

# **Uitspoeling van zware metalen uit landbouwgronden**

**Schatting van de bijdrage van uitspoeling uit landbouwgronden aan de  
belasting van het oppervlaktewater**

**P.F.A.M. Römken  
J. E. Groenenberg  
J. Bril  
W. de Vries**

**Alterra-rapport 459**

**Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2002**

## REFERAAT

Römkens, P.F.A.M., J. E. Groenenberg, J. Bril, W. de Vries, 2001. *Uitspoeling van zware metalen uit landbouwgronden. Schatting van de bijdrage van uitspoeling uit landbouwgronden aan de belasting van het oppervlaktewater*. 2002. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra-rapport 459. 60 blz. 10 fig.; 20 tab.; 27 ref.

Uitspoeling van metalen vanuit de bodem naar grond en oppervlaktewater is tot nu toe niet meegenomen bij de schattingen van de belasting van oppervlaktewater met metalen. Om te kunnen beoordelen of de bijdrage van uitspoeling wezenlijk bijdraagt aan de belasting van oppervlaktewater is een model ontwikkeld dat voor een 15-tal belangrijke bodem – landgebruik combinaties de flux van metalen naar oppervlaktewater (laterale uitstroming) en grondwater (verticale uitstroming) berekent. In dit rapport wordt de modelopzet beschreven alsmede de resultaten van een aantal meetnetten besproken. De hier beschreven methodiek wordt vervolgens toegepast om de uitspoeling op nationale schaal te berekenen en te vergelijken met bekende emissie en belasting cijfers van het oppervlaktewater

Trefwoorden: bodem, grondwater, metalen, model, uitspoeling, oppervlaktewater

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door €18,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 459. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2002 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,  
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.  
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: [postkamer@alterra.wag-ur.nl](mailto:postkamer@alterra.wag-ur.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

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	11
2 Modelbeschrijving	13
2.1 Modelkeuze	13
2.2 Afleiding van partitie relaties om de verdeling tussen vaste fase en bodemvocht te beschrijven	14
2.3 Hydrologische schematisatie en indeling van profielen	15
2.3.1 Selectie van representatieve eenheden en bodemchemische en hydrologische karakterisatie	16
2.3.2 Beschrijving van hydrologische input	17
2.4 Bodemeigenschappen en metaalgehalten in de geselecteerde bodemprofielen	19
2.4.1 Metaalgehalten in onderscheiden Bodemtype - Landgebruikcombinaties	19
2.4.2 Koppeling met overige bodemchemische eigenschappen	23
2.4.3 Modelaannames en beperkingen	24
3 Modevaluatie en vergelijking modelberekeningen - data	27
3.1 Berekende gehalten in lateraal en verticaal uittredend water.	27
3.1.1 Gehalten in de laterale stroming	27
3.1.2 Gehalten in verticale stroming	29
3.2 Overzicht van gebruikte datasets	29
3.2.1 Metingen in het grondwater	30
3.3 Overeenkomsten en verschillen tussen metingen in grond- en oppervlaktewater en modelberekeningen	32
3.3.1 Overeenkomsten en verschillen tussen grondwatermetingen en modelberekeningen	32
3.3.2 Relatie met oppervlaktewater	38
3.4 Beknopte model gevoeligheidsanalyse	39
4 Potentiële bijdrage van uitspoeling aan de belasting van oppervlaktewater in verhouding tot externe bronnen	43
4.1 Belasting van oppervlaktewater via externe bronnen: Veranderingen tussen 1990 en 2000.	43
4.2 Bijdrage van uitspoeling van zware metalen in verhouding tot externe bronnen in 2000	45
5 Conclusies	51
Literatuur	53
Aanhangsel 1 Bodemeigenschappen en zware metaal gehalten in de geselecteerde bodemtype – landgebruikcombinaties	57



## Woord vooraf

Uitspoeling van zware metalen vanuit de bodem naar het grondwater en oppervlaktewater vormt mogelijk een belangrijke bijdrage aan de belasting van het oppervlaktewater. In opdracht van het RIZA is daartoe een studie opgezet waarin nagegaan wordt in hoeverre het mogelijk is deze uitspoeling daadwerkelijk te kwantificeren en zo ja deze berekening op landelijke schaal uit te voeren en te vergelijken met gemeten directe belastingen van het oppervlaktewater.

In een verkennende studie (Römkens en de Vries, 2001) is eerder vastgesteld dat het mogelijk is de omvang van de uitspoeling te benaderen op basis van relatief eenvoudige modellen in combinatie met velddata. In het voorliggende rapport wordt het model beschreven dat gebruikt is om de uitspoeling uit verschillende bodemtypen te schatten. Met dit model is ook de uitspoeling op landelijke schaal geschat en vergeleken met de gemeten totale belasting van het oppervlaktewater in Nederland. Hierbij moet bedacht worden dat in deze fase uitsluitend de potentiële belasting is bepaald, d.w.z. de maximale uitspoeling die berekend is door de flux van bodemwater te vermenigvuldigen met de concentratie in het poriewater. Hierbij is rekening gehouden met lateraal transport vanuit de bodem direct naar het oppervlaktewater. Er is in de berekeningen echter geen rekening gehouden met wisselende hydrologische condities (natte en droge jaren) maar gebruik gemaakt van de condities in een standaard jaar. Hierbij is aangesloten op de systematiek zoals gezamenlijk ontwikkeld door RIVM, ALTErrA en RIZA (zie o.a. Kroes et al., 2001; Kroon et al., 2001).

Uiteraard heeft de hier beschreven methodiek beperkingen. Zo zal de hydrologie in meer detail meegenomen moeten worden en zullen meer gegevens van de ondergrond gegenereerd moeten worden om de betrouwbaarheid van de resultaten te vergroten. Ook zullen op termijn wellicht meer mechanistische modellen beschikbaar komen om de uitspoeling beter te kwantificeren. Hoewel de beperkingen van de methodiek dus onderkend worden, moet worden bedacht dat de bijdrage van uitspoeling uit de bodem tot op heden voornamelijk gebaseerd werd op metingen in een zeer beperkt aantal lysimeters, waarbij de gemeten waarden direct opgeschaald zijn van puntlocatie naar landelijk niveau. In dat opzicht vormt de hier gepresenteerde aanpak een eerste aanzet tot een meer procesmatig onderbouwde schatting waarbij met name de effecten van verschillen in bodemtype op de uitspoeling beter gekwantificeerd kunnen worden.

De auteurs



## Samenvatting

Bij het bepalen van de belasting van het oppervlaktewater met zware metalen is tot op heden de potentiële bijdrage van uitspoeling vanuit de bodem nog niet meegenomen. Omdat uit inventariserende studies is gebleken dat deze bijdrage voor metalen als Cd en Zn substantieel zou kunnen zijn ten opzichte van bekende bronnen is een studie uitgevoerd waarbij de uitspoeling vanuit de bodem naar grond- en oppervlaktewater modelmatig is berekend. Hierbij is het uitgangspunt geweest een model te gebruiken dat op basis van een beperkt aantal gegevens (klei, organische stof, pH en metaalgehalte per onderscheiden horizont) een schatting kan maken van de concentratie in het bodemvocht. Middels een koppeling met hydrologische gegevens wordt vervolgens het verticale en laterale transport berekend. Deze hydrologische gegevens worden niet door het model zelf gegenereerd maar als invoer meegenomen. Hierbij wordt zowel een laterale en verticale stroming onderscheiden waarbij aangenomen wordt dat de laterale stroming in eerste instantie naar het oppervlaktewater gaat terwijl de verticale stroming via het grondwater gaat en pas na langere tijd een bijdrage kan leveren aan de belasting van het oppervlaktewater.

Op basis van een partitiemodel dat de adsorptie van zware metalen beschrijft, is voor een 16-tal bodemtype-landgebruikcombinaties de concentratie van Cd, Cu, Ni, Pb en Zn in lateraal en verticaal uittrekend water berekend. De aldus berekende concentraties in zand, klei en veen gronden onder grasland, bouwland en natuur komen in grote lijnen overeen met gemeten concentraties in het bovenste grondwater die gemeten zijn in de grondwater meetnetten van het RIVM en de Provincie Gelderland. Vervolgens is voor elke bodemeenheid op basis van hydrologische gegevens afkomstig uit STONE de flux van metalen richting oppervlaktewater (laterale flux) en grondwater (verticale flux) bepaald. Door alle bodemeenheden vervolgens op te schalen naar een verdeling over Nederland is de bijdrage van uitspoeling t.o.v. die van andere bronnen bepaald. In geval van de laterale flux neemt de hoeveelheid metalen die via uitspoeling het oppervlaktewater kan bereiken toe van resp. 13% (percentage van de totale vracht die via andere bronnen in het oppervlaktewater komt) voor Pb, 41% (Cu), 51% (Ni), 78% (Cd) tot 93% voor Zn. Dit betekent dat voor meeste metalen uitstroming via laterale stroming een wezenlijke bijdrage vormt aan de belasting van het oppervlaktewater. De bijdrage van verticale stroming, dwz de belasting van het grondwater, is voor Cd en Zn qua omvang groter dan de berekende laterale flux terwijl die voor Cu, Pb en Ni geringer is, in hoofdzaak vanwege de geringere mobiliteit van deze laatste elementen.

Wanneer de bijdrage van alle bodemeenheden geclusterd wordt op hoofdbodemtype (zand, klei en veen) dan blijkt dat de belasting via laterale stroming voornamelijk afkomstig is uit veengronden (tussen de 65% en 87% van de totale metaalvracht die via laterale stroming de bodem verlaat) en, in mindere mate, uit kleigronden (tussen de 6% en 26%) terwijl de belasting van het grondwater voornamelijk optreedt in zandgronden (> 90% van de totale vracht richting grondwater).

Wanneer een zelfde clustering gemaakt wordt op basis van landgebruik (in de categorieën grasland, akkerbouw, maïs en natuur) dan wordt de laterale belasting voornamelijk bepaald door grasland en akkerbouw terwijl de belasting van grondwater afneemt in de volgorde natuur (29 - 69%), maïs (8 - 39%), akkerbouw (10 - 20 %) en grasland (11 - 14%). Deze laatste uitkomsten zijn in hoge mate een gevolg van het feit dat bepaalde landgebruiksvormen sterk gekoppeld zijn aan bodemtype. Zo is het landgebruik op veen vrijwel altijd grasland en zal derhalve de bijdrage van grasland aan de laterale flux richting oppervlaktewater hoog zijn terwijl die van natuur (hier gedefinieerd als bos en heide op droge zandgronden) gering zal zijn.

De uiteindelijke resultaten van de orde van grootte van de bijdrage van uitspoeling van metalen uit de bodem zijn tevens in dezelfde orde van grootte als die van eerdere schattingen die op basis van een zeer beperkt aantal gegevens zijn gemaakt. Met de eerder toegepaste methodiek was het echter niet mogelijk een inschatting te maken van de bijdrage van specifieke bodemtypen en landgebruiksvormen.

Het antwoord op de onderzoeksvraag is echter op basis van de hier gevolgde methodiek gelijk aan die van de eerdere schattingen namelijk dat *de bijdrage van uitspoeling via bodems een belangrijke bijdrage levert aan de belasting van het oppervlaktewater*. Wanneer derhalve maatregelen genomen worden om de belasting van oppervlaktewater te verminderen via reductie van 'externe bronnen' (waterzuivering, industrie) moet worden bedacht dat aanvoer via uitspoeling bij ongewijzigd bodemgebruik een navenant grotere bijdrage gaat vormen.

De uitkomsten zoals die in dit rapport gepresenteerd worden zijn in meer of mindere mate afhankelijk van enkele aannames die gemaakt zijn zoals de keuze van de bodemtypen en landgebruiksvormen en de daarbij behorende hydrologische condities. Zo is de berekening uitgevoerd met hydrologische gegevens van het jaar 1985 dat als gemiddeld jaar is gekozen. Uit de vergelijking met de gegevens van de bodem meetnetten wat betreft de totaalgehalten en de grondwatermeetnetten voor wat betreft de water data blijkt ook al dat de spreiding in de gehalten in het grondwater groot kunnen zijn. Daarnaast is ook het gebruikte modelconcept beperkt in die zin dat specifieke processen die lokaal erg belangrijk kunnen zijn (denk aan stroming via krimp-scheuren in kleigronden of via preferente stroombanen in zandgronden) niet meegenomen zijn. Echter, het belang van dergelijke processen in combinatie met de complexiteit ervan - in termen van modellering - maakt dat het meenemen ervan in een aanpak die geschikt moet zijn voor toepassing op nationale of regionale schaal op dit moment niet aan de orde is.

Wanneer echter bedacht wordt dat de berekende concentraties een goede weergave van de gemiddelde condities lijken te zijn dan kan de aanpak zoals hier gepresenteerd gebruikt worden om op een relatief eenvoudige manier de bijdrage van uitspoeling te kwantificeren anders dan door tijdrovende metingen van gehalten in het grond- en oppervlaktewater. Bovendien kan de hier gepresenteerde systematiek tevens gebruikt worden om na te gaan of de gehalten zoals aangetroffen in grondwater te verwachten



zijn op basis van de belasting vanuit de bodem of dat deze aanleiding geven tot nader onderzoek vanwege mogelijk vervuiling.



# 1 Inleiding

Schattingen van de belasting van het oppervlaktewater met zware metalen zijn tot op heden nog slechts gebaseerd op lozingen vanuit puntbronnen zoals zuiveringsinstallaties en industrie. Het feit dat contaminanten en hier in het bijzonder zware metalen ook via het uitspoelende bodemwater het oppervlaktewater kunnen bereiken is tot op heden om twee redenen niet meegenomen in de beschouwing:

- i. er is van uit gegaan dat de binding van zware metalen aan de vaste fase in de bodem dermate sterk is dat uitspoeling geen grote bijdrage kan leveren (Jansen, 1988), en
- ii. er waren tot voor kort nog zo weinig goed gedocumenteerde gegevens over de gehalten aan zware metalen in bodem- en grondwater dat een schatting nog niet mogelijk of zinvol was.

De sterke binding van zware metalen aan bodemdeeltjes, de lange retentietijd van water in de meeste diepere aquifers en de veelal neutrale pH hierin, maken het inderdaad aannemelijk dat de vracht aan metalen die via het diepe grondwater het oppervlaktewater bereikt, onder normale omstandigheden gering zal zijn. Echter in situaties als in de Kempen is reeds aangetoond dat op den duur de belasting van het bodemoppervlak wel degelijk leidt tot een toename van de gehalten in het diepere grondwater en tot uitspoeling richting het oppervlaktewater. Omdat dit soort, voor Nederland, extreme situaties niet veel voorkomt is het echter niet waarschijnlijk dat uitspoeling via diep grondwater nu of in de nabije toekomst op landelijke schaal leidt tot verslechtering van de oppervlaktewaterkwaliteit. Echter, naast uitspoeling via het diepe grondwater speelt ook uitspoeling via lateraal uittredend bodemwater of grondwater een rol. Afhankelijk van de grondwaterstand en het bodemtype kan tot 90 % van het totale, aan het bodemoppervlakte infiltrerende, water het profiel lateraal verlaten richting het oppervlaktewater. Het is dan ook deze flux die wel voor een significante bijdrage aan de belasting van het oppervlaktewater kan zorgen.

Met betrekking tot het ontbreken van voldoende gegevens aan gehalten in bodem- en grondwater kan worden opgemerkt dat pas sinds begin 90-er jaren o.a. door het RIVM en verschillende provincies een begin gemaakt is met het systematisch bemonsteren van grondwater onder verschillende vormen van landgebruik (akkerbouw, grasland, natuur) en bodemtype (klei, veen, zand) (Groot et al., 1996-1998, 2000). Ofschoon het vergelijken van data van verschillende meetnetten lastig is door verschillen in o.a. methodiek en bemonsteringsdiepte, kan worden geconstateerd dat de verschillen tussen de genoemde bodem- en landgebruikvormen groot zijn. Uit de resultaten van de meetnetten blijkt onder meer dat de gehalten aan metalen met de diepte afnemen (Fraters et al., in voorbereiding). Dat bevestigt het idee dat de bijdrage van uitspoeling via diep grondwater geen wezenlijke bijdrage vormt aan de totale belasting. Echter, de gemeten gehalten in het bodemvocht en het bovenste grondwater (0.5 m -mv) zijn voor sommige metalen soms een factor 10 tot 100 hoger dan die in het diepere grondwater. Het laterale transport van stoffen uit de bovenste laag van de bodem en het bovenste watervoerende pakket zou daarom wel

een significante bijdrage kunnen leveren. De eerste schattingen van de grootte van deze flux zijn tot op heden echter nog gebaseerd op een paar grove aannames. Zo is gebruik gemaakt van een gemiddeld gehalte in deze watervoerende pakketten dat weer is afgeleid van enkele metingen in drainwater. Hierbij is dus ook geen rekening gehouden met de verschillen in gehalten in bodemwater en grondwater die tussen verschillende typen van bodem en landgebruik gevonden worden. De schattingen van de totale omvang van uitspoeling naar het oppervlaktewater die gemaakt zijn op basis van deze gemiddelden lopen uiteen van 1 ton per jaar voor Cd, 35 ton per jaar voor Cu tot 60 ton per jaar voor Zn (Römkens et al., 2001). Deze hoeveelheden bedragen respectievelijk 48, 38 en 11% van de totale emissie naar het oppervlaktewater volgens de Emissie Jaarrapportage (CCDM, 2001).

De conclusie dat uitspoeling dus wel degelijk een bijdrage kan vormen aan de belasting van het oppervlaktewater lijkt op basis van deze eerste schatting redelijk. Om deze conclusie echter beter te onderbouwen is het essentieel dat meer gedetailleerde informatie betreffende de verschillen tussen bodems en landgebruiktypen meegenomen wordt bij de bepaling van de flux.

In deze studie wordt daarom een eerste aanzet gegeven tot een modelaanpak die de bijdrage van uitspoeling uit verschillende bodemtypen en onder verschillende vormen van landgebruik aan de belasting van het oppervlaktewater met zware metalen kan kwantificeren. Gezien de landelijke schaal waarop de berekening moet plaatsvinden is het in deze fase noodzakelijk te komen tot een aanzienlijke vereenvoudiging van de werkelijke situatie. Deze vereenvoudiging betreft zowel de keuze en indeling van de verschillende bodem- en landgebruiktypen als de beschrijving van het gedrag van metalen in de bodem in relatie tot bodemtype en belasting. Echter, de aanpak zoals beschreven in dit rapport laat wel ruimte voor een toekomstige verdere verfijning zowel wat betreft schaalniveau als de beschrijving van chemie en hydrologie. Uitbreiding en verfijning kunnen dan later gericht in die bodem- en landgebruikseenheden toegepast worden waarvan op basis van de hier beschreven modelberekeningen blijkt dat deze de voornaamste bijdragen vormen voor de belasting van oppervlaktewater.

