figuur 3.1 geeft deze processen schematisch weer. Een uitgebreide beschrijving van deze processen is opgenomen in Bonten & Römkens (2008).



Figuur 3.1 Processen in de bodem met betrekking tot zware metalen

Om schattingen of voorspellingen te doen van de huidige of toekomstige uitspoeling van zware metalen naar het oppervlaktewater worden de belangrijkste processen gemodelleerd. Figuur 3.2 geeft de algemene aanpak voor deze modellering weer. Bijlage 1 gaat meer in detail in op de afzonderlijke onderdelen van het model. Voor de schattingen van de huidige landelijke emissies wordt momenteel een statisch model gebruikt, wat betekent dat veranderingen van metaalgehalten in de bodem in de tijd niet worden meegenomen. De huidige gehalten bepalen dan de berekende uitspoeling. Zoals al eerder vermeld, is van een aantal processen niet bekend wat de invloed is op de belasting van het oppervlaktewater. Dit betreft onder andere oxidatie- en reductieprocessen in de bodem, oppervlakkige afspoeling en retentie in de waterbodem. Omdat het effect van deze processen onvoldoende bekend is, kunnen ze ook niet worden opgenomen in het uitspoelingsmodel. Een uitgebreidere beschrijving van deze processen is opgenomen in Bijlage 2.



Figuur 3.2 Schematische weergave van modelaanpak

Bij de berekeningen van landelijke emissies van zware metalen is het model STONE gebruikt voor de schematisatie van de bodem en voor de hydrologie. De validatie van de hydrologie en de schematisatie van de bodemeigenschappen vallen buiten het kader van dit rapport. In verschillende andere onderzoeken in het kader van de ontwikkeling van STONE gebeurt dit wel, zie onder andere Kroes et al. (2002) en Tiktak et al. (2003).

3.3 Metingen voor uitspoeling van zware metalen

3.3.1 Vaste fase van de bodem

Voor het project “Bemestingsvrije perceelsranden” zijn voor elke meetlocatie op minstens 5 verschillende punten bodemprofielen bemonsterd. Deze bodemprofielen zijn voor verschillende lagen geanalyseerd op een groot aantal parameters, voornamelijk bodemeigenschappen en voor nutriënten relevante parameters. Voor dit project zijn per locatie de monsters van twee profielen geanalyseerd op de totaalgehalten van de metalen Cd, Cu, Ni, Pb en Zn. Dit betreft de profielen die genomen zijn midden voor de referentiebak (ca. 2,5 m vanaf de sloot) en de profielen die midden op het perceel (ca. 20 m vanaf de sloot) genomen zijn.

De bemonsteringsdieptes, analysemethoden en de analyseresultaten van de zware metaalgehalten en de voor uitspoeling relevante parameters (organische stof, klei, pH, oxalaat extraheerbaar ijzer en aluminium) zijn weergegeven in Bijlage 3. Uit deze analyseresultaten blijkt dat de twee profielen van een locatie weinig verschillen voor wat betreft bodemeigenschappen en zware metaalgehalten. Alleen in Winterswijk en Loon op Zand verschillen de kleigehalten en de metaalgehalten in de ondergrond voor de twee profielen.

3.3.2 Bodemvocht en grondwater

Bodemvocht wordt bemonsterd met keramische cups. Deze cups zijn in duplo op vijf verschillende dieptes en op twee verschillende afstanden vanaf de sloot geplaatst. Voor de dieptes is de gemiddelde grondwaterstand op een locatie als uitgangspunt genomen, waarbij de cups zowel boven als onder de gemiddelde grondwaterstand zijn geplaatst. In Bijlage 4 zijn de locaties en dieptes van cups weergegeven. Er zijn zowel cups geplaatst in het referentieperceel als in het bufferstrokenperceel. Alleen de cups in het referentieperceel zijn bemonsterd. De cups worden ongeveer vier keer per jaar bemonsterd. De monsters worden geanalyseerd op zware metaalconcentraties en DOC. De pH van de monsters wordt onmiddellijk na bemonstering in het veld bepaald.

De analyseresultaten van het bodemvocht zijn weergegeven in Bijlage 4. De variatie in de analyseresultaten van het bodemvocht is zeer groot, voor zowel de metaalconcentraties, de DOC-concentraties en de pH van het bodemvocht. De

metingen variëren vooral in de tijd. Tussen de verschillende monsterpunten op een locatie zijn er geen significante verschillen.

3.3.3 Oppervlaktewater

Voor analyse van het oppervlaktewater worden wekelijks direct de meetbakken en het slootwater buiten de meetbakken bemonsterd. Van gemiddeld acht bemonsteringstijdstippen in een jaar worden de monsters geanalyseerd op totaal en opgeloste concentraties van zware metalen. Totaal-concentraties van metalen zijn bepaald door de monsters onmiddellijk na monsternamen aan te zuren tot pH 1 á 2 en direct voor de analyse te filtreren over 0.45 µm. De opgeloste concentraties zijn bepaald door de monsters direct na monsternamen te filtreren over 0.45 µm en daarna aan te zuren tot pH 1 á 2. De gemeten concentraties van opgeloste zware metalen zijn weergegeven in Bijlage 5.

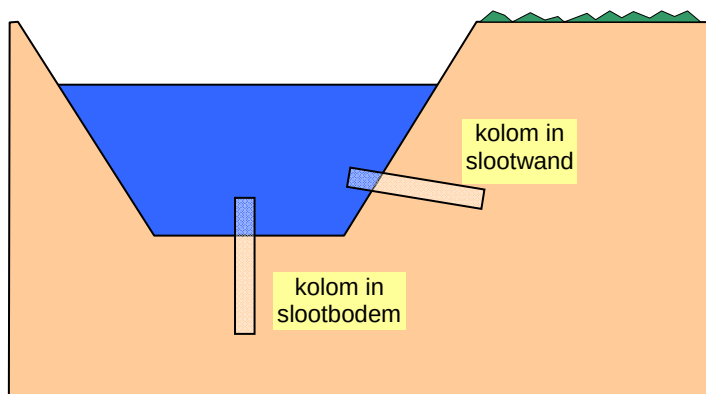
3.3.4 Oppervlakkige afspoeling

Om het belang van oppervlakkige afspoeling vast te stellen zijn op locatie Beltrum opstellingen gebouwd, waarmee afspoelend water kan worden opgevangen. In Bijlage 6 staan enkele foto's van deze opstellingen. Deze locaties zijn gelegen direct naast de locaties van het project “Bemestingsvrije perceelsranden”. Op deze wijze kunnen de afspoelingsmetingen worden vergeleken met de overige metingen aan zware metalen.

Eventueel afspoelend water wordt geanalyseerd op zware metalen (totaal en opgelost), droge stofgehalte, organische stof (totaal en opgelost). Verder wordt het afspoelend sediment geanalyseerd op zware metalen, lutumgehalte en organische stofgehalte. Gedurende de meetperiode van dit onderzoek was er echter geen oppervlakkige afspoeling.

3.3.5 Waterbodem

Om te onderzoeken of vastlegging van metalen in de waterbodem optreedt, zijn op locaties Beltrum, Winterswijk, Zegveld en Lelystad, monsters genomen van de waterbodem. Hiertoe zijn op elke locatie vier kolommen gestoken, twee in slootbodem en twee in de slootwand. De bemonsteringsmethode is schematisch weergegeven in Figuur 3.3.



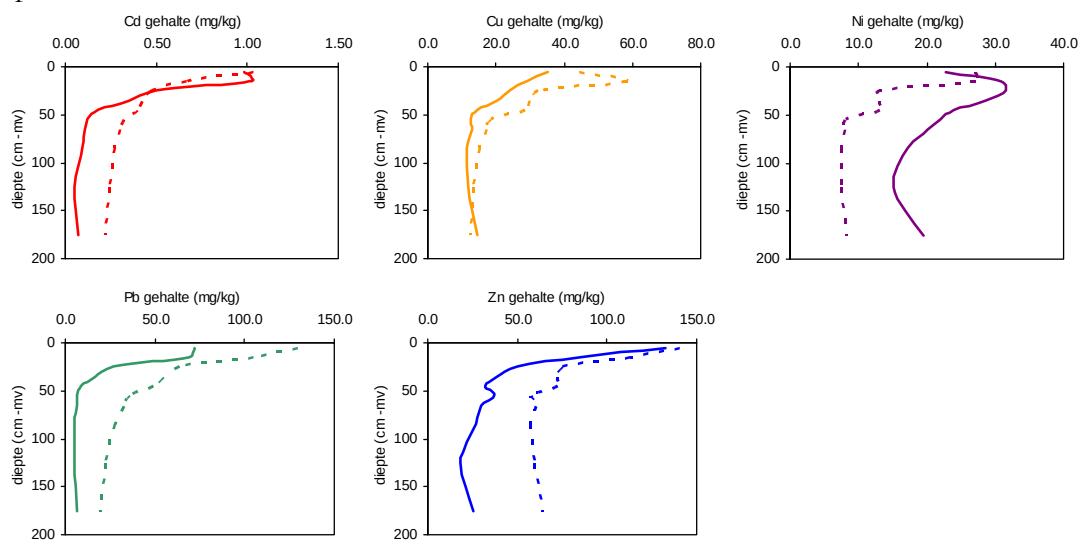
Figuur 3.3 Schematische weergave waterbodembemonstering

In Winterswijk konden geen kolommen worden gestoken vanwege de harde keileemlaag in de slootbodem en –wand. Hier zijn met een schep monsters genomen van de bovenste laag van de waterbodem. Per kolom zijn twee of drie monsters van verschillende diepte geanalyseerd op zware metalen (totaal gehaltes), totaal ijzer en totaal zwavel, oxalaat extraheerbaar ijzer en aluminium en op organische stof. Daarnaast zijn in Beltrum en Lelystad keramische cups in de slootwand en slootbodem geplaatst, waarmee bodemvocht is bemonsterd. Deze monsters zijn geanalyseerd op zware metalen en DOC.

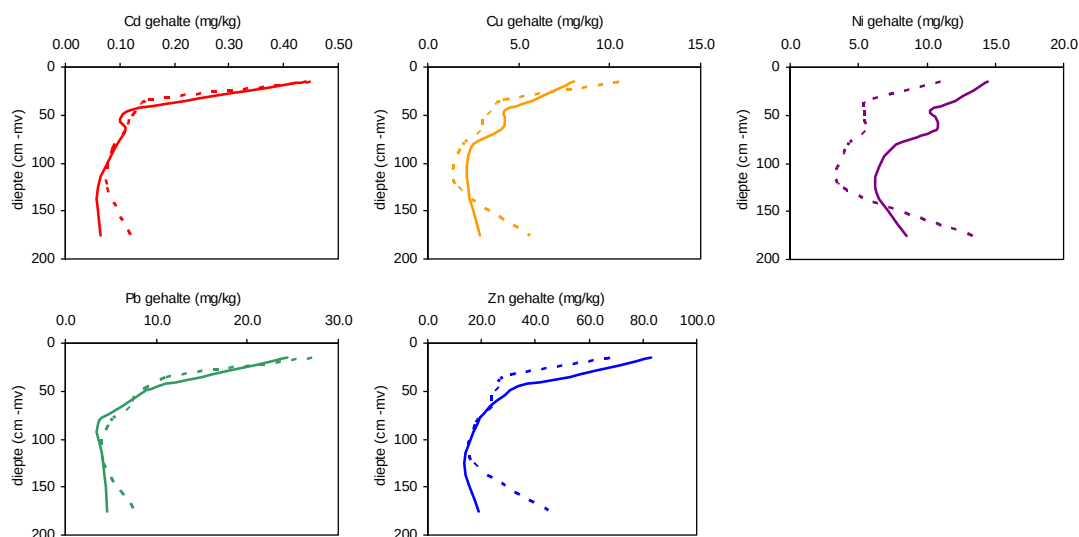
4 Vergelijking modelberekeningen en metingen

4.1 Vaste fase van de bodem

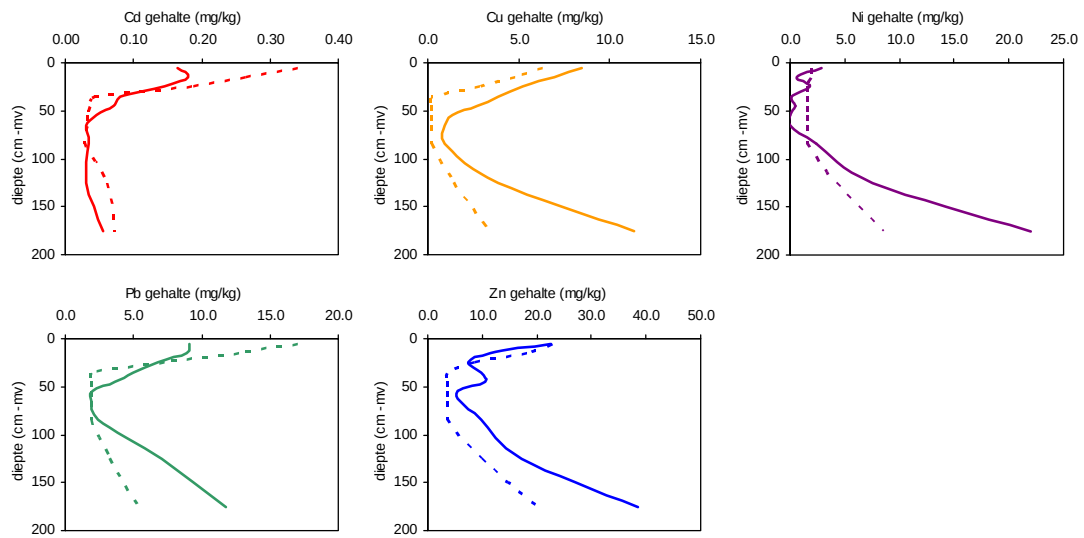
Voor alle meetlocaties hebben we de metaalgehalten in de bodem berekend op basis van de gemeten bodemeigenschappen (zie Bijlage 1). Onderstaande figuren tonen de berekende en de gemeten gehalten. Hierbij is uitgegaan van gemiddelde bodemeigenschappen voor de berekende gehalten en de gemiddelde gemeten gehalten op een locatie, omdat de variatie binnen een locatie klein is.



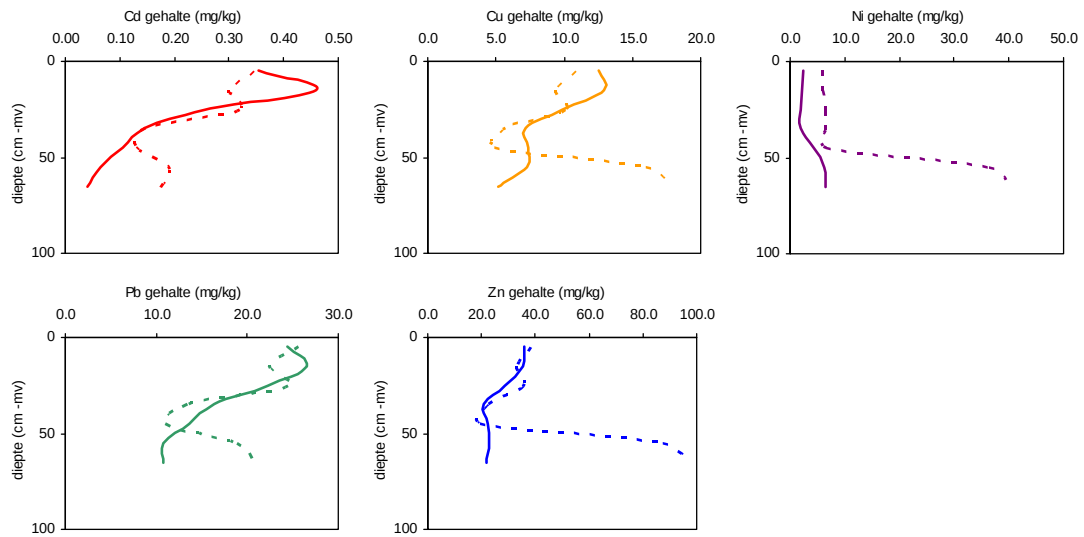
Figuur 4.1 Gemeten en berekende gehalten van Cd, Cu, Ni, Pb en Zn als functie van de diepte op meetlocatie Zegveld (— is gemeten; - - - is berekend)



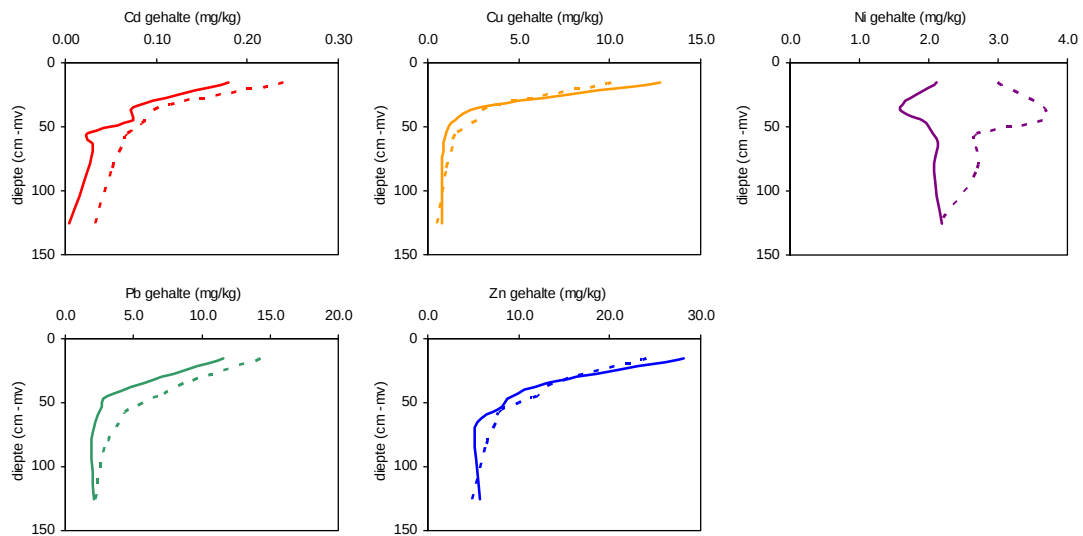
Figuur 4.2 Gemeten en berekende gehalten van Cd, Cu, Ni, Pb en Zn als functie van de diepte op meetlocatie Leystad (— is gemeten; - - - is berekend)



Figuur 4.3 Gemeten en berekende gehalten van Cd, Cu, Ni, Pb en Zn als functie van de diepte op meetlocatie Loon op Zand (— is gemeten; - - - is berekend)



Figuur 4.4 Gemeten en berekende gehalten van Cd, Cu, Ni, Pb en Zn als functie van de diepte op meetlocatie Winterswijk (— is gemeten; - - - is berekend)



Figuur 4.5 Gemeten en berekende gehalten van Cd, Cu, Ni, Pb en Zn als functie van de diepte op meetlocatie Beltrum (— is gemeten; - - - is berekend)

In het bovenste deel van de bodemprofielen komen de berekeningen en metingen goed overeen (m.u.v. nikkel, zie verderop). Dit geldt zowel voor het verloop van de gehalten met diepte als de absolute waarden van de gehalten. Bij de metingen én de berekeningen zijn voor de meeste locaties de gehalten het hoogst bovenin het profiel en nemen af met toenemende diepte. Afwijkingen in de absolute waarden zijn waarschijnlijk het gevolg zijn lokale variaties in de gehalten.

