

Uitspoeling van zware metalen uit bodems in het landelijk gebied

Modelberekeningen voor de emissieregistratie 2009

L.T.C. Bonten
J.E. Groenberg

Alterra-rapport 1882, ISSN 1566-7197



Uitspoeling van zware metalen uit bodems in het landelijk gebied

In opdracht van RWS Waterdienst

Uitspoeling van zware metalen uit bodems in het landelijk gebied

Modelberekeningen voor de emissieregistratie 2009

L.T.C. Bonten
J.E. Groenenberg

Alterra-rapport 1882

Alterra, Wageningen, 2009

REFERAAT

Bonten, L.T.C., J.E. Groenenberg, 2009. *Uitspoeling van zware metalen uit bodems in het landelijk gebied; Modelberekeningen voor de emissieregistratie 2009*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1882. 33 blz.; 2 fig.; 11 tab.; 15 ref.

De uitspoeling van zware metalen uit bodems in het landelijk gebied is geschat middels modelberekeningen ten behoeve van de jaarlijkse Emissieregistratie. Voorheen zijn stationaire berekeningen uitgevoerd, deze keer zijn dynamische berekeningen uitgevoerd om veranderingen in de tijd te bepalen. Uit de berekeningen volgt dat de variatie in uitspoeling vooral wordt bepaald door de variatie in hydrologie. De trendmatige veranderingen in de uitspoeling zijn zeer gering. De resultaten van de dynamische berekeningen komen grotendeels overeen met de resultaten van de stationaire berekeningen uit eerdere jaren.

Trefwoorden: Emissieregistratie, zware metalen, uitspoeling, oppervlaktewater, bodem

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 veelevoudigd 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
1.1 Achtergrond	9
1.2 Doelstelling	9
1.3 Leeswijzer	9
2 Beschrijving modelaanpak	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Algemene modelbeschrijving	11
2.3 Berekening aanvoer van metalen	14
2.3.1 Kunstmest en dierlijke mest	14
2.3.2 Overige bronnen	14
2.4 Berekening afvoer door gewasopname	14
2.5 Berekeningen van uitspoeling in de periode 1990-2000	15
3 Resultaten modelberekeningen	17
3.1 Modelresultaten	17
3.1.1 Landelijke schaal	17
3.1.2 Regionale schaal	18
3.2 Vergelijking met voorgaande berekeningen	20
4 Gehaltes van zware metalen in mest	23
4.1 Kunstmeststoffen	23
4.2 Dierlijke mest	23
5 Conclusies	25
Literatuur	27
Bijlage 1 Gehaltes van zware metalen in dierlijke mest	29
Bijlage 2 Coëfficiënten voor berekening gewasopname	31
Bijlage 3 Mediane metaalgehalten van gewassen	33

Samenvatting

Voor de jaarlijkse Emissieregistratie Schattingen wordt de belasting van het oppervlaktewater door uit- en afspoeling van metalen geschat door middel van modelberekeningen. Tot dusver is gebruikt gemaakt van stationaire berekeningen van de metaaluitspoeling naar het oppervlaktewater, op basis van de huidige gehalten van zware metalen in de bodem. Om veranderingen in de metaalvoorraad in de tijd zichtbaar te maken is een dynamisch model ontwikkeld. De gebruikte methode voor de berekening van de uitspoeling van metalen komt hierbij dan ook meer overeen met de methode voor de berekening van de uitspoeling van N en P.

Uit deze dynamische berekeningen volgt dat verschillen in de uitspoeling van zware metalen tussen de jaren vooral veroorzaakt wordt door verschillen in de hydrologie. Voor natte jaren wordt een hoge uitspoeling berekend en voor droge jaren een lage uitspoeling. De trendmatige veranderingen in de uitspoeling zijn zeer gering voor de periode 2000-2007.

Uitgangspunt voor de dynamische berekeningen zijn schattingen van de gehalten van metalen in de vaste voor het jaar 2000. Voor de jaren 1990 en 1995 wordt voor de berekening van de uitspoeling daarom een andere methode toegepast. De onzekerheid in de resultaten van de berekeningen voor 1990 en 1995 is groter dan voor de andere jaren. De resultaten van deze jaren zijn niet geschikt voor een analyse van de trendmatige ontwikkelingen.

De resultaten van de dynamische berekeningen komen grotendeels overeen met de resultaten van de stationaire berekeningen. De nu berekende uitspoeling verschilt van de berekeningen voor de Emissieregistratie in 2008 doordat de concentraties in het grondwater beneden GLG bij de huidige berekeningen gebaseerd zijn op metingen van concentraties, terwijl voor 2008 de concentraties gebaseerd waren op evenwichtconcentraties met de gehalten in de vaste fase van de bodem.

Een andere bron van emissies van zware metalen is dusver niet meegenomen in de Emissieregistratie, namelijk de belasting door het meemesten van sloten. Voor nutriënten wordt deze bron wel gekwantificeerd. Om deze emissies voor zware metalen te kunnen berekenen zijn de gehalten van zware metalen in dierlijke mest en kunstmest geschat ten opzichte van gehalten N en P.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Sinds 2003 worden door Alterra de emissies van zware metalen naar het oppervlaktewater door uit- en afspoeling geschat ten behoeve van de jaarlijkse Emissieregistratie. Hiervoor is een modelaankpak ontwikkeld om de uitspoeling van zware metalen uit bodems (tot 13 meter diep) te kwantificeren. Tot dusver is gebruikt gemaakt van stationaire berekeningen van de metaaluitspoeling naar het oppervlaktewater, op basis van de huidige gehalten van zware metalen in de bodem (Bonten&Groenenberg, 2008). Om veranderingen in deze metaalvoorraad zichtbaar te maken is besloten om de methodiek voor zware metalen tijdsafhankelijk te maken. Op die manier kunnen trends in de tijd worden gepresenteerd. De gebruikte methode voor de berekening van de uitspoeling van metalen komt hierbij dan ook meer overeen met de methode voor de berekening van de uitspoeling van N en P.

