

Standplaatsfactoren afgeleid van hydrologische modeluitkomsten

Methodeontwikkeling en toetsing in het Drentse Aa-gebied

T. Hoogland
R.H. Kemmers
D.G. Cirkel
J.C. Hunink

werkdOCUMENTEN

wot

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu

Standplaatsfactoren afgeleid van hydrologische modeluitkomsten

De reeks 'Werkdocumenten' bevat tussenresultaten van het onderzoek van de uitvoerende instellingen voor de unit Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu (WOT Natuur & Milieu). De reeks is een intern communicatiemedium en wordt niet buiten de context van de WOT Natuur & Milieu verspreid. De inhoud van dit document is vooral bedoeld als referentiemateriaal voor collega-onderzoekers die onderzoek uitvoeren in opdracht van de WOT Natuur & Milieu. Zodra eindresultaten zijn bereikt, worden deze ook buiten deze reeks gepubliceerd.

Dit werkdocument is gemaakt conform het Kwaliteitshandboek van de WOT Natuur & Milieu en is goedgekeurd door Rogier Pouwels (deel)programmaleider WOT Natuur & Milieu.

Standplaatsfactoren afgeleid van hydrologische modeluitkomsten

Methodeontwikkeling en toetsing in het
Drentse Aa-gebied.

T. Hoogland

R.H. Kemmers

D.G. Cirkel

J.C. Hunink

Werkdocument 214

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu

Wageningen, december 2010

Referaat

Hoogland, T., R.H. Kemmers, D.G. Cirkel & J.C. Hunink, 2010. *Standplaatsfactoren afgeleid van hydrologische model-uitkomsten; Methodeontwikkeling en toetsing in het Drentse Aa-gebied*. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-werkdocument 214. 56 blz. 21 fig.; 6 tab.; 34 ref..

Om verdroging in beeld te brengen is, naast informatie over hydrologische randvoorwaarden voor natuur, informatie nodig over actuele grondwaterstand, kwel en kwaliteit van ingelaten water in natuurgebieden. In dit werkdocument wordt een methode beschreven waarmee, uitgaande van bestaande landelijke modelberekeningen ecologisch relevante informatie over kwel in de wortelzone kan worden berekend. Informatie over kwelsamenstelling kan met de huidige modellen nog niet berekend worden. Uitgaande van meetresultaten en geostatistiek zijn landelijke kaarten gemaakt van grove kweltypen. De kaartbeelden waarin de invloed van regenwater, hard grondwater, Rijnwater en zeewater is weergegeven laten plausibele patronen zien. Een grondwaterstromingsmodel berekent de kwelflux over de eerste scheidende laag terwijl planten reageren op kwel die van invloed is op de omstandigheden in de wortelzone. In het proefgebied Drentse Aa zijn twee methoden beproefd om kwelfluxen uit het hydrologisch model (MIPWA), ontwikkeld door Deltares, te vertalen naar een kwelflux tot in de wortelzone. De modelvoorspellingen over het al dan niet voorkomen van ecologisch relevante kwel zijn in het Drentse Aa-gebied getoetst aan gegevens die ecologisch relevante kwel indiceren, zoals humusprofielen, vegetatieopnames en bodemchemische analyses. De drie getoetste kwelkaarten onderschatten alle het areaal met kwelinvloed. De geringste onderschatting wordt gemaakt met de MIPWA-kwelkaart van de flux over de eerste scheidende laag. Deze uitkomst is onverwacht omdat op theoretische gronden verwacht mocht worden dat de kwelflux over de eerste scheidende laag niet overal tot in de wortelzone doordringt. Dit impliceert dat het gebruik van de toegepaste regenwaterlensmodule gekoppeld aan een regionaal grondwatermodel nog niet de meerwaarde oplevert die op theoretische gronden mag worden aangenomen. Verbetering van de methodes is dus gewenst.