In het onderste deel van het profiel zijn de verschillen tussen metingen en berekeningen groot voor de alle locaties met uitzondering van Beltrum. Voor Zegveld, Lelystad en Winterswijk zijn de berekende gehalten van de meeste metalen hoger dan de gemeten gehalten, terwijl voor Loon op Zand de berekende gehalten lager zijn. Voor Lelystad, Loon op Zand en Winterswijk gaan deze afwijkingen samen met een hoog kleigehalte in de ondergrond. De berekende gehalten in de ondergrond zijn gerelateerd aan het kleigehalte (zie verg. 2 in Bijlage 1). De metingen suggereren dat de relatie tussen metaalgehalten en kleigehalten niet zo eenduidig is als de berekeningen veronderstellen. Bij Loon op Zand bevat de klei-rijke ondergrond veel hogere gehalten aan zware metalen, terwijl de kleilaag bij Winterswijk (=keileem) en bij Lelystad nauwelijks extra zware metalen bevat. Dit betekent dat regionale verschillen in de ondergrond op dit moment onvoldoende in de schematisatie worden meegenomen. Deze bevindingen komen overeen met een studie naar natuurlijke achtergrondgehalten, die ook laat zien dat de regionale variatie in de ondergrond groot kan zijn (Rietra et al., 2009).

Voor Zegveld hebben de verschillen tussen metingen en berekeningen een andere oorzaak. Hier wordt een te geringe afname van de gehalten met toenemende diepte berekend (op basis van verg. 3 in Bijlage 1). Het voornaamste verschil tussen Zegveld en de overige locatie is dat het hier om een veengrond gaat, terwijl de overige locaties minerale gronden zijn. Om vast te stellen of dit geldt voor veengronden in het algemeen of alleen voor deze meetlocatie zijn voor vier andere locaties op

veengronden uit het project Europeat (publicatie in prep.) ook de zware metaalgehalten in de bodem berekend en vergeleken met de gemeten gehalten (zie Bijlage 8). Uit deze vergelijking volgt dat op meerdere van deze locaties, maar niet alle, de gehalten van koper, lood en zink worden overschat. Dit betekent dat voor veengronden een andere of gewijzigde methode voor het schatten van de gehalten van metalen nodig is.

Voor nikkel tenslotte geldt dat de grote verschillen het gevolg zijn van natuurlijke variaties in nikkelgehalte tussen de verschillende locaties. Bijna alle nikkel in de bodem is van natuurlijke oorsprong is, wat ook blijkt uit de metingen die geen duidelijke afname van het nikkelgehalte met de diepte laten zien (voor Lelystad en Zegveld is de afname het gevolg van een afnemend kleigehalte). In de berekeningen is de hoeveelheid nikkel alleen afhankelijk van het kleigehalte, op dezelfde wijze als voor de gehalten in de ondergrond van de andere metalen. Maar ook hier geldt dus dat regionale verschillen in natuurlijke nikkelgehalten onvoldoende worden meegenomen in de schematisatie.

4.2 Van vaste fase naar bodemvocht en grondwater

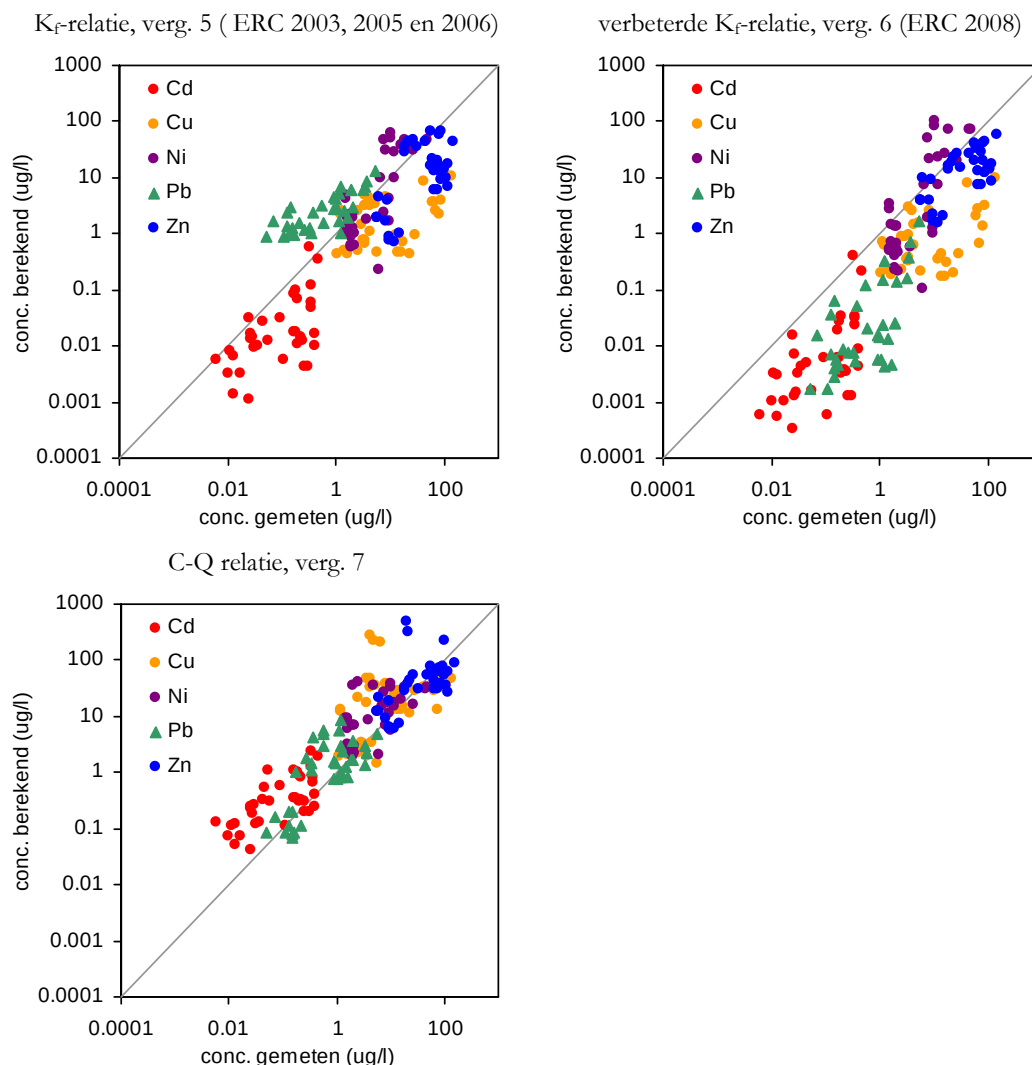
In onderstaande figuren worden de gemeten concentraties van Cd, Cu, Ni, Pb en Zn in het bodemvocht vergeleken met berekende concentraties. De concentraties zijn berekend op basis van gemeten gehalten in de vaste fase en bodemeigenschappen (zie Bijlage 1). Omdat de variatie in de gemeten concentraties zeer groot is, zijn de gemeten concentraties per bemonsteringspunt gemiddeld. De oorzaken van deze grote variatie zijn niet bekend. We hebben de concentraties van metalen zijn op drie verschillende manieren berekend:

- K_f -relaties die o.a. gebruikt zijn voor de Emissieregistratie berekeningen van 2003, 2005 en 2006 (verg. 5 in Bijlage 1);
- verbeterde K_f -relaties die gebruikt zijn voor de Emissieregistratieberekeningen van 2008 (verg 6 in Bijlage 1);
- C-Q relaties (verg. 7 in Bijlage 1).

Deze relaties zijn alle drie afgeleid op basis van laboratoriumexperimenten. Voor laboratoriumgegevens zijn de verschillen tussen de uitkomsten van de relaties klein. Echter, Figuur 4.6 laat zien dat voor de veldmetingen de keuze van partitierelatie van grote invloed is op de berekende concentraties. Bij de K_f -relatie worden alle concentraties met uitzondering van lood onderschat. Voor lood worden de concentraties overschat. Bij een vergelijking tussen berekende en gemeten concentraties in het grondwater (Bonten & Groenenberg, 2008), werd deze overschatting ook al gevonden.

Bij de verbeterde K_f -relatie, die gebruikt voor de huidige berekeningen voor de Emissieregistratie, worden voor cadmium en lood lagere concentraties berekend. De concentraties van lood worden nu zelfs onderschat., evenals voor de andere metalen. Deze onderschatting betekent dat de huidige landelijke schattingen van metaaluitspoeling waarschijnlijk te laag zijn.

Bij de C-Q relaties komen de berekende concentraties van alle metalen, met uitzondering van cadmium, het best overeen met de gemeten concentraties. Ook geldt dat de spreiding in de berekende concentraties voor de meeste metalen kleiner is geworden. Wel worden voor cadmium de concentraties nu overschat.



Figuur 4.6 Vergelijking tussen gemeten en berekende concentraties van metalen in het bodemvocht

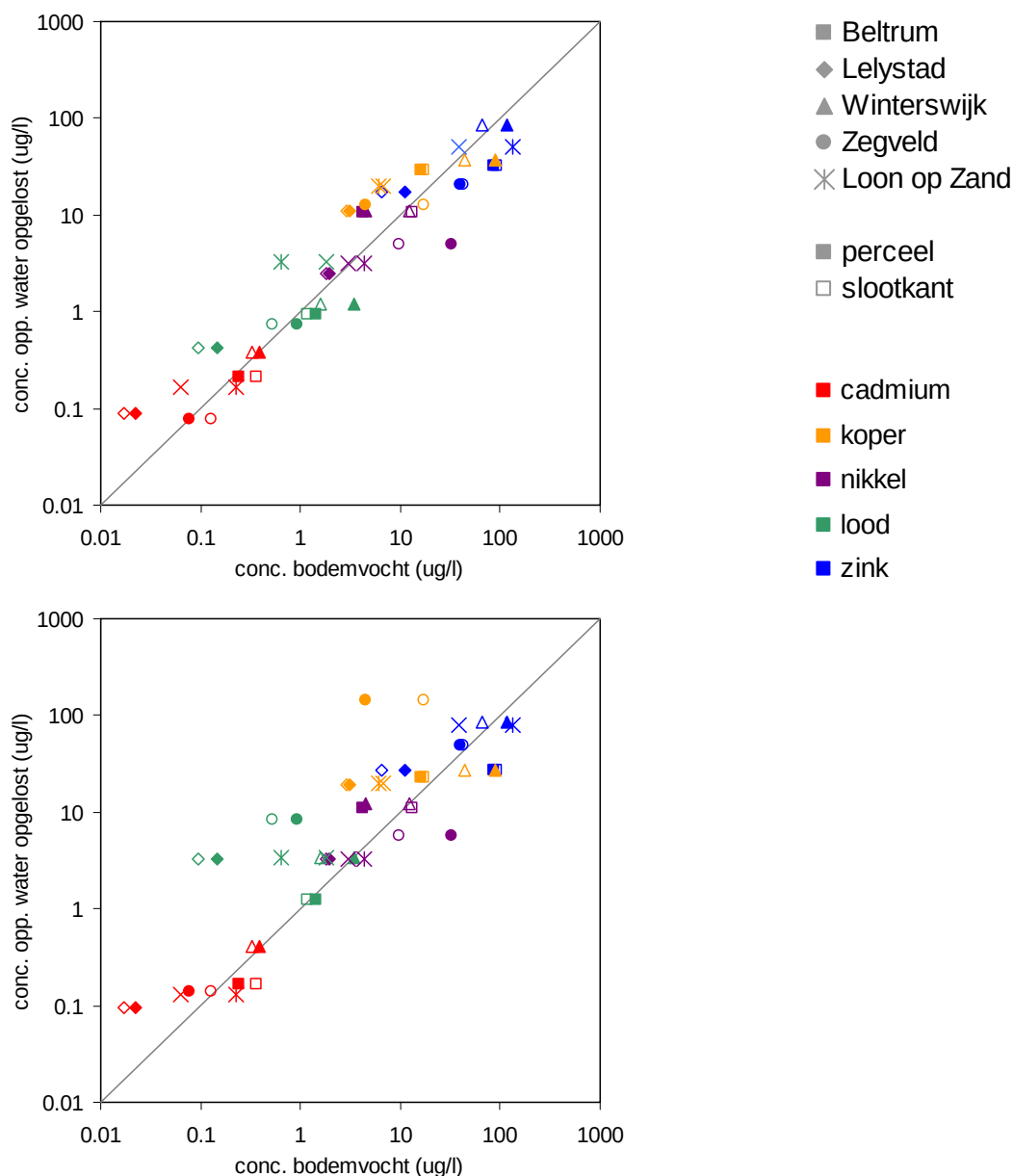
Tabel 4.1 geeft de gemiddelde afwijking en gemiddelde absolute afwijking tussen gemeten en berekende concentraties. De gemiddelde afwijking geeft aan of de berekeningen gemiddeld hoger (waarde groter dan 0) of lager (waarde kleiner dan 0) zijn dan de metingen. De gemiddelde absolute afwijking geeft de spreiding ten opzichte van de gemeten waarden aan en is een maat voor de onzekerheid in de berekening. Deze tabel laat nogmaals duidelijk zien dat voor C-Q relaties de verschillen tussen berekeningen en metingen het kleinst zijn. Verder valt op dat de verbeterde K_f-relatie alleen een kleine verbetering is voor Cu en Zn, maar voor de overige metalen een grotere afwijking tussen metingen en berekeningen oplevert.