Een andere bron van emissies van zware metalen is dusver niet meegenomen in de Emissieregistratie, namelijk de belasting door het meemesten van sloten. Voor nutriënten wordt deze bron wel gekwantificeerd. Om deze emissies voor zware metalen te kunnen berekenen moet er een schatting worden gemaakt van de gehalten van zware metalen in dierlijke mest en kunstmest.

1.2 Doelstelling

De doelstelling van dit project is tweeledig:

- ten eerste het ontwikkelen van een het model en het uitvoeren van dynamische berekeningen van de uitspoeling van zware metalen uit de bodem;
- en verder het maken van schattingen van de gehalten van zware metalen (ten opzichte van N en P) in dierlijke mest en kunstmest, ten behoeve van de berekening van de oppervlaktewaterbelasting met zware metalen door meemesten van sloten.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van het model voor de dynamische berekeningen van de uitspoeling van zware metalen naar het oppervlaktewater. In hoofdstuk 3 worden de belangrijkste resultaten van de modelberekeningen besproken. Hoofdstuk 4 beschrijft de methodiek en resultaten om de metaalgehalten in mest te schatten ten behoeve van de emissieberekeningen voor het meemesten van sloten. Tenslotte geeft hoofdstuk 5 de belangrijkste conclusies van dit rapport.

2 Beschrijving modelaanpak

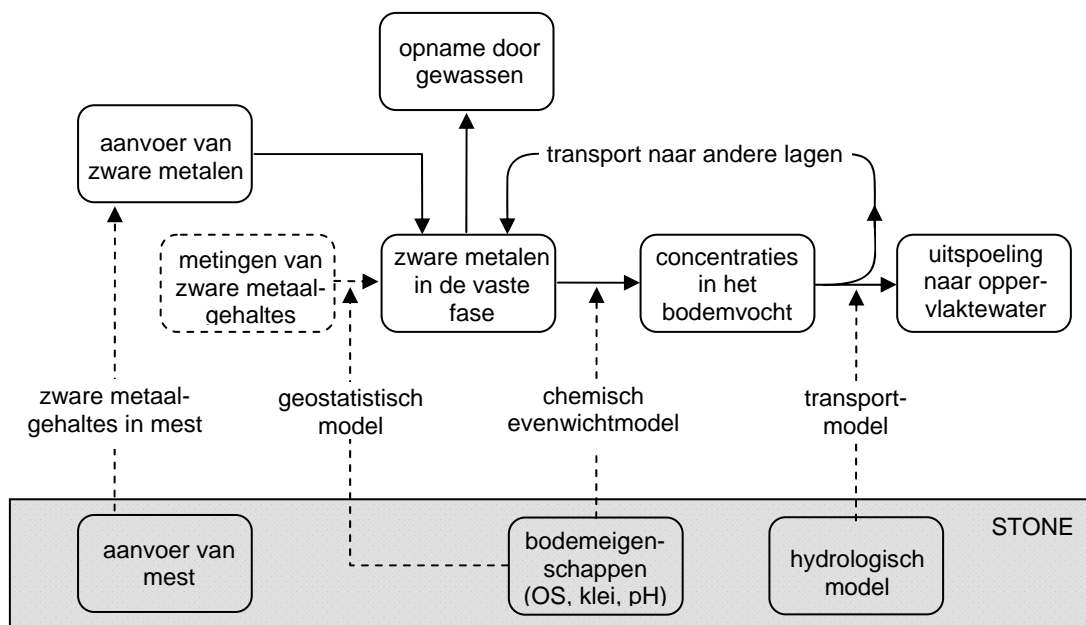
2.1 Inleiding

Het model dat nu gebruikt is voor de berekening van de uitspoeling is grotendeels gelijk aan de eerdere versies van het model voor de emissieregistratie. Dit model is in detail beschreven in een aantal Alterra-rapporten (Bonten & Groenberg, 2008; Bonten et al., 2008; Bonten & Brus, 2006). In dit hoofdstuk beperken we ons daarom tot een algemene beschrijving van het model en gaan we kort in op de verschillen ten opzichte van eerdere versies.

De belangrijkste verschillen van dit model met het model zoals gebruikt is voor de Emissieregistratie in 2008 (Bonten & Groenberg, 2008) zijn aanpassingen om met het model dynamisch tijdreeksen door te kunnen rekenen. Hiervoor zijn aanpassingen gedaan voor het berekenen van de aanvoer en afvoer van zware metalen en het transport van metalen in het bodemprofiel. Aanvoer vindt voornamelijk plaats door mest en depositie (paragraaf 2.3) en afvoer als gevolg van opname door gewassen (paragraaf 2.4). Voorgaande versies berekenden alleen de resultaten van de momentane uitspoeling in een gegeven jaar en niet de veranderingen daarin. Een vergelijkbaar model is gebruikt voor de schatting van de ontwikkeling van de uitspoeling in de komende honderd jaar en effecten van maatregelen hierop (Bonten et al., 2009).

2.2 Algemene modelbeschrijving

In Figuur 1 staat een vereenvoudigd schema van het model voor de berekening van de uitspoeling en veranderingen daarin.



Figuur 1. Schematische weergave van het model voor de dynamische berekeningen van de uitspoeling van zware metalen uit de bodem naar oppervlaktewater.

De basis van het model is een grondkolom van 13 m die is opgedeeld in meerdere lagen variërend in dikte van 5 cm in de toplaag tot enkele meters voor de onderste lagen. Voor elk laagje wordt de stoffenbalans bijgehouden van aanvoer en afvoer van metalen door transport uit aanliggende lagen en door processen als gewasopname en mestaanwending.