Trefwoorden: Kwel, waterkwaliteit, flux, neerschaling, hydrologisch model, standplaatsconditie

Tom Hoogland – Alterra Wageningen UR

Rolf Kemmers – Alterra Wageningen UR

Gijsbert Cirkel – KWR Water Cycle Research Institute

Joachim Hunink – Deltares

©2010 **Alterra Wageningen UR**

Postbus 47, 6700 AA Wageningen

Tel: (0317) 48 07 00; fax: (0317) 41 90 00; e-mail: info.terra@wur.nl

KWR Water Cycle Research Institute

Postbus 1072, 3430 BB Nieuwegein

Tel. (030) 606 95 11; fax: (030) 606 11 65; e-mail: info@kwrwater.nl

Deltares

Postbus 85467, 3508 AL Utrecht

Tel.: (088) 33 57 700; fax: (088) 33 57 720; e-mail: info@deltares.nl

De reeks WOt-werkdocumenten is een uitgave van de unit Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, onderdeel van Wageningen UR. Dit werkdocument is verkrijgbaar bij het secretariaat. **Het document is ook te downloaden via www.wotnatuurenmilieu.wur.nl.**

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Postbus 47, 6700 AA Wageningen

Tel: (0317) 48 54 71; Fax: (0317) 41 90 00; e-mail: info.wnm@wur.nl; Internet: www.wotnatuurenmilieu.wur.nl

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De uitgever aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Woord vooraf

In dit WOT-onderzoek, gestart in 2009, is de doelstelling een methodiek te ontwikkelen waarmee informatie in kaartvorm gegenereerd kan worden over de ecologisch relevante kwelflux en kwelwaterkwaliteit in de Nederlandse natuurgebieden. Daarbij wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van recente en beschikbare meet- of modelresultaten. Bovendien wordt aangesloten op de concepten en gegevens zoals die in het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) worden gehanteerd. Met de methode moet het in de toekomst mogelijk zijn gedetailleerde kaartbeelden te generen van de kwelflux en kwelwaterkwaliteit in de wortelzone van Nederlandse natuurgebieden.

Uit contact met Deltares bleek dat daar een deels overlappend project in opdracht van het ministerie van Verkeer & Waterstaat (thans onderdeel van het ministerie van Infrastructuur & Milieu) liep. Daarop is in overleg met het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) en Deltares aansluiting gezocht en zoveel mogelijk gebruik gemaakt van reeds in het Deltares-project ontwikkelde methoden en modellen. Daarom is in dit project gebruik gemaakt van resultaten van het hydrologisch model MIPWA dat door Deltares voor het Drentse Aa-gebied is ontwikkeld en van neerschalingstechnieken die specifiek voor dit model zijn ontwikkeld. Deltares gebruikt dit model onder andere voor validatie van het NHL. Daarnaast is gebruik gemaakt van een rekenmethode van KWR Watercycle Research Institute om de kwelflux op grotere diepte te vertalen naar een flux tot in de wortelzone

Voor het beschikbaar stellen van de genoemde modelresultaten, berekeningswijzen en de achtergronddocumentatie hierbij willen wij Remco van Ek (Deltares) en Kees Vink (KWR) hartelijk danken. Ook Arjen van Hinsberg en Rien Pastoors werkzaam bij het PBL en Remco van Ek willen wij hartelijk danken voor het kritisch doorlezen en becommentariëren van een eerdere versie van dit werkdocument.

*Tom Hoogland
Rolf Kemmers
Gijsbert Cirkel
Joachim Hunink*

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
2 Werkwijze op hoofdlijnen	13
3 Definities en uitgangspunten	15
4 Typering van het ondiep grondwater	19
4.1 Theoretische concepten waterkwaliteitsmethode	19
4.2 Meetgegevens van de grondwaterkwaliteit	22
4.3 Gebiedsdekkende geostatistische interpolatie van watertypen	24
5 Neerschaling van hydrologische modelresultaten	29
5.1 Grootchalige modellen	29
5.2 Neerschaling van MIPWA-resultaten	29
5.3 Resultaten	30
6 Kwel in de wortelzone	33
6.1 Uitgangspunten	33
6.2 Rekenmethodiek neerslaglensmodule	34
6.2.1 Berekenen vochtprofiel en bergingsvermogen (stap 1)	34
6.2.2 Berekenen grondwateraanvulling en runoff (stap 2)	35
6.2.3 Berekening maximale dikte neerslaglens (stap 3)	36
6.2.4 Berekening moment van doorbraak en flux naar de wortelzone (stap 4)	37
6.3 Resultaten in het Drentse Aa-gebied	39
6.4 Vuistregels voor kwel in de wortelzone	41
6.5 Conclusies en discussie	41
7 Toetsing aan onafhankelijke gegevens	43
7.1 Bodemchemische indicatoren	44
7.2 Vegetatie-indicatoren	44
7.3 Humusprofielindicator voor kwel	45
7.4 Toetsingsmethoden en kwaliteitsmaten	45
7.5 Toetsingsresultaten	46
7.6 Conclusies en discussie	48
8 Conclusies en discussie	51
Literatuur	53

Samenvatting

Verdroging is een belangrijk knelpunt bij het realiseren van (inter)nationale biodiversiteitsdoelen. Veel internationaal beschermde soorten en habitats, die afhankelijk zijn van grondwater, verkeren in Nederland in een ongunstige staat van instandhouding (MNP, 2007). Hoewel het knelpunt duidelijk is, ontbreekt een landelijk overzicht van de ecohydrologische condities in natuurgebieden. Wanneer dergelijke informatie wel aanwezig was, zou de mate van verdroging gekwantificeerd kunnen worden door de actuele toestand te vergelijken met de, hydrologische condities die vereist zijn om de gewenste natuur te realiseren.