Tabel 4.1 Gemiddelde afwijking tussen gemeten en berekende concentraties in het bodemvocht (in log-eenheden, een waarde van 1 betekent een afwijking van $10^1 = 10$, 2 is $10^2 = 100$, etc.)

metaal	gemiddelde absolute fout			gemiddelde fout		
	Kf (verg. 5)	verbeterd Kf (verg. 6)	C-Q (verg. 7)	Kf (verg. 5)	verbeterd Kf (verg. 6)	C-Q (verg. 7)
Cd	0.83	1.3	0.58	-0.78	-1.3	0.51
Cu	0.88	1.1	0.54	-0.70	-1.0	0.33
Ni	0.52	0.62	0.52	0.15	-0.03	0.43
Pb	0.80	1.4	0.48	0.77	-1.3	0.28
Zn	0.68	0.56	0.36	-0.47	-0.39	0.04

4.3 Van bodemvocht en grondwater naar het oppervlaktewater

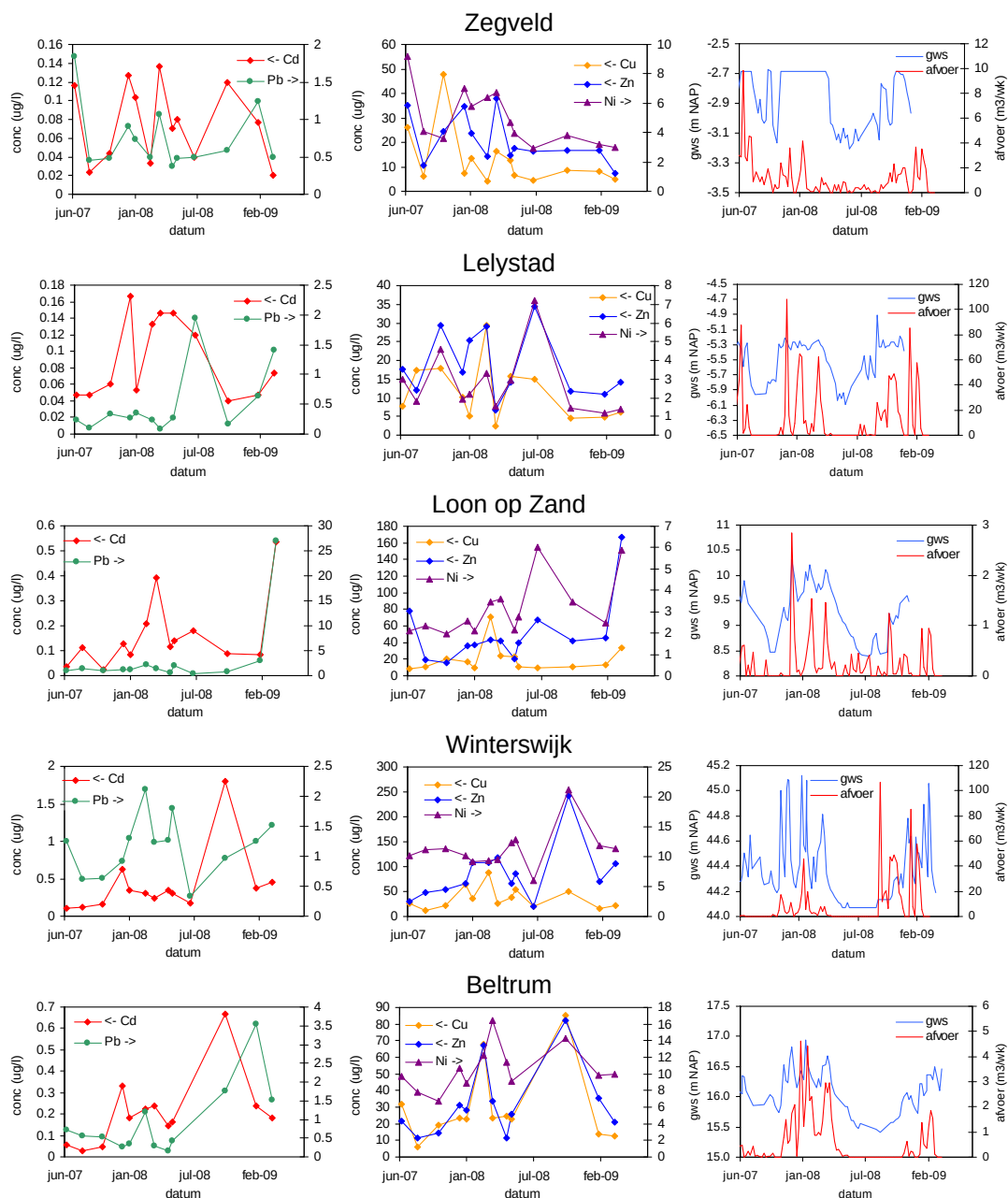
De metalen in het uitspoelende grondwater zijn afkomstig uit verschillende bodemlagen met verschillende concentraties in het bodemvocht. Hierdoor is de concentratie in het uitspoelende grondwater een (gewogen) gemiddelde van concentraties per bodemlaag. Figuur 4.7 geeft een vergelijking tussen de gemiddelde concentraties in het bodemvocht (zie Bijlage 4) met de gemiddelde opgeloste en totale concentraties in het oppervlaktewater (zie Bijlage 5). Deze vergelijking laat zien dat de gemiddelde concentraties van opgeloste zware metalen in het oppervlaktewater goed overeenkomen met de gemiddelde concentraties in het bodemvocht. De totale concentraties, dus inclusief zware metalen aan zwevend stof, zijn in een aantal gevallen veel hoger dan concentraties in het bodemvocht. Dit geldt vooral voor lood, wat overeenkomt met de eerdere waarneming dat het verschil tussen totale en opgeloste concentraties het grootst is voor lood.



Figuur 4.7 Vergelijking tussen zware metaalconcentraties in het oppervlaktewater en in het bodemvocht. Concentraties van opgeloste metalen (boven) en totaalconcentraties in het oppervlaktewater (onder).

In de bovenstaande figuren staan de gemiddelde concentraties in het oppervlaktewater. Echter, deze concentraties variëren sterk op een locatie (zie Figuur 4.8). Deze variatie wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat op verschillende tijdstippen de afzonderlijke bodemlagen een verschillende bijdrage aan de uitspoeling leveren (zie ook Figuur A.2 in Bijlage 1). Anders gezegd, in periodes met hoge grondwaterstanden zal er ook uitspoeling uit meer oppervlakkig gelegen lagen optreden. Meestal zijn in deze lagen ook de gehalten in de vaste fase hoger en daarmee ook de concentraties in het bodemvocht. Dus verwachten we dat in periodes van hoge grondwaterstanden en hoge afvoeren de concentraties in het uitspoelende water ook hoger zijn. In Figuur 4.8 zijn daarom voor elke locatie de

opgeloste metaalconcentraties, de grondwaterstanden en de waterafvoeren als functie van de tijd weergegeven. Het verband tussen concentraties en grondwaterstanden en tussen concentraties en waterafvoeren is niet eenduidig, maar deze figuren laten wel zien dat hoge concentraties van zware metalen meestal optreden in periodes van hoge grondwaterstanden en hoge afvoeren. Alleen voor nikkel geldt dit veel minder, wat ook te verwachten is omdat het nikkelgehalte constant is met de diepte.

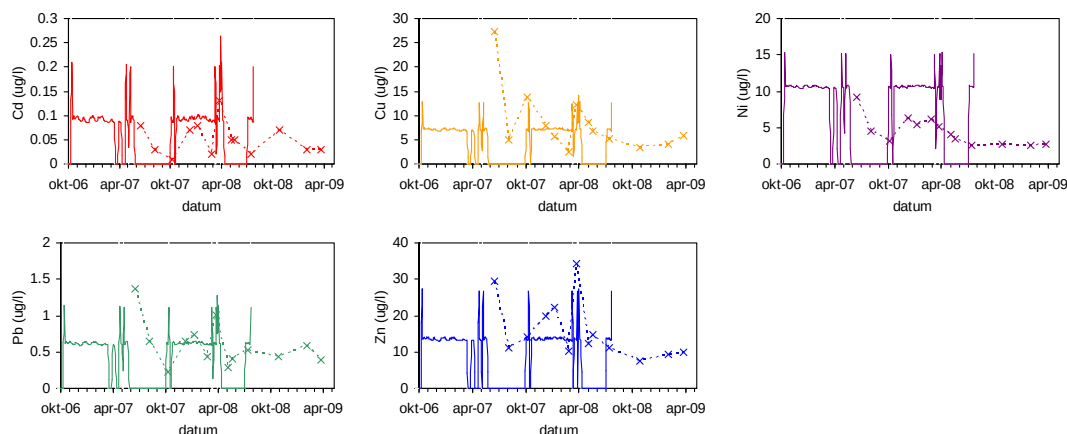


Figuur 4.8 Concentraties van opgeloste zware metalen in de meetbakken (in $\mu\text{g/l}$), grondwaterstanden (in m NAP) en waterafvoeren (in m^3/wk) op de locaties als functie van de tijd. Concentraties zijn gemiddeldes van bufferstrookperceel en referentieperceel.

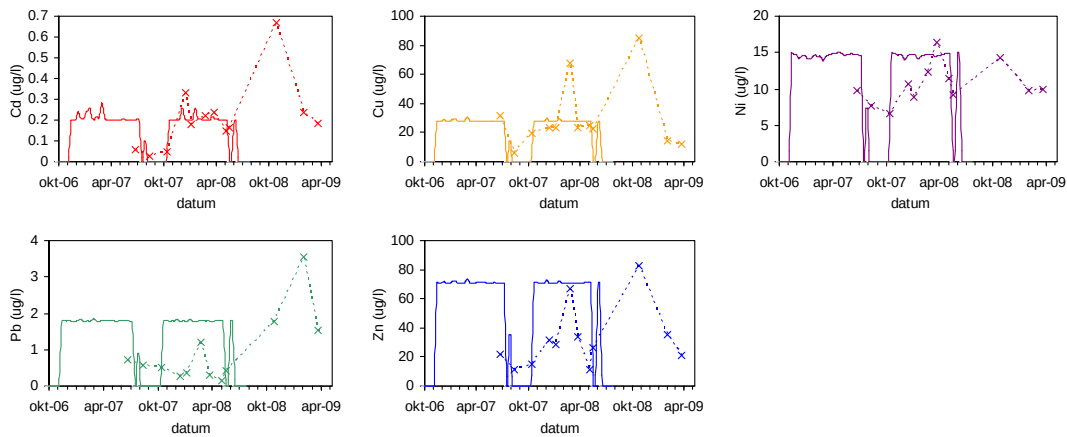
4.4 Van vaste fase naar het oppervlaktewater

In de vorige paragraaf werd al gesteld dat de variaties in de concentraties in het oppervlaktewater worden bepaald door variaties in hydrologie. Anders gezegd, als uitspoeling optreedt uit bodemlagen met hoge concentraties in het bodemvocht leidt dit ook tot de hoge concentraties in de sloot en vice versa. Om dit effect van variaties in de hydrologie te modelleren, moeten er hydrologische berekeningen worden uitgevoerd. Voor de uitspoelingsberekeningen op landelijke schaal wordt de hydrologie van het model STONE gebruikt. Deze hydrologie is berekend met het eendimensionale hydrologische model SWAP (Kroes et al, 2008). Voor de locaties Zegveld en Beltrum zijn met ditzelfde model hydrologische berekeningen uitgevoerd voor de periode 2006-2008. De resultaten van deze hydrologische berekeningen zijn gebruikt om de uitspoeling op deze locaties als functie van de tijd te berekenen.

Uitgangspunt voor deze uitspoelingsberekeningen zijn de gemeten gehalten van zware metalen in de bodem. Op basis van deze gehalten zijn de concentraties in het bodemvocht berekend met de zogenaamde C-Q relatie (zie ook paragraaf 4.2). Deze relatie is gebruikt omdat hierbij de grootste overeenkomst was tussen gemeten en berekende concentraties in het bodemvocht. Voor elke bodemlaag zijn vervolgens de concentraties in het bodemvocht vermenigvuldigd met de waterflux naar het oppervlaktewater. De afvoer van alle bodemlagen samen geeft de totale afvoer van metalen. De concentraties in de afvoer zijn vervolgens berekend door de totale metaalafvoer te delen door de totale waterafvoer. In onderstaande figuren zijn de berekende concentraties in de afvoer en de gemeten concentraties in het oppervlaktewater (in de bakken) weergegeven voor de beide locaties.



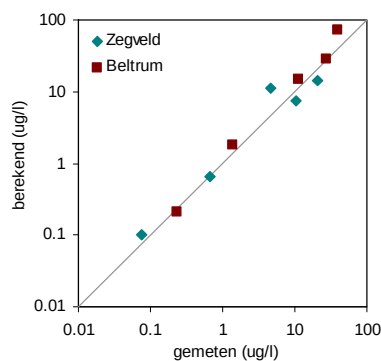
Figuur 4.9 Berekende concentraties in waterafvoer en gemeten concentraties in het oppervlaktewater van Cd, Cu, Ni, Pb en Zn op meetlocatie Zegveld (— is berekend; - - - is gemeten)



Figuur 4.10 Berekende concentraties in waterafvoer en gemeten concentraties in het oppervlaktewater van Cd, Cu, Ni, Pb en Zn op meetlocatie Beltrum (— is berekend; - - - is gemeten)

Een belangrijk verschil tussen de berekende en gemeten concentraties is dat de berekende concentraties betrekking hebben op de afvoer en de gemeten concentraties betrekking hebben op het water in de meetbakken. Dit betekent dat schommelingen in de concentraties in de afvoer gebufferd in de meetbakken worden, doordat de waterafvoer zich vermengd met het water dat al in de meetbakken zit. De concentraties in de meetbakken zijn dus een gemiddelde van concentraties in de afvoer van een langere periode. In periodes dat er zeer weinig of geen waterafvoer is, vooral in de zomer, wordt de concentratie in de bakken dan ook sterk bepaald door de afvoer uit eerdere periodes.

Uit de figuren blijkt in de eerste plaats dat de gemiddelde berekende concentraties goed overeenkomen met de gemiddelde gemeten concentraties. Dit wordt ook verwacht omdat zowel de gemeten en berekende concentraties in het bodemvocht goed overeenkomen (zie paragraaf 4.2) als ook de gemiddelde concentraties in het bodemvocht en in het oppervlakte water (zie paragraaf 4.3). Ter illustraties zijn in Figuur 4.11 de gemiddelde gemeten concentraties uitgezet tegen de gemiddelde berekende concentraties.



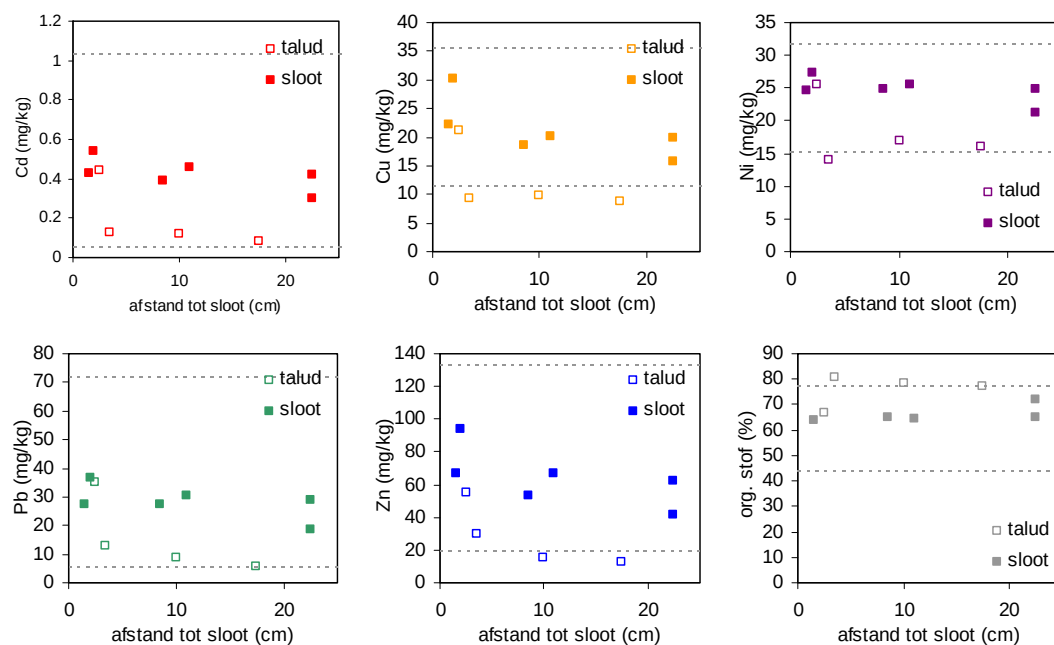
Figuur 4.11 Gemiddelde berekende concentraties in waterafvoer versus gemiddelde gemeten concentraties in het oppervlaktewater van Cd, Cu, Ni, Pb en Zn op meetlocaties Zegveld en Beltrum

Verder valt op in Figuur 4.9 en Figuur 4.10 dat veranderingen in de berekende concentraties relatief snel zijn, waarbij er vooral in de zomer geen afvoer optreedt. In deze periodes worden ook de laagste concentraties in het oppervlaktewater waargenomen. Dit komt overeen met de verwachting dat in die periodes alleen de diepste lagen met de laagste concentraties bijdragen aan de concentraties in het oppervlaktewater. Voor Zegveld is daarnaast duidelijk zichtbaar dat pieken in de gemeten concentraties samengaan met pieken in de berekende concentraties. Voor Beltrum is dit minder duidelijk en worden er in de winterperiode constante concentraties in de afvoer berekend.

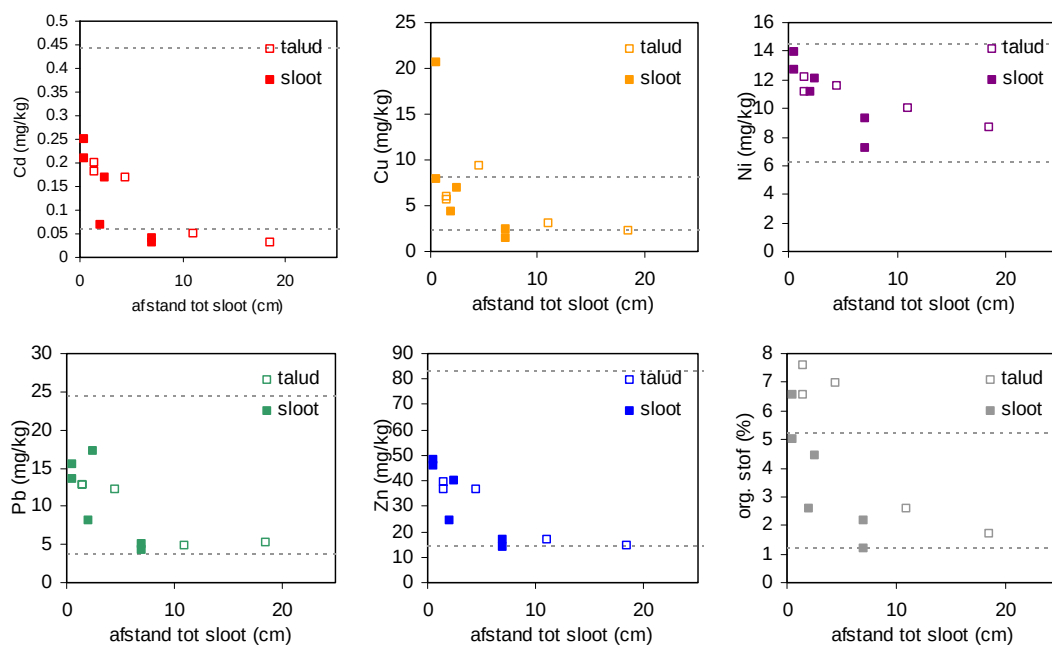
Uit bovenstaande volgt dat variaties in concentraties voor een belangrijk deel verklaard (en gemodelleerd) kunnen worden door rekening te houden met de effecten van variaties in de hydrologie.