Het startpunt van de berekeningen zijn de gehalten zware metalen in de bodem op verschillende dieptes in het jaar 2000. Hiervoor is per locatie uitgegaan van de meest recente metingen van zware metaalgehaltenes in de bodem uit de periode 1990-2005. Deze gehaltenes zijn met behulp van een geostatistisch model vertaald naar landsdekkende kaarten van de gehaltenes van zware metalen in de bodem. Veranderingen in het gehalte in de bodem vinden plaats door zowel aanvoer als afvoer van metalen. De aanvoer van zware metalen komt voornamelijk door aanwending van (kunst- en dierlijke) mest, en daarnaast door het gebruik van andere organische bodemverbeteraars en atmosferische depositie. De aanvoer van metalen is beschreven in paragraaf 2.3. De aanvoer van metalen wordt in het model gelijkmatig verdeeld over de bouwvoor (15 cm voor grasland en natuur en 20 cm voor bouwland), op deze manier wordt transport en menging door processen als ploegen, mestinjectie en bioturbatie in het model verdisconteerd. Afvoer van metalen uit de bodem vindt voornamelijk plaats via gewasopname en uitspoeling. Dit betreft zowel de opname door landbouwgewassen als door de natuurlijke vegetatie (zie paragraaf 2.4). Andere processen die kunnen bijdragen aan de afvoer van metalen zoals wind- en watererosie zijn in de berekeningen niet meegenomen.

Voor de berekening van het transport van metalen naar andere lagen en naar het oppervlaktewater is gebruik gemaakt van de transportmodule uit het model STONE.

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van de hydrologie zoals deze is berekend voor STONE (Kroes et al., 2009). In tegenstelling tot eerdere berekeningen voor de emissieregistratie is nu gerekend met de werkelijke hydrologie van de verschillende jaren in plaats van met een langjarig-gemiddelde hydrologie voor de periode 1971-2000. Om trends in de ontwikkeling van de uitspoeling te kunnen bekijken, waarbij verschillen in hydrologie tussen verschillen dus niet worden meegenomen, zijn naast de berekeningen met de werkelijke hydrologie ook berekeningen uitgevoerd met een referentie-weerjaar. Hiervoor is het jaar 1985 gekozen wat qua meteorologie een redelijk gemiddeld weerjaar is. Deze gestandaardiseerde uitspoeling voor een bepaald jaar is uitgerekend door de reeks van jaren vanaf 2000 (of vanaf 1990 voor de berekeningen voor de jaren 1990 en 1995) met de werkelijke weerjaren door te rekenen tot het betreffende jaar waarna vervolgens met de hydrologie van 1985 de uitspoeling voor dat jaar berekend is. Voor het transport zijn tijdstapgroottes van 10 dagen gebruikt.

Uit de balans tussen aan- en afvoer volgt een verandering in het gehalte in de bodem. Deze kan zowel positief zijn (stijging van het gehalte ten opzichte van het jaar ervoor) of negatief (daling). De daaruit volgende verandering in het totaalgehalte in de bodem dient uiteindelijk als basis voor de berekening van de concentraties aan zware metalen in het bodemvocht en grondwater. Dit gebeurt met chemische evenwichtrelaties op basis van de (nieuwe) gehalten van zware metalen in de bodem en de bodemeigenschappen. Het combineren van deze berekende concentraties in het bodemvocht en grondwater met de grondwaterstromen levert uiteindelijk de uitspoeling van metalen naar het oppervlaktewater op.

Voor de ruimtelijke schematisatie, schematisatie van de bodemprofielen en de hydrologie maken we gebruik van het model STONE (Kroon et al., 2001). Het model STONE is door Alterra in samenwerking met RIVM en RIZA ontwikkeld om de emissies van N en P naar het oppervlaktewater te berekenen. In dit model wordt het landelijk gebied in Nederland onderverdeeld in 6405 ruimtelijk eenheden. Dit zijn unieke combinaties van bodemtype, landgebruik en meteorologie. Voor elk van deze combinaties zijn bodemprofielen geschematiseerd tot een diepte van 13 m –mv op basis van het Bodemkundig Informatiesysteem. Elk van de onderscheiden lagen in de bodemprofielen zijn voorzien van fysische en chemische bodemeigenschappen. Voor elk van de 6405 eenheden is de hydrologie (grondwaterstromen) berekend op basis van de fysische bodemeigenschappen en meteorologische gegevens van de betreffende eenheid.

Voor de berekening van uitspoeling op dieptes beneden de gemiddeld laagste grondwaterstand (=GLG) maken we gebruik van metingen van de concentraties in het grondwater. Dit is nauwkeuriger dan het berekenen van deze concentraties op basis van gehalten in de vaste fase, omdat regionale verschillen in concentraties als gevolg van verschillen in geologische oorsprong zo beter worden meegenomen. Na langere tijd zullen deze concentraties door transport uit de bovenliggende bodem mogelijk veranderen. Gezien de relatief korte periode waarvoor de huidige berekeningen uitgevoerd zijn is toch gekozen voor de gemeten concentraties omdat hiermee een nauwkeurigere berekening van de uitspoeling gemaakt kan worden. Bij

berekeningen voor lange tijdsperioden (enkele decennia) moet echter wel rekening mee worden gehouden met een verandering van de concentraties in het grondwater beneden GLG. In tegenstelling tot wat in de rapportage van de berekeningen voor de Emissieregistratie in 2008 (Bonten & Groenenberg, 2008) vermeld is, zijn deze concentraties in het grondwater niet meegenomen in de berekeningen, maar is gebruik gemaakt van de evenwichtsconcentraties op basis van de gehalten in de vaste fase. Voor cadmium en lood heeft dit tot gevolg dat in 2008 lagere emissies zijn berekend omdat de berekende evenwichtsconcentraties gemiddeld lager zijn dan de gemeten concentraties in het grondwater.

2.3 Berekening aanvoer van metalen

2.3.1 Kunstmest en dierlijke mest

De aanvoer van metalen via kunstmest en dierlijke mest is berekend door het gehalte van zware metalen in verschillende soorten mest te vermenigvuldigen met de aanvoer van de diverse soorten mest per STONE-plot. Voor de aanvoer van mest zijn de resultaten van het model Mambo gebruikt. Deze aanvoer is dezelfde als die wordt gebruikt voor de berekening van de uitspoeling van N en P met STONE.

