



ALTERRA

WAGENINGEN UR

# Dynamische modellering van cadmium- en zinktransport in het stroomgebied van de Keersop

Bijdrage aan een grondwatermodel voor de Vlaamse en Nederlandse Kempen

J.G. Kroes  
L.T.C. Bonten  
P. Groenendijk  
B. van der Grift



Alterra-rapport 1643, ISSN 1566-7197



Dynamische modellering van cadmium- en zinktransport in het stroomgebied van de Keersop



# **Dynamische modellering van cadmium- en zinktransport in het stroomgebied van de Keersop**

**Bijdrage aan een grondwatermodel voor de Vlaamse en Nederlandse Kempen**

**J.G. Kroes  
L.T.C. Bonten  
P. Groenendijk  
B. van der Grift (TNO)**

**Alterra-rapport 1643**

**Alterra, Wageningen, 2008**

## REFERAAT

Kroes, J.G., L.T.C. Bonten, P. Groenendijk & B. van der Grift, 2008. *Dynamische modellering van cadmium- en zinktransport in het stroomgebied van de Keersop; Bijdrage aan een grondwatermodel voor de Vlaamse en Nederlandse Kempen*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1643. 61 blz.; 40 fig.; 25 tab.; 21 ref.

Diffuse zink- en cadmiumverontreinigingen van de bodem in de Vlaamse en Nederlandse Kempen leidt tot verhoogde belasting van het grond- en oppervlaktewater. De invloed van seizoensdynamiek en meteorologische variatie op de oppervlaktewaterbelasting is gemodelleerd met het model SWAP voor het stroomgebied van de Keersop in de Kempen. De uitspoeling voor de periode 1880 tot 2060 is berekend. De hoogste concentraties en uitspoelingsvrachten treden op in de wintermaanden, wanneer de waterafvoer het grootst is. De dynamiek in de berekende en de gemeten concentraties van cadmium en zink in het oppervlaktewater komt sterk overeen. De berekende waterafvoeren zijn overeenkomstig de gemeten afvoeren. Voor cadmium komen de berekende gehalten en concentraties goed overeen met metingen. Voor zink wordt een te lage sorptiesterkte berekend, hetgeen leidt tot een te hoge transportsnelheid in de bodem en te hoge concentraties in het oppervlaktewater.

Trefwoorden: zink, cadmium , Kempen, model, grondwater, uitspoeling, SWAP

ISSN 1566-7197

Dit rapport is digitaal beschikbaar via [www.alterra.wur.nl](http://www.alterra.wur.nl). Een gedrukte versie van dit rapport, evenals van alle andere Alterra-rapporten, kunt u verkrijgen bij Uitgeverij Cereales te Wageningen (0317 46 66 66). Voor informatie over voorwaarden, prijzen en snelste bestelwijze zie [www.boomblad.nl/rapportenservice](http://www.boomblad.nl/rapportenservice)

© 2008 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

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

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

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

## Inhoud

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Samenvatting                                                                     | 7  |
| 1 Inleiding                                                                      | 9  |
| 2 Studiegebied en schematisering                                                 | 11 |
| 2.1 Gebiedskeuze                                                                 | 11 |
| 2.2 Ruimtelijke gebiedsbegrenzing en horizontale schematisering                  | 11 |
| 2.3 Verticale schematisering                                                     | 12 |
| 2.4 Temporele schematisering                                                     | 13 |
| 3 Modelprincipes                                                                 | 15 |
| 3.1 Inleiding                                                                    | 15 |
| 3.2 Modelbeschrijving                                                            | 15 |
| 4 Parameterisering                                                               | 17 |
| 4.1 Hydrologie                                                                   | 17 |
| 4.1.1 Bovenrand – uitwisseling met atmosfeer                                     | 17 |
| 4.1.2 Bodemfysische en chemische gegevens                                        | 18 |
| 4.1.3 Gewas                                                                      | 18 |
| 4.1.4 Zijrand – interactie met oppervlaktewater                                  | 19 |
| 4.1.5 Onderrand – interactie met dieper grondwater                               | 19 |
| 4.2 Stoffen                                                                      | 21 |
| 4.2.1 Bodembelasting                                                             | 21 |
| 4.2.2 Onderrand Cd en Zn                                                         | 23 |
| 4.2.3 Verdeling van zware metalen tussen vaste fase en vloeistoffase in de bodem | 24 |
| 5 Resultaten en toetsing                                                         | 27 |
| 5.1 Hydrologie                                                                   | 27 |
| 5.1.1 Waterbalans                                                                | 27 |
| 5.1.2 Grondwaterstanden                                                          | 27 |
| 5.1.3 Waterafvoeren                                                              | 28 |
| 5.2 Zware metalen Cd en Zn                                                       | 30 |
| 5.2.1 Gehaltes in de bovengrond                                                  | 30 |
| 5.2.2 Cd en Zn gehaltes in bodemprofielen                                        | 32 |
| 5.2.3 Concentraties in het bovenste grondwater                                   | 36 |
| 5.2.4 Concentraties in het oppervlaktewater                                      | 37 |
| 5.3 Resultaten scenario's                                                        | 38 |
| 5.3.1 Definitie                                                                  | 38 |
| 5.3.2 Afvoer water en belasting zware metalen                                    | 39 |
| 6 Discussie en conclusies                                                        | 43 |
| 6.1 Discussie                                                                    | 43 |
| 6.2 Conclusies                                                                   | 44 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Literatuur                                                          | 47 |
| Bijlage 1 Meteorologische gegevens                                  | 49 |
| Bijlage 2 Waterafvoeren (%) verdeling over landgebruik, bodem en Gt | 51 |
| Bijlage 3 Cd-afvoeren (%) verdeling over landgebruik, bodem en Gt   | 55 |
| Bijlage 4 Zn-afvoeren (%) verdeling over landgebruik, bodem en Gt   | 59 |

## Samenvatting

De bodem in grote delen van de Vlaamse en Nederlandse Kempen is verontreinigd met zink en cadmium door historische depositie afkomstig van zinksmelter in de regio. Deze verontreinigingen verplaatsen zich langzaam naar het grond- en oppervlaktewater. Deze studie is onderdeel van een grotere studie waarin de verspreiding van zink en cadmium in het grondwater van de Kempen worden gemodelleerd. De doelstelling van deze studie is de effecten van seizoensdynamiek en meteorologische variatie te modelleren.

Als studiegebied is het stroomgebied van de Keersop gekozen vanwege de relatief zware belasting van het gebied met zware metalen, het voorkomen van ondiepe grondwaterstanden en de gemeten verontreinigingen. De modelberekeningen zijn uitgevoerd met het pseudo-2D water- en stoftransportmodel SWAP. Het onderzoek heeft voor de schematisering en parameterisering zoveel mogelijk aangesloten bij het grondwatermodel voor de gehele Kempen. Voor de interactie met dieper grondwater zijn gegevens uitgewisseld met het ModFlow-model voor de gehele Kempen via de onderrand van de geschematiseerde SWAP-rekeneenheid. De zijrand van de rekenenheid is gebruikt voor de interactie met het oppervlaktewater. Er zijn 686 gridcellen van 250×250m doorerekend gedurende de periode 1880 tot 2060 om de historische belasting na te bootsen, een toetsing te kunnen uitvoeren met recente meetgegevens en een voorspelling voor de toekomst te doen. Tenslotte is een scenarioanalyse uitgevoerd voor drie verschillende meteorologische scenario's, een droog, nat en gemiddeld weerjaar.

Uit de scenarioanalyses blijkt dat de afvoer van water en de vrachten zware metalen een dynamiek vertonen die sterk door de weersomstandigheden wordt bepaald. Waterafvoer en afvoer van Zn en Cd vinden voornamelijk plaats in het vroege voorjaar en in het najaar. De waterafvoer is in een nat jaar circa 3 maal hoger dan de waterafvoer in een droog jaar. De stofvrachten van Cd en Zn zijn in een nat jaar respectievelijk 6.5 en 6.0 maal zo hoog als de stofvrachten in een droog jaar. Uit het dynamische karakter van de waterafvoeren en de niet-lineaire relatie tussen waterafvoeren en stofvrachten van zware metalen blijkt dat het nodig om voor realistische schattingen van de stofvrachten van zware metalen rekening te houden met de dynamiek van de grondwaterstanden en de bijbehorende waterafvoeren.

Uit de vergelijking van modelresultaten met metingen blijkt een goede overeenkomst tussen de gemeten en berekende waterafvoeren en grondwaterstanden. Uit een vergelijking tussen gemeten en berekend gehalten en concentraties van zware metalen blijkt dat gehalten van Cd in de bodem en concentraties in het bodemvocht en oppervlaktewater redelijk overeenkomen met de metingen. De gehalten en concentraties van Zn zijn in het algemeen te hoog, wat mogelijk veroorzaakt wordt door een sterkere sorptie van Zn in werkelijkheid dan in het model, waardoor de transportsnelheid van Zn in de bodem te hoog wordt berekend.



# 1 Inleiding

## ***Probleemstelling***

De bodem in grote delen van de Vlaamse en Nederlandse Kempen is verontreinigd met zink en cadmium. Deze verontreinigingen zijn veroorzaakt doordat zinksmelters in het gebied decennialang zink en cadmium hebben uitgestoten naar de atmosfeer. Deze uitstoot is inmiddels gestopt. Echter, het zink en cadmium in de bodem verplaatst zich langzaam naar het grond- en oppervlaktewater. Door de Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij (OVAM) en de stichting Actief Bodembeheer de Kempen (ABdK) is aan een consortium van VITO, TNO en de Vrije Universiteit Brussel gevraagd de verspreiding van de verontreinigingen in het grondwater en de uitspoeling naar het oppervlaktewater voor nu en in de toekomst te modelleren. Voor deze modellering wordt een stationaire benadering van de hydrologie gebruikt. Omdat verwacht wordt dat meteorologische variatie grote invloed heeft op de uitspoeling naar het oppervlaktewater, zijn voor een kleiner deelgebied dynamische berekeningen uitgevoerd. Deze dynamische berekeningen zijn uitgevoerd door Alterra en weergegeven in deze rapportage.

## ***Doelstelling***

Dit rapport beschrijft een modelstudie met als doelstelling het verwerven van inzicht in de invloed van seizoensdynamiek en meteorologische variatie op de belasting van het oppervlaktewater in de Kempen in het algemeen en het stroomgebied van de Keersop in het bijzonder.

Dit onderzoek levert een bijdrage aan een grensoverschrijdend model dat is opgesteld voor de simulatie van stoftransport in de onverzadigde en verzadigde zone en de uitspoeling van zink en cadmium naar het oppervlaktewater (Grift et al, 2008 in prep.).

## ***Globale aanpak***

Er is een gefaseerde aanpak gehanteerd met als belangrijkste onderdelen:

- ruimtelijke schematisering
- parameterisering van hydrologische en stofparameters
- simulaties van water en stoffen van maaiveld tot in het oppervlaktewater
- toetsing van resultaten
- simulatie van meteorologische scenario's

Voor de schematisering en de parameterisering is zo veel mogelijk aangesloten bij het grondwatermodel voor de gehele Kempen. Indien gegevens niet (tijdig) voorhanden waren, zijn gegevens gebruikt afkomstig van recente landsdekkende datasets (Kroon et al, 2001 en Van Bakel et al, 2008, in prep.).

De simulaties zijn uitgevoerd met het hydrologische en stoftransportmodel SWAP model (van Dam, 2000 en Kroes and van Dam (eds.), 2003) dat is aangepast voor

berekeningen van het reactief transport van zware metalen (Kroes et al, 2008, in prep.).

### ***Leeswijzer***

In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van het studiegebied en de horizontale, verticale en temporele schematisering van de modelstudie. Hoofdstuk 3 geeft een beknopt overzicht van het gebruikte model SWAP. De parameterisering van het model is weergegeven in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van de modelberekeningen gesproken en worden de resultaten getoetst aan meetgegevens. Tenslotte worden in hoofdstuk 6 de resultaten besproken in relatie tot de doelstelling van deze studie, nm. de invloed van seizoensdynamiek en worden de conclusies van dit onderzoek weergegeven.

## 2 Studiegebied en schematisering

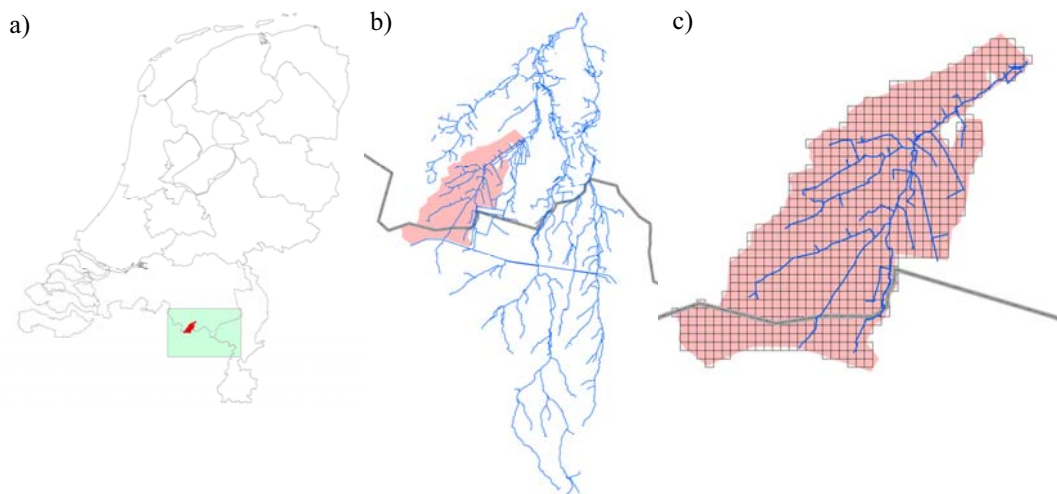
### 2.1 Gebiedskeuze

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag is voor het stroomgebied van de Keersop gekozen. Dit gebied is gekozen omdat er ondiepe grondwaterstanden voorkomen, waarmee de kans dat metalen uitspoelen vanuit ondiepe bodemlagen relatief groot is. Daarnaast is de afstand tot de zinksmelter van Lommel en Overpelt gering, waardoor het stroomgebied relatief zwaar is belast door atmosferische depositie.

### 2.2 Ruimtelijke gebiedsbegrenzing en horizontale schematisering

Het stroomgebied van de Keersop ligt voor het grootste deel in Nederland, een gering deel (ca 15%) ligt in België (Figuur 2.1a). Het gebied valt binnen het stroomgebied van De Dommel (Figuur 2.1b), welke behoort tot dat van de Maas. Het gemodelleerde gebied is 42 875 000 m<sup>2</sup> groot en wordt in het zuiden begrensd door het Schelde-Maas kanaal. Het Nederlandse deel van het gebied komt voor 90% overeen met de afwateringseenheid “Voorste Aa en Keersop bij Bergeijk” van het waterschap De Dommel.

Het stroomgebied van de Keersop is ruimtelijk geschematiseerd door een regelmatig grid over het gebied te leggen en de ruimtelijke schematisering vast te leggen in 686 rekeneenheden met een grootte van 250x250 m (Figuur 2.1c).



*Figuur 2.1 Gebiedsbegrenzing van Keersop binnen Nederland en België en binnen het onderzoeksgebied van de modelstudie voor de gehele Kempen (a), binnen het stroomgebied van de Dommel (b) en het gemodelleerde gebied (c)*

## 2.3 Verticale schematisering

Het verloop van de stroombanen bepaalt de route die water en stoffen volgen op hun weg van maaiveld naar oppervlaktewater. Hierbij is de hydro-geologische schematisering van belang waarin wordt bepaald welk deel van het neerslagoverschot toestroomt naar diepere regionale stroming en welk deel relatief ondiep afstroomt naar “lokale ontwateringsmiddelen”. Binnen de bodemprofielen die met SWAP worden gemodelleerd wordt er vanuit gegaan dat de afstroming naar “lokale ontwateringsmiddelen” berekend wordt als een diffuse lekterm, waarbij de lekterm op een bepaalde manier verdeeld is met de diepte in de gemodelleerde profielen. De toestroming naar diepere regionale stroming vindt plaats over de onderrand. Als een duidelijke geohydrologische grens ontbreekt, dient de modelleur zelf een grenslaag aan te wijzen voor de diepte van de bodemkolommen. De dieptes van de bodemkolommen hangen samen met de ruimtelijke schaal van de rekeneenheden en de verhouding tussen waterstroming naar verschillende ontwateringssystemen. De verhouding van deze waterstromen is afhankelijk van het seizoen en het stroomlijnenpatroon van het grondwater is eveneens afhankelijk van het seizoen. Onderbouwde modelconcepten ontbreken voor het afleiden van regels waarmee de diepte van een bodemkolom kan worden afgeleid uit langjarig gemiddelde stroomlijnenpatronen (stroombanen) in een gebied met complexe grondwaterstroming. Mede hierom is er van afgezien om de met MODFLOW gesimuleerde (stationaire) stroombanen te gebruiken bij het vaststellen van de verticale schematisering.

De onderrand van de profielen is daarom uiteindelijk bepaald aan de hand van geologische gegevens van het gebied. Uit de geologische kaart (DGV-TNO-kaartblad “Centrale Slenk”) zijn gegevens van 4 dwarsdoorsneden gehaald:

- profiel AA' (Nw-ZO), pntn 42,35,20: bovenstrooms ca 80 m wvpI (form v Sterksel)
- profiel BB'(NW-ZO): pntn 27,47: benedenstrooms ca 10 m wvpI (form v Sterksel)
- profiel KK'(W-O): pntn 42,60,47: van boven naar benedenstrooms ca 80->10 m wvpI (form v Sterksel)
- profiel LL'(W-O): pntn 43,20,69,80: bovenstrooms 80->60 m wvpI (form v Sterksel)

Uit deze 4 dwarsdoorsneden kan een gradiënt worden afgeleid met een voorgestelde pakketdikte die varieert van i) relatief dik in het zuidoosten (16 m), ii) dun in het noordoosten (8 m), en iii) een overgangsgedebied van 12 m dik. De onderbouwing van deze diktes was echter onduidelijk en uiteindelijk is gestart met een gemiddelde pakketdikte van 13 meter, analoog aan de keuze in het landsdekkende STONE-model. Binnen dit pakket is een indeling aangebracht in bodemhorizonten welke vervolgens zijn verfijnd naar modelcompartimenten. Aan bodemhorizonten zijn verschillende parameterwaarden toegekend (hoofdstuk 4).

## 2.4 Temporele schematisering

De geschematiseerde rekeneenheden zijn met gevoed met meteorologische gegevens met een tijdstapgrootte van 1 dag. Afhankelijk van de intensiteit van de fluxen verlaagt het model zijn interne rekentijdstap tot fracties van een dag om tot stabiele en nauwkeurige oplossingen te komen.