4.5 Retentie in de waterbodem

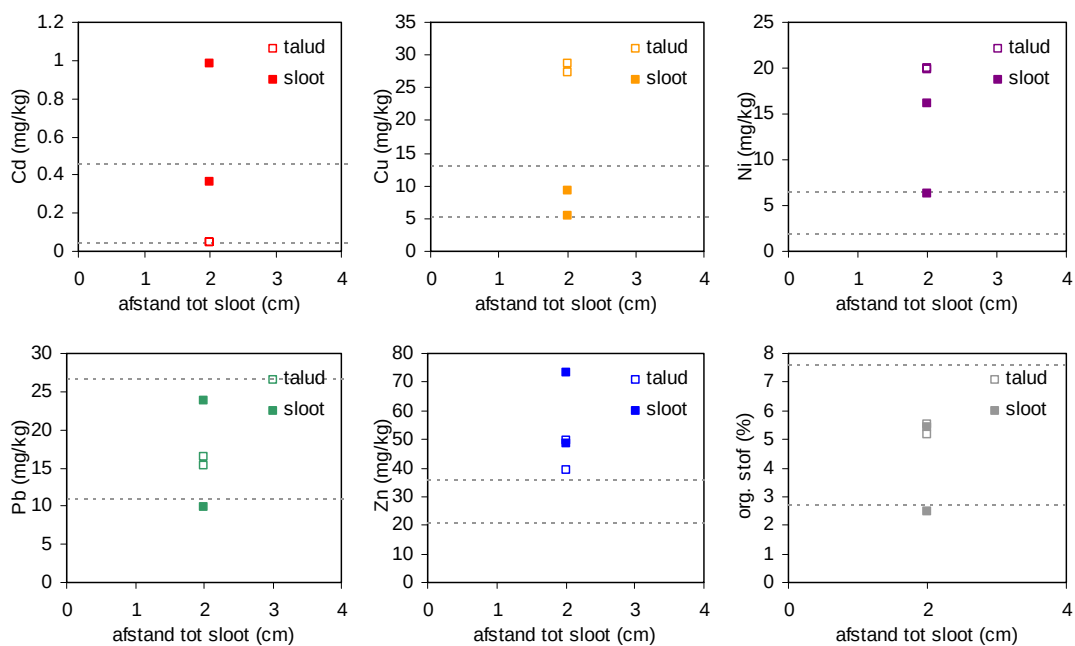
Om na te gaan of er vastlegging van zware metalen in de waterbodem optreedt, zijn de gehalten in de waterbodemmonsters vergeleken met de gehalten in de bodem. Wanneer de gehalten in de waterbodem (veel) hoger zijn dan de hoogste gehalten in de bodem is er mogelijk sprake van vastlegging. Onderstaande figuren tonen de zware metaalgehalten en het organisch stofgehalte voor de verschillende locaties als functie van de afstand tot de sloot. Verder zijn de hoogste en laagste gehalten uit de bodemprofielen weergegeven. De volledige analyseresultaten staan in Bijlage 9.



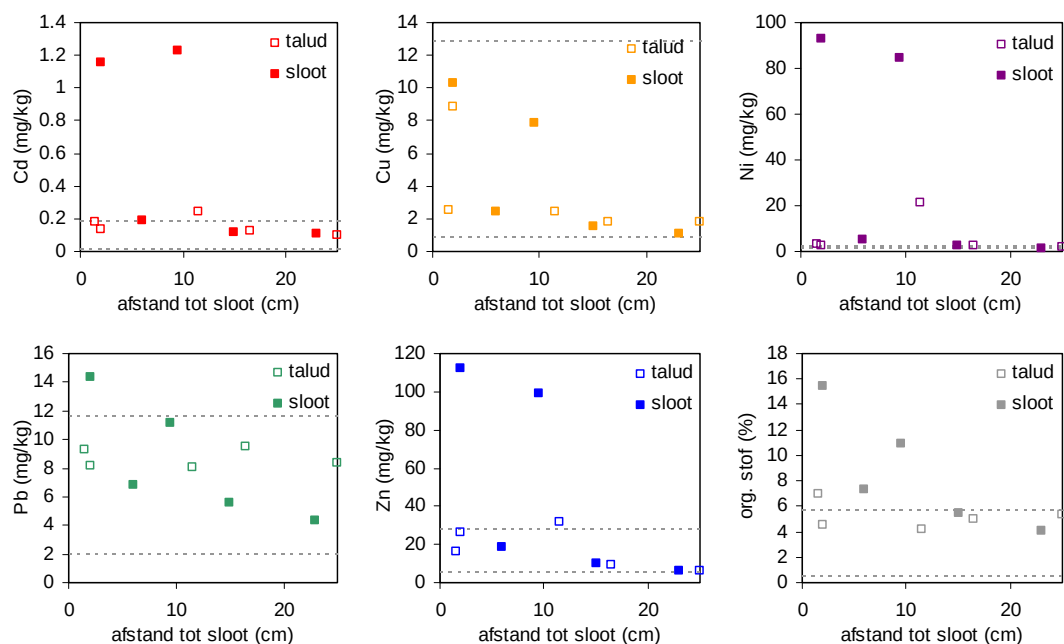
Figuur 4.12 Gemeten van Cd, Cu, Ni, Pb, Zn en org. stof in waterbodems als functie van de afstand tot het slootwater op meetlocatie Zegveld (□ is slootwand; ■ is slootbodem). Minimale en maximale gehalten in de bodem zijn weergegeven met stippellijnen.



Figuur 4.13 Gemeten van Cd, Cu, Ni, Pb, Zn en org. stof in waterbodems als functie van de afstand tot het slootwater op meetlocatie Lelystad (□ is slootwand; ■ is slootbodem). Minimale en maximale gehalten in de bodem zijn weergegeven met stippellijnen.



Figuur 4.14 Gemeten van Cd, Cu, Ni, Pb, Zn en org. stof in waterbodems op meetlocatie Winterswijk (□ is slootwand; ■ is slootbodem). Minimale en maximale gehalten in de bodem zijn weergegeven met stippellijnen.



Figuur 4.15 Gemeten van Cd, Cu, Ni, Pb, Zn en org. stof in waterbodems als functie van de afstand tot het slootwater op meetlocatie Beltrum (□ is slootwand; ■ is slootbodem). Minimale en maximale gehalten in de bodem zijn weergegeven met stippellijnen.

Uit bovenstaande figuren volgt dat voor de meeste metalen bij Beltrum en Lelystad de gehalten afnemen met een toenemende afstand tot de sloot. Dit patroon is het duidelijkst voor de monsters uit de slootbodem en geringer voor monsters uit de slootwand. Bij Zegveld nemen de gehalten alleen af met een toenemende afstand voor de monsters uit de slootwand. Bij Winterswijk konden er door de harde keileemlaag in slootwand en -bodem geen profielen worden bemonsterd.

Deze afnemende gehalten bij een toenemende afstand tot het slootwater kunnen door een aantal processen worden veroorzaakt:

- sorptie aan reactieve bestanddelen die in verhoogde mate in de waterbodem aanwezig kunnen zijn, zoals organische stof, klei en aluminium- en ijzerhydroxide;
- precipitatie als metaalsulfides onder anaerobe omstandigheden in de waterbodem;
- oppervlakkige afspoeling en sedimentatie van bovengrond met relatief hoge gehalten van metalen;
- sedimentatie van zwevend materiaal in de sloot, zoals dode plantenresten, die eventueel van elders zijn aangevoerd.

Precipitatie van metaalsulfides zal alleen optreden onder sterk anaerobe omstandigheden, bij een voldoende beschikbaarheid van zwavel en een beperkte beschikbaarheid van ijzer. Deze condities doen zich alleen voor bij Zegveld en dan overigens in het gehele profiel en niet alleen in de monsters bij de slootwand. Precipitatie als sulfides is dus geen waarschijnlijke oorzaak van de gradiënten in metaalgehalten.

Tussen de drie overige processen kan met behulp van de beschikbare gegevens geen onderscheid worden gemaakt. Voor de meeste monsters geldt dat gehalten van zware metalen niet of niet veel hoger zijn dan de hoogste gehalten in de bodem. Wel zijn de gehalten in de bodem sterk gecorreleerd met de organisch stofgehalten van de monsters. Hoge metaalgehalten gaan meestal samen met hoge organische stofgehalten, wat verklaard kan worden doordat zware metalen sterk binden aan organisch stof. Het is echter niet duidelijk wat de oorsprong van dit organisch materiaal en de hieraan gebonden metalen is. Dit organisch stof kan afkomstig zijn via afspoeling van de bovengrond, die meestal rijker is aan organisch stof en metalen. Daarnaast kan het organisch stof ook afkomstig zijn van dode plantenresten, die ofwel zelf hoge gehalten van zware metalen bevatten ofwel uitspoelende zware metalen invangen.

Een opvallende uitschieter in de metaalgehalten is nikkel bij Beltrum, waar hele hoge gehalten in de slootbodem worden aangetroffen tot wel 40 keer het hoogst waargenomen gehalte in de bodem. In mindere mate geldt dit hier ook voor cadmium. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat deze hoge gehalten het gevolg zijn van instroom vanuit de ondergrond, omdat de concentraties van cadmium en nikkel in het bodemvocht van de waterbodem zeer hoog zijn (zie Tabel.A.12 in Bijlage 9). Ook in het bodemvocht van het bodemprofiel nemen de concentraties van nikkel en cadmium sterk toe met de diepte (zie Bijlage 4).

Uit bovenstaande volgt dat het niet duidelijk is of retentie van uitspoelende zware metalen in de waterbodem daadwerkelijk optreedt. Echter, uit Figuur 4.7 in paragraaf 4.3 is al gebleken dat de gemiddelde concentraties in het bodemvocht goed overeenkomen met de gemiddelde concentraties in het oppervlaktewater. Dit betekent dat de invloed van mogelijke retentie op de totale uitspoeling beperkt zal zijn.

4.6 Oppervlakkige afspoeling

Gedurende de meetperiode van dit onderzoek is er op de locaties waar afspoeling kan worden gemeten geen oppervlakkige afspoeling opgetreden. Er kan dus op dit moment niet worden vastgesteld of oppervlakkige een belangrijke bijdrage levert aan de belasting van het oppervlaktewater met zware metalen. Omdat er op deze meetlocaties wel sporen zichtbaar zijn van eerdere afspoeling, blijkt dat afspoeling in elk geval in de tijd een zeer heteroog proces is.

5 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Het doel van deze studie was de validatie van het model dat gebruikt wordt voor de berekening van de uitspoeling van zware metalen uit landbouwbodems. Hierbij zijn de afzonderlijke modelonderdelen en de gehele modelketen getoetst aan veldmetingen.

Ten aanzien van de schematisatie zware metaalgehalten in vaste fase geldt:

- voor bovengrond komen de berekende gehalten goed overeen met de metingen;
- ook voor de afname van de gehalten met de diepte komen over met de metingen;
- uitzonderingen zijn veengronden waarbij het model de gehalten in de ondergrond soms overschat;
- de gehalten in de ondergrond worden niet goed voorspeld, doordat er grote lokale of regionale variaties in achtergrondgehalten zijn. Van deze variatie is achtergrondgehalten is echter onvoldoende bekend om in het model te kunnen meenemen;
- voor nikkel geldt dat ook voor de bovengrond gehalten niet goed worden voorspeld, omdat nikkel voornamelijk van natuurlijke oorsprong in de bodem is met eveneens grote lokale of regionale variaties in deze natuurlijke achtergrondgehalten.

Ten aanzien van het de overdracht van metalen van de vaste fase naar het bodemvocht geldt:

- de modelvoorspellingen komen redelijk overeen met de gemiddelde gemeten concentraties in het bodemvocht;
- de modelvoorspelling voor de veldsituaties zijn sterk afhankelijk van de gebruikte evenwichtsrelatie;
- de momenteel gebruikte evenwichtsrelaties geven voor de meeste metalen een onderschatting van de concentraties in het bodemvocht, waardoor de huidige schattingen van uitspoeling mogelijk te laag zijn;
- de variatie in gemeten concentraties in de tijd is groot, maar reden hiervan is niet duidelijk.

Ten aanzien van het transport van metalen vanuit het bodemvocht naar het oppervlaktewater geldt:

- de gemiddelde opgeloste concentraties in het oppervlaktewater komen goed overeen met gemiddelde concentraties in bodemvocht;
- de totale concentraties in het oppervlaktewater zijn voor een aantal locaties en metalen hoger dan gemiddelde concentraties;
- de concentraties in het oppervlaktewater zijn sterk afhankelijk van de grondwaterstand: hoge metaalconcentraties komen vooral voor bij hoge

grondwaterstanden, doordat dan uitspoeling uit oppervlakkige bodemlagen met hogere gehalten optreedt.

Ten aanzien van de volledige modelketen (vaste fase → bodemvocht → oppervlaktewater) geldt:

- de gemiddelde berekende concentraties in de afvoer komen goed overeen met de gemiddelde gemeten concentraties in het oppervlaktewater;
- de variaties in de concentraties in het oppervlaktewater kunnen verklaard en gemodelleerd worden door rekening te houden met de variaties in de hydrologie.

Ten aanzien van metalen in de waterbodem geldt:

- voor alle locaties zijn de metaalgehalten in de waterbodem verhoogd ten opzichte van de ondergrond, met uitzondering van Zegveld;
- het is niet mogelijk vast te stellen of deze verhoging het gevolg is van oppervlakkige afspoeling, sedimentatie van zwevend stof of invang van uitstromende metalen;
- de rol van retentie is waarschijnlijk beperkt, wat volgt uit de goede overeenkomsten tussen concentraties in het bodemvocht en concentraties in het grondwater.

Aanbevelingen

Om te komen tot een verbetering van de schatting van uitspoeling (en afspoeling) van zware metalen op nationale en regionale schaal komen we tot de volgende aanbevelingen:

- de schematisatie van de metaalgehalten in ondergrond moet worden verbeterd. Dit geldt vooral voor de regionale variatie in de achtergrondgehalten. Deze achtergrondgehalten zijn vooral belangrijk omdat deze bepalend zijn voor de achtergrondbelasting van het oppervlaktewater en daarmee voor natuurlijke achtergrondconcentraties in het oppervlaktewater;
- voor veengronden moet betere relaties voor de schatting van gehalten in de vaste fase worden afgeleid om de afname van de gehalten met de diepte te beschrijven;
- voor de berekening van de overdracht van metalen van de vaste fase naar het bodemvocht zijn nu betere relaties beschikbaar dan degene die momenteel gebruikt worden voor nationale berekeningen (zoals voor de Emissieregistratie). Wij bevelen aan om voor toekomstige berekeningen deze nieuwe betere relaties te gebruiken;
- de huidige metingen aan oppervlakkige afspoeling moeten voortgezet, omdat de meetperiode van dit onderzoek te kort was om na te gaan of oppervlakkige afspoeling een belangrijke bijdrage levert aan de belasting van het oppervlaktewater.

Literatuur

- Bakel, J. van, Heinen, M., Massop, H.T.L. & Noij, G.J. (2004). *Effectiveness of buffer strips in the Netherlands*. In G.L. Velthof (Ed.): *Onderbouwing van enkele middelvoorschriften uit het Nederlandse Actieprogramma Nitraatrichtlijn* (pp. 9-18) Wageningen: Wageningen UR.
- Bonten, L.T.C., P.F.A.M. Römkens & G.B.M. Heuvelink, 2004. *Uitspoeling van zware metalen in het landelijk gebied, modellering van uitspoeling op regionale schaal: modelaanpak, resultaten modelberekeningen en modelvalidatie*, Alterra-rapport 1044.
- Bonten, L.T.C. & D.J. Brus, 2006. *Belasting van het oppervlaktewater in het landelijk gebied door uitspoeling van zware metalen. Modelberekeningen t.b.v. emissieregistratie 2006 en invloed van redoxcondities*. Alterra-rapport 1340
- Bonten, L.T.C., J.E. Groenenberg, L. Weng & W.H. van Riemsdijk, 2008a. *Use of speciation and complexation models to estimate heavy metal sorption in soils*. *Geoderma*, 146 (1-2): 303-310.
- Bonten, L.T.C., B. van der Grift & J. Klein, 2008b. *Achtergrondbelasting van het oppervlaktewater met zware metalen ten gevolge van uitspoeling uit de bodem*. Alterra-rapport 1636
- Bonten, L.T.C. & J.E. Groenenberg, 2008. *Uitspoeling van zware metalen uit bodems in het landelijk gebied. Modelberekeningen t.b.v. emissieregistratie 2008*, Alterra-rapport 1695.
- Bonten L.T.C., P.F.A.M. Römkens, 2008. *Kennisbehoefte en kennisbeschikbaarheid over de rol van uitspoeling van zware metalen uit de bodem in het landelijk gebied*. Alterra-rapport 1701.
- Bonten, L.T.C., J.E. Groenenberg & P.F.A.M. Römkens, 2009. *Mogelijkheden voor maatregelen en invloed van voorgenomen beleid m.b.t. nutriënten op de uitspoeling van zware metalen naar het oppervlaktewater*, Alterra-rapport 1818
- Kroes, J.G., P.J.T. van Bakel, J. Huygen, H.Th.L. Massop & R. Pastoors, 2002, *Regional validation of a nation wide application of a comprehensive 1D hydrological model*. *proc. 5th Intern. Symp. on Spatial Accuracy Assessment*, eds. G.J. Hunter and K. Lowell, Melbourne, 83-93.
- Kroes J.G., L.T.C. Bonten, P. Groenendijk & B. van der Grift, 2008. *Dynamische modellering van cadmium- en zinktransport in het stroomgebied van de Keersop; Bijdrage aan een grondwatermodel voor de Vlaamse en Nederlandse Kempen*, Alterra-rapport 1643.
- Kroes, J.G., J.C. Van Dam, P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks & C.M.J. Jacobs, 2008. *SWAP version 3.2. Theory description and user manual*. Alterra-report 1649
- Rietra, R.P.J.J., P.F.A.M. Römkens, L.T.C. Bonten, 2009. *Afleiden van achtergrondgehalten voor zware metalen. Een vergelijking van bestaande concepten en discussiepunten*, Alterra-rapport 1862
- Römkens P.F.A.M., L.T.C. Bonten, R.P.J.J. Rietra, J. E. Groenenberg, A.C.C. Plette & J. Bril, 2003. *Uitspoeling van zware metalen uit landbouwgronden; Schatting van de bijdrage van uitspoeling uit landbouwgronden aan de belasting van het oppervlaktewater: modelaanpak en resultaten*, Alterra-rapport 791.