Door veranderingen in beleid en in voerpraktijken veranderen de gehalten in van metalen in dierlijke mest in de tijd. Voor de periode 1990 t/m 1999 zijn daarom de gehalten zoals gepubliceerd in Driessen & Roos (1996) gebruikt. Voor de jaren 2000 en verder zijn de gehalten uit Römken & Rietra (2009) gebruikt. Een overzicht van de gehalten per mestsoort is weergegeven in Bijlage 1. Voor de aanvoer van metalen via kunstmest zijn de gehalten uit De Vries et al. (in prep.) gebruikt (zie ook paragraaf 4.1).

2.3.2 Overige bronnen

Voor de aanvoer van zware metalen via depositie zijn de schattingen uit Bleeker (2004) gebruikt voor Cd, Cu, Pb en Zn. Voor Ni zijn landelijk gemiddelde waardes gebruikt (Westhoek et al., 1996). De aanvoer van metalen via andere bronnen als organische bodemverbeteraars en bestrijdingsmiddelen wordt verwaarloosd, omdat op landelijke schaal de bijdrage van deze bronnen klein en geografisch zeer heterogeen is (Delahaye et al., 2003)

2.4 Berekening afvoer door gewasopname

De netto afvoer van metalen met oogst van het gewas is berekend door de opbrengst te vermenigvuldigen met het gehalte in de oogstbare delen van het gewas:

$$Me_{opn} = Y \cdot \frac{Me_{plant}}{1000} \quad (1)$$

waarbij Me_{opn} is netto metaalafvoer met gewas ($\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{jr}$); Y is oogstopbrengst ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{jr}^{-1}$); Me_{plant} is metaalgehalte in gewas ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

De gehalten metalen in gewassen zijn, indien voor gewas en metaal voorhanden, berekend met een bodem-plant relatie (Römkens et al., 2008) volgens:

$$\log(Me_{gewas}) = a + b \log OM + c \log klei + d \cdot pH + e \log Me_{bodem} \quad (2)$$

waarbij Me_{gewas} is metaalgehalte van het gewas ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); OM is organische stof gehalte in de bodem (%); $klei$ is kleigehalte van de bodem (%); pH is pH-KCl van bodem (-); Me_{bodem} is totale metaalgehalte van de bodem ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Voor Cd en Zn konden in het algemeen goede relaties afgeleid worden. Voor Cu en zijn de relaties in het algemeen slechter. De coëfficiënten voor vergelijking 2 staan in Bijlage 2.

Wanneer er geen goede relatie voor het metaalgehalte in de plant bestaat, gebruiken we het mediane gewasgehalte. Deze staan vermeld in Bijlage 3.

2.5 Berekeningen van uitspoeling in de periode 1990-2000

Voor het berekenen van de metaaluitspoeling in de periode 1990-2000 is met iteratieve modelberekeningen het gehalte metalen in de bodem in het jaar 1990 geschat. Als eerste schatting voor de gehalten in 1990 zijn de gehalten voor jaar 2000 gebruikt. Vervolgens zijn op basis van de aanvoer metalen in de periode 1990-2000 en de hydrologie voor de jaren uit de periode 1990-2000 de veranderingen in deze gehalten berekend voor de periode 1990-2000. Deze veranderingen (negatief bij afname, positief bij toename) in metaalgehalten in de bodem zijn vervolgens verdisconteerd met het oorspronkelijke gehalten in de bodem. Vervolgens is met de aangepaste metaalgehalten deze periode opnieuw doorgerekend. Omdat een aantal processen zoals uitspoeling en gewasopname van het metaalgehalte afhangen zullen de nu berekende veranderingen in metaalgehalten niet precies overeenkomen met de eerder berekende verandering. Zo zal bij een toename in het gehalte de eerst berekende toename te klein zijn omdat de berekende uitspoeling en gewasopname te hoog berekend zijn. Daarom is de berekening een aantal malen herhaald tot de berekende veranderingen niet meer dan 5% van elkaar afwijken. Dit bleek na 3 herhalingen zo te zijn. Voor een aantal plots bleek het niet goed mogelijk om voor alle lagen het metaalgehalte in 1990 te schatten omdat voor die lagen bijvoorbeeld een toename berekend werd die groter was dan de oorspronkelijke hoeveelheid in 2000, hetgeen zou leiden tot negatieve metaalgehalten bij de start van de berekeningen in 1990. Voor die lagen is met een nihil metaalgehalte in 1990 gerekend.

Bovenstaande laat zien dat er soms onrealistische gehalten voor het jaar 1990 geschat worden om te compenseren voor mogelijk kleine discrepanties tussen de

geschematiseerde gehalten in de bodem voor het jaar 2000 en de aanvoer van metalen voor de periode 1990-2000. Dit betekent dat de onzekerheden in de berekende emissies voor de jaren 1990 en 1995 groter zijn dan voor de andere jaren. Voor een analyse van de trendmatige ontwikkelingen in de emissies zijn de berekeningen emissies voor 1990 en 1995 dus niet geschikt.

3 Resultaten modelberekeningen

3.1 Modelresultaten

3.1.1 Landelijke schaal

In onderstaande tabel zijn de berekende landelijke emissies van zware metalen weergegeven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in de emissies voor het werkelijk weerjaar en de emissies voor een gemiddeld weerjaar.

Tabel 1. Uitspoeling van zware metalen voor verschillende jaren (in ton/jr). Onderscheid voor uitspoeling berekend op basis van het werkelijke weerjaar en op basis van een gemiddeld weerjaar (=trendmatige ontwikkeling)

	1990	1995	2000	2005	2006	2007
	werkelijk weerjaar					
Cd	0.16	0.25	0.25	0.16	0.16	0.26
Cu	11	15	17	12	12	20
Ni	17	20	25	17	18	25
Pb	2.3	2.8	3.3	2.3	2.4	3.5
Zn	93	130	140	93	95	152
	gemiddeld weerjaar					
Cd	0.17	0.20	0.19	0.18	0.18	0.18
Cu	12	13	13	13	13	13
Ni	18	20	19	19	19	19
Pb	2.4	2.6	2.6	2.5	2.5	2.5
Zn	97	113	107	106	105	104