Er is in totaal een rekenperiode van 183 jaar doorgerekend, welke is verdeeld in 3 reeksen:

- a) 3 jaar initialisatie 1878 t/m 1880;
- b) 120 jaar voorgeschiedenis van 1881 t/m 2000;
- c) 60 jaar toekomstige ontwikkelingen van 2001 t/m 2060

Voor de initialisatie-berekening zijn klimaatgegevens van het station De Bilt gebruikt. Voor de overige berekeningen (voorgeschiedenis en toekomstige ontwikkelingen) zijn de gegevens van de meest recente klimaatreeks 1971-2000 gebruikt (Heijboer en Nellestijn, 2002). Deze klimaatreeks van 30 jaar is voor de gehele modelperiode herhaald, waarbij gestart is met meteorologische gegevens van 1971 voor het modeljaar 1881. Op deze wijze worden voor de modeljaren 1971-2000 dan ook de daadwerkelijk bijbehorende meteorologische gegevens van toegepast.

Daarnaast zijn de voor het jaar 2001 en 2061 drie verschillende meteorologische scenario's (droog, nat en gemiddeld) gemodelleerd (zie paragraaf 5.3).



## 3 Modelprincipes

### 3.1 Inleiding

De dynamische modellering van het transport van cadmium en zink is uitgevoerd met het model SWAP<sup>1</sup>. Dit is een model dat is ontwikkeld voor de modellering van het transport van water en opgeloste stoffen in bodems. De ontwikkeling van het model begon in Wageningen meer dan 30 jaar geleden met de lancering van het agrohydrologisch model SWATR (Feddes, 1971) en de gewasgroei-routine CROPR (Feddes et al., 1978). Belmans et al. (1983) hebben de randvoorwaarden en de numerieke oplossing uitgebreid en het model omgedoopt tot SWATRE. Vanaf 1990 is een groep van onderzoekers van Alterra en Wageningen Universiteit betrokken geweest bij de verdere ontwikkeling en toepassing van SWATRE. Met de introductie van routines voor generieke gewasgroei, heterogeniteit van bodems, warmtestroming en stoftransport is de naam veranderd in SWAP (van Dam et al., 1997 en Van Dam, 2000). De huidige berekeningen zijn uitgevoerd met een pre-release van SWAP versie 3.2 (Kroes et al, 2008).

In de volgende paragraaf wordt een samenvattende modelbeschrijving gegeven. Voor uitgebreide documentatie wordt verwezen naar bovenvermelde publicaties en naar de internetpagina: 'www.swap.alterra.nl'.

### 3.2 Modelbeschrijving

Het model SWAP beschrijft de stroming van water in zowel de onverzadigde als de verzadigde zone van bodems. Daartoe wordt de Richards-vergelijking numeriek opgelost met diverse mogelijkheden voor randvoorwaarden om de werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen. Voor stoftransport wordt de convectie-dispersie-vergelijking gebruikt, met inbegrip van adsorptie en afbraakprocessen. Warmtestroming wordt numeriek gesimuleerd, rekening houdend met warmtecapaciteit en thermische geleidbaarheid volgens de Vries (1975).

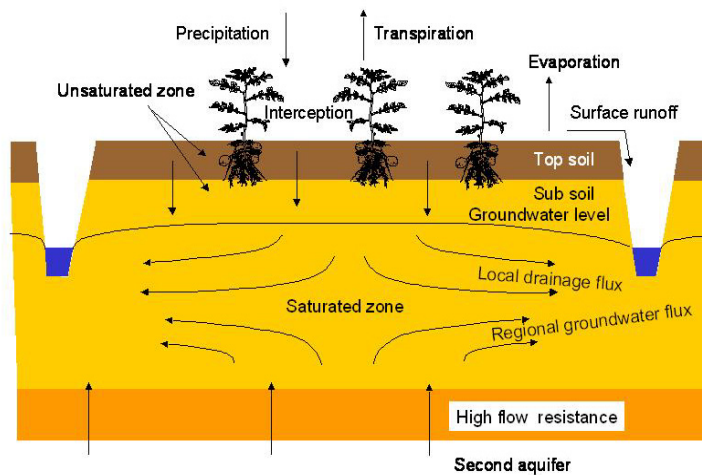
De bovengrens van het beschouwde modeldomein ligt net boven het gewas en de ondergrens wordt gevormd door een vlak in het bovenste grondwater (Figuur 3.1). In deze zone zijn de transportprocessen voornamelijk verticaal, dus SWAP is in principe een één-dimensionaal, verticaal gericht model. Echter, voor de stroming van het grondwater in de verzadigde zone kan gebruikt worden gemaakt van een pseudotweedimensionale stroming waarmee de laterale stroming van/naar oppervlaktewatersystemen wordt beschreven (Groenendijk en Van den Eertwegh, 2004). Hierdoor wordt het mogelijk om de oppervlaktewaterbelasting met één modelcode te berekenen. Dit maakt het weer mogelijk om hydrodynamische stationaire berekeningen uit te voeren.

---

<sup>1</sup> SWAP is een afkorting van Soil Water Atmosphere Plant

Voor de ruimtelijke schaal van de toepassingen geldt dat het model in principe een perceelsmodel is. Voor deze toepassing is een perceel gedefinieerd als een unieke combinatie van microklimaat, soort vegetatie, bodemtype, drainage. Daarmee is een opschaling van veld naar regionale schaal gerealiseerd.

Het model SWAP heeft veel gemeen met het model HYDRUS (Simunek et al., 1998). Beide modellen zijn geschikt voor onverzadigde/verzadigde bodems en lossen de Richards-vergelijking op voor waterstroming en de convectie-dispersievergelijking voor opgeloste stoffen. Het voor deze studie belangrijke verschil is dat HYDRUS-1D alleen waterstroming en stoftransport in de verticale richting simuleert, terwijl SWAP met behulp van de lekterm voor drainage een pseudo 2D-concept voor waterstroming en stoftransport in de verzadigde zone hanteert. Andere extra functies van HYDRUS zijn de 2-dimensionale versie, de intuïtieve grafische user-interface, en de optimalisatieschil. Extra functies van SWAP zijn onder meer de simulatie van gecombineerde kwel/wegzijging over een modelonderrand, gewasgroei, optimale irrigatie, verdamping van gedeeltelijk bedekte bodems en de interactie van bodemvocht met het beheer van het oppervlaktewater.



*Figuur 3.1 Hydrologische processen in SWAP*

## 4 Parameterisering

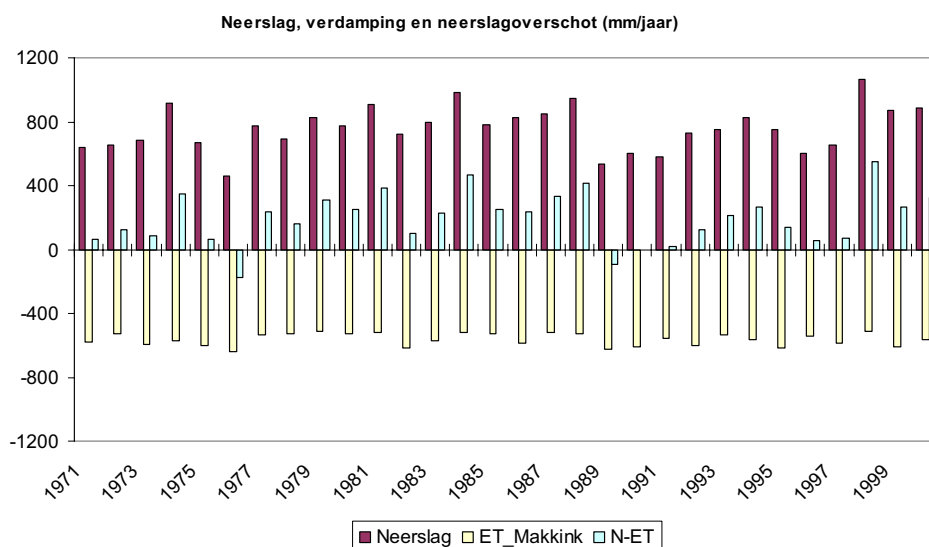
### 4.1 Hydrologie

Voor de parameterisering van de hydrologische gegevens van het gebied is gebruik gemaakt van de landsdekkende schematisatie volgens Kroon et al (2001) en Van Bakel et al (2008, in prep.).

#### 4.1.1 Bovenrand – uitwisseling met atmosfeer

Aan de bovenrand van het modelsysteem zijn meteorologische gegevens opgelegd. Voor de neerslag zijn gegevens van het nabijgelegen KNMI-neerslagstation Eersel gebruikt van de meest recente klimaatperiode 1971-2000 (Heijboer en Nellestijn, 2002). De potentiële verdamping is gebaseerd op de referentieverdamping volgens Makkink welke is afgeleid van gegevens van het station De Bilt en gecorrigeerd voor de verschillen met Eindhoven (Bijlage 1). Voor het beschrijven van sneeuw en vorst in de bodem zijn gegevens van de luchttemperatuur nodig. Omdat de gegevens voor verdamping en luchttemperatuur voor de klimaatperiode 1971-2000 niet volledig van Eindhoven beschikbaar waren, zijn deze aangevuld met gegevens van het KNMI-station De Bilt. Als tijdstapgrootte voor de berekeningen en daarmee tevens voor de meteorologische invoergegevens is een dag gekozen.

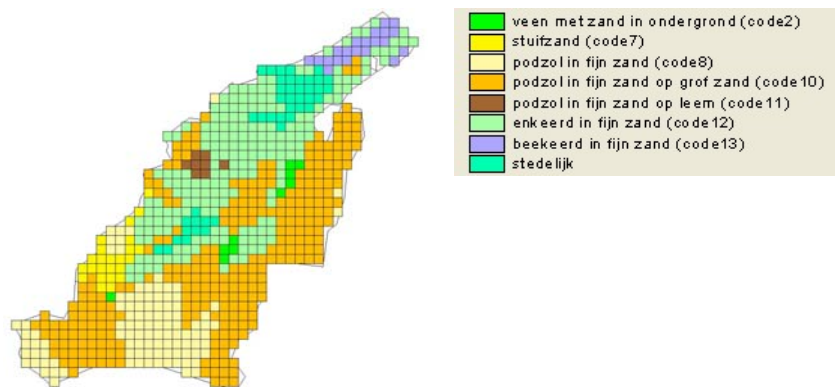
Het gemiddelde neerslagoverschot bedraagt 194 mm (zie Bijlage 1 en Figuur 4.1) met een maximum van 552 mm in 1998 en een minimum van -179 mm (verdampingsoverschot) in 1976.



Figuur 4.1 Meteorologische gegevens: neerslag, referentieverdamping volgens Makkink en het neerslagoverschot (mm/jaar)

#### 4.1.2 Bodemfysische en chemische gegevens

De schematisering van de bodems in het Nederlandse deel van het studiegebied is gebaseerd op de bodemkaart 1:50.000 waarbij de bodemfysische parameters  $K(h)$  en  $\theta(h)$  voor boven- en ondergrond zijn toegekend conform Kroon (2001) via de 21 bouwstenen van de Staringreeks (Wösten, 1994). Voor de bodemchemische eigenschappen (organische stof, klei, pH, Fe- en Al-hydroxiden) is eveneens gebruik gemaakt van de ruimtelijke indeling en toekenning van parameters zoals beschreven door Kroon (2001). Het Belgische zuidelijke deel van het gebied is afgeleid van de Nederlandse en Belgische bodemkaart, waarbij langs hoogtelijnen (AHN) is geëxtrapoleerd over de landsgrens heen (Figuur 4.2).



Figuur 4.2 Bodemindeling Keersop

#### 4.1.3 Gewas

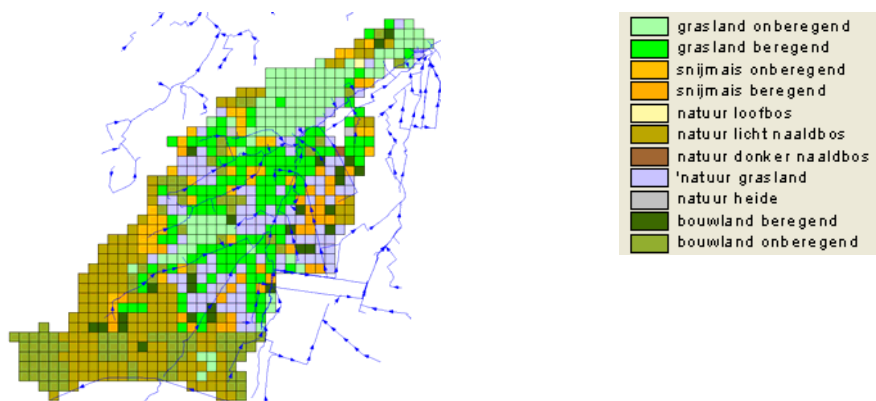
Het landgebruik van het Nederlandse deel van het gebied is gebaseerd op LGN4.

De LGN-landgebruiksvormen zijn geclusterd tot de volgende landgebruiksvormen:

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

Stedelijk gebied is als cultuur-grasland beschouwd met een historische belasting conform de overige landgebruiksvormen. Landbouwgronden zijn berekend conform aannames en rekenregels van Van Bakel et al (2008).

Het landgebruik in het Belgische deel van het gebied is gebaseerd op een combinatie van luchtfoto's en grondgebruikkaarten van het Belgische deel van het gebied. Deze zijn eveneens toegekend aan dezelfde geclusterde landgebruiksvormen als voor het Nederlandse deel (Figuur 4.3).



Figuur 4.3 Landgebruik Keersop

#### 4.1.4 Zijrand – interactie met oppervlaktewater

De zijrand van elke rekeneenheid wordt gebruikt voor interactie met het oppervlaktewatersysteem. Daarbij is de indeling van het oppervlaktewater gebaseerd op de top10vector-database. De afvoer van water van het land naar het oppervlaktewater verloopt via afspoeling over het maaiveld en via uitspoeling door de bodem.

De uitspoeling is verdeeld over 5 drainagetermen, welke elk het watertransport van/naar een ander oppervlaktewatersysteem vertegenwoordigen. De definitie van de 5 oppervlaktewatersystemen is gegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Definitie van 5 oppervlaktewatersystemen

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

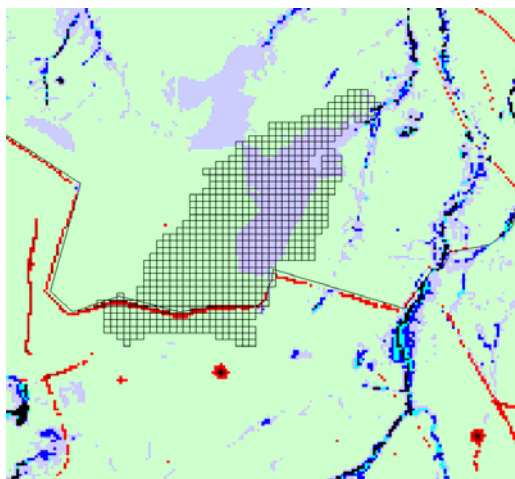
#### 4.1.5 Onderrand – interactie met dieper grondwater

Als onderrandvoorwaarde zijn fluxen vanuit het grondwatermodel voor de gehele Kempen gebruikt (op basis van 100×100m grids). Deze zijn als gewogen gemiddelde toegekend aan de 250×250 m grids van deze studie. Na toekenning bleken voor bepaalde delen van het gebied de berekeningen met het SWAP model te resulteren in sterk dalende grondwaterstanden. Deze bleken te worden veroorzaakt door: i)

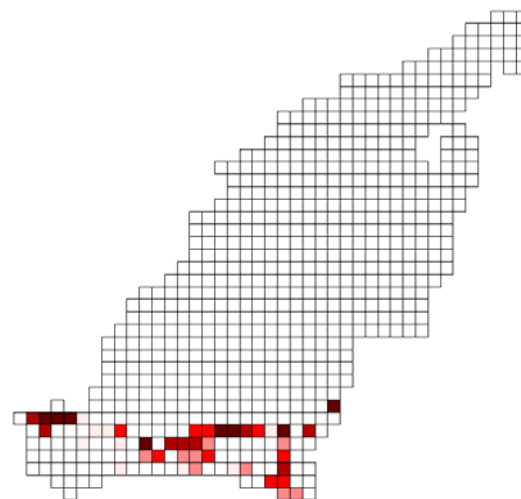
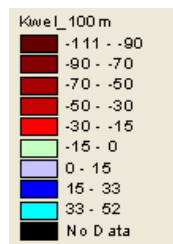
afwijkend hoge wegzijgingsfluxen op de landsgrens (Figuur 4.4) en ii) onrealistisch hoge wegzijgingsflux in het Belgische deel (Figuur 4.5). Dit is het gevolg van de schematisatie van de ondergrond in het ModFlow-model. Als gevolg van de wijze van het verticale opknippen (in lagen van gelijke dikte) kunnen twee geologisch verschillende lagen in één modellaag tegen elkaar aanliggen. Hierdoor kunnen sprongen in de hydraulische doorlatendheid ontstaan waardoor er kunstmatige overgangen in de kwel-wegzijgingsflux ontstaan.

Als criterium voor het accepteren van het modelresultaat is aangehouden dat aan de volgende voorwaarden moet worden voldaan: i) de grondwaterstand moet gedurende een periode van 60 jaar in het profiel blijven, ii) er mag geen langjarige gemiddelde bergingsverandering optreden die groter is dan 1 meter en iii) de waterbalans moet sluitend zijn en mag geen numerieke afwijkingen vertonen groter dan 0.1 mm/d.

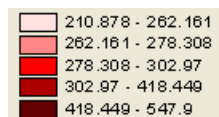
De problemen met enkele rekeneenheden op de landsgrens zijn opgelost door de wegzijging in de betreffende grids te vervangen door de gemiddelde wegzijging van de 16 aangrenzende grids. De problemen met de grids met te hoge wegzijging zijn opgelost door de wegzijging te verminderen met stappen van 0.1 mm/d totdat voldaan werd aan de toetsingscriteria.