- Römkens, P.F.A.M., J.E. Groenenberg, L.T.C. Bonten, W. de Vries & J. Bril, 2004, *Derivation of partition relationships to calculate Cd, Cu, Ni, Pb and Zn solubility and activity in soil solution samples*. Wageningen, ALTErrA. Report 305.
- Tiktak, A., A.H.W. Beusen, L.J.M. Boumans, P. Groenendijk, B.J. de Haan, R. Portielje, C.G.J. Scholten & J. Wolf, 2003. *Toets van STONE versie 2.0; Samenvatting en belangrijkste resultaten*. Bilthoven, RIVM. Rapport 718201007.
- VROM, Ministerie van, 2007, *Besluitbodemkwaliteit*, Staatsblad, 496.

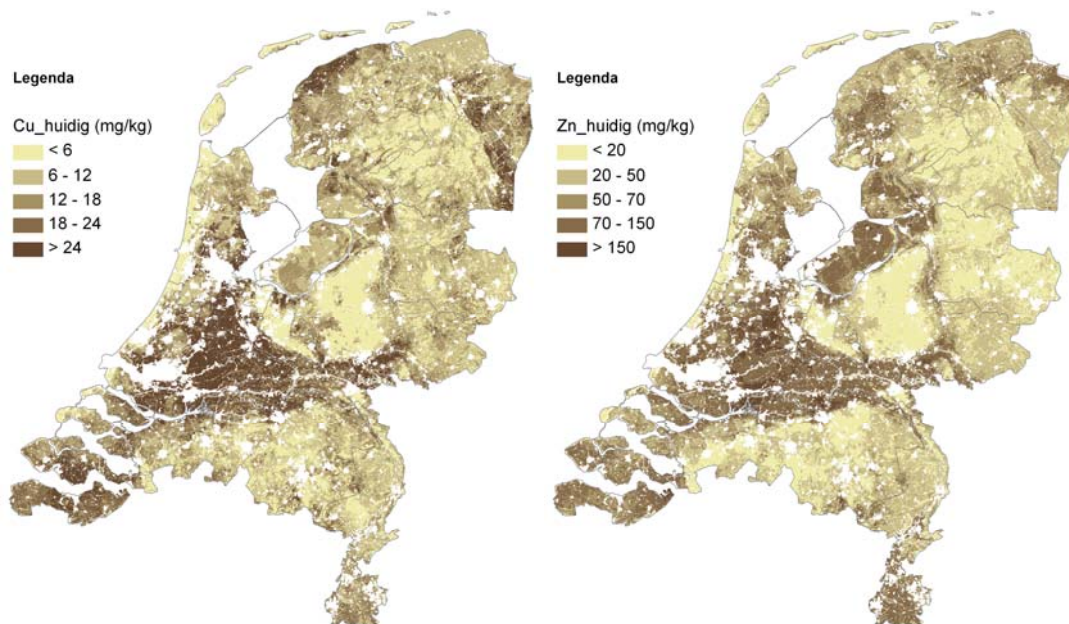
Bijlage 1 Berekeningsmethode van uitspoeling

1. Schematisatie vaste fase

De berekeningen van de uitspoeling op landelijke schaal zijn gebaseerd op landsdekkende kaarten van de huidige gehalten van zware metalen in de bodem. Deze kaarten zijn berekend met een geostatistisch model op basis van een groot aantal metingen van zware metaalgehalten in de bodem. In Alterra-rapport 1340 (Bonten & Brus, 2006) zijn de gebruikte methode en data uitgebreid beschreven. Voor de schematisatie van de gehalten van zware metalen in de bodem wordt onderscheid gemaakt in drie verschillende bodemlagen: de bovengrond (de bouwvoor voor landbouwgebieden en de laag 0-5 cm voor natuurgebieden), de ondergrond met natuurlijke gehalten van zware metalen en de tussenliggende bodemlagen.

Bovengrond

Voor schatting van de gehalten in de bovengrond gebruiken we een 2-staps benadering. In de eerste stap worden generieke wiskundige relaties tussen metaalgehalten, bodemeigenschappen en landgebruik afgeleid (verg 1.). In deze relaties zijn regionale variaties in gehalten door verschillen in historische belasting nog niet meegenomen. Daarom hebben we in de tweede stap deze regionale verschillen gecombineerd met de generieke relaties in landsdekkende kaarten van zware metaalgehalten in de bovengrond. Ter illustratie zijn in Figuur A.1 de gehalten van koper en zink in de bovengrond weergegeven.



Figuur A.1 Gehaltes van koper (links) en zink (rechts) in de bovengrond.

Deze kaarten laten duidelijk zien dat in gebieden met grote bindingscapaciteit voor zware metalen, dus gronden met hoge klei- en organische stofgehalten, de gehalten

van zware metalen ook hoger zijn. Verder zijn een aantal gebieden duidelijk te onderscheiden, zoals natuurterreinen (o.a. Veluwe, Utrechtse heuvelrug) met duidelijk lagere gehalten, maar ook gebieden met een hogere historische belasting en daardoor hogere gehalten in de bovengrond, zoals de Kempen, waarbij de bovengrond belast is door emissies van zinkfabrieken in de regio, en delen van het veenweidegebied waar gehalten verhoogd zijn door toemaakdekken.

Stap 1

De algemene vergelijking voor schatting van de generieke gehalten in de bovengrond (grasland en natuur 0-10 cm, akkerbouw 0-30 cm) en de bijbehorende coëfficiënten zijn hieronder weergegeven.

$$\log Q_{tot} = A_0 + A_1 \cdot \log OM + A_2 \cdot \log k_{lei} + A_3 \cdot pH_{KCl} \quad (1)$$

waarbij, Q_{tot} is metaalgehalte in de vaste fase (mg/kg); OM is organisch stofgehalte van de bodem (%); k_{lei} is kleigehalte van de bodem (%), pH_{KCl} is de pH van de bodem, als pH-KCl.

Tabel A.1 Coëfficiënten voor regressievoorspelling van zware metaalgehalten in bovengrond

metaal	A_0	A_1	A_2	A_3	R^2
Landbouw					
Cd	-1.152	0.380	0.138	0.033	0.20
Cu	0.407	0.420	0.228	0.026	0.37
Pb	0.799	0.456	0.251	-	0.43
Zn	0.757	0.327	0.366	0.056	0.54
Natuur					
Cd	-1.540	0.654	-	0.058	0.41
Cu	-0.359	0.647	0.271	0.073	0.67
Pb	0.774	0.554	0.218	-	0.59
Zn	-0.046	0.563	0.282	0.169	0.71

Voor nikkel zijn er geen significante verschillen tussen gehalten in de ondergrond en gehalten in de bovengrond. Daarom nemen we aan dat nagenoeg alle nikkel in de bodem van natuurlijke oorsprong is. De nikkelgehalten worden daarom berekend met de vergelijkingen voor de ondergrond (zie hieronder).

Stap 2

In de vervolgstap zijn de verschillen tussen de regressieschattingen voor de meetpunten en de metingen van metaalgehalten bepaald. Deze verschillen zijn vervolgens geïnterpoleerd met Simple-Kriging. De uiteindelijke schattingen van gehalten in de bovengrond worden dan berekend door de geïnterpoleerde verschillen op te tellen bij de regressieschattingen.

Ondergrond

De methode voor schattingen van de natuurlijke gehalten in de ondergrond is uitgebreid beschreven in Alterra-rapport 1636 (Bonten et al., 2008b). Het natuurlijk gehalte van zware metalen blijkt sterk gerelateerd aan het kleigehalte van een bodemlaag. In werkelijkheid kan de oorsprong van verschillende bodemlagen sterk verschillen ook al komen het kleigehalte en andere bodemeigenschappen overeen.

Anders gezegd, gelijksoortige bodemlagen kunnen tot verschillende geologische formaties behoren. Door dit verschil in oorsprong kunnen de metaalgehalten bij een gelijk kleigehalte toch nog verschillen voor verschillende dieptes en verschillende locaties in Nederland. Deze verschillen tussen geologische formaties worden niet meegenomen in de uitspoelingberekeningen omdat onvoldoende informatie over deze variatie bekend is.

De algemene vergelijking voor de schatting van natuurlijke gehalten in de ondergrond en de bijbehorende coëfficiënten zijn hieronder weergegeven.

$$Q_{tot} = B_1 \cdot \text{klei} + B_2 \quad (2)$$

Tabel A.2 Regressieparameters voor schatting van natuurlijke gehalten van zware metalen in de bodem

metaal	B_1	B_2	R^2
Cd	0.0029	0.0517	0.26
Cu	0.339	1.71	0.47
Ni	0.759	2.39	0.78
Pb	0.388	2.77	0.55
Zn	1.86	4.76	0.76

Tussenliggende lagen

Met een toenemende diepte in de bodem zullen de metaalgehalten afnemen van de, vooral door menselijke bronnen bepaalde, gehalten in de bovengrond tot de natuurlijke gehalten in de ondergrond. Om de gehalten in deze tussenliggende lagen te schatten is een relatie afgeleid, waarbij het gehalte in de tussenliggende lagen afhankelijk is van het gehalte in de bovengrond, de diepte en de bodemeigenschappen van de betreffende bodemlaag.

De algemene vergelijking voor de schatting van de gehalten in de tussenliggende bodemlagen en de bijbehorende coëfficiënten zijn hieronder weergegeven.

$$\log Q_{tot}(z) = C_0 + C_1 \log z + C_2 \log Q_{tot}(0) + C_3 \log OM + C_4 \log \text{klei} + C_5 \cdot pH_{KCl} \quad (3)$$

waarbij z is de diepte van de betreffende bodemlaag (cm –mv).

Tabel A.3 Regressiecoëfficiënten voor de berekening van gehalten in de tussenliggende bodemlagen

metaal	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	R^2
Cd	-0.496	-0.354	0.382	0.174	0.261	0.011	0.44
Cu	0.364	-0.351	0.102	0.372	0.650	0.009	0.64
Pb	1.141	-0.560	0.191	0.312	0.369	0.014	0.55
Zn	0.343	-0.111	0.146	0.320	0.466	0.071	0.69

In de schematisatie van gehalten in de ondergrond zijn de vergelijkingen voor de gehalten in de tussenliggende lagen gebruikt vanaf de bovengrond (> 10 cm voor grasland en natuur, > 30 cm voor akkerbouw) tot op de diepte waarop de geschatte gehalten kleiner worden dan de voorspellingen voor de achtergrondgehalten. Van deze diepte worden de achtergrondgehalten gebruikt. Deze diepte varieert per bodemprofiel maar ligt voor de meeste profielen tussen de 40 en 100 cm –mv.

Data

De hierboven genoemde relaties zijn afgeleid op basis van een grote database met circa 4000 meetgegevens uit 1) provinciale bodemmeetnetten, 2) het nationaal bodemmeetnet, 3) data van het voormalig instituut voor bodemvruchtbaarheid in Haren (IB-DLO) en 4) data uit het project achtergrondwaarden 2000 (AW2000). Monsters afkomstig van locaties met bekende puntbron-verontreinigingen zijn weggelaten. De beschikbaarheid van data verschilt sterk voor de verschillende bodemlagen. Voor schatting van de gehalten in de bovengrond zijn de meeste metingen beschikbaar (ongeveer 4000, exacte aantallen variëren per metaal). Voor de ondergrond en de tussenliggende lagen zijn echter veel minder metingen beschikbaar, ruim 300 voor de ondergrond en ongeveer 260 voor de tussenliggende lagen. De data zijn uitgebreid beschreven in Alterra-rapport 1636 (Bonten et al., 2008b) en Alterra-rapport 1340 (Bonten & Brus, 2006).

2. Vaste fase → bodemvocht/grondwater

Totale metaalgehalten → reactieve metaalgehalten

Van de totale hoeveelheid zware metalen in de bodem is slechts een gedeelte beschikbaar voor directie uitwisseling met het bodemvocht. Dit wordt de “potentieel beschikbare” of “reactieve” fractie genoemd. De niet-reactieve metalen zijn meestal ingebouwd in minerale bodembestanddelen of in de vorm van zeer slecht oplosbare mineralen. In de tijd kunnen door verwerking deze metalen wel beschikbaar komen. De hoeveelheid reactief metaal in de bodem is onder andere afhankelijk van het soort metaal, de totale hoeveelheid van dat metaal en een aantal bodemeigenschappen. Door Römken et al. (2004) is de volgende algemene relatie afgeleid voor de hoeveelheid reactief metaal in de bodem:

$$\log Q_r = a_1 + a_2 \log OM + a_3 \log k_{lei} + a_4 \log Q_{tot} \quad (4)$$

waarbij, Q_r is gehalte reactief metaal in de vaste fase (mg/kg); Q_{tot} is totaal gehalte in de vaste fase (mg/kg); OM is organisch stofgehalte van de bodem (%); k_{lei} is kleigehalte van de bodem (%). Q_r en Q_{tot} zijn hierbij operationeel gedefinieerd als het metaalgehalten bepaald na een extractie met 0,43 M HNO_3 en met Aqua Regia, respectievelijk.

De coëfficiënten a_1 t/m a_4 hebben voor verg. 4 de volgende waarden:

Tabel A.4 Coëfficiënten voor bepaling van reactieve gehalten in de bodem

metaal	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2
Cd	-0.089	0.022	-0.062	1.075	0.96
Cu	-0.331	0.023	-0.171	1.152	0.93
Ni ¹⁾	-1.016	0.62	0.094	0.74	0.77
Pb	-0.263	0.031	-0.112	1.089	0.92
Zn	-0.703	0.183	-0.298	1.235	0.96

¹⁾ niet in Römken et al. (2004)

Reactieve metaalgehalten → concentraties in bodemvocht

De volgende stap in de berekening van uitspoeling van zware metalen is de berekening van concentraties in het bodemvocht c.q. grondwater op basis van reactieve gehalten van zware metalen in de bodem. Voor de berekening van deze concentraties wordt tot dusver gebruik gemaakt van empirische relaties tussen gehalten, concentraties en bodemeigenschappen. Deze empirische relaties zijn afgeleid op basis van laboratoriumexperimenten. Voor de berekeningen van de uitspoeling voor de emissieregistratie van 2003 (Römkens et al., 2003), 2005 (Bonten et al., 2004) en 2006 (Bonten & Brus, 2006) zijn partitierelaties met de volgende formulering gebruikt (Römkens et al., 2004):

$$Q = K_f \cdot C^n$$
$$\log K_f = b_1 + b_2 \log OM + b_3 \log k_{lei} + b_4 \log FeAl_{ox} + b_5 \cdot pH + b_6 \log DOC \quad (5)$$

waarbij, Q is gehalte reactief metaal in de vaste fase (mg/kg); C is concentratie metaal in het bodemvocht (mg/l); K_f is Freundlich constante ($\text{mg}^{1-n} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{l}^n$); n is Freundlich exponent (-); OM is organisch stofgehalte van de bodem (%); k_{lei} is kleigehalte van de bodem (%); $FeAl_{ox}$ is gehalte ijzer- en aluminiumhydroxiden (m.b.v. oxalaatextractie) (mmol/kg); pH is de pH van het bodemvocht (-); DOC is de concentratie opgelost organisch koolstof (mg C/l).