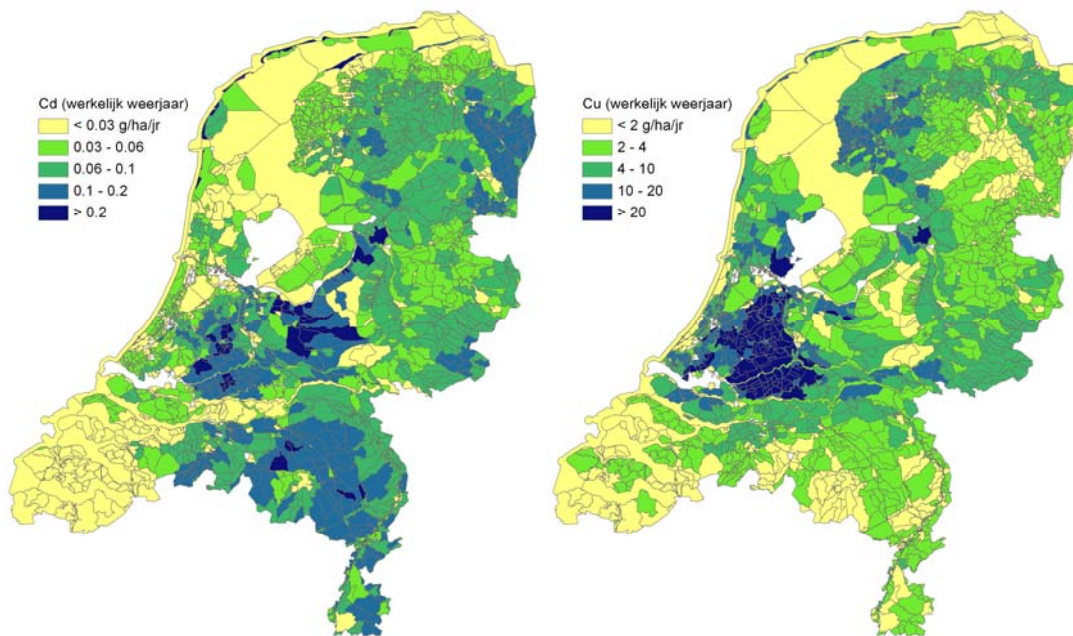
De verschillen tussen de jaren voor daadwerkelijke weerjaren worden voornamelijk veroorzaakt door verschillen in de hydrologie tussen de jaren. Zo worden voor een nat jaar hogere emissies berekend dan voor een droog jaar. De emissies voor werkelijke weerjaren laten trendmatige veranderingen zien in de emissies. Voor de emissies voor de jaren 1990 en 1995 geldt dat de onzekerheden veel groter zijn dan voor andere jaren, als gevolg van de gebruikte berekeningsmethode (zie hoofdstuk 2). Hierdoor kunnen de emissies voor 1990 en 1995 niet voor een trendanalyse worden gebruikt.

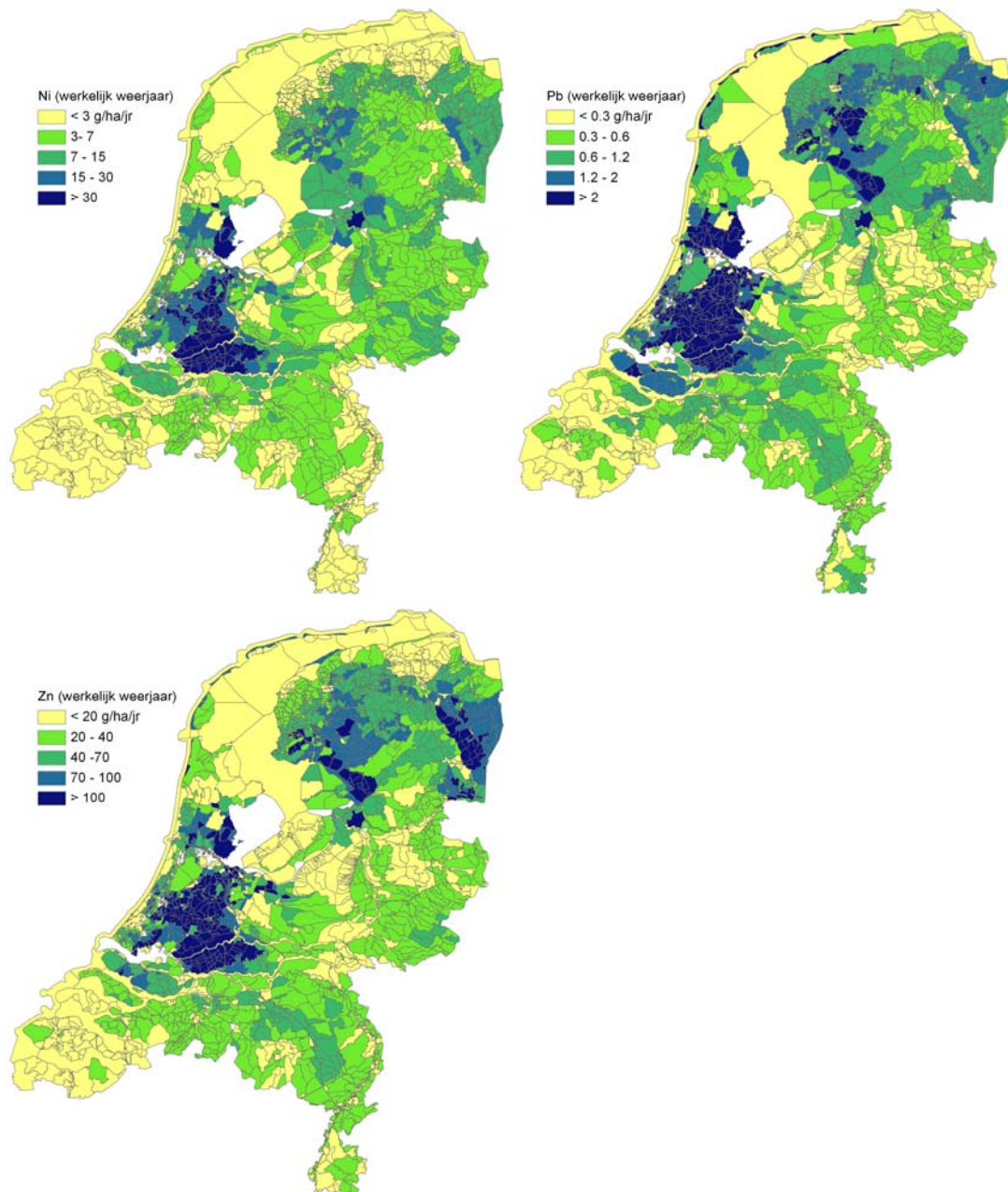
Over de periode 2000-2007 blijven de emissies (voor een gemiddeld weerjaar) nagenoeg onveranderd. Voor Cd en Zn worden een lichte daling van de emissies berekend. Deze daling komt overeen met eerdere studies naar de veranderingen van de uitspoeling in de toekomst (Bonten et al., 2009), waarin ook een kleine (tijdelijke) daling van de uitspoeling werd berekend. Deze kleine afname wordt veroorzaakt door een netto uitloging van zware metalen in de ondergrond, die nog onvoldoende gecompenseerd wordt door een aanvoer van metalen vanuit de bovengrond. Het is niet vast te stellen of dit een manco is in de schematisatie van zware metaalgehalten in