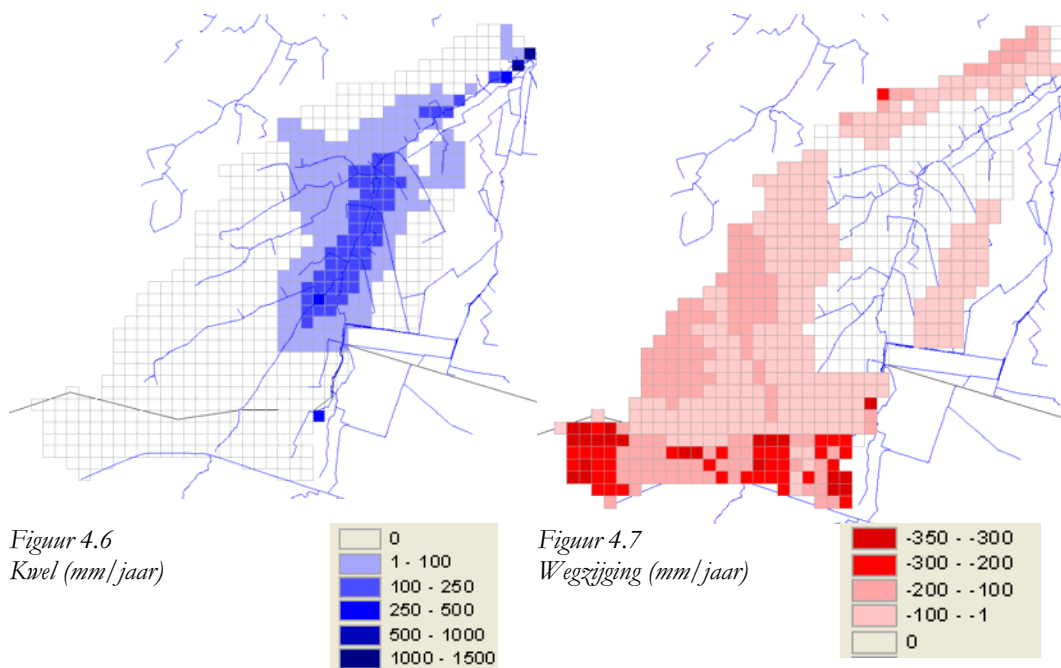
*Figuur 4.4*  
Kwel/ wegzijging (0.1 mm/jaar),  
hoge wegzijging langs landsgrens in  
100x100 m grid  
(negatief=wegzijging)



*Figuur 4.5*  
Kwel/wegzijging (mm/jaar), in  
Belgisch deel van 250x250 m  
grid (positief = wegzijging)



De uiteindelijke kwel en wegzijging die als onderrandvoorwaarde zijn gebruikt, zijn weergegeven in respectievelijk Figuur 4.6 en Figuur 4.7. Hoge kwel komt voor in de beekdalen langs de Keersop en de hoogste wegzijging wordt aangetroffen op de hoger gelegen gebieden in het zuidwesten.



## 4.2 Stoffen

### 4.2.1 Bodembelasting

Voor de belasting van de bodem met de zware metalen Cd en Zn zijn 3 vormen van bodembelasting onderscheiden:

- Atmosferische depositie;
- Bemesting via kunstmest en dierlijke mest
- Uitspoeling vanuit zinkassenwegen

Deze 3 vormen zullen hierna kort worden toegelicht.

#### ***Atmosferische depositie***

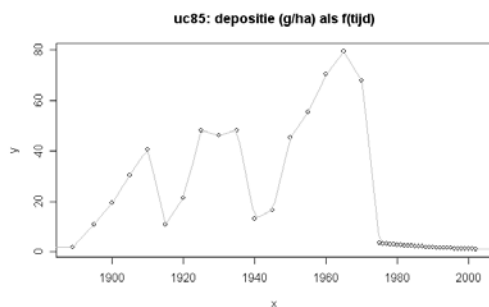
Voor de atmosferische depositie is gebruik gemaakt van dezelfde gegevens als het model voor de gehele Kempen. De atmosferische depositie is beschikbaar in de vorm van kaarten met een 5-jaarlijkse depositie per grid van 200x200 m voor de periode vanaf 1889 tot 1970. Deze grid-kaarten zijn omgezet naar jaarlijkse belastingen om als invoer voor het SWAP-model te kunnen gebruiken. Deze omzetting gebeurde in 3 stappen: i) van Lambert (Belgisch) naar RD (Nederlands) coördinatenstelsel, ii) van 200m naar 250 m grids, iii) interpolatie voor tussenliggende jaren.

Voor de depositie vanaf 1975 t/m 2000 is een aparte tijdreeks verkregen met jaarlijkse depositiecijfers voor het hele gebied. De waarden zijn beduidend lager omdat vanaf 1975 de fabrieken zijn overgestapt naar een andere productiemethode

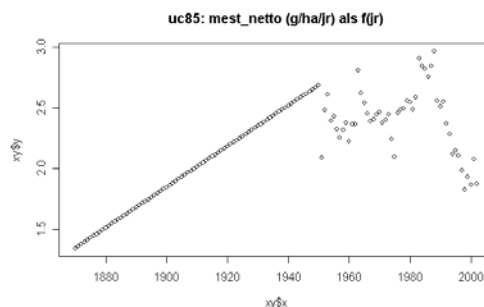
waardoor de atmosferische emissie van zware metalen sterk is afgenomen (zie voorbeeld Figuur 4.8)

### ***Bemesting***

De huidige belasting aan maaiveld wordt voornamelijk veroorzaakt door belasting via dierlijke mest en kunstmest minus afvoer van geoogst product. Voor de periode 1975-2000 is gebruikt gemaakt van een tijdreeks met jaarlijkse netto-belastingen. Voor de periode vóór 1975 is aangenomen dat de belasting in 1870 50% bedroeg van de belasting in 1950; lineaire interpolatie leverde de tussenliggende waarden (zie voorbeeld Figuur 4.9)



*Figuur 4.8 Cd-belasting door atmosferische depositie als functie van de tijd voor rekenenheid uc85*

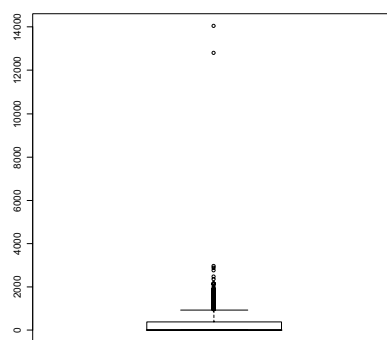
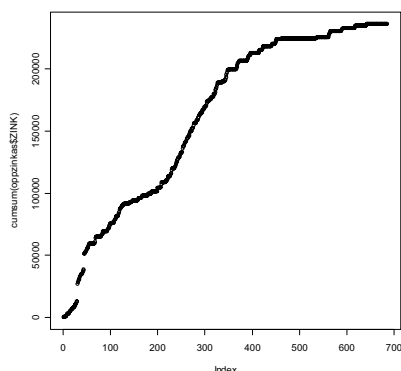


*Figuur 4.9 Cd-belasting door bemesting als functie van de tijd voor rekenenheid uc8*

### ***Zinkassenwegen***

In de twintigste eeuw zijn zinkassenwegen in het gebied aangelegd. In het model is de belasting door alle zinkassenwegen ingebracht vanaf het modeljaar 1950. Voor de locaties van de wegen zijn de gegevens van het grondwatermodel voor de gehele Kempen gebruikt. Deze zijn verkregen in de kaartvorm van 200×200m grids en vertaald naar 250×250m grids. Het totale areaal aan zinkas wegen bedraagt 236.125 m<sup>2</sup>, ofwel 0.55% van het totale gebied van 42.875.000 m<sup>2</sup> (Figuur 4.10).

De belasting vanuit de zinkassenwegen is als last toegevoegd door de gemiddelde concentraties van zink en cadmium in het bodemvocht onder zinkassenwegen te vermenigvuldigen met het neerslagoverschot en de fractie van het oppervlak. Als gemiddelde concentraties zijn gebruikt: 0,03 mg/l voor Cd en 15,0 mg/l voor Zn. Dit levert gemiddeld relatief lage concentraties op, met enkele hoge belastingen in rekengrids met een hoge bedekkingsgraad (Figuur 4.11). De aldus verkregen waarden zijn als extra bodembelasting aan maaiveld toegediend.

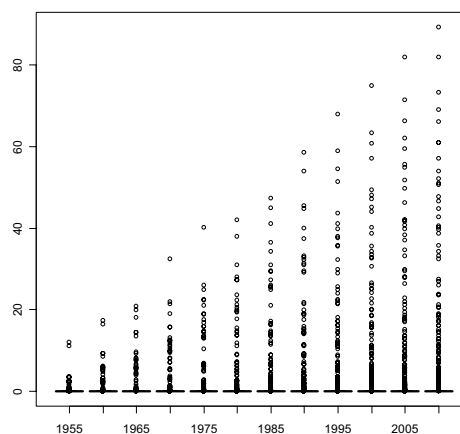
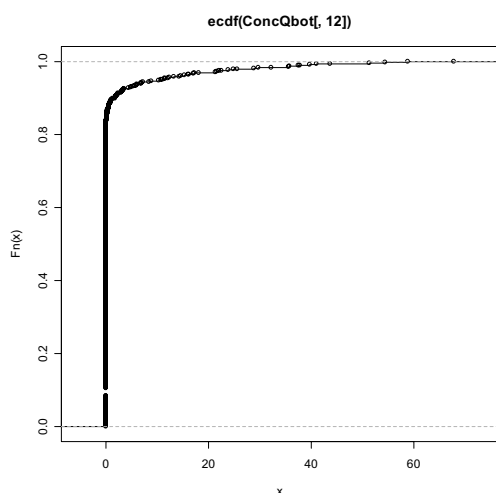


Figuur 4.10 Zinkas wegen: cumulatieve verdeling (m2) over de rekengrids binnen het gebied

Figuur 4.11 Zinkas Wegen. Boxplot van verdeling (m2) over de rekengrids binnen het gebied

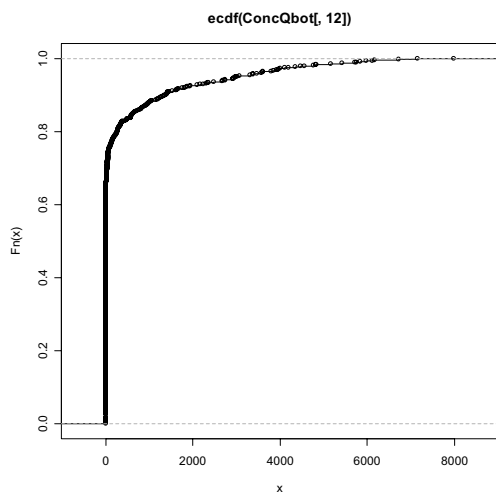
## 4.2.2 Onderrand Cd en Zn

Voor een inschatting van de concentraties op grotere diepte is gebruik gemaakt van de resultaten van de modelberekeningen voor de gehele Kempen. De concentraties zijn beschikbaar in de vorm van kaarten met concentraties per grid van 100×100 m voor elke 5 jaar in de periode 1955-2010. De kaarten bevatten de rekenresultaten voor een diepte van 7.5 – 9.5 meter. Deze kaarten zijn omgezet naar 250×250m-grids en vervolgens toegekend als concentratie aan de onderrand. De resultaten zijn voor Cd en Zn in Figuur 4.12 t/m Figuur 4.15 gegeven als cumulatieve frequentie verdelingen en boxplots. Voor de periode 1880 tot 1955 zijn de concentraties van het jaar 1995 gebruikt.

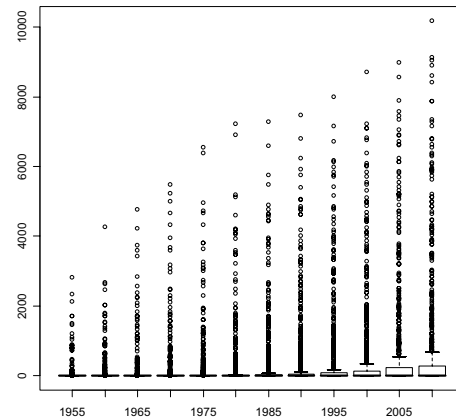


Figuur 4.12 Cd concentraties (µg/l): cumulatieve verdeling in 1995 over de rekengrids binnen het gebied

Figuur 4.13 Cd concentraties (µg/l) in ondergrond. Boxplot per jaar van verdeling over de rekengrids binnen het gebied



Figuur 4.14 Zn concentraties ( $\mu\text{g/l}$ ): cumulatieve verdeling in 1995 over de rekengrids binnen het gebied



Figuur 4.15 Zn concentraties ( $\mu\text{g/l}$ ) in ondergrond. Boxplot per jaar van verdeling over de rekengrids binnen het gebied

### 4.2.3 Verdeling van zware metalen tussen vaste fase en vloeistoffase in de bodem

#### *Sorptie-isothermen*

De verdeling van Cd en Zn tussen de waterfase in de bodem en de vaste fase van de bodem wordt in deze studie beschreven met een empirische relatie. Deze relatie heeft de vorm een Freundlich isotherm, waarbij de Freundlich-constante ( $K_f$ ) afhankelijk is van de bodemeigenschappen.

$$Q_{\text{reactief}} = K_f \cdot C^n, \quad \text{en} \quad (1)$$

$$\log K_f = \log(a_1 \cdot OM + a_2 \cdot k_{\text{lei}} + a_3 \cdot (Fe + Al_{\text{ox}})) + a_4 \cdot pH + a_5 \cdot \log DOC \quad (2)$$

waarbij  $Q_{\text{reactief}}$  is het reactieve zware metaalgehalte in de bodem ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $K_f$  is de Freundlich constante ( $\text{mg}^{1-n} \cdot \text{l}^n \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $C$  is de zware metaalconcentratie in het bodemvocht ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ );  $n$  is de Freundlich-exponent (-);  $OM$  is het organisch stofgehalte van de bodem (%);  $k_{\text{lei}}$  is het kleigehalte van de bodem (%),  $Fe + Al_{\text{ox}}$  is het gehalte reactief ijzer en aluminium in de bodem (bepaald met een oxalaat-extractie) ( $\text{mmol/kg}$ );  $pH$  is de pH-waarde van het bodemvocht;  $DOC$  is de concentratie opgelost organisch koolstof in het bodemvocht ( $\text{mg C} \cdot \text{l}^{-1}$ ); en  $a_1$  t/m  $a_5$  zijn metaalafhankelijke parameters.

Een uitgebreide beschrijving van deze Freundlich-isothermen en de verbeteringen ten opzichte van eerdere isothermen (Römkens et al., 2004) zijn opgenomen in (Bonten & Groenenberg, 2008).

Voor Cd en Zn hebben  $a_1$ - $a_5$  en  $n$  de volgende waardes:

Tabel 4.2 Regressie parameters voor sorptie-isothermen van Cd en Zn in de bodem

|    | $a_1$    | $a_2$    | $a_3$    | $a_4$ | $a_5$  | $n$   |
|----|----------|----------|----------|-------|--------|-------|
| Cd | 8.01E-02 | 3.14E-03 | 3.81E-03 | 0.235 | -0.151 | 0.445 |
| Zn | 1.00E-01 | 2.39E-02 | 5.40E-03 | 0.385 | -0.163 | 0.752 |

### Correctie totaal-reactief

De sorptie-isothermen gaan uit van zogenaamde “reactieve” gehalten in de bodem van zware metalen (operationeel gedefinieerd als het gehalte zoals bepaald met een 0,43 M HNO<sub>3</sub> extractie). Bodemgehalten worden in het algemeen bepaald met AquaRegia extractie, hetgeen een (pseudo) totaalgehalte oplevert. Om totale gehalten om te rekenen naar reactieve gehalten zijn door Römken et al. (2004) relaties afgeleid met de volgende algemene vorm:

$$\log Q_{\text{reactief}} = c_1 + c_2 \cdot \log OM + c_3 \cdot \log k_{\text{lei}} + c_4 \cdot \log Q_{\text{totaal}} \quad (3)$$

Voor Cd en Zn hebben  $c_1$  t/m  $c_4$  de volgende waardes:

Tabel 4.3 Regressie parameters voor correctief totale gehalten – reactieve gehalten van Cd en Zn in de bodem

|    | $c_1$  | $c_2$ | $c_3$  | $c_4$ |
|----|--------|-------|--------|-------|
| Cd | -0.089 | 0.022 | -0.062 | 1.075 |
| Zn | -0.703 | 0.183 | -0.298 | 1.235 |

### Schatting van DOC concentraties

De concentraties opgelost organisch koolstof (DOC) in de bodem zijn geschat met de volgende empirische relatie:

$$\log DOC = 2,31 + 0,29 \cdot \log OM - 0,098 \cdot pH, \quad R^2 = 0,40 \quad (4)$$

### Initialisatie van concentraties en gehalten

Bij de initialisatie van de gehalten in de bodem is er vanuit gegaan dat in 1880 alle metalen in de bodem van natuurlijke oorsprong waren en er dus nog geen belasting vanuit de zinkfabrieken of andere bronnen heeft plaatsgevonden. Deze zogenaamde achtergrondgehalten worden geschat als functie van het kleigehalte in de bodem (Bonten, van der Grift & Klein, 2008):

$$Q_{\text{totaal}} = d_1 \cdot k_{\text{lei}} + d_2 \quad (5)$$

In onderstaande tabel zijn voor Cd en Zn de waardes voor de parameters  $d_1$  en  $d_2$  weergegeven.

Tabel 4.4 Regressie parameters voor bepaling achtergrondgehalten van zware metalen in bovengrond en ondiepe ondergrond op basis van kleigehalte

| metaal | $d_1$  | $d_2$  | $R^2$ |
|--------|--------|--------|-------|
| Cd     | 0.0029 | 0.0517 | 0.26  |
| Zn     | 1.86   | 4.76   | 0.76  |

De initiële concentraties in de vloeistoffase van de bodem worden vervolgens berekend met behulp van de sorptie-isotherm (verg. 1 en 2) en de totaal-reactief correctie (verg. 5).

## 5 Resultaten en toetsing

### 5.1 Hydrologie

#### 5.1.1 Waterbalans

Voor de bodems van het landelijk gebied in het stroomgebied van de Keersop is een gemiddelde waterbalans opgesteld voor de periode 1986-2000 (Tabel 5.1). Daaruit blijkt dat er een gemiddelde aanvoer plaatsvindt van bijna 800 mm.jaar<sup>-1</sup>. De totale afvoer via verdamping bedraagt 522 mm.jaar<sup>-1</sup> en de gemiddelde waterafvoer naar het oppervlaktewater 204 mm.jaar<sup>-1</sup>. Het restant van 71 mm.jaar<sup>-1</sup> verdwijnt via de diepere ondergrond.