De coëfficiënten n en b_1 t/m b_6 hebben voor verg. 5 de volgende waarden:

Tabel A.5 Coëfficiënten voor bepaling van concentraties in het bodemvocht

metaal	n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	R^2
Cd	0,50	-1,30	0,43	0,12	0,32	0,25	-0,04	0,78
Cu	0,67	0,79	0,47	0,12	0,37	0,12	-0,31	0,67
Ni	0,62	-0,77	0,68	0,39	0,06	0,26	-0,08	0,88
Pb	1,11	1,00	0,61	0,09	0,65	0,22	-0,43	0,58
Zn	0,75	-1,13	0,38	0,26	0,23	0,44	-0,13	0,83

Voor de berekeningen van uitspoeling voor de emissieregistratie 2008 (Bonten & Groenenberg, 2008) en voor dynamische berekeningen van uitspoeling in de Kempen (Kroes et al., 2008) is een aangepaste formulering voor de Freundlich constante gebruikt, waarbij verwacht wordt dat voor de ondergrond betere resultaten worden verkregen:

$$\log K_f = \log(b_1 \cdot OM + b_2 \cdot k_{lei} + b_3 \cdot FeAl_{ox}) + b_4 \cdot pH + b_5 \log DOC \quad (6)$$

De coëfficiënten n en b_1 t/m b_5 van verg. 6 zijn op twee verschillende manieren bepaald. Ten eerste door de fout in de geschatte waarde van K_f ten opzichte van de gemeten waarde van K_f te minimaliseren (K_f -methode). Deze methode heeft in principe als voordeel dat de partitierelaties gebruikt kunnen worden om zowel de concentratie C op basis van het gehalte in de bodem Q te berekenen als om Q op basis van C te berekenen. Deze K_f -methode is gebruikt voor de berekeningen van uitspoeling voor de emissieregistratie 2008 (Bonten & Groenenberg, 2008) en voor dynamische berekeningen van uitspoeling in de Kempen (Kroes et al., 2008). Bij de

tweede manier zijn de waarden van de coëfficiënten bepaald door de fout in de geschatte concentraties ten opzichte van de gemeten concentraties te minimaliseren (C-Q methode). Voor de C-Q methode wordt de partitierelaties geschreven als:

$$\log C = \frac{1}{n} \log Q - \log(b_1 \cdot OM + b_2 \cdot k_{lei} + b_3 \cdot FeAl_{ox}) + b_4 \cdot pH + b_5 \log DOC \quad (7)$$

De coëfficiënten n en b_i t/m b_6 van verg. 6 en 7 hebben voor de twee methodes de volgende waarden:

Tabel A 6 Coëfficiënten voor bepaling van concentraties in het bodemvocht

metaal	n	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	R^2
K _f -methode (verg. 6)							
Cd	0.445	0.0801	0.00314	0.00381	0.235	-0.151	0.85
Cu	0.545	7.98	0.720	0.325	0.111	-0.389	0.66
Ni	0.509	0.0733	0.0340	-	0.272	-0.0466	0.88
Pb	0.44	6.42	-	1.15	0.154	-0.329	0.55
Zn	0.752	0.10	0.0239	0.00540	0.385	-0.163	0.84
C-Q methode (verg. 7)							
Cd	0.93	0.0632	0.00835	0.00248	-0.41	0.076	0.85
Cu	1.79	80.9	27.7	9.09	-0.032	0.72	0.66
Ni	1.28	10.9	0.760	-	-0.21	0.60	0.88
Pb	1.32	7.68	5.46	0.497	-0.39	0.66	0.55
Zn	1.05	0.253	0.0356	0.00281	-0.4	0.32	0.84

Schatting van DOC concentraties

De concentraties van opgeloste organische stof (DOC) is nodig om de concentraties van zware metalen in het bodemvocht te kunnen schatten (zie verg. 5 en 6). Deze concentraties zijn meestal niet beschikbaar in de vorm van metingen. Daarom wordt de concentratie DOC geschat op basis van het organisch stofgehalte en de pH van het bodemvocht:

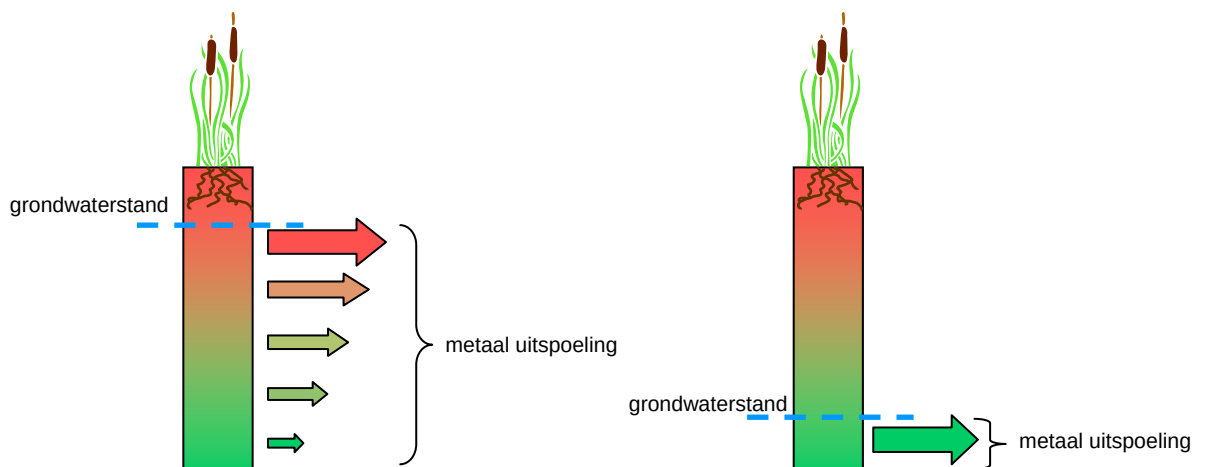
$$\log DOC = 2.48 + 0.365 \log OM - 0.203 \cdot pH \quad ; \quad R^2 = 0.82 \quad (8)$$

Mechanistische sorptiemodellen

Een alternatief voor het gebruik van empirische relaties is het gebruik van mechanistische sorptiemodellen, waarbij de binding van metalen aan de afzonderlijke sorptieoppervlakken gedetailleerd wordt beschreven (o.a. Bonten et al., 2008a; Weng et al., 2003). Het voordeel van het gebruik van mechanistische modellen is dat deze in principe voor een grotere range van bodemeigenschappen en zware metaalconcentraties en voor elk willekeurig metaal kunnen worden gebruikt. Het belangrijkste nadeel is dat meer invoerparameters nodig zijn, zoals concentraties van andere stoffen (calcium, nitraat, chloride, etc.) in het bodemvocht. Eventueel kan voor deze concentraties wel een geschatte waarde worden gebruikt. Mechanistische modellen zijn onder andere gebruikt voor de berekening van emissie- en samenstellingswaarden voor bouwstoffen in het Besluit Bodemkwaliteit (VROM, 2007). Bij dynamische transportberekeningen wordt ook de langere rekentijd een belangrijk nadeel. Voor regionale toepassingen kan de rekentijd al snel oplopen tot meerdere dagen of weken.

3. Bodemvocht/grondwater → oppervlaktewater

De uiteindelijke uitspoeling van metalen wordt berekend door voor elke bodemlaag in het model de berekende concentraties in het bodemvocht te vermenigvuldigen met de waterafvoer vanuit de betreffende laag naar het oppervlaktewater. Deze waterafvoer en daarmee ook de metaaluitspoeling zijn sterk afhankelijk van de grondwaterstand (zie Figuur 2.1). Bij hoger grondwaterstanden zal uitspoeling met optreden uit meer oppervlakkig gelegen bodemlagen. Deze bodemlagen hebben meestal de hoogste metaalgehalten, waardoor ook de uitspoeling bij hoge grondwaterstanden het hoogst is. Bij lagere grondwaterstanden zal de uitspoeling logischerwijze dan ook kleiner zijn.



Figuur A.2 Invloed van grondwaterstand op metaaluitspoeling. Links: hoge grondwaterstanden en rechts: lage grondwaterstanden. Hoge metaalconcentraties zijn rood aangegeven, lage concentraties groen.

Om de effecten van deze variaties in grondwaterstanden mee te nemen in modelberekeningen wordt het niet-stationair hydrologisch model SWAP gebruikt (zie Bijlage 7). Voor statische berekeningen, zoals voor de Emissieregistratie, wordt een langjarig-gemiddelde waterafvoer per bodemlaag gebruikt. Deze berekeningen geven dan ook een gemiddelde uitspoeling van zware metalen. Voor dynamische berekeningen, onder andere uitspoeling van Cd en Zn in de Kempen (Kroes et al., 2008), wordt de actuele waterafvoer per bodemlaag gebruikt, waardoor variaties van de metaaluitspoeling in de tijd kunnen worden berekend.

Bijlage 2 Processen niet in uitspoelingsmodel

Voor de berekening van de uitspoeling van zware metalen uit bodems naar het oppervlaktewater zijn de belangrijkste processen wiskundig beschreven in een computermodel. Van een aantal andere processen is niet goed bekend of deze invloed in de praktijk hebben op de uitspoeling en, zo ja, hoe groot deze invloed dan is. Om deze reden zijn deze processen niet opgenomen in het huidige uitspoelingsmodel. Hieronder staan de drie belangrijkste processen beschreven en is aangegeven wat de mogelijke invloed van deze processen op de uitspoeling van zware metalen is.

Precipitatie onder anaerobe omstandigheden

In de verzadigde zone is zuurstof slechts beperkt beschikbaar en daardoor snel opgebruikt. Voor de oxidatie van organisch materiaal worden dan achtereenvolgens nitraat, ijzer, sulfaat en tenslotte methaanvorming gebruikt. Zodra sulfaat wordt gebruikt voor oxidatie ontstaat sulfide. Dit sulfide vormt met veel metalen, zoals ijzer maar ook zware metalen, zeer slecht oplosbare verbindingen. De concentraties van zware metalen in het bodemvocht zijn dan veel lager dan onder zuurstofrijke omstandigheden. Dit betekent dan ook dat de gebruikte relaties voor overdracht van de vaste fase naar het bodemvocht (zoals beschreven in paragraaf 0) niet meer opgaan.

Het is voor de meeste gebieden in Nederland echter niet goed bekend of er sulfaatreductie in de bodem optreedt en onder welke omstandigheden dit optreedt. Verder is ook niet bekend wat de daadwerkelijke invloed van een eventuele sulfaatreductie op de concentraties van zware metalen in het bodemvocht. De metingen van metaalconcentraties in het bodemvocht zijn wel een belangrijk hulpmiddel om te zien of precipitatie van zware metalen als sulfides optreedt. In deze gevallen zullen namelijk de gemeten concentraties veel lager zijn dan berekende concentraties.

Oppervlakkige afspoeling

Een mogelijk belangrijke transportroute van metalen welke niet in de modelberekeningen wordt meegenomen is oppervlakkige afspoeling van mest en bodemdeeltjes. Schattingen voor nutriënten geven echter aan dat de gemiddelde bijdrage van afspoeling tientallen procenten zou kunnen zijn van de totale belasting, waarbij vooral bij grote neerslaghoeveelheden de belasting bijna volledig veroorzaakt zou kunnen worden door afspoeling. De werkelijke bijdrage van afspoeling is tot nu toe echter nauwelijks gemeten in Nederland. Afspoeling zal voor een belangrijk deel bestaan uit de kleinere en lichtere bodembestanddelen (organische stof en kleideeltjes). Dit zijn juist de bodembestanddelen waaraan zware metalen sterk binden.

Retentie in waterbodem

Een deel van de zware metalen die uit- of afspoelen naar het oppervlaktewater komt uiteindelijk niet in de meetbare afvoer terecht. Dit verschil tussen belasting en afvoer wordt aangeduid met de term retentie. Voor zware metalen zal sedimentatie en

binding aan de waterbodem de belangrijkste oorzaak van retentie zijn. Het optreden van retentie betekent echter niet dat de zware metalen tot in het oneindige in het sediment achterblijven. In veel gebieden wordt de waterbodem gebaggerd, waarbij de hieraan gesorbeerde zware metalen uit het oppervlaktewatersysteem verdwijnen. Daarnaast kan in snelstromende systemen transport van het sediment optreden waarbij de zware metalen uit het systeem worden verwijderd.

Bij de modelberekeningen wordt de uitspoeling van metalen tot aan de waterbodem berekend. Deze waterbodems bestaan vaak uit organisch materiaal en slibdeeltjes, waaraan zware metalen zich kunnen binden. Dit betekent dat een gedeelte van de uitspoelende metalen in de waterbodem achter kan blijven. Het is echter niet bekend of dit ook daadwerkelijk optreedt en zo ja, wat de uiteindelijke invloed op de uitspoeling van metalen is. Om deze reden worden er ook waterbodemmonsters genomen en geanalyseerd.

Metalen kunnen in verschillende vormen in het oppervlaktewater voorkomen, zoals opgelost of gebonden aan zwevend stof. Het is niet bekend hoe uitspoeling en ook afspoeling bijdragen aan deze vormen. Dit is belangrijk omdat metalen aan zwevend stof door sedimentatie uit het oppervlaktewater kunnen verdwijnen. Verder geldt dat vooral opgeloste metalen negatieve effecten op organismen hebben. Een vergelijking tussen concentraties in het grondwater en totale en opgeloste concentraties in het oppervlaktewater geeft meer inzicht in de bijdrage van uitspoeling en afspoeling bijdragen aan deze fracties.

Bijlage 3 Analyseresultaten vaste fase

Tabel A.7 Analyse resultaten vaste fase

diepte (cm –mv)	OS (%)	klei (%)	pH-H ₂ O	Fe/Al-ox (mmol/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Zegveld – profiel bij referentiebak									
0-10	54.5	32.6	5.4	364	0.99	36.7	22.0	73.6	132
10-20	43.7	32.6	5.0	521	1.15	29.3	28.9	76.2	80
20-30	57.5	15.6	4.7	512	0.55	24.5	31.3	30.1	50.4
30-40	66.5	15.6	4.5	450	0.41	21.5	30.6	18.4	41.9
40-50	75.9	15.6	4.5	324	0.16	13.6	25.6	7.8	33.0
50-60	76.4	14.1	4.9	246	0.09	11.5	23.3	5.7	39.8
60-70	75.5	14.1	5.2	184	0.04	11.9	19.8	5.4	30.9
70-100	76.8	7.3	5.0	122	0.01	10.6	16.2	4.2	24.6
100-150	76.9	7.3	5.5	100	0.01	11.6	15.0	4.2	17.9
150-200	73.1	8.9	5.9	103	0.05	15.2	19.8	5.6	28.0
Zegveld – profiel midden in perceel									
0-10	52.7	38.1	5.5	359	0.98	34.1	23.7	70.4	133
10-20	45.3	38.1	5.2	528	0.90	29.1	32.6	62.7	90.7
20-30	62.5	17.7	4.8	470	0.46	23.9	32.0	24.5	50.0
30-40	71.6	17.7	4.5	408	0.29	19.4	26.6	14.7	35.0
40-50	77.3	17.7	4.4	346	0.20	15.5	22.2	10.0	31.8
50-60	77.4	6.7	4.6	267	0.15	13.7	20.8	8.1	34.1
60-70	75.7	6.7	4.9	224	0.17	13.9	20.2	7.7	29.1
70-100	77.2	7.4	5.2	174	0.18	12.2	18.2	6.0	29.7
100-150	77.1	7.4	5.7	113	0.09	12.1	15.3	5.8	19.2
150-200	71.3	8.1	5.9	110	0.10	14.2	19.3	7.9	23.4
Lelystad – profiel bij referentiebak									
0-30	2.6	12.6	8.2	58	0.37	7.2	13.9	22.2	76.7
30-40	2.3	5.5	8.0	66	0.19	5.5	12.4	14.2	53.3
40-50	2.2	5.5	8.2	68	0.12	4.1	10.3	11.0	37.9
50-60	1.6	5.5	8.1	66	0.05	4.0	10.8	8.2	31.9
60-70	1.8	5.5	8.2	67	0.11	4.1	11.2	6.3	25.6
70-100	1.3	2.5	8.1	49	0.06	2.3	7.8	3.0	20.5
100-150	2.3	2.9	7.9	21	0.08	2.4	7.8	4.5	14.7
150-200	5.2	13.5	8.1	35	0.07	3.1	10.1	5.1	20.7
Lelystad – profiel midden in perceel									
0-30	2.7	12.5	8.3	56	0.51	8.87	15.0	26.6	89.7
30-40	2.0	4.9	8.3	51	0.25	6.0	11.7	15.9	52.3
40-50	1.6	4.9	8.3	48	0.12	4.4	10.2	9.3	29.5
50-60	1.6	4.9	8.3	67	0.15	4.4	10.7	7.8	25.3
60-70	1.7	4.9	8.3	68	0.11	4.0	10.3	6.2	20.8
70-100	1.2	4.9	8.2	47	0.12	2.5	7.1	4.2	16.4
100-150	1.8	2.9	8.1	28	0.04	2.0	4.7	3.8	12.8
150-200	3.8	20.4	8.2	28	0.06	2.6	7.0	4.2	17.2