## 2 Modelbeschrijving

### 2.1 Modelkeuze

Het gedrag van zware metalen in de bodem wordt gestuurd door een groot aantal tegelijk optredende processen. In niet-verontreinigde aërobe bodems is adsorptie van metalen aan bodembestanddelen zoals organische stof, klei, en Fe- en Al-(hydr)oxiden het meest bepalend. Factoren zoals de zuurgraad, de aanwezigheid van opgelost organisch koolstof (DOC) en kationen als calcium spelen daarbij een belangrijke rol. De modelmatige beschrijving van het procesgedrag van zowel kationen als anionen op laboratoriumschaal is in de laatste jaren sterk verbeterd en heeft geleid tot een beter inzicht in de processen bij adsorptie en complexatie en het belang van de afzonderlijke bodemfactoren hierin (zie o.a. de Wit, 1992, van de Weerd, 2000; Rietra, 2001). De ontwikkeling en toepassing van mechanistische modellen die deze processen beschrijven is dan ook in een versnelling gekomen. Ofschoon de toepassing ervan op veldniveau, gezien de complexiteit van de bodem (heterogeniteit, variatie in samenstelling en gehalten), nog slechts op kleine schaal plaatsvindt (Temminghoff, 1998), is de verwachting dat 'opschaling' van meer mechanistisch georiënteerde modellen in de nabije toekomst tot een verbeterd inzicht zal leiden in de relatie tussen het voorkomen van stoffen in de bodem en effecten daarvan op grondwater en organismen. Gezien de eerder genoemde complexiteit en heterogeniteit is toepassing van meer empirische modellen op veldschaal op dit moment echter het hoogst haalbare (Römkens, 1998; Tiktak, 1999; Seuntjens, 2000). Op dit moment is daarbij het gebruik van meer of minder uitgebreide *partitierelaties* een voor de hand liggende keuze. Deze beschrijven het evenwicht van zware metalen tussen resp. de vaste fase en de vloeistoffase in de bodem waarbij een statistische relatie gebruikt wordt die het verband tussen beide fasen beschrijft aan de hand van 1 of meerdere bodemeigenschappen. Hierbij wordt in veel gevallen gebruik gemaakt van een Freundlich vergelijking (Boekhold, 1992; Römkens, 1998; Tiktak, 1999):

$$\text{Log}Q_{\text{vaste fase}} = \alpha + \beta \cdot \log F_1 + \dots + \dots \mu \cdot \log F_z + n \cdot \log C_{\text{oplossing}}$$

Waarbij  $Q$  het gehalte van het metaal in de vaste fase is,  $C$  de metaalconcentratie in de bodemoplossing en  $F_1$  t/m  $F_z$  bodemparameters zoals pH, gehalte aan organische stof en klei etc. Ofschoon een dergelijke relatie in principe alleen geldig is voor het bereik dat gedekt wordt door de ruimte van de bodemparameters, kan door deze ruimte groot te maken een meer algemeen toepasbaar model worden verkregen. Aangezien een dergelijk model werkt met algemeen toegankelijke bodemeigenschappen die voor een landelijke schaal voorhanden zijn, is de toepassing ervan op landelijke schaal mogelijk (Tiktak, 1999). Hierbij moet wel worden bedacht dat de geldigheid van een dergelijk model beperkt blijft tot aërobe systemen waarin adsorptie het belangrijkste metaalregulerende proces is. Zodra een systeem sterk gereduceerd is, en precipitatie van sulfiden de gehalten van de metalen gaat bepalen, kan dit model niet meer worden toegepast.

## 2.2 Afleiding van partitie relaties om de verdeling tussen vaste fase en bodemvocht te beschrijven

In deze studie is gebruik gemaakt van partitie relaties die zijn afgeleid uit een grote database met bodem- en bodemvochtgegevens van een 60-tal sterk uiteenlopende (Nederlandse) bodems. De bodemvochtgegevens zijn verkregen door de grondmonsters met verschillende elektrolyten in het laboratorium te schudden (o.a. demiwater, NaCl, CaCl<sub>2</sub>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> en NaNO<sub>3</sub>; Römken et al., 2002). Dit is gebeurd bij verschillende pH niveaus waardoor een bestand met 1450 bodem-bodemvocht combinaties is verkregen. Eerder onderzoek aan partitierelaties afgeleid van velddata toonde aan dat de kwaliteit en variatie (wat betreft bodemtype) van beschikbare velddata onvoldoende zijn om op basis hiervan betrouwbare veldpartitie relaties af te leiden (Otte et al., 2000).

Binnen de genoemde set van 60 bodems -resultierend in totaal ruim 110 verschillende monsters omdat van sommige locaties monsters uit verschillende bodemlagen aanwezig zijn- is een grote range in organische stof gehalte (1 - 60%), pH (3 - 8), klei gehalte (1 - 60%) en metaalgehalte aanwezig. Op basis van een statistische analyse kon niet worden vastgesteld dat er in de set van monsters uit de ondergrond (> 50 cm - maaiveld) een ander verband bestaat wat betreft het metaalevenwicht tussen de vaste fase en het bodemvocht dan voor monsters uit de bovengrond.

In tabel 2.1 staan de resultaten voor Cd, Cu, Ni, Pb en Cu waarbij de volgende relatie is gefit:

$$\text{Log}[(Q_{\text{bodem}})/(C_{\text{extract}})^n] = \alpha + \beta \cdot \text{log}[\text{klei}] + \gamma \cdot \text{log}[\text{SOM}] + \delta \cdot \text{pH} \quad [1]$$

$Q_{\text{bodem}}$  = metaalgehalte in de bodem in 0.43 N HNO<sub>3</sub> in mol kg<sup>-1</sup>

$C_{\text{extract}}$  = metaalgehalte in extract in mol m<sup>-3</sup>

Klei = kleigehalte (%)

SOM = organische stof gehalte in %

pH = pH 0.01 M CaCl<sub>2</sub>

n,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  = regressieparameters

Ofschoon deze relatie sterk lijkt op de standaard Freundlich isotherm, is bij de afleiding niet C dan wel Q als te verklaren variabele genomen, maar de ratio van Q en C waarbij tegelijk de optimale waarde voor n is gefit. Dit is onder meer gedaan omdat bij gebruik van partitie relaties die in 1 richting zijn afgeleid (dwz waarbij hetzij C hetzij Q wordt verklaard) het statistisch gezien niet verantwoord is om daarna de andere variabele te gaan voorspellen met de aldus gevonden functie. Wanneer bijvoorbeeld de klassieke functie  $Q = f(\text{pH}, \text{klei}, \text{os}, C)$  wordt gefit is het niet verantwoord om vervolgens C op te lossen voor een gegeven Q. Wanneer echter zowel Q als C bij de te verklaren variabelen staan is dit wel mogelijk. Een meer uitgebreidere bespreking van deze vorm van afleiden van partitierelaties wordt elders beschreven (Römken et al., 2002).

Tabel 2.1 Partitie relaties voor Cd, Cu, Ni, Pb en Zn met organische stof, pH en klei als voorspellende variabelen

Metaal	Intercept $\alpha$	klei $\beta$	SOM $\gamma$	pH $\delta$	n	R <sup>2</sup>	se(Y)
Cd	-5.01	0.27	0.65	0.29	0.54	0.77	0.37
Cu	-3.67	0.18	0.50	0.17	0.45	0.63	0.35
Ni	-5.39	0.39	0.75	0.34	0.49	0.89	0.28
Pb	-3.06	0.02	0.85	0.26	0.67	0.58	0.55
Zn	-4.96	0.36	0.51	0.52	0.77	0.85	0.41

Omdat voor elementen als koper en lood de invloed van DOC op de verdeling tussen vaste fase en bodemvocht van belang is, zijn ook partitie relaties afgeleid waarbij DOC is meegenomen (zie verg. 2 en data in tabel 2.2).

$$\text{Log}[(Q_{\text{bodem}})/(C_{\text{extract}})^n] = \alpha + \beta \cdot \log[\text{klei}] + \gamma \cdot \log[\text{SOM}] + \delta \cdot \text{pH} + \varepsilon \cdot \log[\text{DOC}] \quad [2]$$

Ofschoon DOC bij alle elementen behalve Cd een duidelijk effect had op de regressie analyse bleek de invloed op uiteindelijk verklaarde variantie van de term  $\text{Log}[(Q_{\text{bodem}})/(C_{\text{extract}})^n]$  niet al te groot.

Tabel 2.2 Partitie relaties voor Cd, Cu, Ni, Pb en Zn inclusief DOC

Metaal	Intercept ( $\alpha$ )	Klei ( $\beta$ )	SOM ( $\gamma$ )	pH ( $\delta$ )	DOC	n	R <sup>2</sup>	se(Y)
Cd	-4.84	0.28	0.70	0.27	-0.09	0.54	0.78	0.37
Cu	-2.75	0.23	0.62	0.13	-0.26	0.57	0.66	0.34
Ni	-4.95	0.39	0.84	0.32	-0.17	0.53	0.90	0.28
Pb	-2.49	0.07	0.98	0.22	-0.23	0.71	0.59	0.56
Zn	-4.59	0.39	0.61	0.49	-0.19	0.78	0.86	0.40

Bij de berekeningen van de gehalten in het bodemvocht is gebruik gemaakt van de relaties zoals gegeven in tabel 2.2. Het model in zijn huidige vorm kan echter ook worden gebruikt om de berekening uit voeren met de partitierelaties als gegeven in tabel 2.1.

### 2.3 Hydrologische schematisatie en indeling van profielen

In deze fase van de studie is er voor gekozen het model voor de berekening van de uitspoeling van zware metalen in eerste instantie toe te passen op een selectie van representatieve combinaties van bodemtype en landgebruik. De uiteindelijke selectie moet echter wel representatief zijn voor de situatie in Nederland (i.v.m. opschaling naar landelijk niveau) en de belangrijkste typen wat betreft landgebruik, bodemsamenstelling en hydrologie omvatten.

Voor modeltoepassingen op landelijke schaal zijn op dit moment verschillende indelingen in gebruik. Voor een schatting van metaalgehalten op landelijke schaal is door Brus et al. (2001) een indeling naar organische stof, klei, pH en zware metalen voor de bovengrond gemaakt. Deze indeling doet, op dit moment, waarschijnlijk het meeste recht aan de ruimtelijke variatie van bodemeigenschappen en metaalgehalten. Omdat de indeling zich nu echter nog beperkt tot de bovengrond is deze voor deze

modelstudie niet geschikt. Voor de beschrijving van de effecten van atmosferische depositie op nationale schaal is door Kros et al. (1995) een schematisatie gemaakt naar een 7-tal bodemtypen en een vijftal grondwatertrappen. Daarnaast wordt voor de berekening van de N- en P uit- en afspoeling met de modelketen STONE gerekend met in totaal 21 bodemtypen en 7 grondwatertrappen (analoog aan de gangbare indeling op de bodemkaart, Kroes et al., 2001). In deze studie is besloten ook aan te sluiten bij de indeling van STONE (Kroon et al., 2001), waarvoor voor elke beschreven combinatie van bodemtype - en landgebruik een schematisatie van de waterbalans voorhanden is, zowel op jaarbasis als op dagbasis (Kroes et al., 2001). Dit maakt ook in de toekomst een toepassing op regionale schaal mogelijk omdat in STONE de hydrologie voor heel Nederland al geschematiseerd is.

### 2.3.1 Selectie van representatieve eenheden en bodemchemische en hydrologische karakterisatie

Het hele STONE bestand is op dit moment ingedeeld in plots variërend in grootte van 25 tot meer dan 20000 hectare waarbij aan elk plot een representatief bodemtype en landgebruik is gekoppeld. De hele lijst van plots is in eerste instantie geclusterd tot een indeling op bodemtype waarbij voor elk bodemtype weer een indeling naar grondwatertrap (GT) is gemaakt; de totale lijst van bodemtype - GT combinaties is weergegeven in tabel 2.3. De uiteindelijke selectie van te modelleren combinaties van bodemtype en GT is gebaseerd op de omvang van de verschillende clusters (in hectare).

Tabel 2.3 Overzicht van indeling naar bodemtype en grondwaterklasse in STONE met bijbehorende oppervlakken (in hectare) per onderscheiden eenheid

Bodemtype STONE	Code STONE	codering 1:50000	Bodemkaart	Oppervlak per GT klasse (ha)						
				1	2	3	4	5	6	7
Koopveen	1	hVb, hVc		3006	73088	7163	706	4881	819	0
Kpveenzd	2	aVz, hVz		1725	49913	48594	3769	1300	1638	213
Klveenol	3	pVb, kVb		3763	74556	6369	0	263	1325	819
Klveenzd	4	kVz		1063	9000	6269	900	2356	331	0
Meerveen	5	iWz, iWp		194	14231	58244	15106	43413	19063	681
Veenklei	6	W0		0	20063	7456	269	0	0	0
Stuifznd	7	Zd20, Zd21		0	15869	3781	17481	1131	8306	91944
PodzLZ12	8	Hd21		0	0	0	0	256	88	37250
PodzolZ8	9	Hn21		0	3150	40231	16363	122725	223494	89444
PodzLZ8g	10	Hn21g		0	0	6413	3556	12325	11725	5969
PodzLZ8x	11	Hn23x		0	275	7338	769	97063	14338	1456
Enkeerdz	12	zEZ21		0	556	8688	950	6600	46763	99838
Beekeerd	13	pZg23		356	4650	74138	13863	10613	14756	7844
PodzLZ13	14	gHd30		0	969	1238	1856	1106	3469	90938
Zavel_M8	15	Mn25A		988	2881	18694	12500	69181	179231	25663
Lichklei	16	Mn35A, Rd90A, Rd90C		0	10175	23594	24919	54231	140125	59463
Zwarklei	17	Rn44C,gMn83C,kMn48C, Rn47C		0	763	48875	5819	76388	26513	8225
Klveeneu	18	RvO1C, Mv41C		1425	37775	35600	8044	6431	5750	206
Kleizand	19	Mn22A		94	7638	50863	22025	15463	47288	16431
Kleigznd	20	Rn52A		0	0	2650	1463	2144	8181	1813
Leemleem	21	BLd6		0	494	4231	0	1288	10781	26775



Op basis van deze indeling is vervolgens een selectie uit deze bodemtypen gemaakt waarbij als criterium een minimaal oppervlakte van 40000 hectare is genomen. Verder is getracht een zo breed mogelijke selectie te maken waarbij alle belangrijke bodemtypen (m.u.v. loess) in de uiteindelijke selectie aanwezig zijn. Voor elk van deze bodemtypen is vervolgens het dominante landgebruik bepaald op basis van de verdeling van de 4 landgebruiktypen (resp. gras, maïs, bouwland en natuur) binnen het bodemtype. In tabel 2.4 staat de procentuele verdeling van landgebruik over de uiteindelijk geselecteerde bodemtypen.

Tabel 2.4 Overzicht van verdeling naar landgebruik binnen bodemtype

STONE			landgebruik (%)				
naam	Code	GT <sup>1</sup>	gras	maïs	bouwland	natuur	gekozen
koopveen	1	2	<b>79</b>	0	2	19	Gras
kpveenzd	2	3	64	6	<b>18</b>	13	Bouwland <sup>2</sup>
klveenol	3	2	<b>96</b>	1	1	2	Gras
meerveen	5	5	31	5	<b>56</b>	8	Bouwland
stuifznd	7	7	2	0	1	<b>97</b>	Natuur
podzolZ8	9	6	<b>51</b>	15	17	17	Gras
podzolZ8	9	6	51	<b>15</b>	17	17	Mais <sup>2</sup>
podzolZ8	9	6	51	15	<b>17</b>	17	Bouwland <sup>2</sup>
podzolZ8	9	7	28	7	20	<b>45</b>	Natuur
enkeerdz	12	6	<b>69</b>	18	14	0	Gras
enkeerdz	12	7	53	<b>24</b>	18	5	Mais <sup>2</sup>
podzlZ13	14	7	11	2	3	<b>84</b>	Natuur
zavel_M8	15	6	19	1	<b>78</b>	2	Bouwland
lichklei	16	6	35	4	<b>56</b>	5	Bouwland
zwarklei	17	3	<b>88</b>	5	4	4	Gras
kleizand	19	6	24	2	<b>70</b>	4	Bouwland

<sup>1</sup>: belangrijkste grondwatertrap binnen de geselecteerde eenheid

<sup>2</sup>: Ofschoon deze combinaties niet de grootste zijn binnen de geselecteerde eenheden zijn ze toch van belang omdat ze hetzij een combinatie representeren waarvan het belang voor uitspoeling wellicht toch groot kan zijn of omdat het totale oppervlak van de eenheid dermate groot is (bijv. het geval bij eenheid podzolZ8) dat ook 15% van deze eenheid nog een groot oppervlak beslaat en tevens een typerende bodemtype-landgebruikcombinatie is.

### 2.3.2 Beschrijving van hydrologische input

Voor de geselecteerde bodemtype-landgebruikcombinaties is ook de hydrologie geschematiseerd per laag van 5 cm tot een totale diepte van 5 meter (in totaal dus 100 segmenten per profiel). Per segment is daarbij aangegeven:

1. De hoeveelheid water die vanuit de bovenliggende laag het betreffende segment binnen komt;
2. De hoeveelheid water die door het gewas uit het betreffende segment wordt opgenomen;
3. De hoeveelheid water die het segment lateraal verlaat;
4. Het watergehalte.

Voor elk van de onderscheiden bodemtype - landgebruik combinaties is een zgn. 'hyd' file gemaakt waarin deze 100 segmenten beschreven staan. Voorwaarde voor

het goed functioneren van het model is namelijk dat de bodemchemische karakterisatie wat betreft de profieldiepte exact overeen komt met de hydrologische schematisatie. Het aantal onderscheiden bodemchemische lagen hoeft echter niet gelijk te zijn aan het aantal segmenten, dwz een bodem horizont kan bestaan uit meerdere segmenten die bodemchemisch identiek zijn, maar die hydrologisch gezien kunnen verschillen.

Omdat in eerste instantie berekeningen op jaarbasis uitgevoerd worden, is in de hydrologische karakterisering uitgegaan van jaargemiddelde waarden van het jaar 1985.

In tabel 2.5 is een overzicht gegeven van de jaar gemiddelde waterbalansen over het hele profiel waarbij onderscheid gemaakt is in neerslag, de som van interceptie en bodemevaporatie, plant opname, en verticale en laterale stroming (zowel de fluxen op 120 cm als op 500 cm diepte zijn gegeven). Voor de hydrologische schematisatie geldt dat er, in tegenstelling tot die van de algemene bodemeigenschappen, wel onderscheid gemaakt is naar landgebruik (gras, maïs, bouwland, natuur) en (uiteraard) GT.