*Tabel 5.1 Waterbalans van het landelijk gebied in de Keersop; gemiddelde waarden (mm.jaar<sup>-1</sup>) voor de periode 1986-2000*

| Balansterm               | Wateraanvoer<br>(mm.jaar <sup>-1</sup> ) | Balansterm              | Waterafvoer<br>(mm.jaar <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------|------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|
| Neerslag                 | 763.2                                    | Verdamping Interceptie  | 77.3                                    |
| Irrigatie                | 4.1                                      | Verdamping Gewas        | 296.0                                   |
| Primaire waterlopen      | 0.5                                      | Verdamping Bodem        | 148.1                                   |
| Secundaire waterlopen    | 0.1                                      | Verdamping Sublimatie   | 0.8                                     |
| Infiltratie via greppels | 0.1                                      | Runoff                  | 1.8                                     |
| Kwel via onderrand       | 26.8                                     | Primaire waterlopen     | 15.6                                    |
|                          |                                          | Secundaire waterlopen   | 36.3                                    |
|                          |                                          | Greppelsdrainage        | 96.0                                    |
|                          |                                          | Maaiveld drainage       | 53.6                                    |
|                          |                                          | Buisdrainage            | 0.7                                     |
| Bergingsverandering      | 2.6                                      | Wegzijing via onderrand | 71.1                                    |
| Totale aanvoer           | 797.3                                    | Totale aanvoer          | 797.3                                   |

#### 5.1.2 Grondwaterstanden

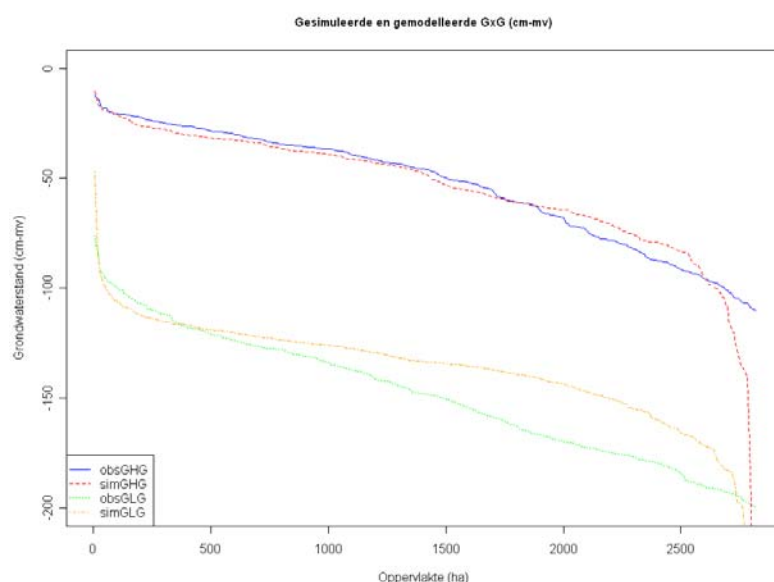
De berekende grondwaterstanden zijn getoetst aan recent gekarteerde grondwaterstanden (Gaast et al, 2006). Daarvoor is een vergelijking gemaakt tussen de ruimtelijke verdeling van de Gemiddeld Hoogste en Laagste Grondwaterstand, ofwel de GHG en de GLG (Figuur 5.1). Deze vergelijking is alleen gemaakt voor die gebieden waar de GLG ondieper is dan 2,0 m-mv, omdat diepere metingen niet door Gaast et al (2006) in beschouwing zijn genomen. In dit gebied kon daardoor een vergelijking gemaakt worden voor 66 % van het gebied. De resultaten (Tabel 5.2) laten zien dat de gemiddelde verschillen gering zijn: voor GHG en GLG respectievelijk 4,6 en 8,4 cm. De rekenresultaten voor de gesimuleerde grondwaterstanden zijn goed. Uit de cumulatieve frequentieverdeling (figuur 5.3) blijkt eveneens dat de beste resultaten behaald zijn voor de gebieden met relatief hoge grondwaterstanden, waar de GHG ondieper is dan 1,0 m-mv.

Tabel 5.2 Berekende en gemeten GHG en GLG (cm-mv)

| Variabele    | unit  | Berekend gemiddeld | Gemeten gemiddeld | Vershil gemiddeld |
|--------------|-------|--------------------|-------------------|-------------------|
| GHG          | cm-mv | 58.1               | 53.5              | 4.6               |
| GLG          | cm-mv | 140.1              | 148.5             | -8.4              |
| aantal Grids | -     | 451                | 451               |                   |



Figuur 5.1 Gemeten/gekarteerde GHG (links) en berekende GHG (rechts) op 250x250m. GHG in cm-mv.



Figuur 5.2 Berekende (sim-) GHG en GLG en gemeten (obs-) GHG en GLG

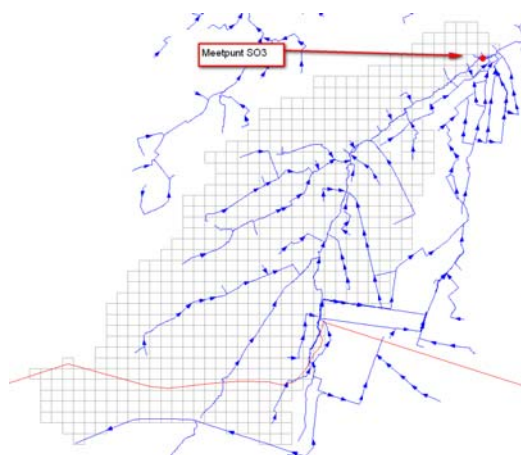
### 5.1.3 Waterafvoeren

Voor de toetsing van de afvoergegevens is gebruik gemaakt van de afvoermetingen bij Westerhoven (meetpunt S03 met coördinaten X=155800 en Y=371150, zie Figuur 5.3).

De resultaten zijn verkregen via calibratie met de wateraanvoer vanuit het Schelde-Maaskanaal in het zuidwesten van het gebied. Een eerste schatting van de afvoer vanuit het gebied hield rekening met een wateraanvoer van  $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Na calibratie zijn de huidige waterafvoeren verkregen met een gekalibreerde wateraanvoer van  $0.15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

De berekende en gemeten afvoeren in het meetpunt zijn als dagelijkse en cumulatieve debiet weergegeven in Tabel 5.3, Figuur 5.4 en Figuur 5.5. De cumulatieve jaarlijkse en maandelijkse gemiddelde afvoeren zijn gegeven in de Figuur 5.6 en Figuur 5.7.

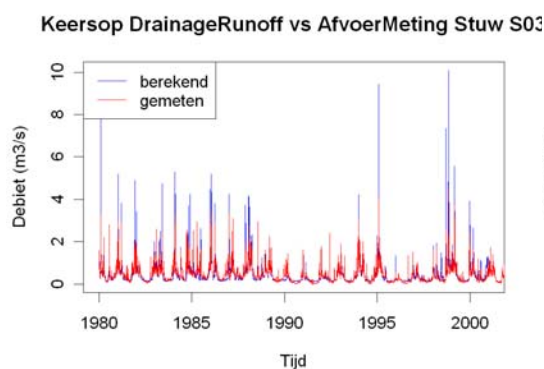
Uit de vergelijking van de dagelijkse waarden blijkt dat de gemiddelde afvoeren goed worden gesimuleerd met een berekende en gemeten afvoer van respectievelijk 0.45 en 0.43  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . De cumulatieve afvoer in extreem natte jaren, zoals 1998, is in de berekeningen hoger dan de metingen. De cumulatieve afvoeren over langere periodes wordt echter goed gesimuleerd (zie Figuur 5.5 en Figuur 5.6). Bovendien vertoont de berekende langjarig gemiddelde maandelijkse afvoer een dynamiek die de werkelijkheid goed weergeeft (Figuur 5.7).



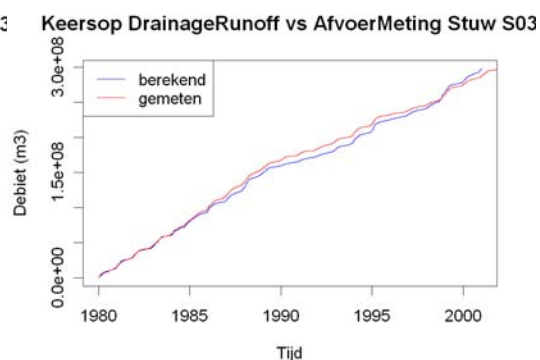
Figuur 5.3 Locatie meetpunt S03 (X=155800, Y=371150)

Tabel 5.3 Gemeten en berekende afvoer ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) in meetpunt S03

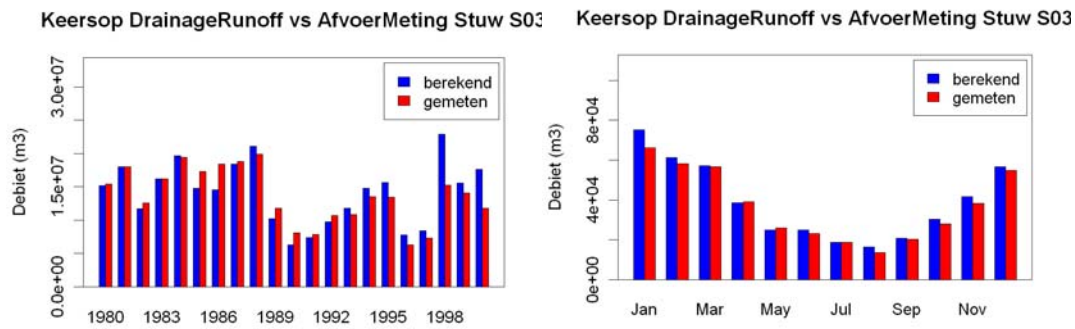
| Omschrijving                                          | min  | 1ste kwartiel | mediaan | gemiddelde | 3e kwartiel | max   |
|-------------------------------------------------------|------|---------------|---------|------------|-------------|-------|
| Berekende afvoer ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 0.15 | 0.17          | 0.26    | 0.45       | 0.56        | 10.08 |
| Gemeten afvoer ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )   | 0.00 | 0.17          | 0.32    | 0.43       | 0.55        | 4.57  |



Figuur 5.4 Gemeten en berekende afvoeren ( $\text{m}^3/\text{s}$ )



Figuur 5.5 Gemeten en berekende cumulatieve afvoeren ( $\text{m}^3$ )



Figuur 5.6 Gemeten en berekende jaarlijkse afvoeren ( $m^3/jr$ ); periode 1980-2000

Figuur 5.7 Gemeten en berekende maandelijkse afvoeren ( $m^3/mnd$ ); gemiddeld periode 1980-2000

## 5.2 Zware metalen Cd en Zn

De uitkomsten van de modelberekeningen voor het transport van cadmium en zink zijn op 4 verschillende manieren getoetst aan metingen van bodem- en waterkwaliteit:

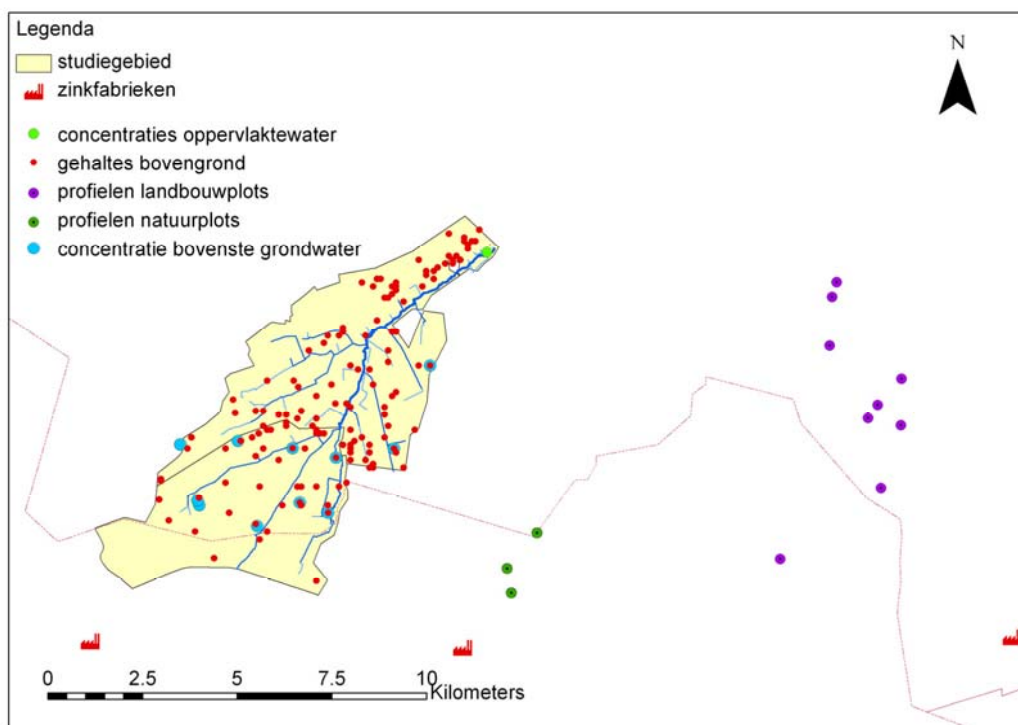
- vergelijking tussen gemeten en berekende gehalten in de bovengrond;
- vergelijking tussen gemeten en berekende profielen van Cd en Zn gehalten in de bodem;
- vergelijking tussen gemeten en berekende concentraties in het bovenste grondwater;
- vergelijking tussen gemeten en berekende concentraties in het oppervlaktewater.

De locaties van alle monsterpunten zijn weergegeven in Figuur 5.8.

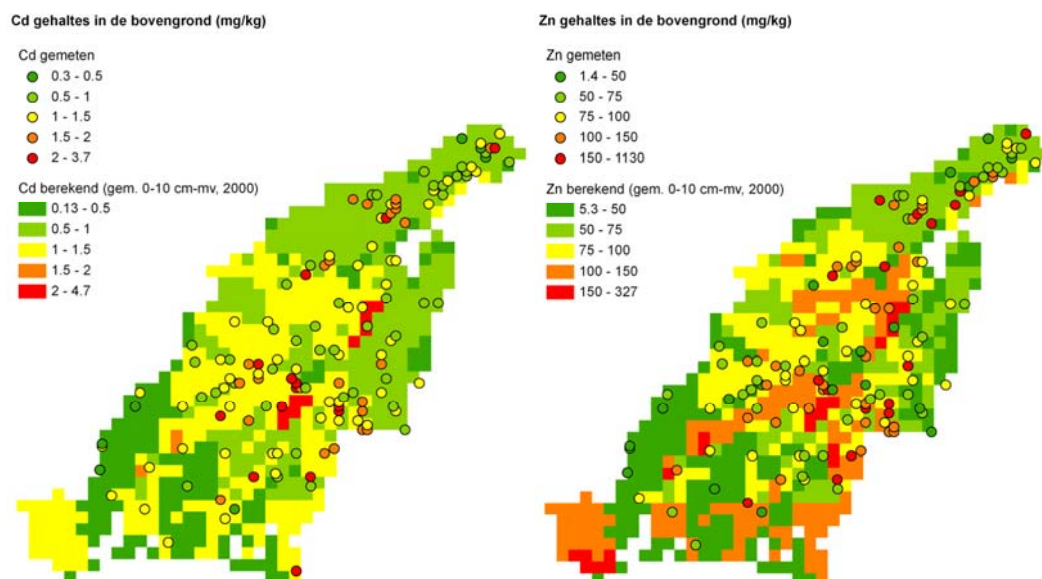
### 5.2.1 Gehaltes in de bovengrond

De berekende gehalten van Cd en Zn in de bovengrond in het jaar 2000 zijn vergeleken met metingen van gehalten in monster uit de periode 1990-2007. Als gehalte in de bovengrond is het gemiddelde gehalte tussen 0 en 10 cm –mv genomen. Dit komt overeen met de bemonsteringsdieptes van de meeste bovengrondmonsters.

In Figuur 5.9 zijn de gemeten en de berekende gehalten van Cd en Zn in bovengrond van het studiegebied weergegeven. Uit deze figuur blijkt dat de berekende gehalten van cadmium en zink in het algemeen binnen het bereik liggen van de gemeten gehalten.



Figuur 5.8 Locaties van monsterpunten voor toetsing modelberekeningen



Figuur 5.9 Gemeten en berekende gehalten van Cd en Zn in de bovengrond (0-10 cm –mv) voor het jaar 2000.

### 5.2.2 Cd en Zn gehalten in bodemprofielen

Voor een vergelijking van profielen van cadmium- en zinkgehalten in de bodem zijn zeven verschillende gridcellen geselecteerd met een verschillend landgebruik en/of hydrologie. Er zijn vier landbouwplots geselecteerd (twee natte en twee droge) en twee natuurplots (één natte en twee droge). In Tabel 5.4 zijn de belangrijkste kenmerken per plot weergegeven.

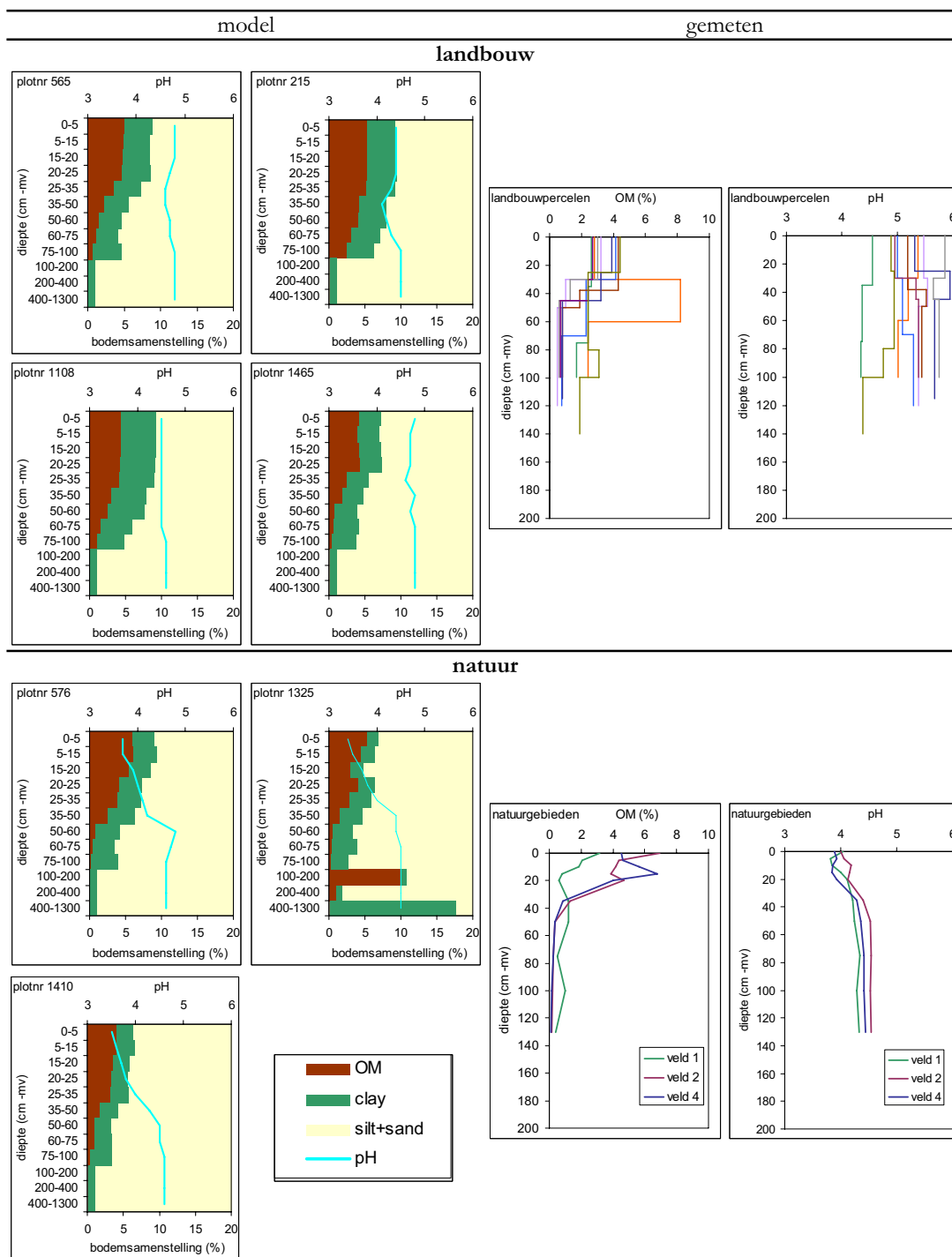
*Tabel 5.4 Kenmerken geselecteerde gridcellen*

| plotnr      | 565                  | 215                  | 1108            | 1465            | 576                 | 1325                | 1410    |
|-------------|----------------------|----------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------|
| STONEplot   | 4868                 | 5420                 | 4901            | 5349            | 6247                | 6246                | 5090    |
| GT          | III                  | VII                  | III             | VI              | III                 | VI                  | VII     |
| GLG         | 23.5                 | 108.1                | 23.9            | 56.5            | 17.4                | 44.4                | 79.5    |
| GHG         | 108.6                | 180.4                | 116.5           | 136.3           | 106.8               | 130.2               | 167.6   |
| bodemtype   | zand                 | zand                 | zand            | zand            | zand                | zand                | zand    |
| landgebruik | maïs (niet beregend) | maïs (niet beregend) | gras (beregend) | gras (beregend) | natuurlijk grasland | natuurlijk grasland | douglas |

De geselecteerde profielen worden vergeleken met profielen gemeten in landbouwplots (Rietra et al., 2004) en in natuurplots (Wilkens & Loch, 1997). De landbouwplots liggen op ongeveer 12 kilometer ten oosten van het studiegebied. De natuurplots liggen ongeveer 5 kilometer ten oosten van het studiegebied en relatief dicht bij de zinkfabriek van Overpelt (zie ook Figuur 5.8).