de bodem of dat er een daadwerkelijk uitloging optreedt van historische verontreinigingen. Echter, de afname is slechts tijdelijk aangezien de nettobelasting van de bodem veel groter is dan de berekende uitspoeling. Op termijn zullen de zware metalen in de bovengrond worden getransporteerd naar de ondergrond en dan bijdragen aan de uitspoeling.

3.1.2 Regionale schaal

Voor de berekeningen van de emissies wordt de ruimtelijke schematisatie van het model STONE gebruikt. De emissies per ruimtelijke eenheid (STONE-plot) worden vervolgens herschaald naar emissies per afwateringseenheid. Ter illustratie staan in onderstaande figuren de uitspoelingsemissies per afwateringseenheid voor het jaar 2007 (werkelijk weerjaar).





Figuur 2. Uitspoeling van zware metalen voor het jaar 2007 (werkelijk weerjaar) per afwateringseenheid

In algemeen geldt dat de hoogste emissies worden berekend voor gebieden met een hoge grondwaterstand. Dit is logisch omdat metaalgehalten in de meeste bodems sterk afnemen met de diepte, waardoor bij hoge grondwaterstanden uitspoeling uit bodemlagen met de hoogste gehalten optreedt.

Opvallend zijn verder de relatief hoge emissies voor Cd, Cu en Pb die zijn toegekend aan enkele afwateringseenheden in de Waddenzee. Deze emissies worden veroorzaakt doordat een hoge uitspoeling wordt berekend voor de hele natte

natuurgebieden op de Waddeneilanden. Deze natuurgebieden behoren tot die afwateringseenheden die ook de betreffende delen van de Waddenzee omvatten.

3.2 Vergelijking met voorgaande berekeningen

De berekeningen van uitspoeling van zware metalen voor de Emissieregistratie zijn tot dusver uitgevoerd met een stationair model op basis van vaste onveranderlijke gehalten in de bodem. Deze gehalten in de bodem zijn als startpunt genomen voor de dynamische berekeningen. Hierbij is het jaar 2000 als startjaar gekozen. De resultaten van eerdere berekeningen voor de Emissieregistratie kunnen dus het beste worden vergeleken met de huidige berekeningen voor het jaar 2000 op basis van een gemiddeld weerjaar worden genomen. In onderstaande tabel zijn de resultaten van de voorgaande berekeningen en de resultaten van de huidige berekeningen voor jaar 2000 bij een gemiddeld weerjaar weergegeven.

Tabel 2. *Berekende emissies door uitspoeling van zware metalen naar het oppervlaktewater (ton/jr)*

jaar van berekening	cadmium	koper	nikkel	lood	zink
2003 ¹⁾	0.7	28	14	12	250
2004 ²⁾	1.63	23.7	110.4	39.1	1187
2006 ³⁾	0.23	20.5	21.3	42.9	146
2008a ⁴⁾	0.095	12.0	23.3	1.26	127
2008b ⁵⁾	0.11	11.7	22.6	1.56	126
2008c ⁶⁾	0.19	12.1	22.7	2.16	110
2009 ⁷⁾	0.19	12.7	19.3	2.56	107

¹⁾ alleen berekeningen op landelijk niveau (Römkens et al., 2003)

²⁾ eerste berekeningen op regionaal niveau (Bonten et al., 2004)

³⁾ verbeterde ruimtelijke schematisatie van zware metaalgehalten in de bodem (Bonten & Brus, 2006)

⁴⁾ officiële cijfers voor de Emissieregistratie 2008. Verbeterde hydrologie, achtergrondgehalten en partitierelaties. Fijnere ruimtelijke schematisatie. (Bonten & Groenenberg, 2008)

⁵⁾ als 2008a met ruimtelijke schematisatie volgens STONE

⁶⁾ als 2008b met achtergrondconcentraties in het diepere grondwater op basis van metingen. Niet opgenomen in Bonten en Groenenberg (2008).

⁷⁾ dynamische berekeningen voor jaar 2000 (weerjaar=1985)

Voor het jaar 2008 zijn naast de “officiële” uitspoelingscijfers (2008a) waarbij Nederland is onderverdeeld in 198.923 eenheden, ook de cijfers weergegeven voor berekeningen met de ruimtelijke schematisatie volgens het STONE model (2008b) met de 6405 STONE-eenheden. Verder zijn voor de berekeningen voor de Emissieregistratie in 2008 de verbeterde achtergrondconcentraties in het diepere grondwater niet meegenomen in de berekeningen, in tegenstelling tot wat vermeld staat in Bonten & Groenenberg (2008). Deze concentraties zijn wel meegenomen in de huidige berekeningen. Om de huidige berekeningen te kunnen vergelijken met de stationaire berekeningen, zoals uitgevoerd in 2008 en eerder zijn extra berekeningen uitgevoerd waarin de verbeterde achtergrondconcentraties wel zijn meegenomen (2008c). Hierbij zijn de STONE-eenheden onderverdeeld in 15.358 eenheden op basis van verschillen in concentraties in het diepere grondwater.