Tabel 2.5 Overzicht van enkele hydrologische kengetallen van de gebruikte bodemtypen (alle fluxen in mm water per jaar)

Bodemtype	Land gebruik	Neer slag	Bodem Evaporatie + Interceptie	Gewas verdamping + opname	Flux			
					120 cm		500 cm	
					Vert.	Lat.	Vert.	Lat.
koopveen	gras	864	199	271	21	373	18	375
koopveen op zand	bouwland	866	187	64	350	226	132	475
klei op veen	gras	864	199	255	-5	414	-11	420
Meerveen	bouwland	866	187	130	497	32	202	276
Stuifzand	natuur	803	173	320	279	0	351	0
Podzol Hn21	gras	776	176	317	276	6	210	64
Podzol Hn21	maïs	776	204	194	359	0	407	0
Podzol Hn21	bouwland	866	187	164	502	0	475	22
Podzol Hn21	natuur	803	178	335	261	0	324	0
Enkeerd	gras	785	178	352	223	18	172	69
Enkeerd	maïs	776	204	194	358	0	352	0
Podzol Hn23	natuur	803	178	321	274	0	354	0
Zavel	bouwland	866	187	155	421	80	25	495
lichte klei	bouwland	771	217	194	289	48	-6	361
zwarte klei	gras	885	178	314	290	86	-6	398
klei op zand	bouwland	771	210	212	299	22	132	202

## **2.4 Bodemeigenschappen en metaalgehalten in de geselecteerde bodemprofielen**

### **2.4.1 Metaalgehalten in onderscheiden Bodemtype - Landgebruikcombinaties**

Gedurende de laatste decennia is uitgebreid aandacht besteed aan de inventarisatie van de kwaliteit en bodemeigenschappen van de bovengrond. Dit heeft geleid tot een goed, landsdekkend, inzicht in de variatie in pH, organische stof, textuur en metaalgehalten in de bovengrond. Voor de ondergrond is deze informatie in veel gevallen niet landsdekkend aanwezig. Met name over de metaalgehalten in de ondergrond is op dit moment nog slechts beperkt informatie voorhanden. Omdat in deze studie gewerkt wordt met representatieve profielen per gegeven STONE combinatie van bodemtype en landgebruikvorm, is die lacune op dit moment nog niet beperkend. Voor het maken van regionale voorspellingen van de variatie in zware metaalconcentraties in bodem- en grondwater is dit gebrek aan ruimtelijke informatie wel een beperking. In de profielen zoals gegeven in bijlage 1 is voor elk bodemtype een schematisatie van organische stof, klei, pH en DOC gegeven. Hierbij zijn de gegevens over organische stof, kleigehalte en pH afkomstig uit de STONE database.

Om aan elk van de in de modelberekening gebruikte bodemprofielen toch een metaalprofiel te kunnen toekennen is hier gebruik gemaakt van enkele databestanden zoals het RIVM bodemmeetnet, en is er anderzijds aanvullend laboratoriumwerk verricht. In tabel 2.6 staan de gegevens van de totaalgehalten zoals bepaald in 256 monsters afkomstig uit een 60-tal profielen die geselecteerd zijn uit het monsterbestand van ALTERRA en die een redelijk beeld geven van de verschillende bodemtypen. In al deze monsters is zowel het (pseudo)totaalgehalte (Aqua Regia) als ook de potentieel beschikbare fractie (0.43 N HNO<sub>3</sub>, zie tabel 2.7) bepaald omdat deze als invoer in het model is gebruikt. In deze tabel zijn naast de elementen die in deze studie aan de orde komen (Cd, Cu, Ni, Pb en Zn) tevens de gehalten aan As en Cr gegeven. Deze zullen hier verder niet worden gebruikt.

De gehalten als vermeld in de tabellen 2.6 en 2.7 worden aangetroffen in bodems uit niet specifiek belaste gebieden. In eerste instantie is een clustering gemaakt in klassen met een bepaald kleigehalte, hierbij zijn veenmonsters (< 5% van het totaal) niet meegenomen. Uit tabel 2.6 en 2.7 blijkt dan dat er op basis van een indeling naar kleigehalte (< 2% klei, 2 - 10% klei, 10 - 20% klei, 20 - 30% klei en > 30% klei) voor elementen als Ni en Zn een duidelijke relatie bestaat met het kleigehalte hetgeen er op wijst dat in de hier onderzochte gronden Ni en Zn van nature in kleimineralen voorkomen. Daarnaast is dit ook een gevolg van het feit dat bij hoge kleigehalten sterkere vastlegging optreedt dan in lichtere (zand)gronden. De potentieel beschikbare fracties zoals bepaald in een 0.43 N HNO<sub>3</sub> extractie staan gegeven in tabel 2.7. Deze zijn voor alle elementen (uiteraard) lager dan de totaal Aqua Regia extraheerbare gehalten.

In tabel 2.8 is voor alle elementen de verhouding tussen 0.43 N HNO<sub>3</sub> en Aqua Regia te zien. Hieruit blijkt dat met de diepte in een profiel een steeds groter deel van de totale metalen pool in de bodem in een zodanige vorm zit dat deze zelfs bij pH 1 (dat is de pH van een 0.43 N HNO<sub>3</sub> extract) niet (chemisch) beschikbaar is. Dit feit illustreert dat het niet zinvol is om voor modelberekeningen (maar in feite ook voor normstelling) uit te gaan van totaalanalyses waarbij het 'inerte' deel van het totale metaalgehalte mee geëxtraheerd wordt. Het gebruik van mildere extractie als 0.43 N HNO<sub>3</sub> en of EDTA is voor dit soort toepassingen dan ook noodzakelijk.

Het feit dat de ratio 0.43 N/AR afneemt met de diepte is een gevolg van het feit dat de belasting van bodems met metalen voornamelijk in de bovengrond is opgetreden en er weinig of geen transport naar diepere lagen is opgetreden.

Uit de gegevens in tabel 2.8 blijkt verder ook dat de textuur (i.e. het kleigehalte) geen eenduidige invloed heeft op de verhouding tussen de hoeveelheden geëxtraheerd met 0.43 N HNO<sub>3</sub> en Aqua Regia. Alleen voor Cu en Zn is een lichte afname van de ratio tussen 0.43 N HNO<sub>3</sub> en Aqua Regia te zien als functie van het kleigehalte in de bovengrond. Een mogelijke verklaring hiervoor is de specifieke belasting van een deel van de zandgronden met beide elementen; deze komen namelijk in verhoogde concentraties voor in dierlijke mest. Aangezien een groot deel van deze mest op zandgronden is opgebracht, zijn de beschikbare hoeveelheden van zandgronden sterker gestegen dan die van kleigronden die niet met dergelijke hoeveelheden zijn aangerijkt.

In tabel 2.9 en 2.10. staan de gegevens van het Bodemmeetnet van het RIVM (Groot et al., 1996 - 1998, 2000) en die van het bodemmeetnet van de Provincie Gelderland (Japenga et al., 2000). Hierbij is meer onderscheid gemaakt naar landgebruiktype. De gehalten voor de elementen Zn, Cu, Pb en Cd komen in grote lijnen goed overeen met de in tabel 2.6 (Aqua Regia) gepresenteerde gegevens. Hierbij moet echter worden opgemerkt dat de gehalten die genoemd staan onder bos in tabel 2.9 betrekking hebben op de strooisel laag en derhalve (veel) hoger zijn dan die genoemd in de tabel van het Bodemmeetnet Gelderland die betrekking hebben op de minerale laag.

In het algemeen zijn de verschillen tussen de verschillende bodemtypen (hier zand, klei en veen) duidelijk groter dan die tussen verschillende landgebruiktypen binnen een bodemtype. Zo zijn met name de gehalten in zand gronden beduidend lager dan in klei en veengronden. Voor een meer uitvoerige beschouwing over de effecten van landgebruik op metaalgehalten wordt echter verwezen naar de desbetreffende RIVM documenten (Groot et al., 1996-1998, 2000). Op basis van de gegevens 2.6 t/m 2.10 zijn de profielen van de verschillende bodemtype-landgebruikcombinaties vervolgens geschematiseerd (zie bijlage 1).

Wat betreft de indeling in bodemtypen is daarbij aangesloten op de schematisering die in STONE is toegepast (Kroon et al., 2001; Kroes et al., 2001) die een indeling in 21 bodemtypen kent. Deze indeling is gevolgd omdat daarmee ook een koppeling met de hydrologische gegevens (water fluxen door het profiel) gemaakt kan worden; deze zijn namelijk ingedeeld in dezelfde bodemtypen waarbij ze nog verder onderverdeeld zijn naar grondwatertrap. Omdat voor elk bodemtype bekend is wat de gehalten aan klei en

organische stof zijn (tot op 5 meter diepte), zijn deze gegevens gebruikt om voor de ondergrond de bijbehorende metaalgehalten te schatten.

Deze indirecte manier van afleiden van de metaalgehalten is noodzakelijk omdat regionale of bodemtype-afhankelijke informatie over metaalgehalten in de ondergrond in relatie tot de hier gekozen bodemtypen vrijwel niet voorhanden is.

Tabel 2.6 Gemiddelde totaal gehalten in boven- en ondergrond: Aqua Regia (mg kg<sup>-1</sup>)

Element:	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Zand (< 2 % klei)							
0 - 30 cm	3.01	0.16	7.45	7.60	2.63	16.33	16.30
30 - 60 cm	2.38	0.08	7.16	3.13	3.92	5.87	11.66
60 - 90 cm	1.84	0.02	6.15	1.25	3.78	3.70	7.62
Lemig zand (2 - 10 % klei)							
0 - 30 cm	5.61	0.23	10.77	8.01	4.38	13.43	24.04
30 - 60 cm	3.23	0.10	8.38	3.43	4.46	7.01	11.10
60 - 90 cm	1.50	0.03	6.26	1.49	2.91	3.06	6.25
zavel (10 - 20 % klei)							
0 - 30 cm	5.12	0.22	14.93	9.54	8.33	19.33	36.86
30 - 60 cm	3.48	0.08	14.49	4.79	8.16	8.83	17.63
60 - 90 cm	3.10	0.03	18.60	3.25	7.37	5.55	13.09
Lichte klei (20 - 30 % klei)							
0 - 30 cm	10.40	0.33	33.70	13.05	17.81	23.54	55.69
30 - 60 cm	7.60	0.16	28.88	9.12	16.19	13.90	35.72
60 - 90 cm	6.21	0.10	28.30	8.26	16.32	11.42	30.36
Zware klei (> 30 % klei)							
0 - 30 cm	11.32	0.27	43.95	21.42	26.18	63.48	62.45
30 - 60 cm	10.42	0.13	48.87	13.08	29.49	26.14	48.22
60 - 90 cm	7.47	0.07	26.03	4.85	14.96	16.43	22.96

Tabel 2.7 Gemiddelde reactieve metaalgehalten in boven en ondergrond: 0.43 N HNO<sub>3</sub> (mg kg<sup>-1</sup>)

Element:	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Zand (< 2 % klei)							
0 - 30 cm	0.49	0.12	0.75	4.71	0.57	11.91	9.85
30 - 60 cm	0.22	0.04	0.61	1.88	0.24	2.60	3.38
60 - 90 cm	0.13	0.01	0.33	0.35	0.11	1.00	1.02
Lemig zand (2 - 10 % klei)							
0 - 30 cm	3.08	0.20	1.09	5.31	1.35	10.86	13.51
30 - 60 cm	1.03	0.06	0.64	2.19	0.94	4.56	4.71
60 - 90 cm	0.23	0.01	0.34	0.67	0.32	1.18	1.16
zavel (10 - 20 % klei)							
0 - 30 cm	2.04	0.18	1.14	6.03	1.72	13.93	17.74
30 - 60 cm	0.68	0.05	0.87	2.94	1.28	4.40	4.59
60 - 90 cm	0.41	0.01	1.52	1.13	0.92	1.93	2.03
Lichte klei (20 - 30 % klei)							
0 - 30 cm	2.58	0.29	2.17	7.18	3.68	16.38	22.09
30 - 60 cm	1.39	0.13	1.91	4.49	3.08	8.21	11.68
60 - 90 cm	0.60	0.06	1.70	2.34	1.91	5.61	8.89
Zware klei (> 30 % klei)							
0 - 30 cm	2.08	0.26	2.08	11.66	6.36	47.07	22.28
30 - 60 cm	1.21	0.09	2.32	5.98	4.96	8.54	11.92
60 - 90 cm	0.95	0.02	1.42	1.82	3.80	3.45	6.20

Tabel 2.8 De verhouding tussen het gehalte extraheerbaar in 0.43 N HNO<sub>3</sub> en Aqua Regia per textuurklasse en diepte (waarde vermenigvuldigd met 100)

Element:	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Zand (< 2 % klei)							
0 - 30 cm	16	75	10	62	22	73	60
30 - 60 cm	9	50	9	60	6	44	29
60 - 90 cm	7	50	5	28	3	27	13
Lemig zand (2 - 10 % klei)							
0 - 30 cm	55	87	10	66	31	81	56
30 - 60 cm	32	60	8	64	21	65	42
60 - 90 cm	15	33	5	45	11	39	19
zavel (10 - 20 % klei)							
0 - 30 cm	40	82	8	63	21	72	48
30 - 60 cm	20	63	6	61	16	50	26
60 - 90 cm	13	33	8	35	12	35	16
Lichte klei (20 - 30 % klei)							
0 - 30 cm	25	88	6	55	21	70	40
30 - 60 cm	18	81	7	49	19	59	33
60 - 90 cm	10	60	6	28	12	49	29
Zware klei (> 30 % klei)							
0 - 30 cm	18	96	5	54	24	74	36
30 - 60 cm	12	69	5	46	17	33	25
60 - 90 cm	13	29	5	38	25	21	27

Tabel 2.9 Totaalgehalten (Aqua Regia) in de bovengrond per landgebruiktype (Bodemmeetnet RIVM, in mg kg<sup>-1</sup>)

	Metaal				Metaal			
	Zn	Cd	Pb	Cu	Zn	Cd	Pb	Cu
<i>Bos op zand</i>					<i>Akkerbouw op zand</i>			
Min	37.5	0.3	32.5	10.2	15.9	0.11	8.6	8.0
Max	317.7	3.2	220.5	34.6	73.4	0.43	65.2	42.0
Avg	92.1	1.1	90.0	16.9	31.6	0.27	32.4	19.5
Med	68.5	0.8	84.2	16.0	27.9	0.28	34.4	17.7
<i>Gras (melkvee extensief) op zand</i>					<i>Gras (melkvee intensief) op zand</i>			
Min	13.5	0.09	7.1	5.9	17.8	0.14	10.2	8.7
Max	52.2	0.71	64.5	22.8	64.6	0.47	23.0	14.8
Avg	28.6	0.28	17.3	11.6	31.9	0.29	15.4	11.3
Med	26.9	0.26	14.2	10.6	32.1	0.26	14.5	11.4
<i>Gras (varkens intensief) op zand</i>					<i>Gras (melkvee intensief) op veen</i>			
Min	18.6	0.20	9.8	9.3	31.7	0.33	16.9	7.4
Max	53.1	0.97	32.2	22.5	233.6	1.06	328.7	109.6
Avg	30.4	0.42	16.1	14.4	126.2	0.73	92.2	42.1
Med	28.9	0.37	14.9	13.3	148.3	0.76	62.3	48.2
<i>Akkerbouw op klei</i>					<i>Gras (veeteelt) op klei</i>			
Min	35.2	0.19	13.0	7.1	57.1	0.34	26.0	14.6
Max	377.6	1.26	104.8	48.6	398.2	2.31	144.4	43.8
Avg	71.1	0.31	22.1	14.2	158.8	0.71	55.6	32.1
Med	51.8	0.26	16.5	11.9	138.2	0.56	46.8	32.5

Tabel 2.10 Gemeten (gemiddelde) gehalte in de bovengrond (Aqua Regia in mg kg<sup>-1</sup>) in zandgebieden van Gelderland (Japenga et al. 2000)

Regio	Landgebruik	Metaal			
		Cu	Zn	Cd	Pb
Westelijk zandgebied	Gras	13.4	38.1	0.27	14.3
Centraal zandgebied	"	10.3	31.0	0.28	16.1
Oostelijk zandgebied	"	12.5	37.4	0.31	15.0
Overig	"	15.5	42.7	0.29	14.8
Westelijk zandgebied	Naaldbos	3.7	9.9	0.06	14.9
Centraal zandgebied	"	2.6	7.2	0.08	11.8
Oostelijk zandgebied	"	3.4	11.0	0.05	18.8
Overig	"	3.0	7.0	0.05	12.2
Westelijk zandgebied	Akker	16.8	26.9	0.19	22.6
Centraal zandgebied	"	9.7	19.3	0.18	23.5
Oostelijk zandgebied	"	15.5	31.3	0.27	23.1
Overig	"	14.4	33.3	0.21	24.0

## 2.4.2 Koppeling met overige bodemchemische eigenschappen

De in tabel 2.5 vermelde eenheden zijn uiteindelijk gebruikt bij de modelberekeningen. Per bodemtype is in STONE reeds een schematisatie uitgewerkt wat betreft textuur, organische stof gehalte en pH KCl. Hierbij is echter geen onderscheid gemaakt naar grondwaterklasse. In bijlage 1 staat een overzicht van de algemene bodemeigenschappen zoals die in de simulatie gebruikt zijn. In deze tabel staan een aantal bodemeigenschappen die niet direct voorhanden waren maar die via regressie zijn afgeleid uit andere bodemkenmerken. Omdat de modelsimulatie werkt met pH CaCl<sub>2</sub> (0.01 M) als verondersteld kenmerkend voor de pH van de bodemoplossing en deze pH niet beschikbaar was, is deze berekend m.b.v. pH KCl omdat tussen beide een goed verband gevonden is. Op basis van data in een database waarin voor een groot aantal gronden zowel pH KCl als pH CaCl<sub>2</sub> is opgenomen, is de volgende relatie afgeleid:

$$\text{pH CaCl}_2 = -0.37 + 1.13 \text{ pH KCl} \quad R^2 = 0.90, \text{ se}(Y) = 0.05$$

Ook voor opgelost organisch koolstof (DOC) is een dergelijke procedure gevolgd. Hier zijn twee verschillende vergelijkingen gebruikt die zijn afgeleid uit verschillende databases (hetgeen de verschillen in R<sup>2</sup> verklaart):

$$\log(\text{DOC}) = 2.04 + 0.73 \log(\text{OM}) - 0.17 \text{ pH CaCl}_2 \quad [3]$$

$$R^2 = 0.68, \text{ se}(Y) = 0.31$$

$$\log(\text{DOC}) = 2.51 + 0.88 \log(\text{OM}) + 1.39 \log(\text{SOL}) - 0.07 \text{ pH}_{\text{CaCl}_2} - 0.30 \log(\text{Fe} + \text{Al}) \quad [4]$$

$$R^2 = 0.56, \text{ se}(Y) = 0.37$$

Met (OM) = organische stof gehalte (%), (SOL) = verhouding vast : vloeibaar (m:m) in schudexperimenten, en (Fe + Al) = oxalaat extraheerbaar Fe en Al in mmol kg<sup>-1</sup>.