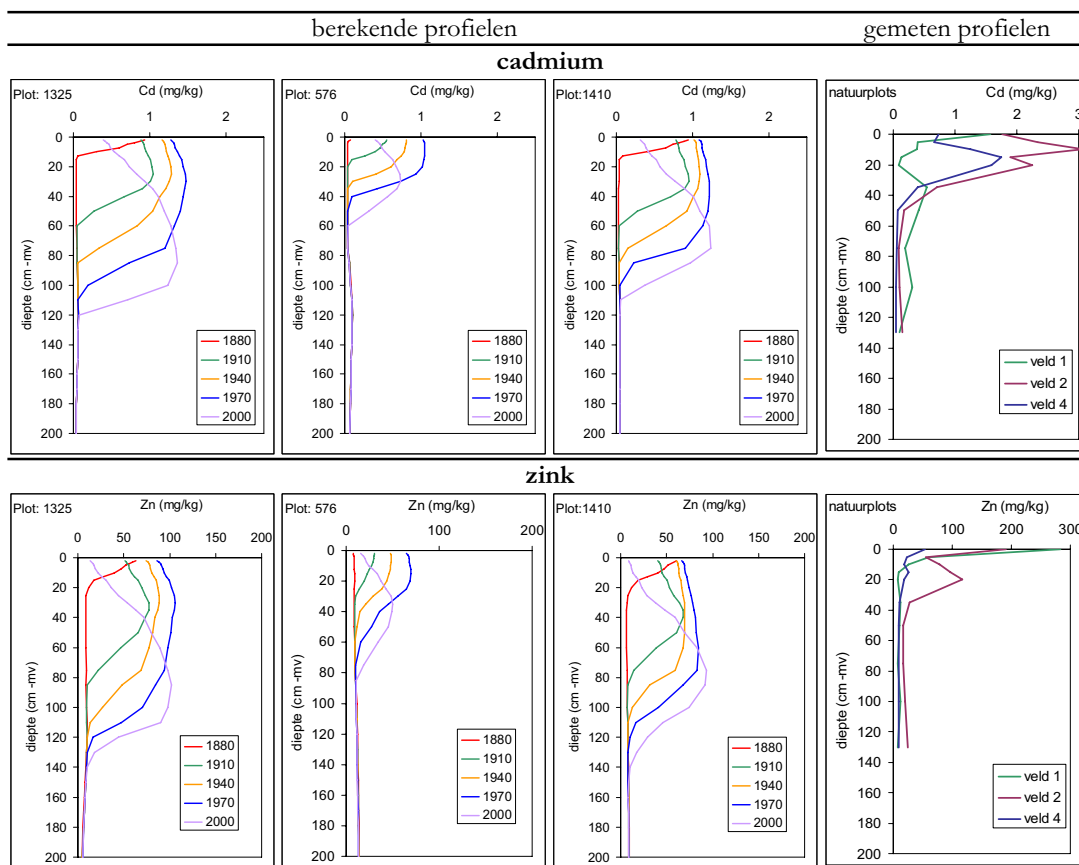
#### ***Bodemeigenschappen***

Om de berekende te profielen te kunnen vergelijken met gemeten profielen, moeten ook de bodemeigenschappen, vooral organisch stofgehalte en pH, zoveel mogelijk overeenkomen. In Figuur 5.10 zijn de bodemeigenschappen van de verschillende plots weergegeven. Voor zowel de landbouw als de natuurplots geldt dat de organische stofgehalten een redelijke overeenkomst vertonen tussen gemeten waarden en de waarden modelplots, terwijl de pH van de geselecteerde modelplots in het algemeen lager is dan van de gemeten profielen.



*Figuur 5.10 Bodemeigenschappen van geselecteerde plots en bodemeigenschappen van bemonsterde profielen*

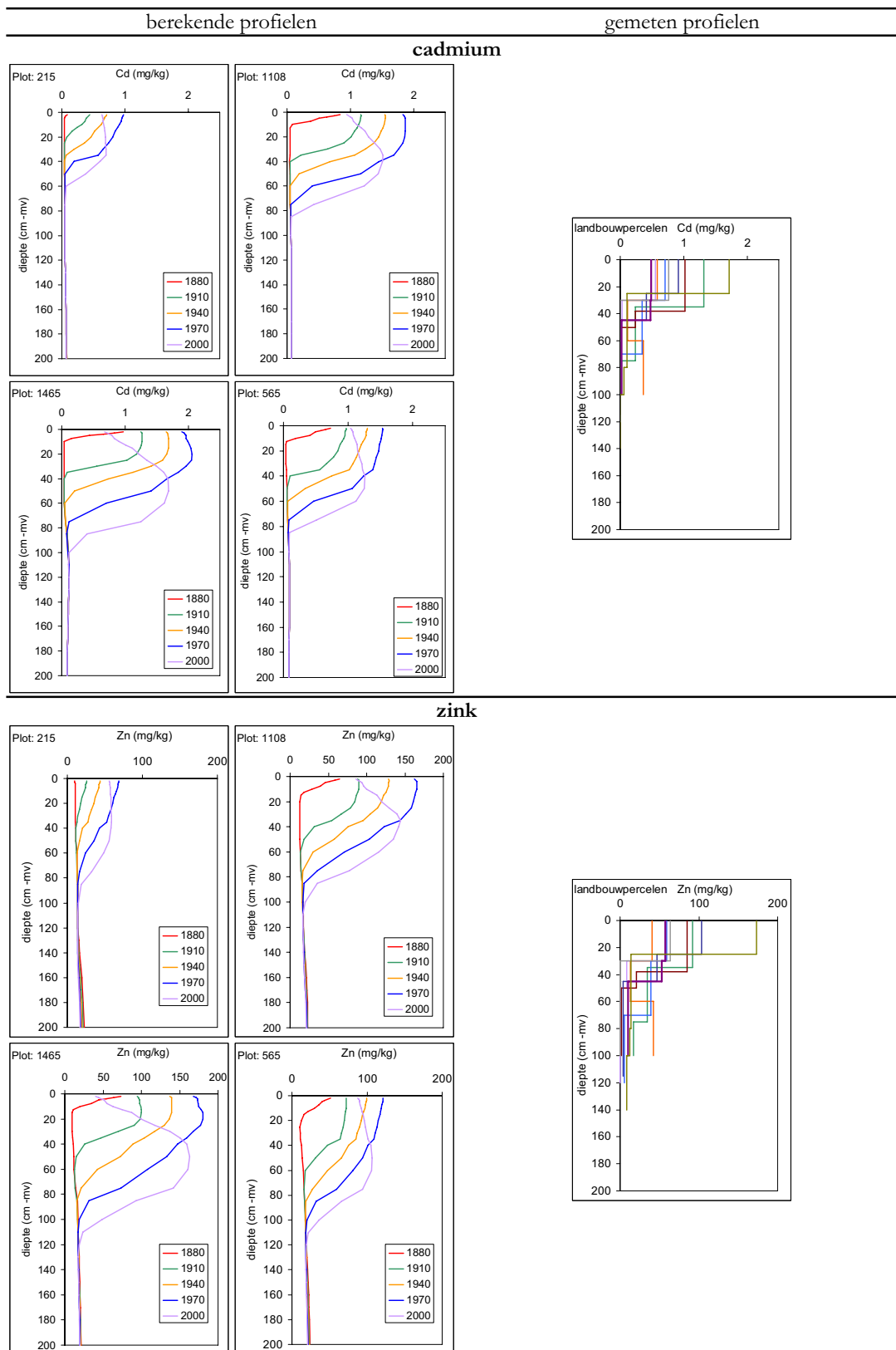
Dit betekent dat in de gemeten profielen een sterkere sorptie van cadmium en zink wordt verwacht en dus een langzamer transport van cadmium en zink naar diepere bodemlagen. De gemeten en berekende profielen van cadmium en zink in natuurplots zijn weergegeven in Figuur 5.11.



*Figuur 5.11 Berekende en gemeten profielen van Cd en Zn in natuurplots. Berekende profielen voor vijf verschillende jaren. Gemeten profielen voor jaar 1990.*

Uit deze figuren blijkt dat in de modelberekeningen een veel hogere transportsnelheid wordt waargenomen dan in de metingen. In de modelberekeningen worden voor het jaar 2000 de hoogste gehalten berekend bij dieptes variërend van 30 tot 90 cm –mv. De metingen laten wel al voor enkele profielen een afname van de gehalten in de bovenste lagen zien, maar de maximale gehalten bevinden zich niet dieper dan 20 cm –mv. De verschillen tussen modelberekeningen en metingen zijn het grootst voor zink. In twee profielen van de metingen bevindt het zink zich nog volledig bovenin het profiel. De lagere pH waarden in de modelprofielen zullen gedeeltelijk de hogere transportsnelheden in de modelberekeningen veroorzaken. Andere mogelijke oorzaken zijn een onderschatting van de sorptie van cadmium en zink aan de bodem.

De gemeten en berekende profielen van cadmium en zink in landbouwplots zijn weergegeven in Figuur 5.12.

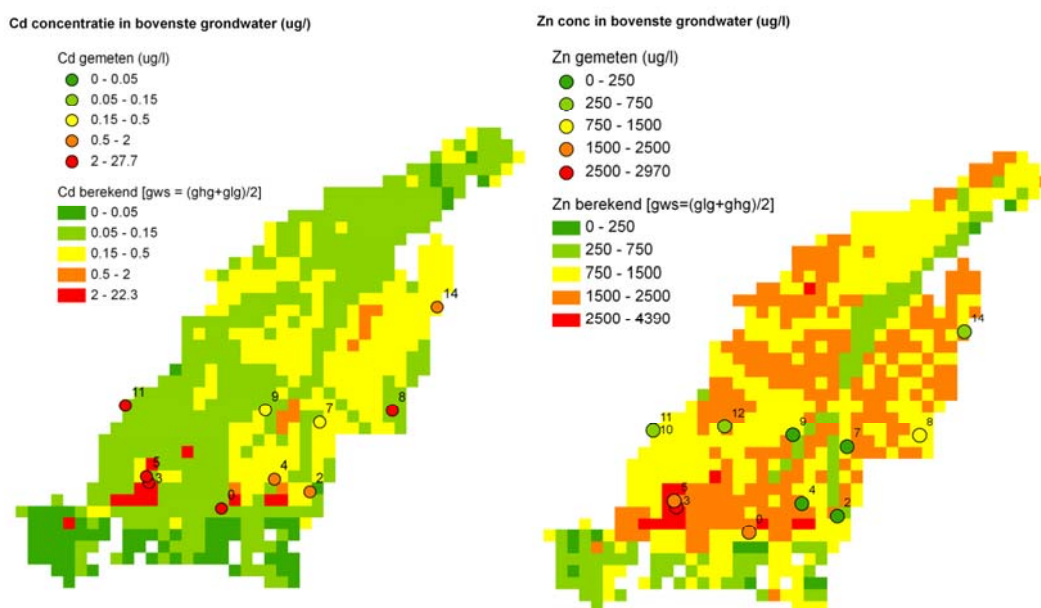


Figuur 5.12 Berekende en gemeten profielen van Cd en Zn in landbouwplots. Berekende profielen voor vijf verschillende jaren. Gemeten profielen voor jaar 2003.

Uit voorgaande figuren blijkt dat de berekende profielen een duidelijk transport van cadmium en zink laten zien. Voor het laatste jaar (2000) worden de hoogste gehalten berekend voor een diepte van ongeveer 40 cm –mv. In de gemeten profielen bevinden de hoogste gehalten zich nog in de eerste bemonsterde bodemlaag (0-ong. 30 cm –mv). Dit betekent dat de modelberekeningen uitgaan van een hogere transportsnelheid dan wordt gemeten. Gedeeltelijk zal dit veroorzaakt worden doordat de geselecteerde modelplots een lagere pH hebben dan de bemonsterde profielen. De lagere pH zorgt voor een geringere sorptie en daarmee voor een hogere transportsnelheid.

### 5.2.3 Concentraties in het bovenste grondwater

In Figuur 5.13 zijn de gemeten en berekende concentraties van cadmium en zink in het bovenste grondwater weergegeven voor het jaar 2000. Voor de modelberekeningen is het bovenste grondwater gedefinieerd als de eerste meter vanaf de gemiddelde grondwaterstand, waarbij voor de gemiddelde grondwaterstand het gemiddelde van GLG en GHG is aangehouden.

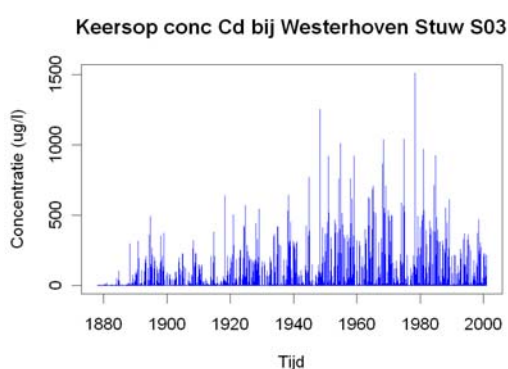


Figuur 5.13 Gemeten en berekende concentraties van Cd (links) en Zn (rechts) in het bovenste grondwater voor het jaar 2000. Concentraties in µg/l.

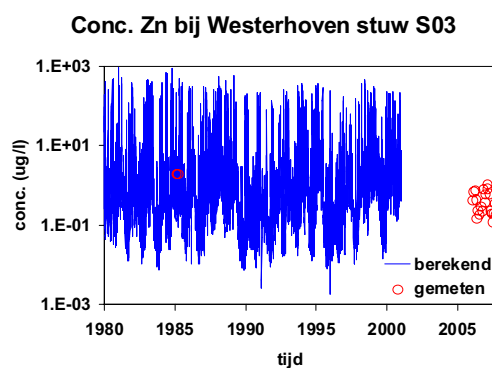
De figuren laten zien dat de modelberekeningen te hoge concentraties van zink in het bovenste grondwater voorspellen. Voor cadmium lijken de berekende concentraties eerder te laag. De te hoge concentraties van zink zijn in overeenstemming met de te hoge transportsnelheid zoals die is gevonden bij de vergelijking tussen gemeten en berekende profielen in de bodem.

## 5.2.4 Concentraties in het oppervlaktewater

De berekende concentraties zijn eveneens vergeleken met de gemeten concentraties in het meetpunt SO3 bij Westerhoven, bij het meetpunt waar ook de waterafvoeren zijn gemeten. De resultaten voor Cd en Zn zijn weergegeven in Figuur 5.14 t/m Figuur 5.17 en enkele statistische kenmerken in Tabel 5.5 en Tabel 5.6. De berekende Cd-concentraties liggen binnen het bereik van de metingen; de berekende Zn-concentraties zijn duidelijk hoger dan de gemeten waarden. Dit is in overeenstemming met wat in de vorige paragrafen is aangetoond voor de concentraties in de bodem.