Tabel A.7 (vervolg) Analyse resultaten vaste fase

diepte	OS (%)	klei (%)	pH-H ₂ O	Fe/Al-ox (mmol/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Loon op Zand – profiel bij referentiebak									
0-10	4.8	0.7	6.0	47	0.16	8.7	3.9	9.1	24.3
10-20	2.6	0.7	5.9	42	0.19	6.4	1.79	8.0	12.3
20-30	2.0	0.1	6.0	44	0.09	3.4	1.20	3.9	6.6
30-40	1.6	0.1	5.7	46	0.02	1.36	1.38	2.0	13.5
40-50	1.3	0.1	5.7	42	0.02	1	1.68	1.85	15.6
50-60	1.0	0.1	5.6	45	0.02	0.92	1.98	1.75	4.9
60-70	1.0	0.1	5.5	47	0.02	0.79	2.3	2.1	7.1
70-100	1.0	0.1	5.3	44	0.04	1.28	4.0	2.7	15.1
100-150	1.5	0.9	5.2	66	0.02	7.1	15.0	11.8	27.6
150-200	1.7	9.2	5.2	63	0.06	12.8	24.1	12.5	42.6
Loon op Zand – profiel midden in perceel									
0-10	5.0	0.3	6.0	42	0.17	8.3	1.75	9.1	20.9
10-20	3.0	0.3	5.8	48	0.17	7.5	< 0.5	9.9	10.5
20-30	2.5	0.1	5.7	47	0.2	7.1	2.39	9.7	7.98
30-40	2.3	0.1	5.5	46	0.14	6.3	< 0.5	7.9	6.1
40-50	2.3	0.1	5.3	41	0.12	4.5	< 0.5	5.4	5.3
50-60	2.0	0.1	5.5	37	0.07	1.8	< 0.5	2.3	5.9
60-70	2.3	0.1	5.4	45	0.04	1.01	< 0.5	1.73	5.1
70-100	1.6	0.1	5.3	46	0.03	0.6	0.68	2.1	4.7
100-150	1.0	0.1	5.3	42	0.04	0.62	< 0.5	2.3	6.9
150-200	1.3	8.3	5.1	50	0.05	9.8	20	11.1	34.4
Winterswijk – profiel bij referentiebak									
0-10	7.6	7.7	6.5	84	0.31	13.3	4.3	23.7	38.5
10-20	5.3	7.7	6.2	77	0.57	13.5	4.0	25.0	37.4
20-30	4.5	6.3	6.1	78	0.21	9.5	3.6	20.9	29.0
30-40	4.3	6.3	6.0	89	0.14	6.9	3.9	16.8	26.0
40-50	3.7	6.3	5.6	91	0.14	7.4	5.4	15.2	31.7
50-60	3.5	57.0	5.4	97	0.07	9.7	9.4	12.8	32.4
Winterswijk – profiel midden in perceel									
0-10	7.5	4.5	6.4	71	0.4	11.8	0.56	25.1	33.1
10-20	6.0	4.5	5.9	76	0.35	12.3	0.46	28.2	33.5
20-30	5.6	8.4	5.8	80	0.3	10.2	< 0.5	23.7	28.0
30-40	5.6	8.4	5.7	87	0.15	7.5	< 0.5	16.0	15.3
40-50	4.7	8.4	5.4	91	0.07	7.4	3.2	12.0	13.4
50-60	2.8	26.2	5.3	69	0.06	4.8	3.1	8.69	13.1
60-70	2.7	52.5	5.2	101	0.04	5.1	6.5	10.8	21.8

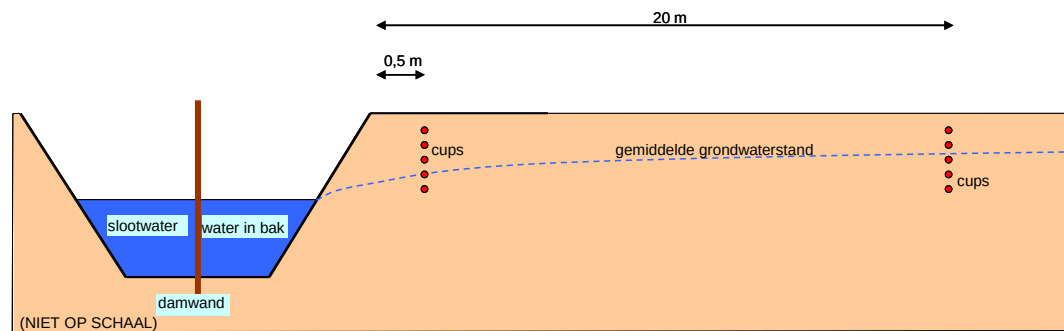
Tabel A.7 (vervolg) Analyse resultaten vaste fase

diepte	OS (%)	klei (%)	pH-H ₂ O	Fe/Al-ox (mmol/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
Beltrum – profiel bij referentiebak									
0-30	5.7	1.1	5.8	95	0.15	11.9	1.84	10.5	24.9
30-40	5.1	3.9	5.6	104	0.07	2.9	1.75	7.16	11.7
40-50	2.5	3.9	5.6	78	0.1	1.29	1.92	3.3	8.6
50-60	2.3	1.5	5.6	72	0.03	1.01	2.0	3.0	8.7
60-70	1.9	1.5	5.6	60	0.04	0.73	1.88	2.0	5.3
70-100	0.7	1.5	6.0	43	0.03	0.71	1.94	1.67	4.7
100-150	0.5	0.1	5.8	28	< 0.05	0.75	2.2	1.96	6.1
Beltrum – profiel midden in perceel									
0-30	5.2	2.9	5.7	106	0.21	13.7	2.4	12.7	31.5
30-40	3.2	2.1	5.8	119	0.08	2.8	1.41	4.4	14.3
40-50	2.2	2.1	5.8	102	0.05	1.72	1.91	2.8	10.1
50-60	1.4	1.2	5.7	75	0.02	1.01	2.1	2.3	7.0
60-70	1.0	1.2	5.7	60	0.02	0.95	2.4	2.3	5.6
70-100	0.7	1.2	5.7	46	0.02	0.87	2.2	2.2	5.5
100-150	0.5	0.9	5.7	32	0.02	0.87	2.2	2.2	5.5

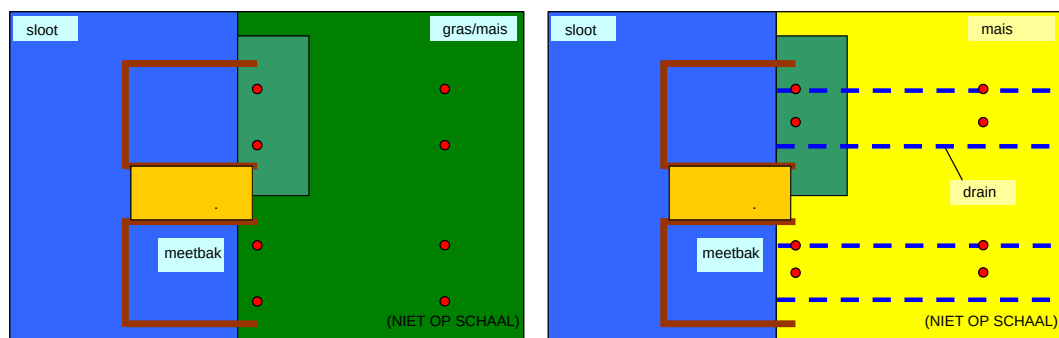
analysemethoden:

- OS: gloeirest
- klei: zeef en pipet methode
- Fe/Al-ox: ICP-AES na extractie met ammonium-oxalaat
- zware metalen: totaal-gehalten met ICP-MS na extractie met Aqua-Regia

Bijlage 4 Analyseresultaten bodemvocht



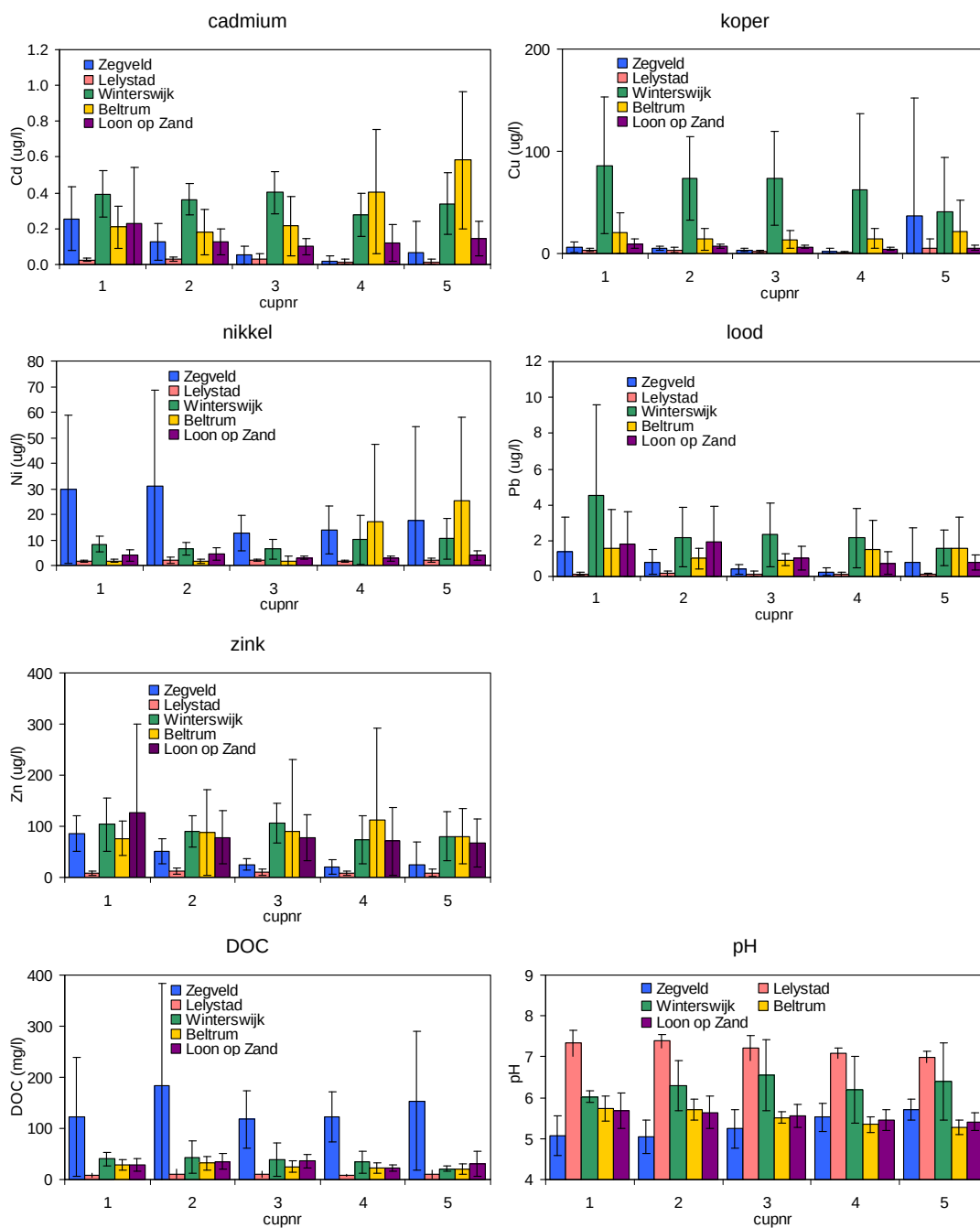
Figuur A.3 Schematische dwarsdoorsnede meetopstelling met locaties van cups in de bodem



Figuur A.4 Schematisch bovenaanzicht meetopstellingen met locaties van cups. Links: Zegveld, Winterswijk en Beltrum. Rechts: Leystad.

Tabel A.8 Analyse resultaten bodemvocht (gemiddelde waarden en standaarddeviaties)

diepte (cm)	Cd (µg/l)	Cu (µg/l)	Ni (µg/l)	Pb (µg/l)	Zn (µg/l)	DOC (mg/l)	pH
Beltrum							
50	0.21 ± 0.12	20.3 ± 19.9	1.8 ± 0.8	1.6 ± 2.2	76 ± 34	28 ± 11	5.7 ± 0.3
75	0.18 ± 0.13	14.2 ± 10.6	1.7 ± 0.7	1.0 ± 0.6	87 ± 84	32 ± 13	5.7 ± 0.3
100	0.22 ± 0.17	13.5 ± 8.7	1.8 ± 1.7	0.9 ± 0.3	91 ± 141	25 ± 11	5.5 ± 0.1
125	0.40 ± 0.35	14.7 ± 9.5	17.2 ± 30.1	1.5 ± 1.6	112 ± 180	22 ± 11	5.3 ± 0.2
150	0.58 ± 0.38	21.9 ± 30.5	25.3 ± 32.5	1.5 ± 1.8	80 ± 54	20 ± 11	5.3 ± 0.2
Lelystad							
40	0.03 ± 0.01	3.6 ± 1.8	1.5 ± 0.4	0.1 ± 0.1	8 ± 4	9 ± 4	7.3 ± 0.3
60	0.03 ± 0.01	3.4 ± 2.6	2.0 ± 1.4	0.17 ± 0.15	12.6 ± 5.7	11.2 ± 8.3	7.4 ± 0.2
80	0.03 ± 0.03	1.9 ± 1.3	2.1 ± 0.4	0.14 ± 0.15	10.2 ± 5.8	9.8 ± 5.5	7.2 ± 0.3
100	0.01 ± 0.01	1.3 ± 0.7	1.7 ± 0.4	0.11 ± 0.14	7.9 ± 4.3	8.9 ± 2.1	7.1 ± 0.1
120	0.01 ± 0.01	4.9 ± 9.5	2.0 ± 0.9	0.10 ± 0.10	9.1 ± 6.8	10.6 ± 8.3	7.0 ± 0.1
Loon op Zand							
50	0.23 ± 0.32	9.6 ± 4.6	4.0 ± 2.3	1.8 ± 1.8	127 ± 172	29 ± 11	5.7 ± 0.4
75	0.13 ± 0.07	6.9 ± 2.0	4.6 ± 2.5	1.9 ± 1.9	78 ± 52	36 ± 15	5.6 ± 0.4
100	0.10 ± 0.05	6.5 ± 1.4	2.9 ± 0.6	1.0 ± 0.6	78 ± 45	36 ± 13	5.6 ± 0.3
125	0.12 ± 0.10	4.5 ± 1.7	2.7 ± 1.0	0.8 ± 0.6	71 ± 67	23 ± 6	5.5 ± 0.3
150	0.14 ± 0.10	5.5 ± 2.3	4.0 ± 1.8	0.8 ± 0.4	67 ± 46	31 ± 24	5.4 ± 0.2
Winterswijk							
20	0.39 ± 0.13	85.9 ± 66.8	8.3 ± 3.2	4.5 ± 5.1	104 ± 52	40 ± 14	6.0 ± 0.1
40	0.36 ± 0.09	73.7 ± 40.8	6.7 ± 2.4	2.2 ± 1.6	89 ± 31	43 ± 31	6.3 ± 0.6
60	0.40 ± 0.12	73.4 ± 45.6	6.5 ± 3.8	2.3 ± 1.8	106 ± 39	39 ± 32	6.6 ± 0.9
80	0.28 ± 0.12	62.1 ± 74.5	10.0 ± 9.5	2.2 ± 1.7	74 ± 47	34 ± 22	6.2 ± 0.8
100	0.34 ± 0.17	40.4 ± 53.9	10.6 ± 7.9	1.6 ± 1.0	81 ± 48	21 ± 5	6.4 ± 1.0
Zegveld							
20	0.26 ± 0.18	6.2 ± 5.1	29.9 ± 29.0	1.4 ± 1.9	85 ± 34	122 ± 116	5.1 ± 0.5
35	0.13 ± 0.10	4.7 ± 2.0	31.0 ± 37.4	0.8 ± 0.7	51 ± 25	184 ± 200	5.0 ± 0.4
50	0.05 ± 0.05	3.3 ± 1.4	12.7 ± 6.9	0.4 ± 0.3	25 ± 11	117 ± 56	5.2 ± 0.5
65	0.02 ± 0.03	2.4 ± 2.2	13.9 ± 9.4	0.3 ± 0.2	20 ± 14	123 ± 49	5.5 ± 0.3
80	0.07 ± 0.17	37.1 ± 114.9	17.6 ± 36.8	0.8 ± 1.9	25 ± 44	154 ± 136	5.7 ± 0.3



Figuur A.5 Gemiddelde concentraties van zware metalen, DOC en pH in het bodemvocht voor de verschillende locaties en verschillende dieptes van de cups.