Zoals te zien in bijlage 1 is de schatting voor DOC in de minerale bodems (dwz alle bodems behalve de veengronden) van dezelfde orde van grootte. Voor veenbodems geeft verg. 4 waarbij ook het Fe-Al-ox gehalte wordt meegenomen een beduidend lagere, maar meer realistische schatting dan verg. 3 op basis van pH en organische stof alleen (overschatting). Voor veenbodems is dan ook gebruik gemaakt van verg. 4 terwijl voor de minerale bodems het gemiddelde gebruikt is van beide vergelijkingen.

In bijlage 1 is ook de indeling in bodemhorizonten gegeven waarbij elk profiel is ingedeeld in segmenten van 5 cm. De diepte van elke laag is aangegeven met twee segment nummers die corresponderen met begin en einddiepte.

### **2.4.3 Modelaannames en beperkingen**

Ofschoon de hier gepresenteerde methodologie van berekenen van concentraties in bodemvocht en bovenste grondwater meer inzicht geeft in de variatie die optreedt als gevolg van variatie in bodemeigenschappen en hydrologie, moet er op gewezen worden dat deze methodiek verder verbeterd moet worden. Een aantal belangrijke tekortkomingen die in een volgende fase verder uitgewerkt worden zijn onder andere:

1. *Effecten van de gekozen tijdstappen.*

Op dit moment wordt gerekend met een enkele tijdstap over een jaar. Er is dus geen rekening gehouden met seizoensinvloeden op de concentratie en waterfluxen. Ook effecten van bijvoorbeeld mestgiften door het seizoen hebben een effect op de concentratie van metalen in het bodemvocht, maar ook die is nu niet meegenomen. In eerste instantie zal daarom een indeling naar seizoenen gemaakt worden, waardoor de verschillen in de flux tussen bijvoorbeeld het herfst en winterseizoen (verwachte hogere laterale flux) tot uitdrukking zullen komen.

2. *Verschillen van bijdragen tussen primaire, secundaire en tertiaire stelsels.*

Op dit moment wordt de hele flux die uit STONE komt (totale flux over 0 tot 500 cm) gebruikt om de uitstroom van metalen te berekenen. De totale flux kan echter onderverdeeld worden in de primaire, secundaire en tertiaire flux die verschillende verblijftijden en stroombanen kennen, variërend van heel kort in de tertiaire stromingsbaan (naar bijvoorbeeld greppels) tot langer in de primaire flux richting beken. Hier is nu verondersteld dat over een jaar gezien (en in een evenwichtssituatie) deze hele flux (som van primaire, secundaire en tertiaire flux) het oppervlaktewater bereikt. Dit hoeft voor een gegeven jaar echter niet zo te zijn, want een deel van de primaire flux kan er langer over doen voordat deze het oppervlaktewater bereikt (langere verblijftijd). Echter, over meerdere jaren bezien zal deze uiteindelijk wel het oppervlaktewater bereiken en zal de orde van grootte van de totale flux die in een jaar het oppervlaktewater bereikt wel overeenkomen met de hier gebruikte fluxen. Wel zou het in dat geval kunnen zijn dat de condities die optreden in de stroombanen van de primaire flux zodanig zijn dat een deel van de metalen als



gevolg van adsorptie en, in natte systemen, reductie het oppervlaktewater niet meer bereikt. In het vervolgdeel van de studie zal daarom gekeken worden hoe groot de bijdrage van de verschillende fluxen is aan de berekende belasting van het oppervlaktewater.

### 3. *Effecten van opschaling*

De hier gebruikte keuze van indeling in bodemtype - landgebruikcombinaties is mede gebaseerd op de hoeveelheid beschikbare data. Een meer gedetailleerde indeling van met name de ondergrond is niet verantwoord gezien de beperkte hoeveelheid informatie van zowel bodemeigenschappen als metaalgehalten. Een uitbreiding van de indeling waarbij met name verschillen in de bovengrond en landgebruik meegenomen worden is wel mogelijk omdat met name voor de metaalgehalten en bodemeigenschappen voor de 0 tot 30 cm laag veel meer bekend is. Met name in die systemen waar de laterale stroming belangrijk is (natte systemen) zal een verfijning nodig zijn omdat verschillen in gehalten en bodemeigenschappen in de bovengrond een direct effect hebben op de orde van grootte van de laterale flux. In drogere systemen zal het voor de berekende laterale flux niet -of veel minder- doorwerken in de uitkomst omdat de gehalten in de bovengrond slechts in geringe mate bijdragen aan de uiteindelijke laterale flux (alleen laterale stroming via de ondergrond is van belang).

### 4. *Gebruik van partitierelaties en andere schatters*

Ofschoon het gebruik van partitierelaties een bruikbaar concept is voor de berekening van de concentratie in bodemvocht, zal in het vervolg meer nadruk gelegd worden op bandbreedtes in de berekende concentraties die kunnen optreden als gevolg van modelonzekerheden. In paragraaf 3.4 zal in beperkte mate ingegaan worden op ranges in modelberekende concentraties die kunnen optreden als gevolg van variatie in bodemeigenschappen. Naast de effecten van variatie in invoer spelen ook effecten van de modelonzekerheid zelf een rol. Met behulp van een uitgebreide onzekerheidsanalyse zal in de vervolgfase ingegaan worden op de bijdrage hiervan op de berekende belasting van het oppervlaktewater.



### **3 Modevaluatie en vergelijking modelberekeningen - data**

#### **3.1 Berekende gehalten in lateraal en verticaal uittredend water.**

In tabel 3.1 staan de resultaten van de berekeningen van de fluxgewogen gemiddelde metaalconcentraties in de laterale en verticale fluxen. De concentratie in de laterale flux is het gewogen gemiddelde dat berekend is uit alle laterale fluxen van de hier onderscheiden lagen (waarbij rekening is gehouden met de hoeveelheid water die uit elke laag stroomt, het is dus niet het gemiddelde van de berekende concentraties alleen). Het aandeel van de individuele lagen is hier niet weergegeven.

De concentratie in de verticale flux is de berekende concentratie op 5 meter (bij segment 100), hetgeen ruwweg overeenkomt met de concentratie die onder veldomstandigheden in het eerste watervoerende pakket aangetroffen wordt (ondiep grondwater, niet te verwarren met freatisch grondwater dat veelal minder diep begint).

##### **3.1.1 Gehalten in de laterale stroming**

De berekende gehalten in de laterale stroming zijn vaak (veel) hoger dan die in de verticale stroming. Dat komt in de eerste plaats omdat de gehalten aan zware metalen in de hier opgenomen profielen vrijwel altijd afnemen met de diepte. Zoals reeds werd opgemerkt in paragraaf 2.2. neemt de hoeveelheid potentieel beschikbare metalen (zoals bepaald met 0.43 N HNO<sub>3</sub>) extra af met de diepte (ten opzichte van de totale hoeveelheid als geëxtraheerd met Aqua Regia) vanwege de afnemende bijdrage van de belasting (mest, atmosfeer) met de diepte.

Doordat de gehalten in het lateraal uittredende water in hoofdzaak gerelateerd zijn aan de metaalgehalten in bovenste lagen van het profiel en deze sterker uiteen lopen dan die in de ondergrond (zie ook tabellen 2.6 - 2.8) zijn ook de verschillen tussen de verschillende onderscheiden eenheden groter dan in het verticaal uittredende water. Zo loopt het gehalte aan Zink in zandgronden uiteen van minder dan 100 µg L<sup>-1</sup> tot meer dan 1300 (factor 20) terwijl de range in het verticaal uittredende water loopt van ruim 20 tot 170 µg L<sup>-1</sup> (factor 7.5).

Wel moet bedacht worden dat de hoge berekende gehalten in het lateraal uittredende water niet automatisch leiden tot grote laterale verliezen in de desbetreffende bodemeenheid. Zo bedraagt de Cd concentratie in de stuifzand grond en de podzol onder akkerbouw weliswaar bijna 6 µg L<sup>-1</sup>, maar is de uiteindelijke laterale flux aan Cd vrijwel 0 omdat er nauwelijks laterale stroming in deze (droge) zandgronden optreedt. Een lagere Cd concentratie zoals bijvoorbeeld in de meeste veengronden (0.1 tot 0.5 µg L<sup>-1</sup>) resulteert derhalve uiteindelijk in een veel hogere laterale flux vanwege het grotere watervolume dat via deze weg het profiel verlaat.

De hier gerapporteerde fluxgewogen gehalten in de laterale stroming komen overeen met eerder gerapporteerde gehalten aan Cd, Zn en Cu in bodemvocht (Römken en Salomons, 1998 zie ook paragraaf 3.2) dat verkregen was door centrifugatie van bodemmonsters. De soms opvallend hoge concentraties aan Cd en Zn en in mindere mate Ni en Cu in de zandgronden zijn daarbij zowel in de metingen als in de modelvoorspellingen het gevolg van de relatief lage bodem pH.

Tabel 3. Overzicht van berekende fluxgewogen concentraties aan Cd, Zn, Ni, Pb en Cu in lateraal en verticaal uitspoelend water (in  $\mu\text{g L}^{-1}$ )

Bodemtype	Landgebruik	Cd		Zn		Ni	
		Lateraal	Verticaal	Lateraal	Verticaal	Lateraal	Verticaal
koopveen	Gras	0.23	0.00	170.0	5.0	7.20	0.03
kpveenzd	bouwland	0.12	0.05	48.0	13.5	3.33	0.86
klveenol	gras	0.25	0.00	86.7	20.9	3.58	0.23
meerveen	bouwland	0.45	0.42	107.0	101.0	3.25	2.79
stuifznd	natuur	4.55	0.96	190.0	174.0	23.20	7.88
podzolZ8	gras	0.59	0.56	66.5	56.4	4.16	1.60
podzolZ8	maïs	5.80	1.43	942.0	94.9	92.80	1.60
podzolZ8	bouwland	1.43	1.43	95.1	94.9	0.30	0.28
podzolZ8	natuur	0.52	0.26	183.0	23.2	7.49	0.08
enkeerdz	gras	1.29	1.27	80.5	48.3	4.85	1.38
enkeerdz	maïs	4.87	1.27	838.0	48.3	151.00	0.24
podzlZ13	natuur	1.72	0.32	1320.0	69.1	58.60	0.10
zavel_M8	bouwland	0.02	0.01	2.3	1.8	0.48	0.41
lichklei	bouwland	0.01	0.01	3.2	3.0	0.82	0.81
zwarklei	gras	0.02	0.00	14.7	2.6	3.28	0.37
kleizand	bouwland	0.01	0.01	0.2	0.2	0.01	0.01

Bodemtype	Landgebruik	Cu		Pb	
		Lateraal	Verticaal	Lateraal	Verticaal
koopveen	Gras	22.80	0.17	6.16	0.07
kpveenzd	bouwland	3.84	0.48	1.82	0.82
klveenol	gras	8.61	1.15	4.07	0.33
meerveen	bouwland	1.69	1.23	3.73	3.37
stuifznd	natuur	7.10	2.28	16.10	6.61
podzolZ8	gras	1.28	1.00	3.13	2.54
podzolZ8	maïs	105.00	2.03	29.00	2.76
podzolZ8	bouwland	2.03	2.03	2.76	2.76
podzolZ8	natuur	10.90	0.30	4.64	0.64
Enkeerdz	gras	1.89	0.93	1.75	1.20
Enkeerdz	maïs	53.40	0.93	31.90	3.19
podzlZ13	natuur	46.80	1.18	11.60	1.36
zavel_M8	bouwland	0.65	0.50	0.49	0.30
Lichklei	bouwland	1.33	0.90	0.93	0.86
Zwarklei	gras	5.74	3.26	2.70	0.94
Kleizand	bouwland	0.09	0.08	0.07	0.06

### **3.1.2 Gehalten in verticale stroming**

Vanwege de veelal lagere gehalten in de ondergrond, in combinatie met soms een hogere pH in de ondergrond, zijn de model berekeningen van de gehalten in de verticaal uittredende fluxen voor vrijwel alle elementen laag. Desalniettemin is de spreiding in bijvoorbeeld de Cd concentraties in overeenkomst met de verwachte verschillen tussen zand-, veen- en kleigronden. De hier gepresenteerde gegevens hebben betrekking op de concentratie in een gegeven jaar. Er is daarom weinig of geen invloed van de samenstelling van de bovengrond op de concentraties in het bodemwater in de ondergrond. Wanneer echter meerjarige simulaties worden uitgevoerd dan zal er op den duur wel degelijk een invloed merkbaar worden van de verschillen in de gehalten in de bovengrond (en landgebruik) op de concentraties in de ondergrond.

Ook voor de berekende concentraties in de verticaal uittredende fluxen geldt dat die in zandgronden veelal hoger zijn dan die in veen- en kleigronden. Binnen de verschillende vormen van landgebruik op zandgronden (zie tabel 3.1) vallen vooral de hoge concentraties in landbouwgronden op in zowel de podzolen als de enkeerdgronden (incl. de maïs percelen). Dit is een gevolg van de combinatie van verhoogde gehalten als gevolg van mestgift en (met name) de licht zure pH. Daarnaast komt het effect van de zeer lage pH ook naar voren in de hoge berekende concentraties in de zandgronden met natuur (stuifzand en podzolZ13).

### **3.2 Overzicht van gebruikte datasets**

Door verschillende provincies (o.a. Drenthe, Gelderland, Zuid-Holland) zijn op dit moment meetnetten ingericht om de gehalten aan zware metalen in het grondwater te monitoren. In veel gevallen betreft dit echter grondwater putten die dieper (>10 meter min maaiveld) zijn dan de diepte waarop de modelvoorspelling die hier gepresenteerd wordt betrekking heeft.

Daarnaast komt het regelmatig voor dat de gemeten gehalten twijfelachtig zijn in verband met verontreiniging via bodem en/of filter. Bovendien is de regelmaat waarmee in de meeste gevallen gemeten wordt te laag om in te kunnen schatten of de waarde van een meting al dan niet als 'uitschieter' betiteld kan worden.

Wat betreft het ondiepe grondwater (< 5 m -mv) zijn er twee meetnetten die echter wel voldoende gegevens bevatten om in ieder geval voor een deel van de bodemeenheden de vergelijking te kunnen maken tussen modelberekeningen en veldgegevens. Het betreft hier de gegevens van:

1. het bodemmeetnet van het RIVM (Groot et al., 1996 - 1998, 2000);
2. een onderzoek naar de kwaliteit en samenstelling van het ondiepe grondwater in de Provincie Gelderland (Japenga et al., 2000). Een beperking van deze laatste dataset is echter wel dat deze voornamelijk betrekking heeft op zand grond.

Aanvullende gegevens van dieper grondwater zijn gerapporteerd in een landelijk onderzoek door van Drecht et al. (1996) waarbij onderscheid is gemaakt tussen het

grondwater van 5 tot 15 meter -mv (ondiep grondwater) en dat van 15 tot 30 meter -mv (diep grondwater).

Tenslotte wordt een beknopt overzicht gegeven van de kwaliteit van de belangrijkste oppervlaktewateren in 1998 (CIW, 2001). Hierbij moet wel worden bedacht dat de samenstelling van deze wateren zeker niet alleen door regionale factoren bepaald wordt, maar ook door (inter)nationale.

### **3.2.1 Metingen in het grondwater**

Een overzicht van de resultaten van metaalconcentraties in het grondwater in het Bodemmeetnet van het RIVM en het grondwatermeetnet van Gelderland is gegeven in resp. Tabel 3.2 en Tabel 3.3.

Uit de resultaten van de twee meetnetten blijkt dat in het algemeen dat de gehalten in het Gelders meetnet hoger zijn dan die in het Bodemmeetnet van het RIVM. De voornaamste reden hiervoor is waarschijnlijk het verschil in bemonsteringstechniek. In geval van het Bodemmeetnet worden filters geplaatst van waaruit monsters van het grondwater op een diepte van 0.5 meter onder de heersende grondwaterspiegel genomen worden. Bij de bemonstering van het Gelders meetnet worden buizen geslagen die na een bepaalde spoelperiode direct bemonsterd worden. Wanneer de gevonden gehalten vergeleken worden met de huidige streefwaarden (tabel 3.4) voor het ondiep grondwater dan blijken deze voor de metalen Zn en Cd en in mindere mate Ni en Cu regelmatig boven de streefwaarde te liggen. Onder bos en natuur wordt bovendien regelmatig de interventiewaarde voor Cd en Zn overschreden als gevolg van de lage pH en de daaruit voortvloeiende hoge mobiliteit van de genoemde elementen.

Deze verschillen illustreren al dat het moeilijk is om, op basis van verschillende meetnetten waarbij monsters op vrijwel gelijke diepten genomen worden maar met verschillende methoden, een globaal beeld te schetsen van de gehalten in het grondwater. Wanneer er ook nog verschillen in bemonsteringsdiepten zijn dan zal dat leiden tot nog grotere verschillen. Zo laten de metingen in het diepere grondwater (van Drecht et al., 1996) zien dat er in de zandgebieden een duidelijke afname optreedt van de gehalten met de diepte wanneer het grondwater van 5 - 15 meter -mv vergeleken wordt met dat van 15 - 30 meter -mv. Met name voor elementen als Cd en Zn is de afname drastisch.