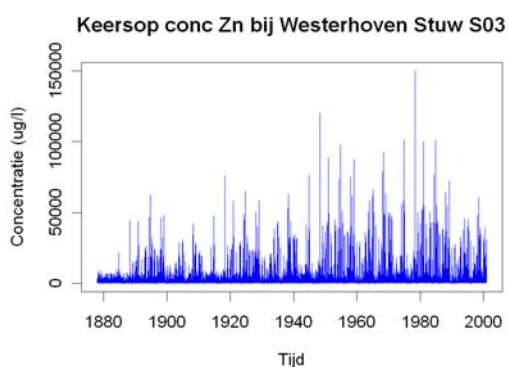
Figuur 5.14 Berekende concentraties Cd ( $\mu\text{g/l}$ )



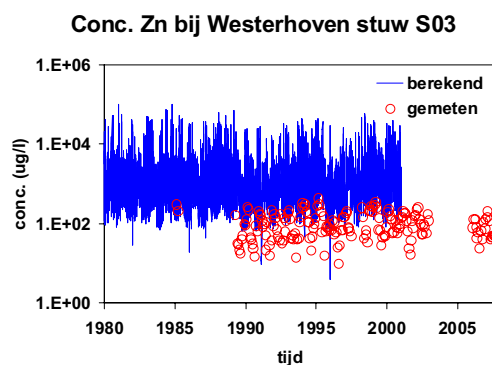
Figuur 5.15 Berekende en gemeten concentraties Cd ( $\mu\text{g/l}$ )

Tabel 5.5 gemeten en berekende Cd-conc ( $\mu\text{g/l}$ ) 1980-2000, Keersop Westerhoven  $X=155980$   $Y=371180$

| Omschrijving                         | min  | 1ste kwartiel | mediaan | gemiddelde | 3e kwartiel | Max   |
|--------------------------------------|------|---------------|---------|------------|-------------|-------|
| Berekend Conc Cd ( $\mu\text{g/l}$ ) | 0.0  | 0.1           | 0.4     | 9.8        | 1.6         | 970.3 |
| Gemeten Conc Cd ( $\mu\text{g/l}$ )  | 0.12 | 0.22          | 0.37    | 0.56       | 0.72        | 2     |



Figuur 5.16 Berekende concentraties Zn ( $\mu\text{g/l}$ )

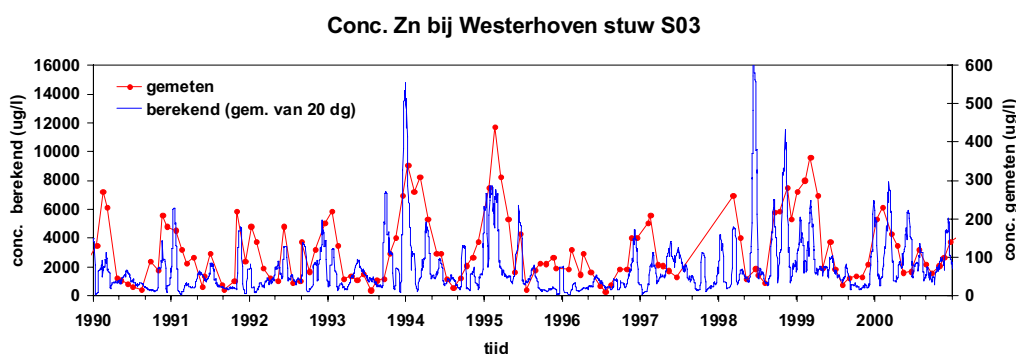


Figuur 5.17 Berekende en gemeten concentraties Zn ( $\mu\text{g/l}$ )

Tabel 5.6 gemeten en berekende Zn-conc ( $\mu\text{g/l}$ ) 1980-2000, Keersop Westerhoven  $X=155980$   $Y=371180$

| Omschrijving                         | min  | 1ste kwartiel | mediaan | gemiddelde | 3e kwartiel | Max      |
|--------------------------------------|------|---------------|---------|------------|-------------|----------|
| Berekend Conc Zn ( $\mu\text{g/l}$ ) | 4.0  | 289.5         | 603.3   | 2077.0     | 1392.0      | 100600.0 |
| Gemeten Conc Zn ( $\mu\text{g/l}$ )  | 10.0 | 48            | 84      | 113        | 160         | 440      |

Ondanks de grote verschillen tussen gemeten en berekende concentraties komt de variatie in de concentraties in de tijd wel goed overeen voor de berekeningen en de metingen. In Figuur 5.18 zijn de berekende en gemeten concentraties voor de periode 1990-2000 weergegeven (N.B. verschillende y-assen voor berekende en gemeten concentraties). Uit deze figuur blijkt dat zowel de berekeningen als de metingen voor de meeste jaren hogere concentraties laten zien in de winter dan in de zomerperiodes.



Figuur 5.18 Gemeten en berekende concentraties van Zn voor de periode 1990-2000. Linker y-as heeft betrekking op berekende concentraties, rechter y-as op gemeten concentraties.

## 5.3 Resultaten scenario's

### 5.3.1 Definitie

Uit de reeks van 30 jaar zijn 3 jaren gekozen met een droog, nat en gemiddeld neerslagoverschot (neerslag minus evapotranspiratie, zie Tabel 5.7). Deze jaren zijn gebruikt voor de scenarioanalyse.

Tabel 5.7 De gekozen jaren voor een droog, nat en gemiddelde toestand.

| Omschrijving           | Jaar | Neerslag<br>( $\text{mm j}^{-1}$ ) | ET_Makkink<br>( $\text{mm j}^{-1}$ ) | N-ET<br>( $\text{mm j}^{-1}$ ) |
|------------------------|------|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| 10% droog <sup>2</sup> | 1990 | 602.8                              | -606.7                               | -3.9                           |
| gemiddeld              | 1993 | 753.5                              | -537.2                               | 216.3                          |
| 10% nat <sup>3</sup>   | 1988 | 942.3                              | -526.1                               | 416.2                          |

Met de genoemde 3 jaren (droog, gemiddeld en nat) zijn berekeningen uitgevoerd voor de huidige situatie (jaar 2001) en voor een toekomstige situatie (jaar 2061). De resultaten zijn gepresenteerd voor verschillende landgebruikvormen, bodemtypen en grondwatersituatie.

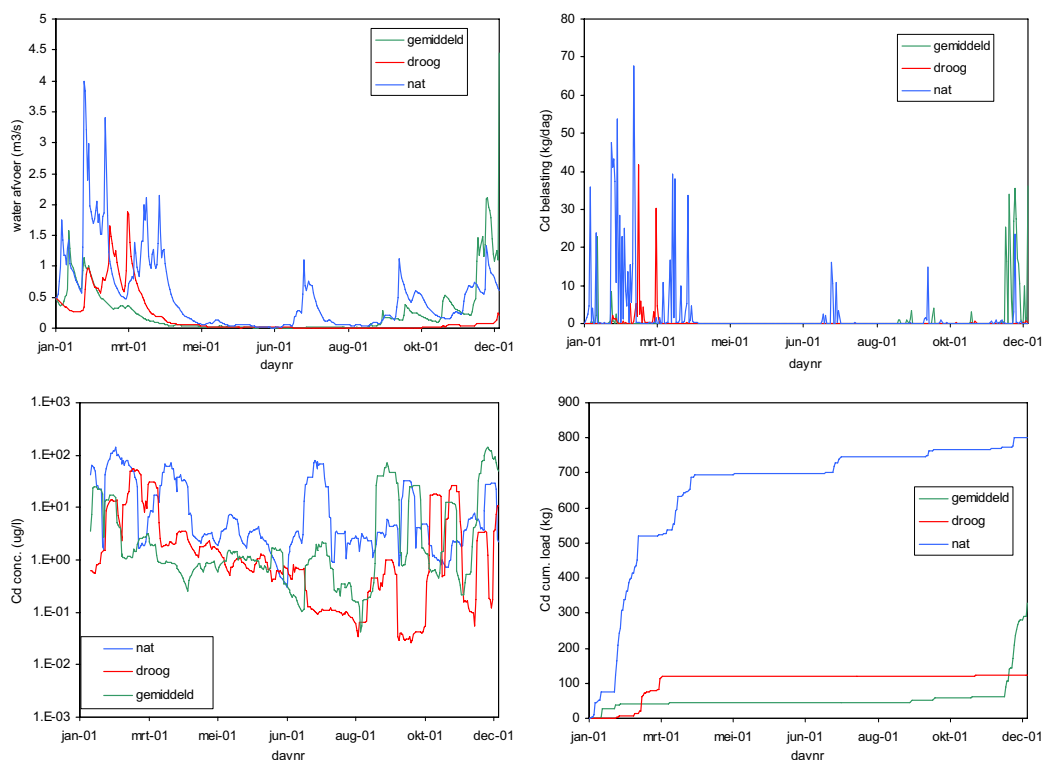
<sup>2</sup> 10%droog: 10 % van de jaren heeft een neerslagoverschot gelijk of kleiner dan de genoemde waarde

<sup>3</sup> 10% nat: 10 % van de jaren heeft een neerslagoverschot gelijk of groter dan de genoemde waarde

### 5.3.2 Afvoer water en belasting zware metalen

De afvoer van water en de belasting met zware metalen vertoont een dynamiek die sterk door de weersomstandigheden wordt bepaald. Waterafvoer vindt voornamelijk plaats in het vroege voorjaar en in het najaar. De patronen van stofvrachten aan Cd en Zn zijn overeenkomstig en sterk gerelateerd aan de waterafvoer. Ter illustratie is de belasting van Cd in een huidige droog, gemiddeld en nat jaar opgenomen in Figuur 5.19.

Deze figuren illustreren dat een toename van de waterafvoer tevens leidt tot een toename van de concentratie van Cd (en Zn) in de belasting van het oppervlaktewater. Deze toename van de concentratie wordt veroorzaakt doordat een hoge waterafvoer optreedt in geval van hoge grondwaterstanden, waarbij Cd en Zn uit de bovenste en meest verontreinigde bodemlagen worden afgevoerd. De relatie tussen waterafvoer en de belasting met Cd en Zn is hierdoor niet lineair.



*Figuur 5.19 Waterafvoer (linksboven), Cd-concentraties (10 daags-voortschrijdend gemiddelde, linksonder), Cd-belasting (rechtsboven) en cumulatieve Cd-belasting (rechtsonder) vanuit de bodem naar het oppervlaktewatersysteem*

De niet-lineaire relatie tussen waterafvoer en oppervlaktewaterbelasting wordt verder geïllustreerd in Tabel 5.8, waarin de procentuele waterafvoer en stofvrachten voor de huidige en toekomstige situatie worden besproken. Uit de tabel blijkt dat de waterafvoer in een nat jaar 3 maal hoger is dan de afvoer in een droog jaar. In de huidige situatie echter zijn de Cd- en Zn-vrachten in een nat jaar respectievelijk 6,5 en 6,0 maal zo hoog als de afvoer in een droog jaar. In de toekomstige situatie (2060)

is dit respectievelijk 5,3 en 4,6. De kleinere verschillen tussen natte en droge jaren voor de toekomstige situatie worden veroorzaakt doordat de Cd en Zn-verontreinigingen steeds dieper in de bodem zakken, waardoor in de toekomstige situatie ook in droge jaren uitspoeling uit de verontreinigde lagen optreedt.

*Tabel 5.8 Relatieve waterafvoeren, Cd- en Zn-vrachten in de huidige en toekomstige situatie (jaren 2001 en 2061); waarden in % van de waarden van het jaar met gemiddelde weer*

| Type weer | Huidige situatie            |                           |                            | Toekomstige situatie       |                            |
|-----------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|           | Waterafvoer<br>(% van gem.) | Cd-vracht<br>(% van gem.) | Zn- vracht<br>(% van gem.) | Cd- vracht<br>(% van gem.) | Zn- vracht<br>(% van gem.) |
| droog     | 68                          | 38                        | 40                         | 44                         | 52                         |
| gemiddeld | 100                         | 100                       | 100                        | 100                        | 109                        |
| nat       | 201                         | 244                       | 232                        | 232                        | 243                        |

De verdeling van de waterafvoer over de verschillende onderscheiden landgebruikvormen, bodemsoorten en grondwatertrappen is gegeven in Bijlage 2 voor het droge, gemiddelde en het natte weerjaar. Uit de verdeling over de landgebruikvormen (Tabel 5.9) blijkt dat de meeste waterafvoer (ruim 55%) afkomstig is van al dan niet beregend grasland. Vanuit de natuur komt ruim 14% van de waterafvoer in droge jaren en 12% in natte jaren.

*Tabel 5.9 Relatieve verdeling van de waterafvoer over de landgebruikvormen van het studiegebied (% van totaal)*

| landgebruik                       | droog | gemiddeld | nat  |
|-----------------------------------|-------|-----------|------|
| grasland beregend                 | 38%   | 39%       | 38%  |
| grasland niet beregend            | 17%   | 16%       | 17%  |
| bos douglas                       | 9%    | 5%        | 9%   |
| maïs beregend                     | 7%    | 9%        | 8%   |
| maïs niet-beregend                | 7%    | 9%        | 8%   |
| natuurlijk grasland niet-beregend | 5%    | 5%        | 4%   |
| bouwland beregend                 | 5%    | 5%        | 5%   |
| bouwland onberegend               | 11%   | 12%       | 12%  |
| totaal                            | 100%  | 100%      | 100% |

De verdeling van de Cd-vrachten over de verschillende onderscheiden landgebruikvormen, bodemsoorten en grondwatertrappen is gegeven in bijlage 3 voor het droge, gemiddelde en het natte weerjaar. Vanuit de natuur komt 2% van de afvoer in een gemiddeld jaar en 6% in natte jaren (Tabel 5.10). Uit de verdeling over de overige landgebruikvormen blijkt dat de grootste Cd-vracht (ca 50%) afkomstig is van bouwland. De overige Cd-vrachten zijn afkomstig van snijmaïs en grasland, welke elk ongeveer 15-20% bijdragen.

De verdeling van de Zn-vrachten over de verschillende onderscheiden landgebruikvormen, bodemsoorten en grondwatertrappen is gegeven in bijlage 4 voor het droge, gemiddelde en het natte weerjaar. Uit de verdeling over de landgebruikvormen (Tabel 5.11) blijkt dat de verdeling van de Zn-vracht redelijk overeenkomt met de verdeling van de Cd-vracht. Opvallend zijn de hogere afvoeren vanuit onberegend grasland en snijmaïs.

*Tabel 5.10 Bijdrage van de verschillende landgebruiksvormen in het studiegebied aan de totale Cd vracht (% van totaal)*

| landgebruik                       | droog | gemiddeld | nat  |
|-----------------------------------|-------|-----------|------|
| grasland beregend                 | 15%   | 15%       | 17%  |
| grasland niet beregend            | 1%    | 1%        | 1%   |
| bos douglas                       | 1%    | 1%        | 5%   |
| maïs beregend                     | 19%   | 19%       | 16%  |
| maïs niet-beregend                | 11%   | 11%       | 9%   |
| natuurlijk grasland niet-beregend | 1%    | 1%        | 1%   |
| bouwland beregend                 | 14%   | 14%       | 11%  |
| bouwland onberegend               | 37%   | 37%       | 39%  |
| totaal                            | 100%  | 100%      | 100% |

*Tabel 5.11 Bijdrage van de verschillende landgebruiksvormen in het studiegebied aan de totale Zn vracht (% van totaal)*

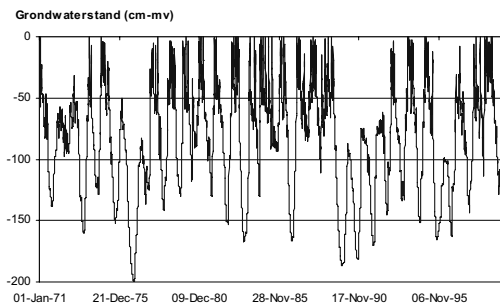
| landgebruik                       | droog | gemiddeld | nat  |
|-----------------------------------|-------|-----------|------|
| grasland beregend                 | 17%   | 15%       | 17%  |
| grasland niet beregend            | 5%    | 4%        | 4%   |
| bos douglas                       | 5%    | 1%        | 3%   |
| maïs beregend                     | 14%   | 18%       | 15%  |
| maïs niet-beregend                | 14%   | 17%       | 15%  |
| natuurlijk grasland niet-beregend | 1%    | 1%        | 1%   |
| bouwland beregend                 | 12%   | 14%       | 11%  |
| bouwland onberegend               | 33%   | 31%       | 33%  |
| totaal                            | 100%  | 100%      | 100% |



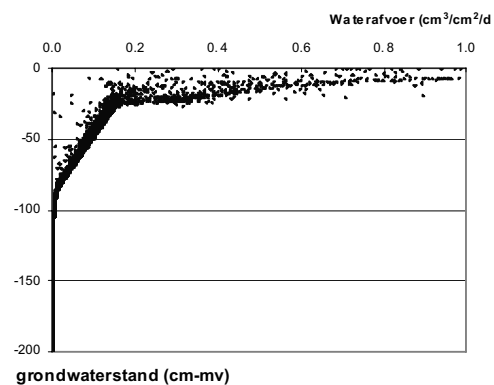
## 6 Discussie en conclusies

### 6.1 Discussie

Deze modelstudie maakt onderdeel uit van een modelstudie naar het transport van zink en cadmium in het grondwater van de gehele Vlaamse en Nederlandse Kempen. In het grondwatermodel voor de gehele Kempen wordt vanwege het grotere studiegebied gebruik gemaakt van een stationaire benadering met betrekking tot de hydrologie. In deze studie wordt voor de hydrologie echter een dynamische benadering gekozen. Om de gevolgen en het belang van dynamische berekeningen te verduidelijken zijn de resultaten van een bepaalde rekeneenheid afzonderlijk geanalyseerd. Het betreft een bouwlandplot die centraal in het gebied is gelegen en een grondwaterstandverloop heeft dat varieert tussen maaiveld en 200 cm diepte (Figuur 6.1) gedurende de klimaatreeks 1971-2000. De waterafvoer gedurende deze periode neemt toe als de grondwaterstand stijgt (Figuur 6.2).



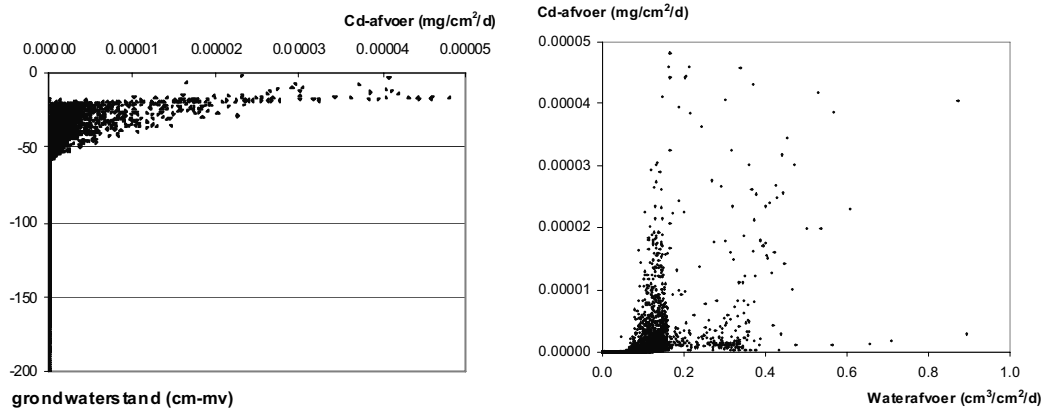
Figuur 6.1 Berekende grondwaterstand (cm-mv) rekeneenheid 1190



Figuur 6.2 Berekende grondwaterstand (cm-mv) als functie van waterafvoer (cm.d<sup>1</sup>)

In principe wordt water afgevoerd naar het oppervlaktewater als de grondwaterstand stijgt tot boven de oppervlaktewaterpeilen. De relatie is niet lineair en toont een duidelijke spreiding (Figuur 6.2). Er is geen waterafvoer bij diepe grondwaterstanden en een sterk (exponentieel) toenemende waterafvoer bij grondwaterstanden aan maaiveld. Ook de Cd-vracht is gerelateerd aan de grondwaterstand (Figuur 6.3) en laat zien dat de grootste belastingen bij ondiepe grondwaterstanden plaatsvinden. De relatie tussen Cd-vracht en waterafvoer (Figuur 6.4) is minder eenduidig. De berekende concentraties wijken soms veel af van de lange-termijn gemiddelde concentratie die met een stationaire benadering van de hydrologie zou worden berekend. Ook het gemiddelde van de dagwaarden wijkt af van de concentratie die met een stationaire benadering van de hydrologie berekend zou worden. De spreiding in de relatie tussen Cd-vracht en waterafvoer (Figuur 6.4) is eveneens de spreiding die men in concentraties mag verwachten. Aanvullende (debiet-

proportionele) metingen in het oppervlaktewater en analyses zijn nodig om de relatie tussen de afvoer van water en (vrachten van) zware metalen nader te onderbouwen. Indien geen rekening wordt gehouden met de variatie in grondwaterstanden zal de berekende Cd-vracht te weinig dynamiek vertonen. Afhankelijk van de gekozen grondwaterstand zal de belasting aan zware metalen worden onderschat of overschat. Gelet op het dynamische karakter van zowel de waterafvoer als de Cd-vracht lijkt het gewenst om voor realistische schattingen van de vrachten zware metalen rekening te houden met de dynamiek van de grondwaterstanden. Door het dynamische en niet-lineaire karakter van de Cd en Zn vrachten is het te verwachten dat de belasting van het oppervlaktewater bij gemiddelde grondwaterstanden een onderschatting geeft van langjarige daggemiddelde stofvracht. Naarmate de metalen verder zullen uitzakken in de bodem zal dit effect kleiner worden.