Een vergelijking tussen de berekeningen van 2009 en 2008c laat zien dat voor koper en lood een hogere uitspoeling wordt berekend en voor nikkel en zink een lagere uitspoeling. De verschillen zijn het grootst voor lood. De berekende uitspoeling van cadmium voor 2009 verschilt niet van 2008c.

De belangrijkste redenen voor deze verschillen tussen beiden berekeningen zijn de verschillen in hydrologie. Voor de berekeningen van 2008 is een langjarig gemiddelde van de hydrologie gebruikt, terwijl voor de berekeningen van 2009 de hydrologie van een gemiddeld weerjaar, in dit geval 1985, is gebruikt. De verschillen tussen beide typen hydrologie kunnen leiden tot kleine verschillen in de berekende emissies.

4 Gehaltes van zware metalen in mest

De belasting van het oppervlaktewater met zware metalen door het meemesten van sloten is tot op heden niet meegenomen in de Emissieregistratie. Voor N en P worden deze emissies berekend door het slootoppervlak grenzend aan landbouwgronden te vermenigvuldigen met de N en P belasting per slootoppervlak. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in kunstmest en dierlijke mest en in grasland en bouwland.

De emissies van zware metalen kunnen nu worden berekend op basis van de eerder berekende N en P emissies en de verhoudingen tussen de zware metalen en de nutriënten in mest. Hieronder zijn de gehalten van zware metalen ten opzichte van de gehalten van N en P voor kunstmeststoffen en dierlijke mest weergegeven.

4.1 Kunstmeststoffen

In onderstaande tabel zijn de gemiddelde gehalten van zware metalen in kunstmeststoffen weergegeven ten opzichte van het gehalte N en P.

Tabel 3. Gehalten van metalen in N en P kunstmeststoffen (mg metaal/ kg N of P)

	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
P ¹⁾	105.2	178.4	257.6	21.0	2242
N ²⁾	0.36	8.4	-	84	25

¹⁾ pers. comm EFMA (European Fertilizer Management Association)

²⁾ De Vries et al. (in prep.)

4.2 Dierlijke mest

In onderstaande tabel zijn de gehalten van zware metalen in dierlijke mest weergegeven ten opzichte van het N gehalte in mest. Hierbij is onderscheid gemaakt in mest voor grasland en mest voor bouwland.

Tabel 4. Gehalten van metalen in dierlijke mest (mg metaal/ kg N)

	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
gras	4.1	3135	86.7	95.9	4566
bouwland	4.0	3326	84.6	106.2	6029

De gehalten van metalen in dierlijke mest zijn gebaseerd op de gehalten in de verschillende mestsoorten als beschreven in Römken & Rietra (2009). Voor gras en bouwland zijn vervolgens de gemiddelde metaalgehalten per hoeveelheid N berekend door de totale metaalbelasting ten gevolge van dierlijke mest voor grasland c.q. bouwland (incl. maïs) te delen door de totale N belasting ten gevolge van dierlijke mest. De totale belastingen van metalen en N zijn berekend met het model INITIATOR2 (De Vries et al., *in prep.*)

5 Conclusies

De doelstelling van dit project was tweeledig:

- ten eerste het ontwikkelen van een het model en het uitvoeren van dynamische berekeningen van de uitspoeling van zware metalen uit de bodem;
- en verder het maken van schattingen van de gehalten van zware metalen (ten opzichte van N en P) in dierlijke mest en kunstmest, ten behoeve van de berekening van de oppervlaktewaterbelasting met zware metalen door meemesten van sloten.

Uit de dynamische berekeningen volgt dat verschillen in de uitspoeling van zware metalen tussen de jaren vooral veroorzaakt wordt door verschillen in de hydrologie. Voor natte jaren wordt een hoge uitspoeling berekend en voor droge jaren een lage uitspoeling. De trendmatige veranderingen in de uitspoeling zijn zeer gering voor de periode 2000-2007.

Uitgangspunt voor de dynamische berekeningen zijn schattingen van de gehalten van metalen in de vaste voor het jaar 2000. Voor de jaren 1990 en 1995 wordt voor de berekening van de uitspoeling daarom een andere methode toegepast. De onzekerheid in de resultaten van de berekeningen voor 1990 en 1995 is groter dan voor de andere jaren. De resultaten van deze jaren zijn niet geschikt voor een analyse van de trendmatige ontwikkelingen.

De resultaten van de dynamische berekeningen komen grotendeels overeen met de resultaten van de stationaire berekeningen. De nu berekende uitspoeling verschilt van de berekeningen voor de Emissieregistratie in 2008 doordat de concentraties in het grondwater beneden GLG bij de huidige berekeningen gebaseerd zijn op metingen van concentraties, terwijl voor 2008 de concentraties gebaseerd waren op evenwichtconcentraties met de gehalten in de vaste fase van de bodem.

De zware metaalgehalten in mest zijn geschat op basis van recente metingen in dierlijke mest. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen grasland en bouwland. De gehalten in kunstmest zijn geschat op basis van literatuurgegevens.

Literatuur

Bleeker, A., 2004. *Depositie van vier zware metalen op Nederland in 2000, 2010 en 2020*. TNO rapport R2004/022

Bonten, L.T.C., P.F.A.M. Romkens, and G.B.M. Heuvelink. 2004. *Uitspoeling van zware metalen in het landelijk gebied. Modelleren van uitspoeling op regionale schaal: modelaanpak, resultaten modelberekeningen en modelvalidatie* Alterra-rapport 1044. Alterra, Wageningen.

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*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1340.

Bonten L.T.C. & J.E. Groenenberg, 2008. *Uitspoeling van zware metalen uit bodems in het landelijk gebied; Modelberekeningen ten behoeve van Emissieregistratie 2008*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1695

Bonten, L.T.C., B. van der Grift & J. Klein, 2008. *Achtergrondbelasting van het oppervlaktewater met zware metalen ten gevolge van uitspoeling uit de bodem*, Alterra-rapport 1636.