Tabel 3.2 Overzicht van gemeten gehalten aan Cd, Cu, Pb, Ni en Zn in grondwater (RIVM, n=20 voor elke vorm van landgebruik, Groot et al., 1996 - 1998, 2000)

	DOC mg C L <sup>-1</sup>	Metaal				
		Zn µg L <sup>-1</sup>	Cd µg L <sup>-1</sup>	Pb µg L <sup>-1</sup>	Cu µg L <sup>-1</sup>	Ni µg L <sup>-1</sup>
<i>Bos op zand</i>						
Min	n.a.	88	0.28	0.47	1.27	3.08
Max	n.a.	2,462	23.39	4.70	34.45	260.14
Avg	n.a.	419	2.78	1.65	7.99	26.64
Med	n.a.	282	0.70	1.10	5.08	9.99
<i>Akkerbouw op zand</i>						
min	14	13	0.10	1.28	7.62	2.52
max	77	98	0.49	3.34	24.77	36.98
avg	47	41	0.25	2.33	13.64	11.99
med	50	33	0.25	2.28	12.07	7.28
<i>Gras (melkvee extensief) op zand</i>						
min	7	24	0.06	0.50	0.69	n.a.
max	59	306	1.70	4.75	21.75	n.a.
avg	20	110	0.59	1.57	9.74	n.a.
med	19	97	0.45	1.50	10.00	n.a.
<i>Gras (melkvee intensief) op zand</i>						
min	7	5	0.05	0.50	5.38	n.a.
max	61	260	1.55	7.50	16.25	n.a.
avg	22	98	0.69	2.20	10.23	n.a.
med	17	93	0.68	1.56	10.13	n.a.
<i>Gras (varkens intensief) op zand</i>						
min	n.a.	23	0.10	0.57	3.65	1.89
max	n.a.	242	1.43	6.21	28.42	105.92
avg	n.a.	82	0.48	1.98	13.80	16.31
med	n.a.	64	0.38	1.58	11.35	10.57
<i>Gras (melkvee intensief) op veen</i>						
min	n.a.	13	0.01	1.51	0.67	1.58
max	n.a.	78	0.09	22.15	89.55	10.33
avg	n.a.	34	0.04	7.39	14.59	5.54
med	n.a.	33	0.03	5.46	6.14	4.69
<i>Akkerbouw op klei</i>						
min	6	<6.5	<0.06	<0.2	<0.7	0.8
max	22	183.1	1.25	12.8	17.2	159.3
avg	n.a.	15.3	0.10	2.15	3.97	7.2
med	7					
<i>Melkvee op klei</i>						
min	2	<6.5	<0.06	<0.2	<0.7	1.0
max	27	45.8	0.37	4.1	44.8	21.4
avg	n.a.	14.1	0.07	0.86	7.07	3.9
med	12					

Tabel 3.3 Gemeten (gemiddelde) gehalte in bovenste grondwater en/of bodemvocht (in  $\text{mg L}^{-1}$ ) in zandgebieden van Gelderland (Japenga et al. 2000)

Regio	Landgebruik	Metaal			
		Cu	Zn	Cd	Pb
Westelijk zandgebied	Gras	10.1	18	0.2	1.3
Centraal zandgebied	"	5.5	32	0.3	1.6
Oostelijk zandgebied	"	12.9	36	0.5	1.3
Overig	"	9.6	19	0.1	1.3
Westelijk zandgebied	Naaldbos	12.3	158	2.3	18
Centraal zandgebied	"	9.2	138	2.2	10.1
Oostelijk zandgebied	"	15.1	413	5.2	13.3
Overig	"	11.0	250	3.9	15.2
Westelijk zandgebied	Akker	32.3	165	1.1	9.7
Centraal zandgebied	"	23.9	150	1.3	9.4
Oostelijk zandgebied	"	28.9	124	1.6	10.2
Overig	"	26.1	197	1.7	9.2

Tabel 3.4 Criteria voor de beoordeling van de kwaliteit van grond- en oppervlaktewater

Systeem	Eis	Pakket	Metaal (Concentratie in $\mu\text{g L}^{-1}$ )				
			Zn	Cu	Cd	Pb	Ni
Grondwater	Streefwaarde	Ondiep	65	15	0.4	15	15
		Diep	24	1.3	0.06	1.7	2.1
	Interventie waarde	-	720	190	12	530	210
Oppervlakte water	MTR	-	40	3.8	2	220	6.3
	Streefwaarde	-	12	1.1	0.4	5.3	4.1

### 3.3 Overeenkomsten en verschillen tussen metingen in grond- en oppervlaktewater en modelberekeningen

#### 3.3.1 Overeenkomsten en verschillen tussen grondwatermetingen en modelberekeningen

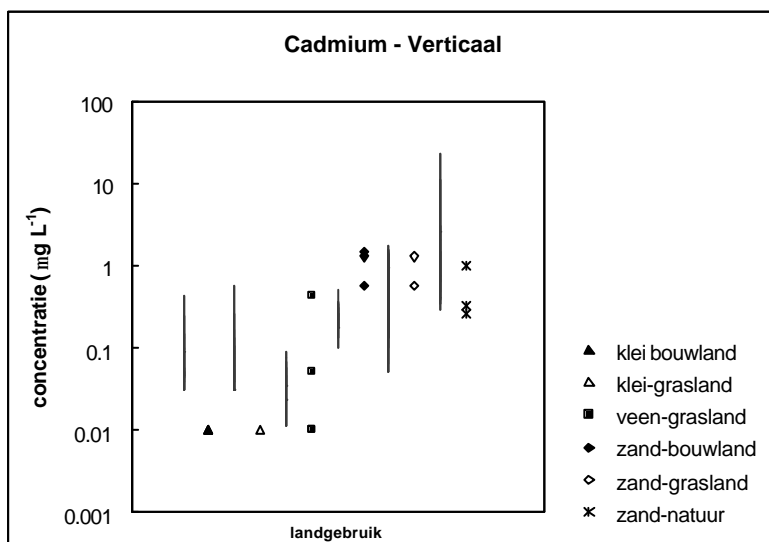
De overeenkomst tussen de -in deze studie- berekende concentraties aan Cd in zandgronden die variëren van  $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$  en  $1.5 \mu\text{g L}^{-1}$  en de in het veld gemeten gehalten in de laag van 5 tot 15 meter die variëren van  $0.4$  tot  $1.7 \mu\text{g L}^{-1}$  is in de meeste gevallen goed te nemen. Ook voor koper waarvan de gemeten concentraties in beide meetnetten (Bodemmeetnet en Gelderland) hoger zijn dan de berekende concentraties in de verticale flux, komen de gemeten gehalten in de laag van 5 - 15 meter -mv goed overeen met de berekende waarden. Die variëren van  $1$  à  $2 \mu\text{g L}^{-1}$  in het grondwater onder de meeste bodemtypen. Alleen voor de gehalten in zandgronden worden lagere koperconcentraties voorspeld dan in het diepere grondwater gemeten worden (meetnet:  $3$  à  $6 \mu\text{g L}^{-1}$ ; model  $1$  à  $2 \mu\text{g L}^{-1}$ ).



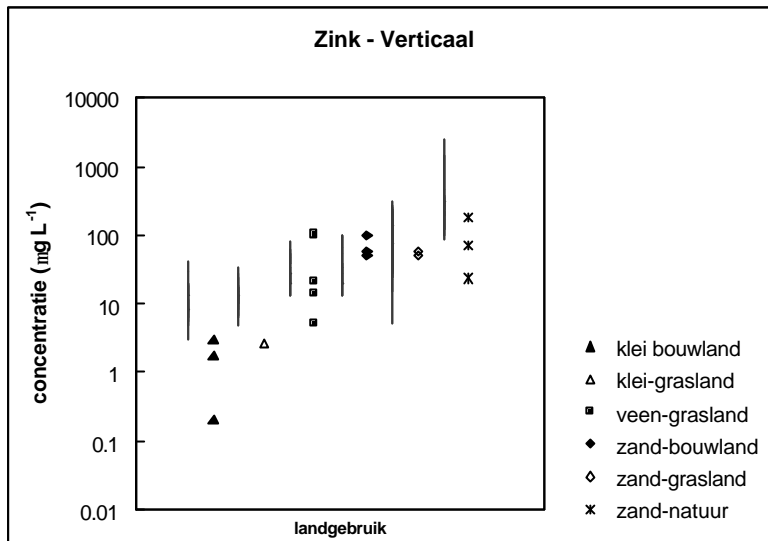
Ondanks de hier geschetste verschillen tussen de meetnetten en het effect van diepte blijkt dat er voor de meeste metalen een redelijk tot goede overeenkomst is tussen de gemeten range in het bovenste grondwater zoals bepaald in het Bodemmeetnet en het Gelders meetnet en de gehalten die door het model voorspeld worden. Zo varieert de mediane waarde voor zink in het Bodemmeetnet in de zandgronden van 33 tot 100  $\mu\text{g L}^{-1}$  terwijl de berekende range in de zandgronden varieert van 48 tot 100  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Voor Koper daarentegen is de berekende waarde in de verticale flux (0.3 à 2  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) veelal lager dan de gemeten gehalten (rond de 10  $\mu\text{g L}^{-1}$ ).

Dit geeft aan dat voor de meer mobiele elementen Cd en Zn de afname in de concentratie tot op een diepte van 5 meter nog niet zodanig is dat de gehalten sterk afwijken van de gemeten gehalten net onder grondwaterspiegel (RIVM meetnet). Voor elementen als Cu en Pb is de afname duidelijk sterker en zijn de meeste model berekende concentraties lager dan die welke gemeten worden in de beide meetnetten. Daar staat weer tegenover dat de gehalten in het diepere grondwater (5 - 15 meter) wel weer goed in overeenstemming zijn met de hier berekende waarden, zowel voor de relatief mobilere als minder mobiele elementen als Pb en Cu.

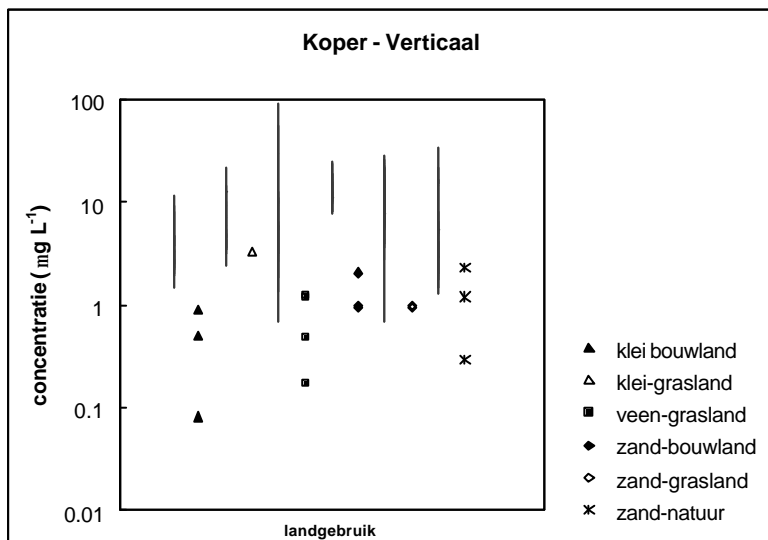
In de figuren 3.1 en 3.2 worden de verschillen en overeenkomsten tussen de berekende concentraties en de gehalten in het bodemmeetnet (ondiep grondwater) geïllustreerd. In figuur 3.1 a t/m d staan de berekende concentraties van de vier metalen (waarbij de range is gegeven per bodemtype en landgebruik) uitgezet tegen de range gemeten in het overeenkomstige bodemtype en landgebruik in het Bodemmeetnet van het RIVM. Daarbij is de range in het bodemmeetnet gegeven als verticale balk en de berekende gemiddelde concentraties in symboolvorm rechts van de bijbehorende balk.



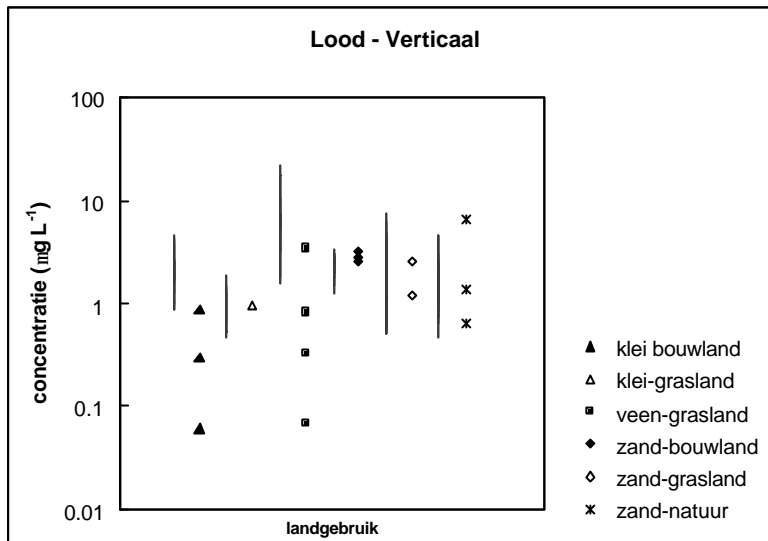
Figuur 3.1 a. Berekende concentraties aan Cadmium in verticale flow t.o.v. range in RIVM Bodemmeetnet (ondiepe grondwater)



Figuur 3.1 b. Berekende concentraties aan Zink in verticale flow t.o.v. range in RIVM Bodemmeetnet (ondiepe grondwater)

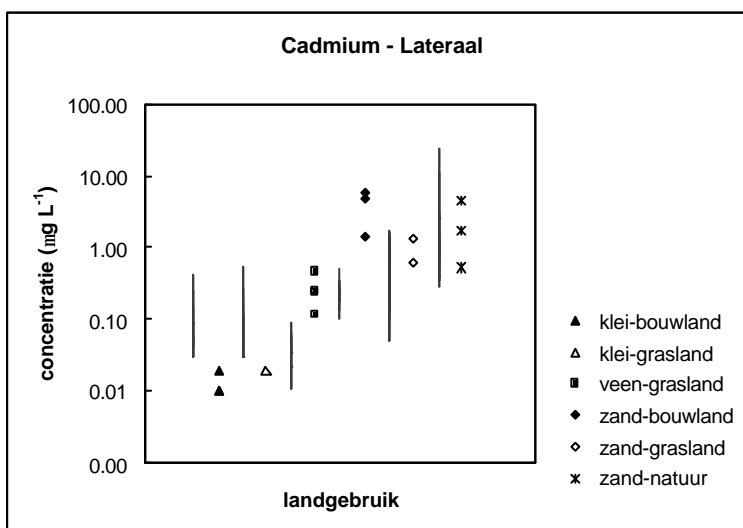


Figuur 3.1 c. Berekende concentraties aan Koper in verticale flow t.o.v. range in RIVM Bodemmeetnet (ondiepe grondwater)

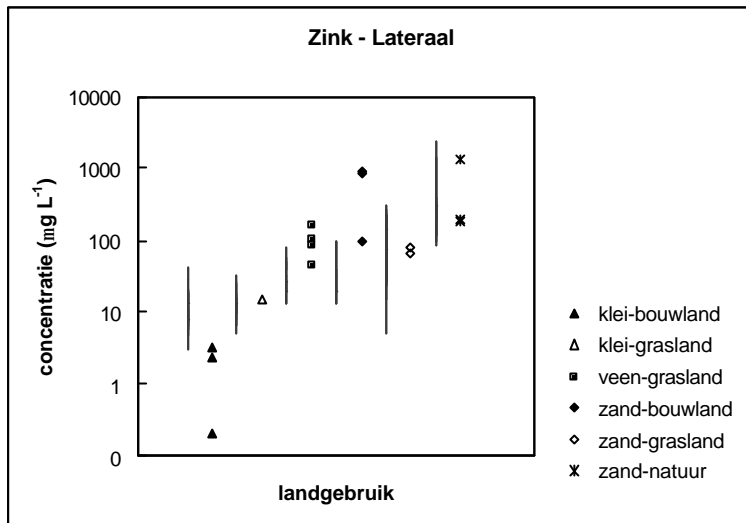


Figuur 3.1 d. Berekende concentraties aan Lood in verticale flow t.o.v. range in RIVM Bodemmeetnet (ondiepe grondwater)

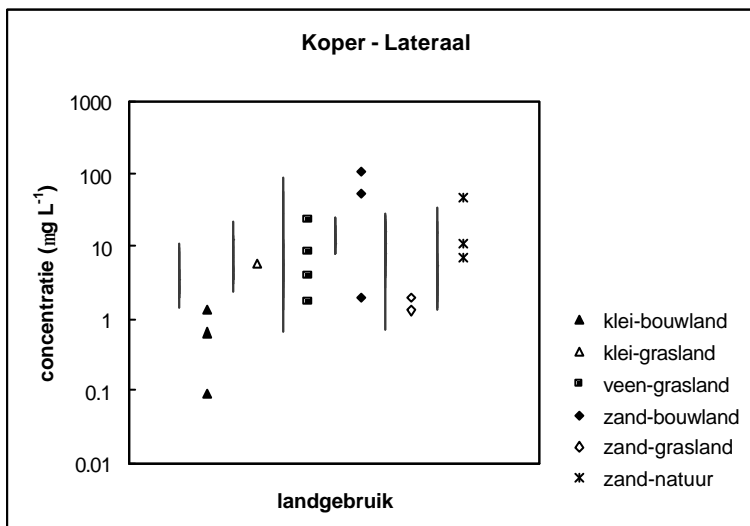
In figuur 3.2 is hetzelfde gedaan als in figuur 3.1 maar dan met de berekende concentraties in de laterale stroming.