*Figuur 6.3 Berekende Cd-vracht ( $\text{mg cm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) als functie van grondwaterstand (cm-mv)* *Figuur 6.4 Berekende Cd-vracht ( $\text{mg cm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) als functie van waterafvoer ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-2}\text{d}^{-1}$ )*

Bovenstaande sluit aan de bevindingen van de scenario's waarin de vrachten van zware metalen het grootst zijn in periodes met hoge grondwaterstanden en hoge waterafvoeren.

## 6.2 Conclusies

De doelstelling van deze modelstudie is het verwerven van inzicht in de invloed van seizoensdynamiek en meteorologische variatie op de belasting van het oppervlaktewater in de Kempen met zink en cadmium.

Uit deze studie kunnen de volgende algemene conclusies worden getrokken:

- de afvoer van water en de belasting met zware metalen vertoont een dynamiek die sterk door de weersomstandigheden wordt bepaald. De belasting van het oppervlaktewater met Cd en Zn vindt vooral plaats in de wintermaanden als de waterafvoer het grootst is;
- in zowel metingen van concentraties als berekeningen van concentraties is deze dynamiek duidelijk zichtbaar;

- de waterafvoer is in het stroomgebied van de Keersop in een nat jaar circa 3 maal hoger dan de waterafvoer in een droog jaar. Echter, de berekende Cd- en Zn-belasting van het oppervlaktewater is in een nat jaar respectievelijk 6,5 en 6,0 maal zo hoog als de belasting in een droog jaar;
- indien geen rekening wordt gehouden met de variatie in grondwaterstanden zal de berekende Cd- en Zn-vracht te weinig dynamiek vertonen. Afhankelijk van de gekozen grondwaterstand zal de belasting dan worden onderschat of overschat;
- bij berekeningen met een gemiddelde grondwaterstand zal, zolang de bulk van de metalen in de bovengrond aanwezig is, de berekende stofvracht een onderschatting geven van de daadwerkelijke gemiddelde stofvracht;
- naarmate de zware metalen verder in de bodem zullen uitzakken, zal de invloed van de variatie in grondwaterstanden op de dynamiek kleiner worden.

Meer specifiek, ten aanzien van de simulaties van de hydrologie kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- de berekende waterafvoeren komen goed overeen met de gemeten afvoeren;
- wel was het noodzakelijk de aanvoer vanuit het Belgische Schelde-Maas-kanaal aan de zuidrand van het studiegebied te calibreren. De gecalibreerde wateraanvoer bedraagt  $0,15 \text{ m.s}^{-1}$ ;
- de berekende en gemeten grondwaterstanden komen goed overeen. Uit een toetsing voor 66% van het gebied blijkt dat de gemiddelde verschillen tussen berekeningen en metingen gering zijn. De berekende gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) is ca. 5 cm ondieper dan de metingen en de berekende gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) is 8 cm dieper dan de metingen;
- in de eerste modelberekeningen bleek dat er in een aantal rekeneenheden geen evenwicht te verkrijgen was tussen de wegzijgingsflux aan de onderrand en de overige aan- en afvoertermen. Dit is een gevolg van de wijze van schematisatie van de ondergrond in het grondwatermodel voor de gehele Kempen, waaruit de wegzijgingsfluxen zijn gebruikt. Om dit te corrigeren zijn de onderrandvoorwaarden aangepast. Deze aanpassingen beperken zich tot een strook langs de grens en het Belgische deel van het gebied.

Ten aanzien van stoftransportmodelleringen kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- uit een vergelijking tussen gemeten en berekende gehalten van zware metalen in bodemprofielen blijkt dat dieper in de bodem te hoge concentraties worden berekend. Dit wordt toegeschreven aan een te hoge transportsnelheid van zink en cadmium. De verschillen tussen modelberekeningen en metingen zijn het grootst voor zink. Deels kan dit verschil verklaard worden door een verschil in bodemeigenschappen tussen de geselecteerde modelbodemprofielen en de bemonsterde bodemprofielen. Echter een andere mogelijke oorzaak, die ook gevolgen heeft voor de verdere modelresultaten, wordt vooralsnog gezocht in een onderschatting van de sorptie;
- uit een vergelijking tussen gemeten en berekend concentraties zware metalen in het bovenste grondwater blijkt dat de cadmiumconcentraties in het bereik van de

meetwaarden liggen. Voor zink zijn de concentraties te hoog, wat overeenstemt met de te hoge berekende gehalten in de bodemprofielen;

- uit een vergelijking tussen gemeten en berekende concentraties zware metalen in het oppervlaktewater blijkt dat, evenals voor het grondwater, voor cadmium redelijke waarden worden berekend; voor zink zijn ook de concentraties in het oppervlaktewater te hoog, wat verwacht werd op basis van de te hoge transportsnelheid van zink. Wel kwam de berekende seizoensdynamiek in de concentraties (hogere concentraties in de winter en lagere in de zomer) goed overeen met de metingen;
- de mediane concentraties van Cd en Zn in het oppervlaktewater liggen binnen het bereik van de waarden die berekend worden door Van der Grift et al (2008, in prep.).

## Literatuur

- Bakel, P.J.T. van, H.Th.L. Massop, J.G. Kroes, J. Hoogewoud, R. Pastoors & T. Kroon, 2008 (in prep). *Actualisatie Hydrologie voor Stone 2.3; Aanpassing randvoorwaarden en parameters, koppeling tussen NAGROM en SWAP, en plausibiliteitstoets*. Wageningen, Alterra
- Belmans, C., J.G. Wesseling & R.A. Feddes. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil. *J. Hydrol.* 63: 271-286.
- Bonten, L.T.C. & J. E. Groenenberg, 2008. *Uitspoeling van zware metalen uit bodems in het landelijk gebied – Berekeningen ten behoeve van Emissieregistratie 2008*, Alterra-rapport in voorbereiding
- Bonten, L.T.C., B. van der Grift & J. Klein, 2008. *Achtergrondbelasting van het oppervlaktewater met zware metalen ten gevolge van uitspoeling uit de bodem*, Alterra-rapport 1636.
- Dam, J.C., van 2000. *Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation, and case studies*. PhD-thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 167 p., English and Dutch summaries
- Dam, J.C. van, J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk & C.A. van Diepen. 1997. *Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Air-Plant environment*. Technical document 45. Alterra. Wageningen.
- Feddes, R.A., 1971. *Water, heat and crop growth*. Ph.D. diss. Wageningen University, the Netherlands.
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik, & H. Zaradny. 1978. *Simulation of field water use and crop yield*. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen.
- Groenendijk, P. & G.A.P.H. van den Eertwegh. 2004. Drainage-water travel times as a key factor for surface water contamination. p. 145-178. In R.A. Feddes, G.H. de Rooij and J.C. van Dam (ed.) *Unsaturated zone modeling. Progress, challenges and applications*. Wageningen UR Frontis Series. Vol. 6. Kluwer Ac. Pub. Dordrecht, the Netherlands.
- Gaast, J.W.J. van der, H.Th.L. Massop, H.R.J. Vroon & I.G. Staritsky, 2006. *Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken*, Alterra-rapport 1339, Alterra,
- Grift, B. van der, I. Joris, G. Janssen, J. Bronders, J.G. Kroes, L.T.C. Bonten, P. Groenendijk, F. De Smedt & P. Seuntjens, 2008 (in prep). *Een grondwatermodel voor de Vlaamse en Nederlandse Kempen Fase 2: Modelleren*. TNO, Utrecht
- Heijboer, D. & J. Nellestijn, 2002. *Klimaatatlas van Nederland. De Normaalperiode 1971-2000*. KNMI, De Bilt
- Kroon, T., P.A. Finke, I. Peereboom & A.H.W. Beusen, 2001. *Redesign STONE. De nieuwe schematisatie voor STONE: de ruimtelijke indeling en de toekenning van hydrologische en bodemchemische parameters*. RIZA-rapport 2001.017. ISBN 9036953713.
- Kroes, J.G. & J.C. van Dam (ed), 2003. *Reference manual SWAP version 3.0.3*. Alterra-rapport 773.
- Rietra, R.P.J.J., P.F.A.M. Römken, J. Japenga, 2004. *Cadmium en zink in de bodem en landbouwgewassen in de Kempen; Onderzoek naar de relatie tussen cadmium- en zinkgehalte in de bodem en in het gewas in de gemeente Cranendonck*, Alterra-rapport 974.

- Römkens, P.F.A.M., J.E. Groenenberg, L.T.C. Bonten, W. de Vries & J. Bril, 2004. *Derivation of partition relationships to calculate Cd, Cu, Ni, Pb and Zn solubility and activity in soil solutions*, Alterra-report 305.
- Sauve, S., W. Hendershot & W.H.E. Allen, 2000. *Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter*. Environ. Sci. Technol., 34: 1125-1131.
- Simunek, J., M.Th. van Genuchten & M. Sejna, *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media*, Version 3.0, HYDRUS Software Series 1, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 270 pp., 2005
- Vries, D.A. de, 1975. Heat transfer in soils. p. 5-28. *In* D.A. de Vries and N.H. Afgan (ed.) Heat and mass transfer in the biosphere. I. Transfer processes in plant environment. Scripta Book Company, Washington D.C., Maryland.
- Wilkens B.J. & J.P.G. Loch, 1997. *Accumulation of cadmium and zinc from diffuse immission on acid sandy soils, as a function of soil composition*, Water Air Soil Pollut., 96: 1-16.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman & J. Stolte, 1994. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. Vernieuwde uitgave 1994*. Technisch document 18, DLO Staring Centrum, Wageningen.

## Bijlage 1 Meteorologische gegevens

De meteorologische gegevens zijn verzameld voor de periode 1971 t/m 2000, een periode die geldt als de laatste Klimaatreeks. Daarbij zijn de neerslagcijfers van het station Eersel afkomstig en de verdampingscijfers, berekend volgens de methode Makkink, en de luchttemperatuur van De Bilt. De Bilt ligt in een overeenkomstige klimaatzone qua T en ET als de regio BeneKempen. Om de verschillen tussen verdamping in DeBilt en Eindhoven te minimaliseren is de referentieverdamping gecorrigeerd met een factor 1.04, welke gebaseerd is op de verschillen tussen de referentieverdamping van DeBilt en Eindhoven.

|                        | stationEersel    | Station DeBilt | Station<br>Eindhoven | Eindh/<br>DeBilt | Eindh_DeBilt<br>(gecorrigeerd) |                 |
|------------------------|------------------|----------------|----------------------|------------------|--------------------------------|-----------------|
| jaar                   | Neerslag<br>(mm) | ETref (mm)     | ETref<br>(mm)        | ETref<br>(-)     | ETref<br>(mm)                  | N-ETref<br>(mm) |
| 1971                   | 641.6            | 557.7          |                      |                  | 580.0                          | 61.6            |
| 1972                   | 657.2            | 510.0          |                      |                  | 530.4                          | 126.8           |
| 1973                   | 682.5            | 570.0          |                      |                  | 592.8                          | 89.7            |
| 1974                   | 918.4            | 551.4          |                      |                  | 573.5                          | 344.9           |
| 1975                   | 669.1            | 579.1          |                      |                  | 602.3                          | 66.8            |
| 1976                   | 461.8            | 616.5          |                      |                  | 641.2                          | -179.4          |
| 1977                   | 770.8            | 513.4          |                      |                  | 533.9                          | 236.9           |
| 1978                   | 691.2            | 507.0          |                      |                  | 527.3                          | 163.9           |
| 1979                   | 826.9            | 493.3          |                      |                  | 513.0                          | 313.9           |
| 1980                   | 777.1            | 508.8          | 569.7                | 1.12             | 529.2                          | 247.9           |
| 1981                   | 908.3            | 501.4          | 546.1                | 1.09             | 521.5                          | 386.8           |
| 1982                   | 718.1            | 595.3          | 595.7                | 1.00             | 619.1                          | 99.0            |
| 1983                   | 797.1            | 550.5          | 599.0                | 1.09             | 572.5                          | 224.6           |
| 1984                   | 981.9            | 497.5          | 527.8                | 1.06             | 517.4                          | 464.5           |
| 1985                   | 778.9            | 509.0          | 514.0                | 1.01             | 529.4                          | 249.5           |
| 1986                   | 826.6            | 565.1          | 561.3                | 0.99             | 587.7                          | 238.9           |
| 1987                   | 850.8            | 499.2          | 513.5                | 1.03             | 519.2                          | 331.6           |
| 1988                   | 942.3            | 505.9          | 520.5                | 1.03             | 526.1                          | 416.2           |
| 1989                   | 534.7            | 602.8          | 625.1                | 1.04             | 626.9                          | -92.2           |
| 1990                   | 602.8            | 583.4          | 597.9                | 1.02             | 606.7                          | -3.9            |
| 1991                   | 580.7            | 537.6          | 560.1                | 1.04             | 559.1                          | 21.6            |
| 1992                   | 727.4            | 579.2          | 571.2                | 0.99             | 602.4                          | 125.0           |
| 1993                   | 753.5            | 516.5          | 536.3                | 1.04             | 537.2                          | 216.3           |
| 1994                   | 828.9            | 539.5          | 577.3                | 1.07             | 561.1                          | 267.8           |
| 1995                   | 748.8            | 590.2          | 604.1                | 1.02             | 613.8                          | 135.0           |
| 1996                   | 602.4            | 522.6          | 538.9                | 1.03             | 543.5                          | 58.9            |
| 1997                   | 654.0            | 561.1          | 596.5                | 1.06             | 583.5                          | 70.5            |
| 1998                   | 1064.2           | 492.2          | 517.6                | 1.05             | 511.9                          | 552.3           |
| 1999                   | 871.4            | 582.5          | 607.6                | 1.04             | 605.8                          | 265.6           |
| 2000                   | 889.7            | 540.5          | 556.7                | 1.03             | 562.1                          | 327.6           |
| Gemidd<br>1971-2000    | 758.6            | 542.6          |                      |                  | 564.3                          | 194.3           |
| Gemiddeld<br>1980-2000 | 782.8            | 541.9          | 563.7                | 1.04             | 563.6                          |                 |



## Bijlage 2 Waterafvoeren (%) verdeling over landgebruik, bodem en Gt

| water-afvoer, droog jaar |                                    | Gt    |       |       |        |       |        |        |       |       |         |
|--------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|---------|
| bodem                    | Landgebruik                        | I     | II*   | III   | III*   | IV    | V*     | VI     | VII   | VII*  |         |
| klei                     | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.38%  | 0.00% | 0.00% | 0.38%   |
|                          | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.42%  | 0.00% | 0.00% | 0.42%   |
| klei Total               |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.38%  | 0.42% | 0.00% | 0.00%   |
| veen                     | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 2.60% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00% | 2.60%   |
|                          | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.00% | 0.40% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00% | 0.40%   |
|                          | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.17%  | 0.00% | 0.00% | 0.17%   |
|                          | natural grassland not-irrigated    | 1.09% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00% | 1.09%   |
| veen Total               |                                    | 1.09% | 1.09% | 0.00% | 3.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.17% | 0.00% | 0.00%   |
| zand                     | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.88% | 4.19%  | 3.45% | 9.21%  | 18.99% | 0.15% | 0.00% | 36.87%  |
|                          | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 1.28% | 0.43% | 0.00%  | 0.32% | 0.00%  | 12.00% | 1.92% | 0.00% | 15.95%  |
|                          | forest douglas not-irrigated       | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 1.83%  | 3.07% | 0.06% | 4.96%   |
|                          | maize only irrigated               | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 5.79%  | 0.28% | 1.47%  | 1.04%  | 0.00% | 0.00% | 8.59%   |
|                          | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 2.01% | 1.41%  | 0.00% | 0.53%  | 2.35%  | 1.71% | 0.00% | 8.00%   |
|                          | natural grassland not-irrigated    | 0.00% | 0.00% | 0.47% | 0.77%  | 0.25% | 1.02%  | 1.11%  | 0.31% | 0.00% | 3.93%   |
|                          | potatoes only irrigated            | 0.00% | 0.00% | 0.22% | 1.29%  | 0.00% | 2.70%  | 1.10%  | 0.00% | 0.00% | 5.32%   |
|                          | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 1.27% | 0.00%  | 0.33% | 5.66%  | 2.77%  | 0.86% | 0.42% | 11.31%  |
| zand Total               |                                    | 0.00% | 1.28% | 5.28% | 13.46% | 4.63% | 20.59% | 41.19% | 8.02% | 0.49% | 94.93%  |
| total                    |                                    | 1.09% | 1.28% | 8.28% | 13.46% | 4.63% | 20.98% | 41.78% | 8.02% | 0.49% | 100.00% |