Om verdroging in beeld te brengen is, naast informatie over hydrologische randvoorwaarden voor natuur, informatie nodig over actuele grondwaterstand, kwel en kwaliteit van ingelaten water in natuurgebieden. In dit werkdokument wordt een methode beschreven waarmee, uitgaande van bestaande landelijke modelberekeningen ecologisch relevante informatie over kwel in de wortelzone kan worden berekend.

Informatie over kwelsamenstelling kan met de huidige modellen nog niet berekend worden. Uitgaande van meetresultaten en geostatistiek zijn landelijke kaarten gemaakt van grove kweltypen. De kaartbeelden waarin de invloed van regenwater, hard grondwater, Rijnwater en zeewater is weergegeven laten plausibele patronen zien. Door het koppelen van concentratiewaarden van kweltypen en berekende mengverhoudingen is een relatie te leggen met de chemische eisen die natuur stelt. De bruikbaarheid van de kaarten hiervoor is echter niet getoetst. Dit zou kunnen door grenswaarden in mengverhoudingen te toetsen aan het voorkomen van specifieke vegetaties. Daarbij moet wel bedacht worden dat de hier gepresenteerde kaarten gebaseerd zijn op waterkwaliteitgegevens op grotere dieptes. Als dezelfde typering, uitgedrukt in mengverhoudingen of de mate van overeenkomst, wordt toegepast op watermonsters uit het grondwater dat beschikbaar is voor de vegetatie zou deze toetsing aan vegetatieopnames kunnen plaatsvinden.

Voor landsdekkende informatie over grondwaterstanden en kwelfluxen kan in principe het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) gebruikt worden. Voorwaarde is wel dat de uitkomsten voldoende betrouwbaar zijn en aansluiten op de schaal van natuurgebieden en/of natte locaties daarbinnen. Met een ruimtelijke resolutie van 250 m cellen is sprake van een middeling van standplaatscondities waardoor informatieverlies optreedt. Voor neerschalen van grondwaterstanden zijn inmiddels verschillende methoden beschikbaar. Voor neerschalen van kwelflux zijn door Deltares nieuwe methoden ontwikkeld. Gebieden met een substantiële kwelflux rondom de waterlopen worden door toepassing van deze nieuwe neerschalingmethode nauwelijks vertekend. De infiltratiezones rondom deze waterlopen vertonen echter grote verschillen ten opzichte van het oorspronkelijke modelresultaat. Om de kwelgebieden rondom de waterlopen te schatten, lijkt de toegepaste neerschalingstechniek bruikbaar; voor de infiltratiegebieden levert deze techniek echter een vertekend beeld.

Een grondwaterstromingsmodel berekent de kwelflux over de eerste scheidende laag terwijl planten reageren op kwel die van invloed is op de omstandigheden in de wortelzone. In het proefgebied Drentse Aa zijn twee methoden beproefd om kwelfluxen uit het hydrologisch model (MIPWA), ontwikkeld door Deltares, te vertalen naar een kwelflux tot in de wortelzone. De modelvoorspellingen over het al dan niet voorkomen van ecologisch relevante kwel zijn in het Drentse Aa-gebied getoetst aan gegevens die ecologisch relevante kwel indiceren, zoals humusprofielen, vegetatieopnames en bodemchemische analyses. De waarnemingen gebruikt

voor toetsing van de gemodelleerde kwel zijn middels een schatting of meting van pH getransformeerd tot een indicatorwaarde voor kwel in de wortelzone. In totaal zijn een drietal methoden gebruikt: directe MIPWA-gegevens (kwel berekend over een scheidende laag), met een door KWR ontwikkelde berekeningsmethode (neerslaglensmodule) en met vuistregels. De drie verschillende kwelkaarten berekend volgens: (1) neerslaglensmodule, volgens (2) vuistregels of de directe uitkomst van (3) MIPWA verschillen alle ongeveer op een derde van de waarnemingslocaties van de gemodelleerde kwel in de wortelzone.