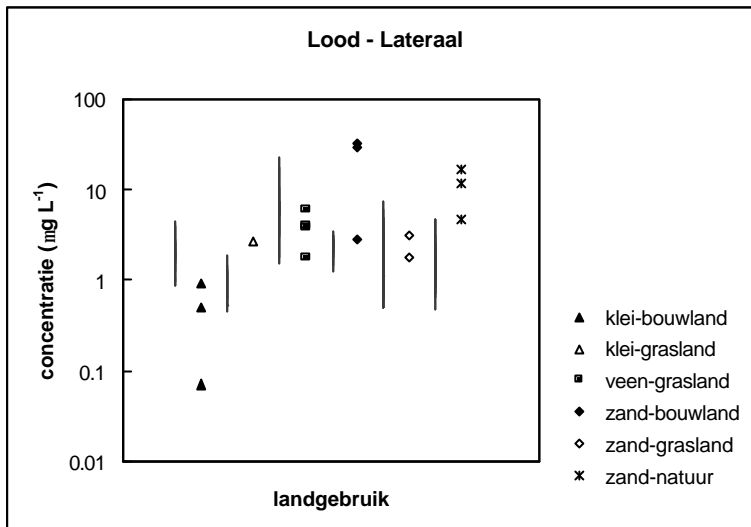
Figuur 3.2 a. Berekende concentraties aan Cadmium in laterale flow t.o.v. range in RIVM Bodemmeetnet (ondiepe grondwater)



Figuur 3.2 b. Berekende concentraties aan Zink in laterale flow t.o.v. range in RIVM Bodemmeetnet (ondiepe grondwater)



Figuur 3.2 c. Berekende concentraties aan Koper in laterale flow t.o.v. range in RIVM Bodemmeetnet (ondiepe grondwater)

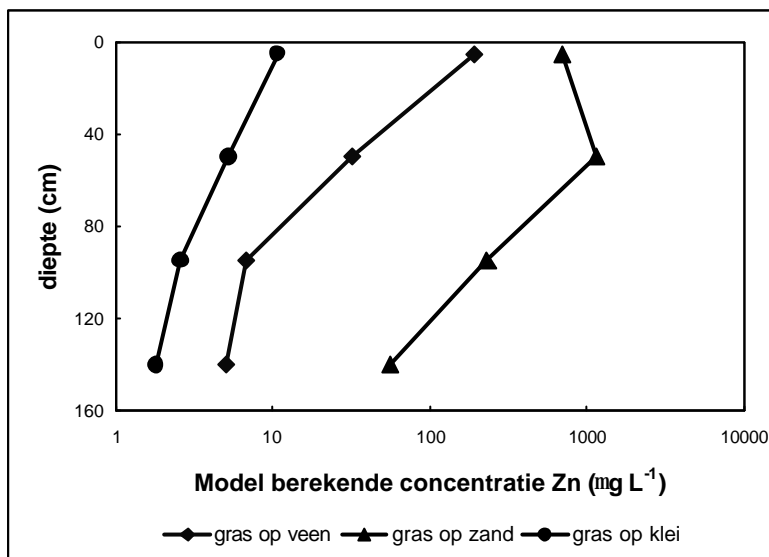


Figuur 3.2 d. Berekende concentraties aan Lood in laterale flow t.o.v. range in RIVM Bodemmeetnet (ondiepe grondwater)

De belangrijkste conclusies die ook uit de figuren 3.1 en 3.2 getrokken worden zijn:

1. de berekende concentraties in de verticale flow zijn veelal lager dan die in het meetnet. Dat is waarschijnlijk een gevolg van het feit dat de gemeten concentraties afkomstig zijn uit monsters die minder diep genomen worden dan 5 meter -mv (diepte van de berekende concentratie).
2. Ook de berekende concentraties in de laterale stroming in kleigronden zijn lager dan die in het Bodemmeetnet, hetgeen suggereert dat de bijdrage van de lagere gehalten in diepere segmenten (die ook bijdragen aan de gemiddelde concentratie in de laterale stroming) zwaar meetelt in de uiteindelijke berekening.

Dat de concentraties in het profiel met de diepte (in het model) sterk afnemen, wordt geïllustreerd in figuur 3.3. waar de verandering van de Zn concentratie als functie van de diepte in het profiel is weergegeven.



Figuur 3.3 Verloop van de concentratie aan zink in het bodemvocht met de diepte in drie bodemtype - landgebruikcombinaties

Bij de berekening van de laterale flux heeft de verdeling van de hoeveelheid water die uitstroomt uit welke segmenten daarom een grote invloed op de uiteindelijke gemiddelde berekende concentratie. Een betere vergelijking zou daarom ook verkregen kunnen worden wanneer precies bekend is op welke diepte de monsters uit het bodemmeetnet genomen zijn en voor die diepte per bodemtype de laterale concentratie te berekenen.

Aangezien het gehalte in de laterale flux in tabel 3.1 gepresenteerd wordt als gemiddelde over de laag 0 tot 5 meter (waarbij de flux wel berekend wordt uit de gehalten in elke laag apart), zijn de waarden niet direct vergelijkbaar met die in het diepere grondwater noch die in het bovenste grondwater. Voor veel elementen is te zien dat de uiteindelijk gevonden range in de laterale concentraties hoger ligt dan die in het bovenste grondwater hetgeen de directe invloed van de bovengrond weergeeft. Zoals reeds eerder opgemerkt zijn de gehalten in de verticale flux wel in overeenkomst met gemeten gehalten in de bodem (bodemvocht, Römken en Salomons, 1998).

### 3.3.2 Relatie met oppervlaktewater

Hoewel de hier berekende concentraties in de laterale stroming zeker niet rechtstreeks kunnen worden vergeleken met de gehalten in het oppervlaktewater, is in tabel 3.5 toch een overzicht gegeven van de 90 percentiel waarden van metaalconcentraties in het oppervlaktewater. Deze zijn afgeleid uit meetdata van alle meetpunten die in de (zoete) wateren aanwezig zijn. Hierbij moet worden bedacht dat hierin niet alleen de invloed van activiteiten in Nederland teruggevonden wordt maar ook van die in het buitenland. Zeker voor de grotere rivieren zoals Rijn en Maas geldt dat de gehalten sterk beïnvloed worden door industriële activiteiten in het buitenland (resp. Duitsland, België en Frankrijk)

Wanneer echter de 90 percentiel waarden vergeleken worden met de gemeten waarden in het bovenste grondwater en de berekende concentraties in de laterale flux (tabellen 3.2 en 3.3) dan blijkt dat voor de elementen Zn, Cd, Cu, Pb en Ni deze in dezelfde orde van grootte liggen. Dat feit alleen betekent echter nog niet dat de concentratie in het oppervlaktewater sterk beïnvloed wordt door het uittredend bodem- en grondwater, maar wel dat deze een wezenlijke bijdrage kan leveren.

Wanneer de concentratie in het oppervlaktewater namelijk veel hoger geweest zou zijn dan de gevonden en berekende concentraties in het bodemwater en grondwater dan is het niet aannemelijk dat de bijdrage van uittredend water in belangrijke mate bijdraagt aan de belasting van oppervlaktewater.

Omdat de gegevens in tabel 3.5 echter 90 percentiel waarden voor heel Neerland zijn, moet bedacht worden dat lokaal of regionaal het belang van het grondwater sterk kan verschillen (geen of juist dominante bijdrage).

*Tabel 3 90 percentielen van de concentratie in oppervlaktewater (in microgram per liter, CIW, 2001)*

Jaar	Zn	Cu	Cd	Pb	Ni
1990	91.8	7.3	0.4	8.5	6.0
1991	44.6	9.3	0.4	6.1	5.5
1992	68.7	8.8	0.3	6.8	6.0
1993	59.3	8.2	0.2	6.6	7.7
1994	46.6	6.2	0.2	6.9	5.8
1995	101.5	6.5	0.3	8.5	6.1
1996	69.9	6.4	0.2	6.7	8.1
1997	44.3	7.0	0.3	8.2	5.8
1998	38.7	8.8	1.1	6.5	7.0
1999	35.3	7.6	0.3	5.7	5.6

### 3.4 Beknopte model gevoeligheidsanalyse

Ofschoon de hier gepresenteerde modelberekeningen redelijk tot goed overeenkomen met gemeten gehalten in het bovenste en diepere grondwater is ook duidelijk dat de beperkte range aan invoerparameters (bij de schematisatie van de verschillende bodemeenheden) nooit de variatie aan gehalten in het grondwater kan verklaren.

In principe is daarom een uitvoerige modelonzekerheidsanalyse nodig die in deze fase van de studie nog niet is uitgevoerd. Aangezien een deel van de parameters die in het model als invoer zitten sterk aan elkaar gecorreleerd zijn is het niet voldoende om alle parameters tussen bepaalde grenzen te laten variëren. Dat zou namelijk een aantal combinaties opleveren die onder natuurlijke condities niet voorkomen.

Om echter wel een beeld te krijgen van de invloed die een verandering in de invoer heeft op de berekende gehalten in de laterale en verticale flux, is voor zink een tweetal variaties aangebracht in een deel van de invoer parameters. Hierbij is zowel voor maïs op zand als voor gras op veen uitgerekend hoe de concentraties veranderen als gevolg van deze variatie in de invoer. In tabel 3.6 staan de wijzigingen alsmede het effect op de berekende concentraties. De orde van grootte van de range in invoerparameters (de 'nieuwe waarde' in tabel 3.6) komt ruwweg overeen met de

onder veldcondities aanwezige range in bodemparameters in de beide bodemeenheden. Het is bijvoorbeeld in geval van maïs op zand niet realistisch aan te nemen dat de pH die gemiddeld op 5.1 is gezet veel hoger dan 6 of veel lager dan 4.5 wordt. Het testen van het effect van een wijziging in de pH van 5.1 naar 3.5 of 8 of een organisch stofgehalte van 30% is derhalve in deze bodemeenheid niet realistisch

Tabel 3.6 Effect van wijzigingen in invoerparameters op de berekende Zn concentraties in de verticale en laterale flux voor maïs op zand en voor gras op veen

Parameter	Horizon	Oude waarde	Nieuwe waarde	C-lateraal	C-verticaal
<b>Maïs op zand</b>					
Normaal <sup>1</sup>	-	-	-	942.5	94.9
pH	A	5.1	4.6	1650.0	94.9
pH	A	5.1	6	297.0	94.9
pH	C	4.8	4.3	942.0	196.0
pH	C	4.8	5.2	942.0	53.2
SOM	A	5	8	681.0	94.9
SOM	A	5	2	1700.0	94.9
klei	A	3	6	704.0	94.9
klei	A	3	1	1450.0	94.9
Me	A	45	60	1340.0	94.9
Me	A	45	25	456.0	94.9
Me	C	1.5	5	456.0	444.0
Me	C	1.5	0.2	456.0	7.2
<b>Gras op Veen</b>					
Normaal <sup>1</sup>	-	-	-	170.0	5.0
pH	A	5.2	4.7	325.0	5.0
pH	A	5.2	6	68.2	5.0
pH	C	5.3	4.7	170.0	11.9
pH	C	5.3	6	170.0	1.8
SOM	A	25	35	135.0	5.0
SOM	A	25	18	213.0	5.0
klei	A	45	60	150.0	5.0
klei	A	45	30	203.0	5.0
Me	A	85	110	228.0	5.0
Me	A	85	50	96.6	5.0
Me	C	8.2	15	170.0	10.8
Me	C	8.2	2	170.0	0.8

<sup>1</sup> waarde in uitgangssituatie

Uit tabel 3.6 blijkt dat:

1. De wijzigingen in de invoerparameters in de bovengrond beïnvloeden de concentratie in de verticale flux niet. Dit is een logisch gevolg van het feit dat hier slechts de resultaten van 1 jaar zijn weergegeven. In geval van een berekening over meerdere jaren zal er waarschijnlijk op termijn wel een effect optreden in de ondergrond als gevolg van wijzigingen in pH of organische stof gehalte in de bovengrond. De uiteindelijke grootte van dit effect hangt echter sterk af van de



mate van adsorptie in het profiel dwz van de pH, textuur en organische stofgehalte.

2. De range in concentraties die na de verschillende wijzigingen gevonden wordt komt ruwweg overeen met de gevonden range in gemeten gehalten binnen een bepaald type landgebruik. Dat kan betekenen dat de hier opgelegde range in invoerfactoren inderdaad de 'ruimte' omspant die onder veldcondities voorkomt (er van uit gaand dat de modelvoorspellingen betrouwbaar zijn). Het feit dat er als gevolg van het opleggen van een beperkte variatie in invoer een redelijke mate van variatie in de concentratie wordt berekend, kan echter ook betekenen dat het model erg gevoelig is voor verschillen. Dit zal in de vervolgfase waarin een modelonzekerheidsanalyse uitgevoerd wordt aan de orde komen.
3. De orde van grootte van de effecten elkaar niet veel ontlopen: het effect van de wijziging van de pH met een halve eenheid komt redelijk overeen met een wijziging in het organische stof gehalte. Hierbij moet bedacht worden dat de orde van grootte van de verschillende wijzigingen bepaald is op basis van de range in bodemeigenschappen die binnen een bepaalde bodemeenheid verwacht mag worden.
4. Het effect van de wijzigingen in beide (sterk verschillende) bodemtypen op de grootte van de flux in de meest gevallen beperkt blijft tot een factor 2 in het resultaat (dwz hoger of lager). Een uitzondering hierop vormt het effect van de wijziging van het metaalgehalte in de ondergrond in de zandgronden op de verticale flux. Het is echter de verwachting is dat de hoeveelheid metalen die via het grondwater (dus via de verticale flux) het oppervlaktewater bereikt gering is als gevolg van retentie in de aquifer. Onzekerheden in de grootte van de verticale flux zullen daarom uiteindelijk minder sterk doorwerken op de uiteindelijke (model berekende) variatie in de belasting van het oppervlaktewater dan onzekerheden in de laterale flux.

In het vervolg van de studie zal meer de nadruk gelegd worden op de verschillende aspecten van het model die uiteindelijk de totale onzekerheid bepalen. Er zal daarbij onderscheid gemaakt worden tussen de al eerder genoemde factoren:

1. *Model onzekerheden,*
2. *invoer onzekerheden, en*
3. *effecten van opschaling*

Met modelonzekerheden worden die onzekerheden bedoeld die optreden als gevolg van het niet perfect zijn van de modelbenaderingen. Een van de belangrijkste is de bijdrage van de onzekerheid in de berekende metaal concentratie (onzekerheidsanalyse van de partitievergelijkingen). Onder invoer onzekerheden vallen o.a. keuzes met betrekking tot de schematisatie van de eenheden en de daarbij behorende metaalgehalten en bodemeigenschappen (onzekerheidsanalyse van het effect van de range in bodemeigenschappen die binnen een bodemtype kan voorkomen). Hieronder vallen ook effecten van de grootte van de verschillende waterfluxen (lateraal, verticaal, plant).

De uiteindelijke aannames met betrekking tot de opschaling (welk deel van de gekozen bodemtypen is representatief voor welk deel van het totale oppervlak) dragen ook bij tot de uiteindelijke onzekerheid en moeten apart benoemd worden



## 4 Potentiële bijdrage van uitspoeling aan de belasting van oppervlaktewater in verhouding tot externe bronnen

### 4.1 Belasting van oppervlaktewater via externe bronnen: Veranderingen tussen 1990 en 2000.

In tabel 4.1 staat een overzicht van de bijdrage van externe bronnen aan de belasting van het oppervlaktewater. Hieruit blijkt dat voor meeste metalen gedurende de laatste 10 jaar een significante reductie is bereikt. De afname van belasting in 2000 t.o.v. 1990 bedraagt resp. 80% (Cd), 40% (Cu), 36% (Zn), 43% (Pb) en 36% (Ni). Met name de sterke reductie in emissie door de chemische industrie van Cd heeft er voor gezorgd dat de belasting van Cd naar het oppervlaktewater sterk is afgenomen. Door deze reductie is op dit moment met name de belasting via rioleringen en waterzuiveringsinstallaties een van de belangrijkste bronnen voor metalen. Daarnaast zijn vooral de bijdrage van het verkeer en de chemische industrie nog steeds belangrijk.

Tabel 4.1 Bijdrage van externe bronnen aan de metaalbelasting van oppervlaktewater en de veranderingen daarin van 1990 tot 2000 (CCDM, 2001) in ton per jaar

Bron		Jaar				
		1990	1995	1998	1999	2000
<b>CADMIUM</b>	Afvalverwijderingsbedrijven	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03
	Bouw		0.00		0.00	0.00
	Chemische Industrie	3.46	0.45	0.21	0.08	0.09
	Consumenten	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Energiesector	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	HDO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Overig	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
	Overige industrie	0.31	0.13	0.12	0.16	0.19
	Raffinaderijen	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Riolering en waterzuiveringsinstallaties	0.99	0.45	0.41	0.47	0.47
	Verkeer en vervoer	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	<i>Totaal:</i>	5.02	1.29	0.99	0.96	0.99
Bron		Jaar				
		1990	1995	1998	1999	2000
<b>KOPER</b>	Afvalverwijderingsbedrijven	0.04	0.16	0.10	0.14	0.15
	Bouw	0.01	0.01	0.10	0.19	0.19
	Chemische Industrie	8.44	7.38	10.70	7.78	3.67
	Consumenten	2.62	2.65	2.82	3.21	2.50
	Energiesector	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00
	HDO	0.12	0.07	0.08	0.08	0.08
	Landbouw				0.00	0.00
	Overig	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04
	Overige industrie	20.49	9.11	9.09	9.43	9.54
	Raffinaderijen	0.04	0.03	0.24	1.57	1.57
	Riolering en waterzuiveringsinstallaties	53.57	28.96	22.48	21.44	21.44
Verkeer en vervoer	24.62	26.27	26.69	27.00	26.44	
	<i>Totaal:</i>	112.78	76.68	74.33	72.86	67.60

Tabel 4.1 Vervolg

		<i>Jaar</i>				
		1990	1995	1998	1999	2000
<b>ZINK</b>	Afvalverwijderingsbedrijven	0.19	1.13	0.81	0.64	0.80
	Bouw	0.03	0.11	0.64	0.33	0.33
	Chemische Industrie	55.99	23.08	22.81	21.63	22.83
	Consumenten	11.90	9.59	8.36	8.02	7.89
	Energiesector	0.16	0.01	0.00	0.02	0.02
	HDO	4.10	2.46	2.47	2.13	2.10
	Landbouw	2.43	2.91	4.39	4.27	4.29
	Overig	8.09	8.09	8.09	8.09	8.09
	Overige industrie	51.55	18.32	13.73	12.34	13.07
	Raffinaderijen	0.42	0.76	0.17	0.98	0.98
	Riolering en waterzuiveringsinstallaties	234.96	185.06	174.04	160.58	160.58
	Verkeer en vervoer	49.82	49.54	47.19	46.55	46.70
		<b>Totaal:</b>	<b>419.6</b>	<b>301.1</b>	<b>282.7</b>	<b>265.6</b>
		<i>Jaar</i>				
		1990	1995	1998	1999	2000
<b>LOOD</b>	Afvalverwijderingsbedrijven	0.16	0.25	0.13	0.17	0.17
	Bouw	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04
	Chemische Industrie	12.22	4.75	4.42	3.16	1.41
	Consumenten	2.33	1.66	1.42	1.42	1.43
	Energiesector	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
	HDO	0.11	0.06	0.01	0.02	0.02
	Landbouw	61.90	35.54	34.20	34.40	34.59
	Overig	10.72	10.72	10.72	10.72	10.72
	Overige industrie	5.93	1.02	0.91	1.25	1.27
	Raffinaderijen	0.04	0.03	0.00	0.27	0.27
	Riolering en waterzuiveringsinstallaties	62.74	41.74	37.39	38.09	38.09
	Verkeer en vervoer	8.80	7.86	6.78	6.24	6.24
		<b>Totaal:</b>	<b>164.96</b>	<b>103.63</b>	<b>96.00</b>	<b>95.77</b>
		<i>jaar</i>				
		1990	1995	1998	1999	2000
<b>NIKKEL</b>	Afvalverwijderingsbedrijven	0.19	0.54	0.26	0.25	0.25
	Bouw	0.00	0.03	0.04	0.15	0.15
	Chemische Industrie	13.16	5.59	5.03	4.14	4.31
	Consumenten	0.12	0.09	0.07	0.07	0.06
	Energiesector	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01
	HDO	0.08	0.04	0.12	0.10	0.10
	Landbouw				0.00	0.00
	Overig	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10
	Overige industrie	3.03	2.20	3.27	1.78	1.86
	Raffinaderijen	0.04	0.03	0.33	0.28	0.28
	Riolering en waterzuiveringsinstallaties	22.44	14.83	15.31	16.87	16.87
	Verkeer en vervoer	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13
		<b>Totaal:</b>	<b>42.31</b>	<b>26.58</b>	<b>27.65</b>	<b>26.87</b>