| water-afvoer, gemiddeld jaar |                                    | Gt    |       |       |        |        |        |        |        |       |         |
|------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|
| bodem                        | Landgebruik                        | I     | II*   | III   | III*   | IV     | V*     | VI     | VII    | VII*  |         |
| klei                         | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.38%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.38%   |
|                              | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.42%  | 0.00%  | 0.00% | 0.42%   |
| klei Total                   |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.38%  | 0.42%  | 0.00% | 0.00%   |
| veen                         | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 2.60% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 2.60%   |
|                              | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.00% | 0.40% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.40%   |
|                              | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.17%  | 0.00%  | 0.00% | 0.17%   |
|                              | natural grassland not-irrigated    | 1.09% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 1.09%   |
| veen Total                   |                                    | 1.09% | 1.09% | 0.00% | 3.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.17%  | 0.00% | 0.00%   |
| zand                         | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.88% | 4.19%  | 3.45%  | 9.21%  | 18.99% | 0.15%  | 0.00% | 36.87%  |
|                              | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 1.28% | 0.43% | 0.00%  | 0.32%  | 0.00%  | 12.00% | 1.92%  | 0.00% | 15.95%  |
|                              | forest douglas not-irrigated       | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 1.83%  | 3.07%  | 0.06% | 4.96%   |
|                              | maize only irrigated               | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 5.79%  | 0.28%  | 1.47%  | 1.04%  | 0.00%  | 0.00% | 8.59%   |
|                              | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 2.01% | 1.41%  | 0.00%  | 0.53%  | 2.35%  | 1.71%  | 0.00% | 8.00%   |
|                              | natural grassland not-irrigated    | 0.00% | 0.00% | 0.47% | 0.77%  | 0.25%  | 1.02%  | 1.11%  | 0.31%  | 0.00% | 3.93%   |
|                              | potatoes only irrigated            | 0.00% | 0.00% | 0.22% | 1.29%  | 0.00%  | 2.70%  | 1.10%  | 0.00%  | 0.00% | 5.32%   |
|                              | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 1.27% | 0.00%  | 0.33%  | 5.66%  | 2.77%  | 0.86%  | 0.42% | 11.31%  |
| zand Total                   |                                    | 0.00% | 0.00% | 1.28% | 5.28%  | 13.46% | 4.63%  | 20.59% | 41.19% | 8.02% | 0.49%   |
| total                        |                                    | 1.09% | 1.28% | 8.28% | 13.46% | 4.63%  | 20.98% | 41.78% | 8.02%  | 0.49% | 100.00% |

| water-afvoer, nat jaar |                                    | Gt    |       |       |        |        |        |        |        |        |         |
|------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| bodem                  | Landgebruik                        | I     | II*   | III   | III*   | IV     | V*     | VI     | VII    | VII*   |         |
| klei                   | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.27%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.27%   |
|                        | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.29%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.29%   |
| klei Total             |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.27%  | 0.29%  | 0.00%  | 0.00%   |
| veen                   | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 2.06% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 2.06%   |
|                        | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.00% | 0.28% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.28%   |
|                        | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.18%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.18%   |
|                        | natural grassland not-irrigated    | 0.62% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.62%   |
| veen Total             |                                    | 1.09% | 0.62% | 0.00% | 2.34%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.18%  | 0.00%  | 0.00%   |
| zand                   | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.69% | 3.43%  | 2.77%  | 8.49%  | 19.85% | 0.24%  | 0.00%  | 35.47%  |
|                        | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.72% | 0.30% | 0.00%  | 0.25%  | 0.00%  | 12.57% | 2.96%  | 0.00%  | 16.79%  |
|                        | forest douglas not-irrigated       | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 2.55%  | 5.89%  | 0.40%  | 8.84%   |
|                        | maize only irrigated               | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 4.87%  | 0.23%  | 1.41%  | 1.09%  | 0.00%  | 0.00%  | 7.59%   |
|                        | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 1.55% | 1.17%  | 0.00%  | 0.45%  | 2.27%  | 1.99%  | 0.00%  | 7.44%   |
|                        | natural grassland not-irrigated    | 0.00% | 0.00% | 0.39% | 0.63%  | 0.21%  | 0.85%  | 1.17%  | 0.41%  | 0.00%  | 3.67%   |
|                        | potatoes only irrigated            | 0.00% | 0.00% | 0.20% | 1.09%  | 0.00%  | 2.57%  | 1.04%  | 0.00%  | 0.00%  | 4.90%   |
|                        | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 0.91% | 0.00%  | 0.25%  | 5.22%  | 2.73%  | 1.08%  | 1.39%  | 11.59%  |
| zand Total             |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.72% | 4.03%  | 11.19% | 3.71%  | 19.00% | 43.28% | 12.57% | 1.80%   |
| total                  |                                    | 0.62% | 0.72% | 6.37% | 11.19% | 3.71%  | 19.26% | 43.75% | 12.57% | 1.80%  | 100.00% |



### Bijlage 3 Cd-afvoeren (%) verdeling over landgebruik, bodem en Gt

| Cd-afvoer, droog jaar |                                    | Gt    |       |        |        |       |        |        |       |       |         |
|-----------------------|------------------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|---------|
| bodem                 | Landgebruik                        | I     | II*   | III    | III*   | IV    | V*     | VI     | VII   | VII*  |         |
| klei                  | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.24%  | 0.00% | 0.00% | 0.24%   |
|                       | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.07%  | 0.00% | 0.00% | 0.07%   |
| klei Total            |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.24%  | 0.07% | 0.00% | 0.00%   |
| veen                  | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.72%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00% | 0.72%   |
|                       | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.00% | 0.16%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00% | 0.16%   |
|                       | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.63%  | 0.00% | 0.00% | 0.63%   |
|                       | natural grassland not-irrigated    | 0.04% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00% | 0.04%   |
| veen Total            |                                    | 1.09% | 0.04% | 0.00%  | 0.87%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.63% | 0.00% | 0.00%   |
| zand                  | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.49%  | 1.63%  | 0.15% | 6.31%  | 5.33%  | 0.01% | 0.00% | 13.93%  |
|                       | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.04% | 0.11%  | 0.00%  | 0.01% | 0.00%  | 0.65%  | 0.27% | 0.00% | 1.07%   |
|                       | forest douglas not-irrigated       | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.70%  | 0.65% | 0.00% | 1.36%   |
|                       | maize only irrigated               | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 11.23% | 0.00% | 5.08%  | 2.81%  | 0.00% | 0.00% | 19.12%  |
|                       | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 4.82%  | 2.01%  | 0.00% | 0.85%  | 2.53%  | 0.14% | 0.00% | 10.35%  |
|                       | natural grassland not-irrigated    | 0.00% | 0.00% | 0.25%  | 0.23%  | 0.05% | 0.12%  | 0.16%  | 0.07% | 0.00% | 0.88%   |
|                       | potatoes only irrigated            | 0.00% | 0.00% | 0.41%  | 2.38%  | 0.00% | 9.86%  | 1.83%  | 0.00% | 0.00% | 14.48%  |
|                       | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 3.38%  | 0.00%  | 0.02% | 23.62% | 8.70%  | 0.99% | 0.24% | 36.96%  |
| zand Total            |                                    | 0.00% | 0.04% | 9.47%  | 17.48% | 0.23% | 45.84% | 22.71% | 2.13% | 0.24% | 98.15%  |
| total                 |                                    | 0.04% | 0.04% | 10.34% | 17.48% | 0.23% | 46.08% | 23.41% | 2.13% | 0.24% | 100.00% |

| Cd-afvoer, gemiddeld jaar |                                    | Gt    |       |        |        |        |        |        |        |       |         |
|---------------------------|------------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|
| bodem                     | Landgebruik                        | I     | II*   | III    | III*   | IV     | V*     | VI     | VII    | VII*  |         |
| klei                      | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.24%  | 0.00%  | 0.00% | 0.24%   |
|                           | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.07%  | 0.00% | 0.07%   |
| klei Total                |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.24%  | 0.07%  | 0.00% | 0.00%   |
| veen                      | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.72%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.72%   |
|                           | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.00% | 0.16%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.16%   |
|                           | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.63%  | 0.00%  | 0.00% | 0.63%   |
|                           | natural grassland not-irrigated    | 0.04% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.04%   |
| veen Total                |                                    | 1.09% | 0.04% | 0.00%  | 0.87%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.63%  | 0.00% | 0.00%   |
| zand                      | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.49%  | 1.63%  | 0.15%  | 6.31%  | 5.33%  | 0.01%  | 0.00% | 13.93%  |
|                           | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.04% | 0.11%  | 0.00%  | 0.01%  | 0.00%  | 0.65%  | 0.27%  | 0.00% | 1.07%   |
|                           | forest douglas not-irrigated       | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.70%  | 0.65%  | 0.00% | 1.36%   |
|                           | maize only irrigated               | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 11.23% | 0.00%  | 5.08%  | 2.81%  | 0.00%  | 0.00% | 19.12%  |
|                           | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 4.82%  | 2.01%  | 0.00%  | 0.85%  | 2.53%  | 0.14%  | 0.00% | 10.35%  |
|                           | natural grassland not-irrigated    | 0.00% | 0.00% | 0.25%  | 0.23%  | 0.05%  | 0.12%  | 0.16%  | 0.07%  | 0.00% | 0.88%   |
|                           | potatoes only irrigated            | 0.00% | 0.00% | 0.41%  | 2.38%  | 0.00%  | 9.86%  | 1.83%  | 0.00%  | 0.00% | 14.48%  |
|                           | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 3.38%  | 0.00%  | 0.02%  | 23.62% | 8.70%  | 0.99%  | 0.24% | 36.96%  |
| zand Total                |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.04%  | 9.47%  | 17.48% | 0.23%  | 45.84% | 22.71% | 2.13% | 0.24%   |
| total                     |                                    | 0.04% | 0.04% | 10.34% | 17.48% | 0.23%  | 46.08% | 23.41% | 2.13%  | 0.24% | 100.00% |

| Cd-afvoer, nat jaar |                                    | Gt    |       |       |        |        |        |        |        |       |         |
|---------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|
| bodem               | Landgebruik                        | I     | II*   | III   | III*   | IV     | V*     | VI     | VII    | VII*  |         |
| klei                | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.13%  | 0.00%  | 0.00% | 0.13%   |
|                     | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.02%  | 0.00%  | 0.00% | 0.02%   |
| klei Total          |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.13%  | 0.02%  | 0.00% | 0.00%   |
| veen                | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.58% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.58%   |
|                     | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.00% | 0.14% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.14%   |
|                     | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.73%  | 0.00%  | 0.00% | 0.73%   |
|                     | natural grassland not-irrigated    | 0.03% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.03%   |
| veen Total          |                                    | 1.09% | 0.03% | 0.00% | 0.72%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.73%  | 0.00% | 0.00%   |
| zand                | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.49% | 1.51%  | 0.23%  | 5.66%  | 8.49%  | 0.11%  | 0.00% | 16.48%  |
|                     | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.03% | 0.06% | 0.00%  | 0.01%  | 0.00%  | 0.59%  | 0.60%  | 0.00% | 1.29%   |
|                     | forest douglas not-irrigated       | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 1.56%  | 3.50%  | 0.17% | 5.23%   |
|                     | maize only irrigated               | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 8.89%  | 0.00%  | 4.56%  | 2.45%  | 0.00%  | 0.00% | 15.90%  |
|                     | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 3.53% | 1.67%  | 0.00%  | 0.84%  | 2.40%  | 0.14%  | 0.00% | 8.58%   |
|                     | natural grassland not-irrigated    | 0.00% | 0.00% | 0.22% | 0.19%  | 0.05%  | 0.09%  | 0.19%  | 0.15%  | 0.00% | 0.89%   |
|                     | potatoes only irrigated            | 0.00% | 0.00% | 0.36% | 1.91%  | 0.00%  | 7.42%  | 1.64%  | 0.00%  | 0.00% | 11.34%  |
|                     | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 2.28% | 0.00%  | 0.03%  | 20.31% | 8.33%  | 2.52%  | 5.19% | 38.66%  |
| zand Total          |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.03% | 6.94%  | 14.17% | 0.32%  | 38.87% | 25.66% | 7.02% | 5.36%   |
| total               |                                    | 0.03% | 0.03% | 7.66% | 14.17% | 0.32%  | 38.99% | 26.41% | 7.02%  | 5.36% | 100.00% |



#### Bijlage 4 Zn-afvoeren (%) verdeling over landgebruik, bodem en Gt

| Zn afvoer, droog jaar |                                    | Gt    |       |       |       |        |        |        |        |       |         |
|-----------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|
| bodem                 | Landgebruik                        | I     | II*   | III   | III*  | IV     | V*     | VI     | VII    | VII*  |         |
| klei                  | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.33%  | 0.00%  | 0.00% | 0.13%   |
|                       | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.01%  | 0.00%  | 0.00% | 0.02%   |
| klei Total            |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.33%  | 0.01%  | 0.00% | 0.00%   |
| veen                  | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.95% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.58%   |
|                       | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.00% | 0.24% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.14%   |
|                       | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 1.28%  | 0.00%  | 0.00% | 0.73%   |
|                       | natural grassland not-irrigated    | 0.06% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00% | 0.03%   |
| veen Total            |                                    | 1.09% | 0.06% | 0.00% | 1.19% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 1.28%  | 0.00% | 0.00%   |
| zand                  | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.43% | 1.36% | 0.58%  | 5.17%  | 8.03%  | 0.04%  | 0.00% | 16.48%  |
|                       | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.28% | 0.11% | 0.00% | 0.01%  | 0.00%  | 3.03%  | 1.46%  | 0.00% | 1.29%   |
|                       | forest douglas not-irrigated       | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 1.86%  | 3.00%  | 0.03% | 5.23%   |
|                       | maize only irrigated               | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 6.31% | 0.04%  | 4.97%  | 2.27%  | 0.00%  | 0.00% | 15.90%  |
|                       | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 3.23% | 1.94% | 0.00%  | 0.72%  | 4.03%  | 2.04%  | 0.00% | 8.58%   |
|                       | natural grassland not-irrigated    | 0.00% | 0.00% | 0.23% | 0.26% | 0.09%  | 0.04%  | 0.30%  | 0.20%  | 0.00% | 0.89%   |
|                       | potatoes only irrigated            | 0.00% | 0.00% | 0.50% | 1.46% | 0.00%  | 8.31%  | 1.32%  | 0.00%  | 0.00% | 11.34%  |
|                       | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 3.43% | 0.00% | 0.05%  | 18.97% | 9.34%  | 0.97%  | 0.72% | 38.66%  |
| zand Total            |                                    |       | 0.00% | 0.28% | 7.93% | 11.33% | 0.76%  | 38.17% | 30.18% | 7.72% | 0.75%   |
| total                 |                                    |       | 0.06% | 0.28% | 9.12% | 11.33% | 0.76%  | 38.50% | 31.48% | 7.72% | 100.00% |

| Zn afvoer, gemiddeld jaar |                                    | Gt    |       |       |        |       |        |        |        |        |         |
|---------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
| bodem                     | Landgebruik                        | I     | II*   | III   | III*   | IV    | V*     | VI     | VII    | VII*   |         |
| klei                      | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.31%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.31%   |
|                           | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.11%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.11%   |
| klei Total                |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.31%  | 0.11%  | 0.00%   |
| veen                      | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.73% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.73%   |
|                           | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.00% | 0.15% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.15%   |
|                           | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.96%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.96%   |
|                           | natural grassland not-irrigated    | 0.03% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.03%   |
| veen Total                |                                    | 1.09% | 1.09% | 0.03% | 0.00%  | 0.88% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.96%  | 0.00%   |
| zand                      | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.40% | 1.56%  | 0.49% | 5.90%  | 5.90%  | 0.02%  | 0.00%  | 14.28%  |
|                           | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.18% | 0.15% | 0.00%  | 0.01% | 0.00%  | 2.93%  | 0.73%  | 0.00%  | 4.00%   |
|                           | forest douglas not-irrigated       | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00% | 0.00%  | 0.51%  | 0.59%  | 0.01%  | 1.10%   |
|                           | maize only irrigated               | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 10.33% | 0.03% | 4.56%  | 2.62%  | 0.00%  | 0.00%  | 17.55%  |
|                           | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 4.39% | 2.43%  | 0.00% | 0.86%  | 4.46%  | 3.35%  | 0.00%  | 15.47%  |
|                           | natural grassland not-irrigated    | 0.00% | 0.00% | 0.18% | 0.24%  | 0.07% | 0.09%  | 0.20%  | 0.08%  | 0.00%  | 0.87%   |
|                           | potatoes only irrigated            | 0.00% | 0.00% | 0.49% | 2.39%  | 0.00% | 8.81%  | 1.91%  | 0.00%  | 0.00%  | 13.60%  |
|                           | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 2.82% | 0.00%  | 0.06% | 19.05% | 7.84%  | 0.96%  | 0.11%  | 30.85%  |
| zand Total                |                                    |       | 0.00% | 0.00% | 0.18%  | 8.42% | 16.95% | 0.67%  | 39.28% | 26.38% | 5.72%   |
| total                     |                                    | 0.03% | 0.18% | 9.29% | 16.95% | 0.67% | 39.59% | 27.45% | 5.72%  | 0.12%  | 100.00% |

| Zn afvoer, nat jaar |                                    | Gt    |       |       |       |        |        |        |        |        |         |
|---------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| bodem               | Landgebruik                        | I     | II*   | III   | III*  | IV     | V*     | VI     | VII    | VII*   |         |
| klei                | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.17%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.17%   |
|                     | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.03%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.03%   |
| klei Total          |                                    | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.17%  | 0.03%  | 0.00%   |
| veen                | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.62% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.62%   |
|                     | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.00% | 0.13% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.13%   |
|                     | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 1.12%  | 0.00%  | 0.00%  | 1.12%   |
|                     | natural grassland not-irrigated    | 0.02% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.02%   |
| veen Total          |                                    | 1.09% | 1.09% | 0.02% | 0.00% | 0.75%  | 0.00%  | 0.00%  | 0.00%  | 1.12%  | 0.00%   |
| zand                | cultivated grassland irrigated     | 0.00% | 0.00% | 0.40% | 1.51% | 0.48%  | 5.57%  | 8.39%  | 0.08%  | 0.00%  | 16.43%  |
|                     | cultivated grassland not-irrigated | 0.00% | 0.12% | 0.08% | 0.00% | 0.01%  | 0.00%  | 2.60%  | 1.30%  | 0.00%  | 4.12%   |
|                     | forest douglas not-irrigated       | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00%  | 0.00%  | 0.98%  | 2.33%  | 0.14%  | 3.44%   |
|                     | maize only irrigated               | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 8.51% | 0.02%  | 4.27%  | 2.41%  | 0.00%  | 0.00%  | 15.22%  |
|                     | maize only not-irrigated           | 0.00% | 0.00% | 3.38% | 2.05% | 0.00%  | 0.85%  | 4.07%  | 2.93%  | 0.00%  | 13.28%  |
|                     | natural grassland not-irrigated    | 0.00% | 0.00% | 0.16% | 0.20% | 0.07%  | 0.07%  | 0.24%  | 0.14%  | 0.00%  | 0.88%   |
|                     | potatoes only irrigated            | 0.00% | 0.00% | 0.45% | 1.99% | 0.00%  | 7.12%  | 1.81%  | 0.00%  | 0.00%  | 11.37%  |
|                     | potatoes only not-irrigated        | 0.00% | 0.00% | 2.01% | 0.00% | 0.06%  | 17.13% | 7.81%  | 2.19%  | 3.97%  | 33.15%  |
| zand Total          |                                    |       | 0.00% | 0.00% | 0.12% | 6.48%  | 14.26% | 0.64%  | 35.02% | 28.29% | 8.97%   |
| total               |                                    |       | 0.02% | 0.12% | 7.23% | 14.26% | 0.64%  | 35.19% | 29.45% | 8.97%  | 100.00% |