Bijlage 5 Analyseresultaten oppervlaktewater

Tabel A.9 Analyseresultaten oppervlaktewater (gemiddelde waarden en standaarddeviaties)

locatie	behandeling	Cd (µg/l)	Cu (µg/l)	Ni (µg/l)	Pb (µg/l)	Zn (µg/l)
<i>opgeloste concentraties</i>						
Zegveld	buffer	0.05 ± 0.03	8.3 ± 6.6	4.5 ± 2.0	0.6 ± 0.3	16 ± 8
	referentie	0.07 ± 0.04	10 ± 8	4.5 ± 2.0	0.6 ± 0.3	19 ± 10
	sloot	0.11 ± 0.06	20 ± 25	5.9 ± 2.0	1.0 ± 0.7	27 ± 15
Lelystad	buffer	0.06 ± 0.04	9.8 ± 7.9	2.0 ± 1.2	0.2 ± 0.1	14 ± 11
	referentie	0.08 ± 0.06	10 ± 8	2.4 ± 1.7	0.4 ± 0.5	15 ± 10
	sloot	0.12 ± 0.06	13 ± 10	3.0 ± 1.3	0.7 ± 1.1	24 ± 9
Loon op Zand	buffer	0.13 ± 0.14	15 ± 10	2.5 ± 0.8	1.6 ± 1.6	32 ± 21
	referentie	0.12 ± 0.11	16 ± 14	2.4 ± 0.9	1.6 ± 1.1	33 ± 18
	sloot	0.25 ± 0.37	29 ± 29	4.4 ± 3.2	6.8 ± 19.6	85 ± 108
Winterswijk	buffer	0.60 ± 0.85	44 ± 37	10.8 ± 8.1	1.1 ± 0.6	114 ± 109
	referentie	0.31 ± 0.22	39 ± 29	16 ± 4	1.8 ± 1.2	102 ± 59
	sloot	0.22 ± 0.10	27 ± 18	7.3 ± 1.5	0.8 ± 0.6	38 ± 14
Beltrum	buffer	0.23 ± 0.18	38 ± 31	13 ± 6	1.0 ± 1.1	33 ± 18
	referentie	0.23 ± 0.19	28 ± 22	11 ± 4	1.4 ± 1.9	40 ± 31
	sloot	0.16 ± 0.16	22 ± 20	7.6 ± 3.4	0.4 ± 0.6	23 ± 25
<i>totaalconcentraties</i>						
Zegveld	buffer	0.09 ± 0.15	55 ± 130	5.0 ± 3.3	3.4 ± 8.2	26 ± 32
	referentie	0.11 ± 0.16	73 ± 208	5.3 ± 3.4	4.8 ± 13.0	31 ± 43
	sloot	0.22 ± 0.49	308 ± 1043	6.9 ± 4.2	17 ± 51	92 ± 187
Lelystad	buffer	0.05 ± 0.05	15 ± 15	2.4 ± 1.5	1.3 ± 1.7	19 ± 19
	referentie	0.08 ± 0.07	18 ± 15	2.9 ± 2.1	1.8 ± 2.4	21 ± 18
	sloot	0.16 ± 0.29	25 ± 23	4.6 ± 5.1	6.9 ± 17.8	41 ± 47
Loon op Zand	buffer	0.16 ± 0.21	19 ± 19	2.7 ± 1.1	2.9 ± 2.3	69 ± 124
	referentie	0.09 ± 0.09	19 ± 15	2.8 ± 1.3	3.5 ± 3.9	62 ± 77
	sloot	0.14 ± 0.09	22 ± 18	4.2 ± 2.8	3.9 ± 3.1	109 ± 175
Winterswijk	buffer	0.64 ± 0.94	33 ± 27	11.5 ± 8.8	2.3 ± 2.5	115 ± 112
	referentie	0.36 ± 0.18	30 ± 18	19 ± 5	7.3 ± 11.6	101 ± 92
	sloot	0.21 ± 0.11	19 ± 13	7.4 ± 1.5	1.2 ± 0.4	39 ± 16
Beltrum	buffer	0.20 ± 0.11	24 ± 15	13 ± 6	1.5 ± 2.0	29 ± 19
	referentie	0.18 ± 0.16	20 ± 15	11 ± 4	1.7 ± 1.3	37 ± 34
	sloot	0.13 ± 0.10	24 ± 19	8.3 ± 2.4	0.5 ± 0.5	17 ± 7

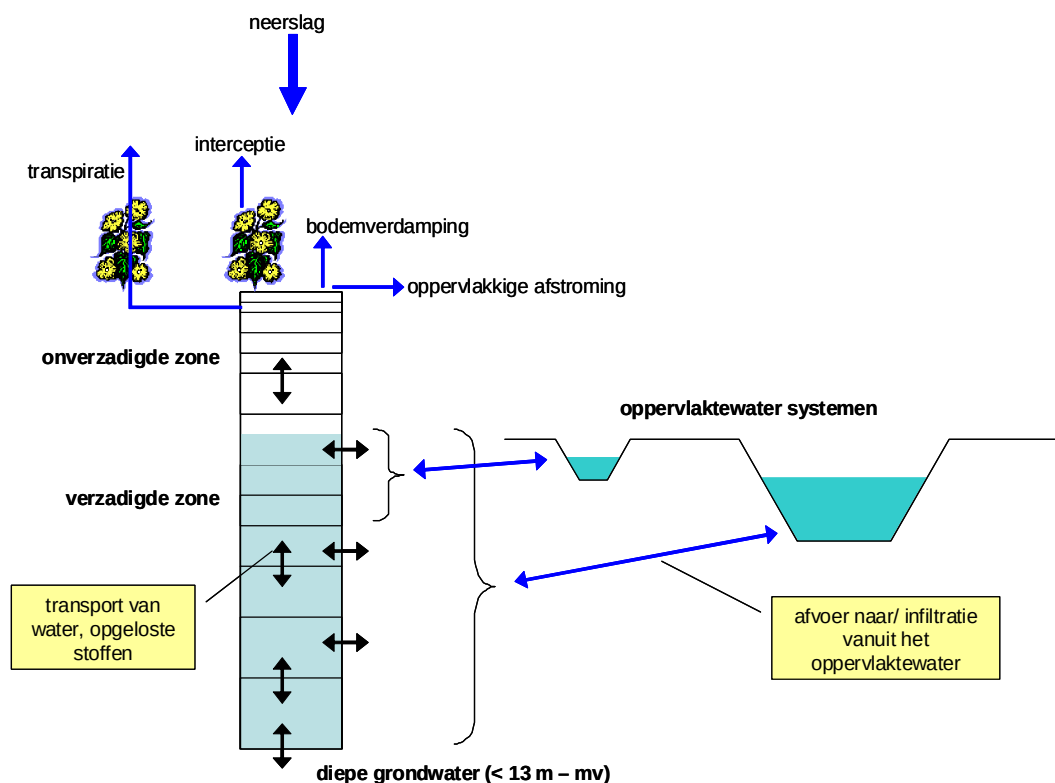
Bijlage 6 Meetopstelling oppervlakkige afspoeling





Bijlage 7 Hydrologisch model SWAP

Voor berekening van de hydrologie in STONE wordt het model SWAP gebruikt (Kroes & van Dam, 2003). Dit model beschrijft de stroming van water in zowel de onverzadigde als de verzadigde zone van bodems. De bovengrens van het modeldomein ligt net boven het gewas en de ondergrens wordt gevormd door een vlak in het bovenste grondwater, voor STONE is dit op 13 m –mv. In deze zone zijn de transportprocessen voornamelijk verticaal, dus SWAP is in principe een één-dimensionaal, verticaal gericht model. Echter, voor de stroming van het grondwater in de verzadigde zone kan gebruikt worden gemaakt van een pseudo-tweedimensionale stroming waarmee de zijwaartse stroming naar en van oppervlaktewatersystemen wordt beschreven. In Figuur A.6 zijn de waterstromen in het model SWAP schematisch weergegeven.



Figuur A.6 Schematische weergave van waterstromen in SWAP

Aan de bovenrand van het modelsysteem zijn regionale meteorologische gegevens opgelegd (neerslag, potentiële verdamping, temperatuur). De zijrand van elke rekeneenheid wordt gebruikt voor interactie met het oppervlaktewatersysteem. De uitspoeling is verdeeld over 5 drainagetermen, welke elk het watertransport van/naar een ander oppervlaktewatersysteem vertegenwoordigen. De definitie van de 5 oppervlaktewatersystemen is gegeven in Tabel A10. Als onderrandvoorwaarde zijn fluxen vanuit het nationaal grondwatermodel (NAGROM) gebruikt.

Tabel A.10 Definitie van 5 oppervlaktewatersystemen

systeem	omschrijving	toelichting
1	watervoerend > 3m	dit zijn de primaire waterlopen die het hele jaar watervoerend zijn. Ze hebben een minimale breedte van 3 meter op de waterspiegel
2	watervoerend < 3 m	dit zijn de secundaire waterlopen die het hele jaar watervoerend zijn. Ze hebben een maximale breedte van 3 meter op de waterspiegel
3	droogvallende waterlopen	dit zijn waterlopen die een deel van het jaar droogvallen. Ze kunnen soms heel breed zijn
4	buisdrainage of maaiveld drainage	een van beide is altijd aanwezig
5	maaiveld drainage of ontbreekt	systeem 5 ontbreekt als er buisdrainage aanwezig is, dan is systeem 4 maaiveld drainage

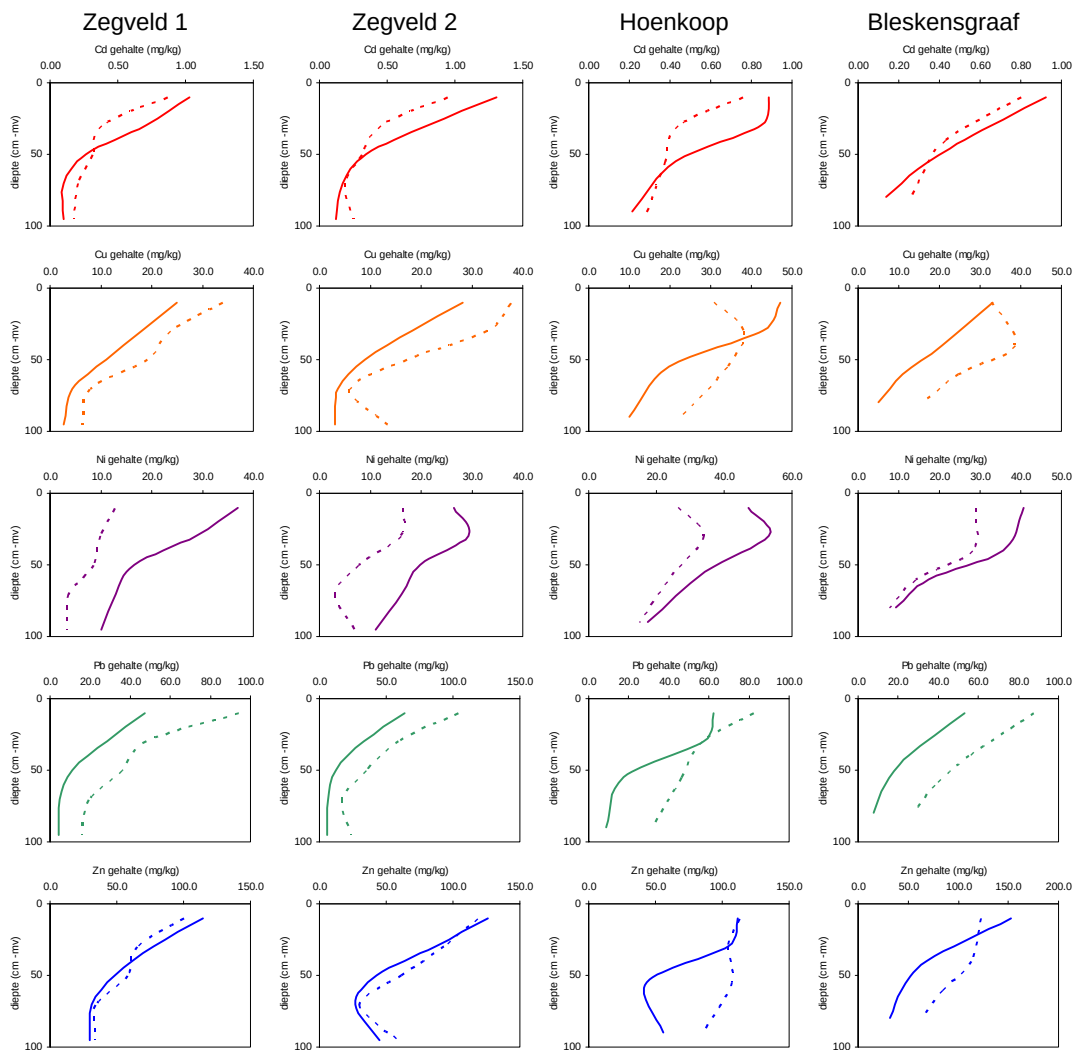
Voor de ruimtelijke schaal van de toepassingen geldt dat SWAP in principe een perceelsmodel is. Voor STONE is een perceel gedefinieerd als een unieke combinatie van microklimaat, soort vegetatie, bodemtype, drainage, waarbij heel Nederland is onderverdeeld in 6450 van deze unieke eenheden.

Het landgebruik is gebaseerd op LGN4. De LGN-landgebruiksvormen zijn geclusterd tot de volgende landgebruiksvormen:

- 5 soorten natuur: i) grasland, ii) heide, iii) loofbos, iv) licht naaldbos (dennen), v) donker naaldbos (Douglas);
- 3 soorten landbouw: i) cultuurgrasland, ii) snijmais, iii) overig bouwland;

Voor de verticale schematisering van de bodemprofielen van elk van deze 6450 eenheden wordt onderscheid gemaakt tussen de bovengrond (0-1 m –mv) en de ondergrond (1-13 m –mv). Voor de bovengrond worden 456 bodemprofielen onderscheiden, waarbij elk bodemprofiel is opgebouwd uit 9 horizonten in dikte variërend van 5 tot 25 cm. Voor de ondergrond worden 30 typen onderscheiden met 3 horizonten in dikte variërend van 1 tot 9 m. Aan elke bodemhorizont zijn bodemfysische parameters ($K(h)$ en $\theta(h)$) en bodemchemische parameters (organische stof, klei, pH, Fe- en Al-hydroxiden) toegekend conform Kroon (2001).

Bijlage 8 Schematisatie zware metaalgehalten in veengronden



Figuur A.7 Gemeten en berekende gehalten van zware metalen als functie van de diepte op vier verschillende locaties in veengebieden (— gemeten, ---- berekend)

Bijlage 9 Analyseresultaten waterbodem

Tabel A.11 Analyseresultaten van gehalten van zware metalen, ijzer, zwavel en organische stof in de slootbodem en slootwand.

wand/ bodem	profiel nr.	diepte (cm)	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	S	Fe-tot (g/kg)	Fe-ox	Al-ox	org. stof (%)
Beltrum												
wand	1	0-3	0.18	2.5	3.4	9.3	16.1	0.39	2.9	1.38	2.8	6.9
wand	1	15-18	0.13	1.8	2.3	9.5	9.5	0.38	2.2	0.88	3.1	5.1
wand	1	24-26	0.10	1.8	2.0	8.3	6.3	0.23	2.8	1.15	2.6	5.3
wand	2	0-4	0.14	8.9	2.7	8.2	26.1	0.21	2.0	0.55	2.7	4.5
wand	2	10-13	0.24	2.5	21.3	8.0	31.7	0.35	1.9	0.53	2.3	4.1
bodem	1	0-4	0.19	2.4	5.4	6.8	18.9	1.86	7.0	5.1	5.1	15.4
bodem	1	8-11	0.12	1.5	2.3	5.6	10.4	0.99	2.4	0.52	3.6	10.9
bodem	2	4-8	0.11	1.1	1.5	4.4	6.5	0.46	3.4	1.95	2.0	7.4
bodem	2	13-17	1.2	10.3	93.2	14.3	112.0	0.31	1.9	0.80	2.2	5.4
bodem	2	22-24	1.2	7.9	84.3	11.1	98.8	0.16	1.5	0.77	2.3	4.1
Winterswijk												
wand	1	0-4	0.05	28.7	19.9	15.3	49.8	0.26	45.2	3.3	2.09	5.5
wand	2	0-4	0.05	27.3	20.0	16.4	39.3	0.26	43.5	3.2	1.99	5.4
bodem	1	0-4	0.36	9.2	16.1	23.9	48.6	0.56	8.9	2.0	0.96	5.2
bodem	2	0-4	0.98	5.5	6.2	9.9	73.4	0.50	5.6	1.18	1.01	2.5
Lelystad												
wand	1	0-3	0.18	5.9	12.2	12.7	39.4	0.75	11.8	3.1	0.22	7.6
wand	1	3-6	0.17	9.3	11.6	12.1	36.3	0.68	11.6	3.2	0.22	7.0
wand	1	17-20	0.03	2.2	8.7	5.2	14.7	0.22	7.4	0.78	0.09	1.7
wand	2	0-3	0.20	5.6	11.2	12.8	36.7	0.89	8.6	1.12	0.23	6.6
wand	2	10-12	0.05	3.1	10.0	4.9	17.0	0.37	9.9	2.33	0.12	2.6
bodem	1	0-1	0.21	20.7	12.7	13.5	45.7	1.14	11.8	2.9	0.20	5.0
bodem	1	1-3	0.07	4.4	11.1	8.1	24.2	0.33	11.4	3.1	0.15	2.6
bodem	1	6-8	0.04	2.5	9.3	5.1	16.8	0.28	10.5	3.2	0.12	2.2
bodem	2	0-1	0.25	8.0	13.9	15.4	48.4	2.75	13.2	4.5	0.23	6.6
bodem	2	2-3	0.17	6.9	12.1	17.2	40.3	1.13	10.1	1.79	0.20	4.4
bodem	2	6-8	0.03	1.4	7.2	4.2	14.0	0.14	7.5	1.55	0.10	1.2
Zegveld												
wand	1	0-5	0.43	22.2	24.6	27.6	66.7	13.6	16.6	10.7	4.0	66.7
wand	1	8-12	0.39	18.5	24.8	27.5	53.1	29.3	13.9	1.99	2.3	78.4
wand	2	0-7	0.30	15.8	21.3	18.7	41.2	28.3	12.4	n.d.	n.d.	80.7
wand	2	15-20	0.54	30.3	27.4	36.8	94.0	30.9	13.7	0.39	1.96	77.5
bodem	1	0-3	0.46	20.1	25.6	30.4	67.0	28.0	15.5	n.d.	n.d.	64.1
bodem	1	7-10	0.42	20.0	24.8	28.9	62.0	28.6	14.3	1.11	3.4	65.2
bodem	1	20-25	0.44	21.2	25.5	35.1	55.3	30.2	12.1	1.17	2.8	71.9
bodem	2	0-4	0.12	9.8	16.9	9.0	15.5	29.1	17.3	n.d.	n.d.	n.d.
bodem	2	10-12	0.13	9.3	13.9	13.1	30.1	28.2	16.4	1.29	3.4	64.2
bodem	2	20-25	0.08	8.8	16.0	5.5	12.6	31.8	15.8	1.29	3.3	65.3

n.d. = niet bepaald

Tabel A.12 Analyseresultaten van concentraties van zware metalen en DOC in het bodemvocht van de waterbodem.

locatie	wand/bodem	nr.	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	DOC
Beltrum	wand	1	0.28	9.75	7.57	5.61	36.5	38.3
Beltrum	wand	2	0.24	12.8	17.1	0.99	30.0	35.3
Beltrum	bodem	1	2.48	56.2	70.7	41.6	199	39.8
Beltrum	bodem	2	3.54	11.5	454	21.2	492	11.0
Lelystad	wand	-	1.01	5.57	22.4	37.8	49.3	37.8
Lelystad	bodem	-	0.40	3.29	2.14	19.6	23.5	27.3