## 4.2 Bijdrage van uitspoeling van zware metalen in verhouding tot externe bronnen in 2000

In tabel 4.2 staat een overzicht van de absolute vrachten evenals de relatieve bijdrage van elk van de afzonderlijk externe bronnen in 2000. Daarnaast ook de totale berekende vracht die via laterale en verticale uitspoeling de bodem verlaat. Van de laterale en verticale flux wordt in tabel 4.2 een drietal hoeveelheden gegeven:

1. De som van de berekende hoeveelheid metalen die voor elk van de onderscheiden bodemtype - landgebruikcombinaties via uitspoeling de bodem verlaat. Voor cadmium is dat bijvoorbeeld 264 kg Cd via laterale stroming resp. 1206 kilo via verticale stroming. Hierbij wordt tevens vermeld hoe groot deze bijdrage is t.o.v. het totaal van de externe bronnen in 2000 (27 en 122% voor resp. de laterale en verticale flux).
2. De berekende hoeveelheid metalen die de bodem verlaat wanneer de hoeveelheid berekend onder 1 wordt opgeschaald naar het totale oppervlak van de desbetreffende bodemeenheid, dwz het totale oppervlak van de bodemeenheid wordt verondersteld het zelfde landgebruiktype te hebben. De afwijking t.o.v. de werkelijkheid is hierbij acceptabel omdat reeds bij de selectie het dominante landgebruik is gekozen. Een extreem voorbeeld is de eenheid stuifzand die voor 97% uit natuur bestaat. In alle gevallen is de bijdrage van het dominante landgebruik in de hier onderscheiden categorieën meer dan 60%. Bovendien geldt dat de verschillen tussen de verschillende vormen van landgebruik binnen een bodemtype weliswaar gevolgen hebben voor de metaalgehalten in het profiel maar dat deze verschillen niet van dien aard zijn dat dat resulteert in significant andere uitkomsten. Dit is temeer zo omdat de verschillen in metaalgehalte in de ondergrond die in hoge mate de uitspoeling sturen wat betreft verticale uitspoeling nog geringer zijn dan die in de bovengrond.
3. De berekende hoeveelheid die de bodem verlaat wanneer de onder 2 berekende fluxen worden opgeschaald naar Nederland. Hierbij is aangenomen dat de selectie representatief is voor Nederland wat betreft bodem en landgebruik. De in de berekening opgenomen bodemtype beslaan in totaal bijna de helft van het areaal van het landelijk gebied ( $2.8 \cdot 10^6$  ha) waardoor de fluxen die onder 3 genoemd staan uiteindelijk nog met een factor 2 opgehoogd zijn t.o.v. die genomen onder 2.

Bij de interpretatie van de gegevens wordt op dit moment verondersteld dat de hoeveelheid die via de laterale flux uitspoelt ook daadwerkelijk in datzelfde jaar in het oppervlaktewater terecht komt. Hierbij is dus geen onderscheid gemaakt in de verschillende verblijftijden van de laterale fluxen. Ofschoon deze verschillen aanzienlijk kunnen zijn en variëren van weken tot jaren is de aanname bij deze berekening (die immers niet voor een bepaalde tijd is uitgevoerd maar slechts voor 1 jaar) dat de uitkomsten zoals hier gegeven de 'evenwicht' situatie benaderen bij de huidige gehalten. Hierbij geldt dat in dat geval ook de bijdragen van de fluxen met langere verblijftijd op termijn dus per jaar gaan bijdragen.

In tabel 4.3 staan de berekende (absolute) vrachten in de laterale en verticale flux uitgesplitst naar bodemtype - landgebruikcombinatie. Ook hier zijn weer de drie

totalen (totaal berekend, opgeschaald naar bodemeenheid en opgeschaald naar Nederland) gegeven alsmede de verhouding tussen de laterale en verticale flux om het belang van de een t.o.v. van de ander weer te kunnen geven.

In tabel 4.4 tenslotte is het aandeel van elk van de hier onderscheiden bodemtype-landgebruikcombinaties in de totale verticale en laterale flux weergegeven. De percentages in tabel 4.4 zijn berekend op basis van de naar Nederland opgeschaalde hoeveelheden (laatste twee regels in tabel 4.2 en 4.3). Daarnaast zijn een tweetal clusteringen gemaakt, een naar (hoofd)bodemtype: klei, zand en veen en een naar landgebruik waarbij maïsteelt apart genomen is en niet bij bouwland is ingedeeld.

Op basis van de resultaten gepresenteerd in de tabellen 4.2 t/m 4.4 kunnen de volgende conclusies getrokken worden

1. de bijdrage van *laterale* uitspoeling die gedacht wordt op korte termijn (binnen een jaar) bij te dragen aan de belasting van het oppervlaktewater varieert van 13% voor lood tot 93 % voor Zn (percentage t.o.v. de totale externe belasting). De verschillen tussen de geschatte bijdrage van de verschillende metalen komen overeen met de 'gemiddelde' mobiliteit van deze metalen in de bodem. Deze neemt ruwweg af in de volgorde:  $Zn \approx Cd > Ni > Cu \gg Pb$ . Het feit dat alle hier berekende fluxen in dezelfde orde van grootte liggen als die van de externe bijdragen geeft aan dat uitspoeling via laterale stroming mogelijk net zo belangrijk is als de bijdrage van de dominante bron genoemd in tabel 4.1. (externe bronnen)
2. De bijdrage van de *verticale* uitspoeling voor de elementen Cu, Pb en Ni zal niet wezenlijk bijdragen aan de belasting van het oppervlaktewater. De geschatte bijdrage van Cu, Pb en Ni via verticale uitspoeling varieert van 9% voor Cu tot 31% voor Ni, maar aangezien de verwachting is dat gedurende het transport van metalen door de aquifer als gevolg van adsorptie en reductie reacties deze flux sterk zal afnemen, is de te verwachten netto bijdrage aan de belasting van het oppervlaktewater gering. Met name in zwaar belaste gebieden als de Kempen, moet echter voorzichtigheid betracht worden met bovenstaande stelling gezien de geringe retentie capaciteit van zandige, zure aquifers in combinatie met de, voor Nederlandse begrippen, extreem hoge belasting van de aquifer met Cd en Zn uit de bodem. Op dit moment is in de berekening niet specifiek rekening gehouden met deze mogelijk bijdrage.

Tabel 4.2 Absolute en relatieve bijdrage van verschillende bronnen (in 2000) aan totale belasting (zonder uitspoeling) en hoeveelheid laterale en verticale uitspoeling

	<b>Cd</b>		<b>Cu</b>		<b>Pb</b>		<b>Zn</b>		<b>Ni</b>	
	kg	%	ton	%	ton	%	ton	%	ton	%
Afvalverwijderingsbedrijven	25.41	2.6	0.15	0.2	0.17	0.2	0.80	0.3	0.25	0.9
Bouw	0.00	0.0	0.19	0.3	0.04	0.0	0.33	0.1	0.15	0.6
Chemische Industrie	86.17	8.7	3.67	5.4	1.41	1.5	22.83	8.5	4.31	15.9
Consumenten	6.10	0.6	2.50	3.7	1.43	1.5	7.89	2.9	0.06	0.2
Energiesector	0.72	0.1	0.00	0.0	0.01	0.0	0.02	0.0	0.01	0.0
HDO	1.28	0.1	0.08	0.1	0.02	0.0	2.10	0.8	0.10	0.4
Landbouw	?	-	0.00	0.0	34.59	36.7	4.29	1.6	0.00	0.0
Overig	210.00	21.2	2.04	3.0	10.72	11.4	8.09	3.0	3.10	11.4
Overige industrie	185.91	18.7	9.54	14.1	1.27	1.4	13.07	4.9	1.86	6.8
Raffinaderijen	1.20	0.1	1.57	2.3	0.27	0.3	0.98	0.4	0.28	1.0
Riolering en waterzuiveringsinstallaties	469.63	47.3	21.44	31.7	38.09	40.4	160.58	60.0	16.87	62.2
Verkeer en vervoer	5.83	0.6	26.44	39.1	6.24	6.6	46.70	17.4	0.13	0.5
<b>totaal externe belasting</b>	<b>992</b>	<b>100</b>	<b>67.60</b>	<b>100</b>	<b>94.25</b>	<b>100</b>	<b>267.68</b>	<b>100</b>	<b>27.11</b>	<b>100.0</b>
Laterale stroming berekend <sup>1</sup>	264	27 <sup>4</sup>	9.78	14	4.2	5	84.4	32	4.5	17
Verticale stroming berekend	1206	122	2.15	3	4.5	5	131.6	49	3.4	13
Lateraal tot oppervlak bodemtype <sup>2</sup>	347	35	12.59	19	5.6	6	112.3	42	6.2	23
Verticaal tot oppervlak bodemtype	1663	168 <sup>4</sup>	2.63	4	5.8	6	159.3	60	3.8	14
Lateraal Nederland <sup>3</sup>	772	78	27.99	41	12.4	13	249.6	93	13.8	51
Verticaal Nederland	3697	373 <sup>4</sup>	5.84	9	12.9	14	354.1	132	8.4	31

<sup>1</sup> de berekende hoeveelheid voor elk van de onderscheiden bodem landgebruiktypen, dwz voor het desbetreffende oppervlak dat daadwerkelijk door deze combinaties wordt ingenomen

<sup>2</sup> de berekende hoeveelheid vermenigvuldigd met het totale oppervlak van de desbetreffende bodemeenheid (incl. andere landgebruikvormen binnen deze eenheid)

<sup>3</sup> de totale belasting op Nederlandse schaal ervan uitgaand dat de selectie qua oppervlakte representatief is voor Nederland

<sup>4</sup> percentage van de totale externe belasting

Tabel 4.3 Bijdrage van verschillende bodemtypen aan uitspoeling via laterale en verticale flux

Stroming: Bodem	Cd		Zn		Cu		Pb		Ni	
	lat kg	bot kg	lat kg	bot kg	lat kg	bot kg	lat kg	bot kg	lat kg	bot kg
koopveen	50.4	0.0	36800.0	52.6	4950.0	1.7	1340.0	0.7	1560.0	0.3
kpveenzd	5.1	0.6	1990.0	155.0	159.0	5.5	75.5	9.4	138.0	9.9
klveenol	75.4	0.0	26000.0	-168.0	2590.0	-9.3	1220.0	-2.7	1080.0	-1.9
meerveen	29.8	20.4	7180.0	4940.0	113.0	60.5	250.0	166.0	218.0	137.0
stuifznd	0.0	300.0	0.0	54600.0	0.0	716.0	0.0	2070.0	0.0	2470.0
podzolZ8	43.6	133.0	4880.0	13500.0	93.5	239.0	230.0	607.0	305.0	384.0
podzolZ8	0.0	195.0	0.0	12900.0	0.0	277.0	0.0	377.0	0.0	219.0
podzolZ8	11.8	258.0	787.0	17100.0	16.8	367.0	22.9	498.0	2.5	51.3
podzolZ8	0.0	34.1	0.0	3020.0	0.0	38.5	0.0	83.0	0.0	10.0
enkeerdz	28.7	70.1	1800.0	2680.0	42.2	51.5	39.0	66.6	108.0	76.3
enkeerdz	0.0	107.0	0.0	4080.0	0.0	78.5	0.0	269.0	0.0	20.6
podzlZ13	0.0	87.4	0.0	18700.0	0.0	318.0	0.0	368.0	0.0	28.0
zavel_M8	11.0	0.4	1560.0	63.0	450.0	17.7	340.0	10.4	334.0	14.2
lichklei	3.9	-0.1	897.0	-14.5	376.0	-4.3	264.0	-4.1	233.0	-3.9
zwarklei	3.8	0.0	2520.0	-6.9	982.0	-8.8	462.0	-2.5	560.0	-1.0
kleizand	0.5	0.3	15.7	9.6	6.1	3.4	4.6	2.8	0.8	0.3
Totaal <sup>1</sup> :	264	1206	84430	131611	9779	2152	4248	4519	4539	3414
Fractie <sup>2</sup> :	0.18	0.82	0.39	0.61	0.82	0.18	0.48	0.52	0.57	0.43
Totaal <sup>3</sup> :	347	1663	112306	159280	12593	2628	5581	5810	6201	3761
Fractie	0.17	0.83	0.41	0.59	0.83	0.17	0.49	0.51	0.62	0.38
Totaal <sup>4</sup> :	772	3697	249648	354070	27994	5842	12407	12915	13785	8361

<sup>1</sup> totale berekende hoeveelheid op basis van het oppervlakte van de desbetreffende bodem - landgebruikcombinatie

<sup>2</sup> aandeel van laterale resp. verticale uitspoeling voor elk element

<sup>3</sup> totale hoeveelheid omgerekend naar totale oppervlak van desbetreffende bodemeenheid

<sup>4</sup> totale hoeveelheid omgerekend naar Nederland op basis van een totaal oppervlak van 2.8 10<sup>6</sup> ha.



Tabel 4.4 Bijdrage van de onderscheiden bodemtypen en vormen van landgebruik aan de berekende uitspoeling

Bodemtype	Lateraal					Verticaal				
	Cd	Zn	Cu	Pb	Ni	Cd	Zn	Cu	Pb	Ni
koopveen	18	41	50	30	32	0	0	0	0	0
kpveenzd	8	10	7	8	12	0	1	1	1	1
klveenol	23	24	21	23	18	0	0	0	0	0
meerveen	15	11	2	8	6	2	6	4	5	7
stuifznd	0	0	0	0	0	19	35	28	37	68
podzolZ8	13	4	1	4	5	8	8	9	10	10
podzolZ8	0	0	0	0	0	12	8	11	6	6
podzolZ8	3	1	0	0	0	16	11	14	9	1
podzolZ8	0	0	0	0	0	5	4	3	3	1
enkeerdz	12	2	0	1	3	6	2	3	2	3
enkeerdz	0	0	0	0	0	27	11	12	19	2
podzlZ13	0	0	0	0	0	6	14	14	8	1
zavel_M8	4	2	5	8	7	0	0	1	0	0
lichklei	2	1	5	8	7	0	0	0	0	0
zwarklei	1	3	9	9	10	0	0	0	0	0
kleizand	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bodemtype	Cd	Zn	Cu	Pb	Ni	Cd	Zn	Cu	Pb	Ni
zand	28	7	1	6	7	98	94	95	94	92
klei	8	6	19	26	24	0	0	0	0	0
veen	65	87	80	69	69	2	6	5	6	8
Landgebruik	Cd	Zn	Cu	Pb	Ni	Cd	Zn	Cu	Pb	Ni
gras	67	75	81	68	68	14	11	11	12	13
maïs	0	0	0	0	0	39	19	23	26	8
akker	33	25	19	32	32	18	17	20	15	10
natuur	0	0	0	0	0	29	54	46	47	69

Wat betreft de verschillen tussen de hier onderscheiden bodem- landgebruikseenheden wordt geconcludeerd dat:

1. laterale uitspoeling vooral gerelateerd is aan de uitspoeling uit veengronden en in mindere mate aan kleigronden. Dit feit is vooral het gevolg van de grootte van de laterale waterfluxen die in zandgronden relatief klein is t.o.v. nattere klei- en veengronden.
2. Verticale uitspoeling voor meer dan 90% afkomstig is uit zandgronden. Hier valt ook de relatief grote bijdrage van uitspoeling onder natuurterreinen op (stuifzand en podzolZ13). Dit komt overeen met de hoge gemeten concentraties onder bos en heide waarbij voor Cd en Zn vaak waarden ver boven de streef- en interventiewaarden voor grondwater aangetroffen worden. In de meeste gevallen is deze flux een gevolg van de lage tot zeer lage (< 4) pH van de natuurterreinen.
3. Wanneer de uitkomsten geclusterd worden tot op hoofd-bodemtypen resp. zand, klei en veen (tabel 4.4) dan komt een zelfde beeld als eerder geschetst naar voren, namelijk een hoge uitspoeling lateraal uit veen gronden gevolgd door kleigronden en voornamelijk uitspoeling verticaal uit zandgronden.
4. Wanneer de resultaten geclusterd worden naar landgebruik (Zie tabel 4.4) dan blijkt dat voor de laterale uitspoeling deze voornamelijk optreedt onder grasland en in mindere mate onder akkerbouwland. Dat heeft te maken met het feit dat zowel de gronden waarop maïs verbouwd wordt als de categorie natuur vrijwel uitsluitend op de drogere zandgronden voorkomen. Wanneer echter regionaal maïsteelt op nattere zandgronden voorkomt, betekent dat, gezien de hoge berekende gehalten in de laterale stroming onder maïs, dat laterale verliezen aanzienlijk kunnen zijn.
5. De uitspoeling in verticale richting is meer verdeeld over de verschillende categorieën waarbij het aandeel van natuur samen met dat van maïsteelt in de meeste gevallen ruwweg 70% van de totale verticale flux bedraagt.

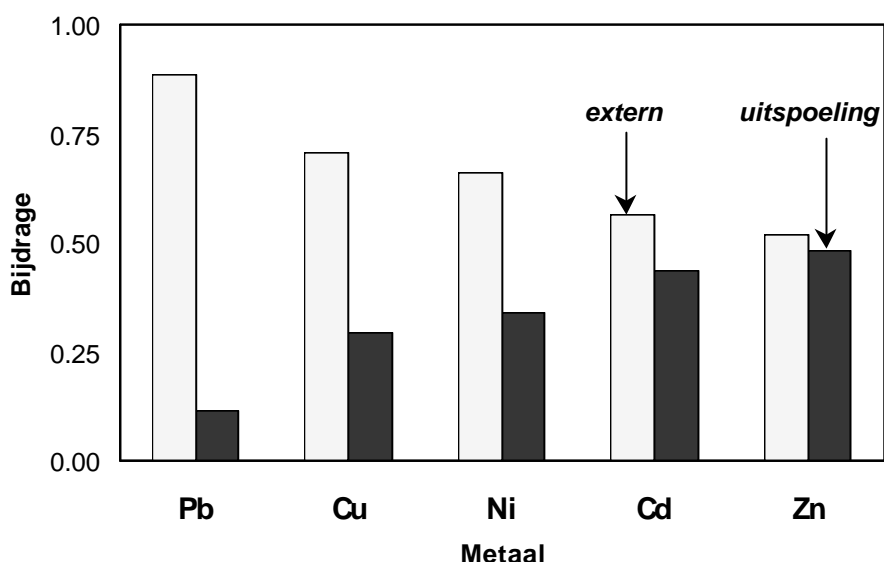
### ***Vergelijking resultaten IRC methodiek en deze aanpak***

Voor de metalen Cd, Cu en Zn is recentelijk een schatting gemaakt van de totale flux die via uitspoeling het oppervlaktewater zou kunnen bereiken (Römkens et al., 2001). Deze schatting is gebaseerd op gemiddelde gehalten in het bovenste grondwater en maakt geen onderscheid tussen verliezen via laterale fluxen en verticale fluxen. Voor Cd, Cu en Zn bedragen de aldus berekende fluxen respectievelijk 1.6, 35.6 en 316.8 ton per jaar voor heel Nederland. Ofschoon deze waarden hoger zijn dan de in deze studie berekende waarden verschillen ze niet al te veel van de hier berekende (laterale) fluxen van respectievelijk 0.7, 28 en 250 ton per jaar. Echter, wanneer bedacht wordt dat de totale belasting sterk gerelateerd is aan bepaalde vormen van landgebruik en, meer nog, bodemtype dan volgt daaruit dat op basis van de IRC methode geen uitspraak gedaan kan worden over de effectiviteit van maatregelen terwijl de berekeningen in de voorliggende studie ieder geval wel inzicht geven in de bijdrage van de verschillende bodem-landgebruiktypen.