Bonten, L.T.C., J.E. Groenenberg & P.F.A.M. Römken 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, Wageningen

Delahaye, R., P.K.N. Fong, M.M. van Eerdt, K.W. van der Hoek & C.S.M. Olsthoorn, 2003. *Emissie van zeven zware metalen naar landbouwgrond*. Voorburg, Centraal Bureau voor de Statistiek.

De Vries, W., J. Kros & G. Velthof. *INITIATOR2: instrument voor een integrale milieuanalyse van de gevolgen van aanpassingen in de landbouw. Berekening van de emissies van ammoniak, broeikasgassen, fijn stof en geur en de accumulatie, uit- en afspoeling van koolstof, stikstof, fosfaat, basen en zware metalen*. Alterra rapport in prep., Alterra, Wageningen.

Driessen, J.J.M. & A.H. Roos, 1996. *Zware metalen, organische microverontreinigingen en nutriënten in dierlijke mest, compost, zuiveringsslib, grond en kunstmeststoffen*. Rapport 96.14, RIKILT-DLO, Wageningen

Kroes, J., A. Beusen, L. Renaud, 2009. *Actualisatie Landelijke Emissieregistratie 2009, Uit- en afspoeling nutriënten met STONE2.3*, Project Eindverslag, Alterra, Wageningen

Kroon, T., P.A. Finke, I. Peereboom & A.H.W. Beusen, 2001. *Redesign STONE. De nieuwe schematisatie voor STONE: de ruimtelijke indeling en de toekenning van hydrologische en bodemchemische parameters*. RIZA-rapport 2001.017.

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*. Wageningen, ALTEERRA. Rapport 791, Lelystad, RIZA. Rapport 2003.018

Römkens, P.F.A.M., J.E. Groenenberg, R.P.J.J. Rietra, J.E. Groenenberg & W. de Vries, 2008. *Onderbouwing LAC2006-waarden en overzicht van bodem-plant relaties ten behoeve van de Risicotoolbox; een overzicht van gebruikte data en toegepaste methoden*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1442.

Römkens, P.F.A.M. & R.P.J.J. Rietra, 2009. *Zware metalen en nutriënten in dierlijke mest in 2008; Gehalten aan Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, As, N en P in runder-, varkens en kippenmest*. Alterra-rapport 1729, Wageningen, Alterra.

Westhoek, H.J. et al. 1996. *Aan en afvoerbalansen van zware metalen van Nederlandse landbouwgronden* IKC Landbouw Ede

Bijlage 1 Gehaltes van zware metalen in dierlijke mest

In onderstaande tabellen zijn de gehalten van zware metalen in dierlijke mest weergegeven, zoals die gebruikt zijn voor de aanvoer van zware metalen. Voor de periode 1990 tot en met 1999 zijn de gehalten volgens Driessen en Roos (Tabel A.1) gebruikt en voor de periode 2000 en verder zijn de gehalten volgens Römken en Rietra (Tabel A.2) gebruikt.

Tabel A.1. Gehalten van zware metalen in mest volgens Driessen en Roos (1996) in mg/kg d.s.

	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
rund	0.23	42.00	14.33	14.00	156.00
varken	0.45	413.33	21.00	16.67	662.33
pluimvee	0.21	74.50	13.85	14.25	353.50

Tabel A.2. Gehalten van zware metalen in mest volgens Römken en Rietra (2009) in mg/kg d.s.

	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
rund	0.25	135.00	4.50	4.80	198.00
varken	0.35	404.00	9.20	5.60	952.00
pluimvee	0.20	78.00	3.30	6.30	266.00

Bijlage 2 Coëfficiënten voor berekening gewasopname

Tabel A.3. Coëfficiënten voor het berekenen van cadmiumgehalten in gewassen

	a	b (OS)	c (klei)	d (pH)	e (Me)
Gras	1.45	0	0	-0.38	1.22
Mais	0.9	0	-0.32	-0.21	1.08
Aardappels	0.97	-0.41	-0.2	-0.21	0.81
Graan	0.22	-0.33	-0.04	-0.12	0.62
Suikerbiet	1.33	0	-0.13	-0.22	0.62
Overig graan	0.22	-0.33	-0.04	-0.12	0.62

Tabel A.4. Coëfficiënten voor het berekenen van kopergehalten in gewassen

	a	b (OS)	c (klei)	d (pH)	e (Me)
Gras	1.41	-0.65	0	-0.18	0.83
Mais	0.07	0	-0.11	0.06	0.19
Aardappels	0.22	0	0	-0.02	0.43
Graan	0.65	0	0	-0.03	0.16
Suikerbiet	0.73	0	0	-0.03	0.39
Overig graan	0.65	0	0	-0.03	0.16

Tabel A.5. Coëfficiënten voor het berekenen van zinkgehalten in gewassen

	a	b (OS)	c (klei)	d (pH)	e (Me)
Gras	2.19	0	-0.49	-0.15	0.47
Mais	1.35	-0.14	-0.25	-0.17	0.81
Aardappels	1.23	-0.07	-0.15	-0.09	0.34
Graan	1.32	0	-0.24	-0.06	0.45
Suikerbiet	2.69	-0.71	-0.37	-0.41	1.13
Overig graan	1.32	0	-0.24	-0.06	0.45

Bijlage 3 Mediane metaalgehalten van gewassen

Tabel A.6. Mediane concentraties in overige akkerbouwgewassen (mg/kg)

	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
zand	0.34	5.9	0.7	0.63	64
klei	0.11	11.3	0.7	0.26	83
veen	0.4	8.3	0.7	1.33	79

Tabel A.7. Mediane metaal concentraties in bos en natuur (mg/kg)

	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
loofbomen	0.3	10	1.0	5	10
sparren	0.3	10	1.0	5	10
dennen	0.3	10	1.0	5	10
heide	0.15	10	1.0	2	10

afkomstig uit: de Vries et al., *in prep.*