## 5 Conclusies

Ofschoon de berekende metaalconcentraties en de gemeten gehalten in verschillende bodem en grondwatermeetnetten niet altijd overeenkomen, zijn de modelberekeningen gebruikt om de grootte van de belasting van het oppervlaktewater als gevolg van uitspoeling uit de bodem te berekenen. De in hoofdstuk 4 gepresenteerde modelberekeningen geven aan dat uitspoeling van zware metalen uit de bodem via laterale stroming een wezenlijke bijdrage kan leveren aan de belasting van het oppervlaktewater in Nederland. Hierbij is er op dit moment van uitgegaan dat de totale hoeveelheid die via laterale stroming het bodemprofiel verlaat ook daadwerkelijk bijdraagt aan de belasting van het oppervlaktewater. Daarentegen is er dus geen rekening gehouden met de bijdrage van diep grondwater.

Wanneer de bijdrage van laterale stroming vergeleken wordt met de momenteel bekende externe belasting (gegevens tabel 4.1) dan ontstaat het beeld zoals weergegeven in figuur 5.1



*Figuur 5.1 Bijdrage van externe bronnen (som van alle bekende belastingen, weergegeven in lichtblauw) en uitspoeling (berekende laterale flux in rood) aan de belasting van oppervlaktewater voor Pb, Cu, Ni, Cd en Zn (som van beide is gelijk aan 1)*

Uit figuur 5.1 blijkt dat met name de mobiele elementen als Cd en Zn en in mindere mate Ni en Cu een zeer wezenlijke bijdrage kunnen leveren aan de belasting van het oppervlaktewater. Voor Pb geldt dat de mobiliteit dermate laag is dat uitspoeling slechts een kleine bijdrage kan leveren. De bijdrage van uitspoeling in verticale richting is in deze beschouwing niet meegenomen omdat in eerste instantie aangenomen wordt dat de retentie van metalen in het diepere grondwater zal leiden tot een sterke afname van de concentraties die het oppervlaktewater uiteindelijk bereiken.

Bij de interpretatie van deze gegevens moet bedacht worden dat:

1. de totale belasting die berekend is via uitspoeling verkregen is middels opschaling van enkele representatieve bodemtype - landgebruikcombinaties naar Nederland als geheel. Dat betekent dat gebieden met sterk afwijkende bodemkenmerken of gehalten (denk aan de Kempen) in deze beschouwing niet specifiek zijn meegenomen
2. De belasting is bepaald op basis van gemiddelde bodem-schematisaties en met modelberekeningen. Hoewel de invloed van de range in bodemeigenschappen in beperkte mate is bepaald voor Zn, geldt dat variatie in bodemeigenschappen in het algemeen een grotere range in concentraties zal bewerkstelligen dan hier is weergegeven. In principe leidt dat dus automatisch tot grotere of kleinere fluxen. Wat het effect zal zijn van het opschalen van verschillende (meer of minder sterk) afwijkende kleinere eenheden voor de totale flux is nu nog niet duidelijk. De verwachting is dat, omdat de afwijking zowel naar beneden als naar boven zal optreden (in sommige gevallen hogere dan wel lagere uitspoeling) de uiteindelijke uitkomst binnen acceptabele marges zal veranderen.
3. De invoer is gebaseerd op basis van bodemkaarten en bestaande schematisaties. Met name wat betreft de metaalgehalten en bodemeigenschappen in de ondergrond lijkt de hoeveelheid bestaande informatie nog te gering om op grotere schaal een betrouwbare uitspraak te kunnen doen.
4. In het algemeen geldt dat er over de metaalgehalten en overige bodemeigenschappen in de bovengrond voldoende informatie voorhanden is. Ook over de gehalten van metalen in het grondwater bestaat informatie om uitspoeling in verticale zin te kunnen valideren op regionaal niveau. Over metaalconcentraties in het bodemvocht en in het lateraal uitspoelende water zijn daarentegen nog weinig geschikte meetgegevens beschikbaar. Om de berekende laterale fluxen te kunnen valideren zou daarom een aantal representatieve meetlocaties moeten worden ingericht om de veranderingen in de metaalconcentratie van de bovengrond tot aan het oppervlaktewater te monitoren.

## Literatuur

Boekhold, A.E., 1992. Field scale behaviour of cadmium in soils. PhD thesis Wageningen University, Wageningen, the Netherlands.

Brus, D.J., J.J. de Gruijter, D.J. Walvoort, P.F.A.M. Römken, F. de Vries en W. de Vries, 2001. Landelijke kaarten met overschrijdingsrisico's van landbouwkundige bodemnormen voor zware metalen. *In* W. de Vries et al. Risico's van bodemverontreiniging in het landelijk gebied. ALTERRA rapport 244, Wageningen.

CIW, 2001. Water in Beeld 2001: voortgangsrapportage over het waterbeheer in Nederland. Commissie Integraal Waterbeheer, Den Haag (zie ook: [http://wib2001.waterland.net/Rapport/titel\\_pag1.html](http://wib2001.waterland.net/Rapport/titel_pag1.html)).

CCDM, 2001. (in voorbereiding). Emissies en afval in Nederland samengevat. Jaarrapport 1999 en ramingen 2000. Rapportagereeks Doelgroepmonitoring. Coördinatiecommissie Doelgroepmonitoring, Den Haag.

Drecht, van, G., H.F.R. Reijnders, L.J.M. Boumans en W. van Duijvenbooden, 1996. De kwaliteit van het Nederlandse grondwater op een diepte tussen 5 en 30 meter in Nederland en de verandering daarvan in de periode 1984 - 1993. RIVM rapport 714801005.

Fraters, B., L.J.M. Boumans en H.P. Prins, 2001. Achtergrondconcentraties van 17 sporenelementen in het grondwater. Notitie t.b.v. het afleiden van streefwaarden. RIVM rapport in voorbereiding.

Groot, M.S.M., J.J.B Bronswijk, W.J. Willems, T. de Haan en P. del Castillo, 1996. Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit. Resultaten 1993. RIVM rapport 714801007.

Groot, M.S.M., J.J.B Bronswijk, W.J. Willems, T. de Haan en P. del Castillo, 1997. Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit. Resultaten 1994. RIVM rapport 714801017.

Groot, M.S.M., J.J.B Bronswijk, W.J. Willems, T. de Haan en P. del Castillo, 1998. Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit. Resultaten 1995. RIVM rapport 714801024.

Groot, M.S.M., J.J.B Bronswijk en T.C van Leeuwen, 2000. Landelijk Meetnet Bodemkwaliteit. Resultaten 1996. RIVM rapport 714801026.

Janssen, 1988. Invloed van de landbouw op de kwaliteit van oppervlaktewater. Zware metalen en organische microverontreinigingen. ICW rapport no. 30/III, Wageningen.

Japenga, J., J. Bril en W. Schuurmans, 2000. Het meetnet bodemkwaliteit van de provincie Gelderland. Opzet en resultaten 1997-1999. ALTERRA rapport 138.

Kroes, J.G., P.J.T. van Bakel, J. Huygen, T. Kroon en R. Pastoors, 2001. Actualisatie van de hydrologie voor STONE 2.0. Reeks Milieuplanbureau 16, ALTERRA rapport 298, Wageningen.

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

Kros, J., G.J. Reinds, W. de Vries, J.B. Latour and M.J.S. Bollen, 1995. Modelling of soil acidity and nitrogen availability in natural ecosystems in response to changes in acid deposition and hydrology. Wageningen, SC-DLO Report 95.

Otte, J.G., P.F.A.M. Römkens, A. Tiktak en W. de Vries, 2000. Partitierelaties voor zware metalen (Cd, Cu, Pb, Zn) voor diffuus verontreinigde Nederlandse bodems. PGBO rapport no. 30. Wageningen.

Rietra, R.P.J.J., 2001. The relationship between the molecular structure and ion adsorption on goethite. PhD thesis Wageningen University, Wageningen the Netherlands.

Römkens, P.F.A.M., 1998. Effects of land use changes on organic matter dynamics and trace metal solubility in soils. PhD thesis University of Groningen, Groningen , the Netherlands.

Römkens, P.F.A.M. and W. Salomons, 1998. Cd, Cu and Zn solubility in arable soils and forest soils: consequences of land use changes for metal mobility and risk assessment. Soil Science, 163(11):859-871.

Römkens, P.F.A.M. en W. de Vries, 2001. Bijdrage van uitspoeling van zware metalen aan de belasting van het oppervlaktewater. Rapportage fase 1a. ALTERRA rapport 85124-1.

Römkens, P.F.A.M., A.C.C. Plette and G.G.C Verstappen, 2001. Contribution of agriculture to heavy metal charging of Dutch surface waters. Proc. Intl. Conf. on Agricultural effects on ground and surface waters, Wageningen, October 1 - 4, 2000.

Römkens, P.F.A.M., J.E. Groenenberg and W. de Vries, 2002. Derivation of partition relationships to calculate Cd, Cu, Pb, Ni and Zn solubility and activity in soil solutions. ALTERRA rapport, in voorbereiding.

Seuntjens, P., 2000. Reactive solute transport in heterogeneous porous media: Cadmium leaching in acid sandy soils. University of Antwerp, Antwerp, België.

Temminghoff, E.J.M., 1998. Chemical speciation of heavy metals in sandy soils in relation to availability and mobility. PhD thesis Wageningen University, Wageningen , the Netherlands.

Tiktak, A., 1999. Modeling non-point source pollutants in soils. Applications to the leaching and accumulation of pesticides and Cadmium. PhD thesis University of Amsterdam, Amsterdam, the Netherlands.

Weerd, van de, H., 2000. Transport of reactive carriers and contaminants in groundwater systems. A dynamic competitive happening. PhD thesis Wageningen University, Wageningen, the Netherlands.

Wit, de, J.C.M., 1992. Proton and metal ion binding to humic substances. PhD thesis Wageningen University, Wageningen, the Netherlands.





## Aanhangsel 1 Bodemeigenschappen en zware metaal gehalten in de geselecteerde bodemtype – landgebruik- combinaties

### Koopveen (BT1, hVb, hVc)

van seg#	Tot seg#	pH CaCl2	DOC ppm	SOM %	klei %	Zn ppm	Cu ppm	Ni ppm	Cd ppm	Pb ppm
1	5	5.2	111	25	45	85	34	8.5	0.7	67.2
6	7	5.3	93	22	47	60.9	24	6.1	0.6	48.1
8	10	5.3	99	55	31	32	13	3.2	0.4	25.3
11	15	5.3	79	60	28	10.5	4.2	1.05	0.2	8.3
16	20	5.3	67	60	28	10.4	4.2	1.04	0.1	8.24
21	100	5.3	67	60	28	8.2	3.3	0.8	0.1	6.5

### Kpveenzda (HVz, Vz,)

van seg#	Tot seg#	pH CaCl2	DOC ppm	SOM %	klei %	Zn ppm	Cu ppm	Ni ppm	Cd ppm	Pb ppm
1	4	5.3	156	30	8	80	32	8	1	63.2
5	7	5.3	103	60	8	60	24	6	0.9	47.4
8	15	5.3	117	70	8	35	14	3.5	0.3	28
16	20	5.5	30	1	4	4	1.6	0.4	0.05	3.2
21	100	5.5	30	1	4	1	0.4	0.1	0.02	0.8

### Klveenolp (KVb, Vb,)

van seg#	Tot seg#	pH CaCl2	DOC ppm	SOM %	klei %	Zn ppm	Cu ppm	Ni ppm	Cd ppm	Pb ppm
1	4	5.2	70	15	47	40	16	4	0.6	32
5	7	5.2	51	10	50	35	14	3.5	0.4	28
8	10	5.3	99	55	31	30	12	3	0.2	24
11	15	5.3	79	60	28	30	12	3	0.1	24
16	20	5.3	67	60	28	25	10	2.5	0.1	20
21	100	5.3	67	60	28	25	10	2.5	0.1	20

### Meerveeni (Iwp, Wz)

van seg#	Tot seg#	pH CaCl2	DOC ppm	SOM %	klei %	Zn ppm	Cu ppm	Ni ppm	Cd ppm	Pb ppm
1	4	5.3	50	10	4	35	14	0.5	0.2	28
5	10	4.9	75	85	4	25	10	2.5	0.1	20
11	15	4.8	30	85	4	15	6	1.5	0.1	12
16	20	4.8	18	0.5	3	3	1.2	0.17	0.05	2.4
21	100	4.4	10	0.5	3	1	0.4	0.05	0.02	0.8

### Stuifznd (Zd20, Zd21)

van seg#	Tot seg#	pH CaCl2	DOC ppm	SOM %	klei %	Zn ppm	Cu ppm	Ni ppm	Cd ppm	Pb ppm
1	20	4.4	8	0.3	2	2	0.8	0.2	0.07	1.6
21	100	4.4	8	0.3	2	1	0.4	0.05	0.02	0.8

<b>podzolZ8 (Hn21 grasland)</b>										
van	Tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	4	5.1	49.1	5	3	35	14	3.5	0.35	20
5	10	4.6	40.4	3	3	20	8	2	0.2	10
11	15	4.6	30	2	3	10	4	1	0.1	6
16	20	4.8	10	0.5	3	3	1.2	0.3	0.05	3
21	100	4.8	10	0.5	3	1	0.4	0.05	0.03	0.8

<b>podzolZ8 (Hn21 maïs)</b>										
van	Tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	4	5.1	49.1	5	3	45	18	3.5	0.6	35
5	10	4.6	40.4	3	3	38	15.2	3.5	0.4	16
11	15	4.6	30	2	3	15	6	1.5	0.25	5
16	20	4.8	10	0.5	3	4	1.6	0.5	0.1	2
21	100	4.8	10	0.5	3	1.5	0.6	0.05	0.05	0.85

<b>podzolZ8 (Hn21 akkerbouw)</b>										
van	Tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	4	5.1	49.1	5	3	35	14	2.5	0.3	22
5	10	4.6	40.4	3	3	15	6	1.5	0.2	11
11	15	4.6	30	2	3	10	4	1	0.1	5
16	20	4.8	10	0.5	3	4	1.6	0.4	0.1	2
21	100	4.8	10	0.5	3	1.5	0.6	0.02	0.05	0.85

<b>podzolZ8 (Hn21 natuur)</b>										
van	Tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	4	5.1	49.1	5	3	12	4.8	0.8	0.15	9.5
5	10	4.6	40.4	3	3	7.5	3	0.55	0.1	6.5
11	15	4.6	30	2	3	5.5	2.2	0.35	0.06	4.3
16	20	4.8	10	0.5	3	1	0.4	0.02	0.03	0.8
21	100	4.8	10	0.5	3	0.5	0.2	0.01	0.02	0.3

<b>Enkeerdz (zEZ21 grasland)</b>										
van	Tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	5	4.6	58.6	5	3	20	8	4	0.28	25
6	15	4.6	49.8	4	3	10	4	1.5	0.2	8
16	20	4.7	28.7	2	3	4	1.6	0.05	0.1	3
21	100	4.9	9.6	0.5	3	1	0.4	0.05	0.05	0.5

<b>Enkeerdz (zEZ21 maïs)</b>										
van	Tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	5	4.6	58.6	5	3	25	10	3.5	0.4	28
6	15	4.6	49.8	4	3	15	6	1	0.35	10
16	20	4.7	28.7	2	3	5	2	0.05	0.1	3
21	100	4.9	9.6	0.5	3	1	0.4	0.02	0.05	1

<b>podz1Z13gHd30</b>										
van	Tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	3	3.5	104.2	6	2	15	6	1	0.11	8
4	7	4.2	59.4	4	2	7	2.8	0.7	0.07	4
8	12	4.7	28.7	2	2	5	2	0.5	0.03	2
13	20	4.8	10	0.5	2	2	0.8	0.02	0.02	2
21	100	4.8	10	0.5	2	1	0.4	0.01	0.02	0.5

<b>zavel_M8 (Mn25A)</b>										
van	Tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	5	7.9	11.2	3	20	55	8.8	4.5	0.45	30
6	12	8.4	4	1	20	35	5.6	3.5	0.4	15
13	20	8.4	4	1	20	20	3.2	2	0.15	8
21	100	8.4	4	1	20	15	2.4	1.5	0.1	3

<b>Lichklei (Mn35A, Rd90A, Rd90C)</b>										
van	Tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	5	7.9	16.2	5	28	60	24	6	0.4	40
6	12	8	8	2	28	45	18	4.5	0.25	25
13	20	8.3	4.2	1	20	20	8	2	0.2	8
21	100	8.3	4.2	1	20	20	3.2	2	0.1	6

<b>Zwarklei (Rn44C, gMn83C, kMn48C, Rn47C)</b>										
van	Tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	5	6	39.4	6	55	45	18	8.5	0.4	35
6	20	5.8	18.5	2	55	30	12	3.5	0.1	20
21	100	8	8	2	55	25	10	2.5	0.05	10

<b>Kleizand (Mn22A)</b>										
van	tot	pH	DOC	SOM	klei	Zn	Cu	Ni	Cd	Pb
seg#	seg#	CaCl2	ppm	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	5	8	10.7	3	20	35	14	3.5	0.3	30
6	12	8.2	4.4	1	20	27	10.8	2.7	0.2	20
13	20	8.4	2.4	0.5	3	4	1.6	0.4	0.1	2
21	100	8.4	2.4	0.5	3	1	0.4	0.05	0.03	0.5