Alle drie de kwelkaarten onderschatten het aantal waarnemingslocaties met kwel. De geringste onderschatting wordt gemaakt met de MIPWA-kwelkaart van de flux over de eerste scheidende laag. Omdat de twee methodes om kwel naar de wortelzone te berekenen een correctie uitvoeren op de directe MIPWA-resultaten zal de onderschatting bij deze methodes altijd groter zijn. Deze uitkomst is onverwacht omdat op theoretische gronden verwacht mocht worden dat de kwelflux over de eerste scheidende laag lang niet overal tot in de wortelzone doordringt. Voor het feit dat toch deze kaart het best overeen komt met indicatoren voor kwel in de wortelzone op de waarnemingslocaties zijn een aantal redenen aan te dragen:

- (i) Er bestaat een minder scherpe scheiding tussen regenwaterlens en kwelwater dan aangenomen in de methodes. Bij een meer dispers front kan sprake zijn van toevoer van basen naar de wortelzone ondanks de 'theoretische' aanwezigheid van een neerslaglens.
- (ii) In de neerslaglensmodule wordt vooralsnog drainage van regenwater verwaarloosd. Verder is vooralsnog een over het jaar constante grondwaterspiegel verondersteld. De invloed van kwel wordt hierdoor onderschat.
- (iii) Diep ontwaterde gebieden met kwel zijn vaak in landbouwkundig gebruik. Juist in deze gebieden geeft de neerslaglensmodule een sterke reductie van de berekende kwel. Doordat dergelijke percelen veelal worden bekalkt, is het onduidelijk of dit ook tot uitdrukking komt in de indicatoren.
- (iv) Het toetsen van het wel of niet voorkomen van een neerslaglens op basis van bodemchemische factoren of vegetatieindicaties kan sterk worden verstoord door na-ijling: bij hydrologisch nagenoeg neutrale condities (zoals optredend in dunne neerslaglensen) kan het jaren duren voordat het basenverzadigingscomplex zover is uitgeput dat je inderdaad te maken krijgt met te zure standplaatscondities

Op basis van de toetsing geven correcties op de met een regionaal grondwatermodel over een scheidende laag berekende kwelpatronen geen betere voorspelling van de vegetatie. Dit is anders dan op theoretische gronden mag worden aangenomen. Nader uitzoeken van de bovengenoemde mogelijke oorzaken en verbetering van de methodes is gewenst.

1 Inleiding

Aanleiding

Verdroging is een belangrijk knelpunt bij het realiseren van (inter)nationale biodiversiteitsdoelen. Veel internationaal beschermde soorten en habitats, die afhankelijk zijn van grondwater, verkeren in Nederland in een ongunstige staat van instandhouding (MNP, 2007). Hoewel het knelpunt duidelijk is, ontbreekt een landelijk overzicht van de ecohydrologische condities in natuurgebieden. Wanneer dergelijke informatie wel aanwezig was, zou de mate van verdroging gekwantificeerd kunnen worden door de actuele toestand te vergelijken met de hydrologische condities die vereist zijn om de gewenste natuur te realiseren. Bij gebrek aan beter wordt nu de actuele grondwaterstand nog vaak afgeleid van Gd-kaarten (Grondwaterdynamiek; Finke *et al.*, 2004) of Gt-kaarten. Deze informatie is echter vooral gericht op landbouwgebieden. Bovendien is deze informatie vaak niet actueel en door definitieverschillen, schaalverschillen en dergelijke slechts beperkt bruikbaar om uitspraken te doen over de mate van verdroging van grondwaterafhankelijke natuur.

Om verdroging in beeld te brengen is, naast informatie over hydrologische randvoorwaarden voor natuur, informatie nodig over actuele grondwaterstand, kwel en kwaliteit van ingelaten water. In dit werkdocument wordt een methode beschreven waarmee, uitgaande van bestaande landelijke modelberekeningen, een kaart van de kwelflux tot in de wortelzone kan worden gemaakt. Uitgangspunt daarbij is de definitie van verdroging uit de vierde Nota Waterhuishouding (Braat *et al.* 1998): “Een gebied wordt als verdroogd aangemerkt als aan dat gebied een natuurfunctie is toegekend en de grondwaterstand in het gebied onvoldoende hoog is dan wel de kwel onvoldoende sterk om bescherming van de karakteristieke grondwater afhankelijke ecologische waarden, waarop functietoekenning is gebaseerd, in dat gebied te garanderen. Een gebied met een natuurfunctie wordt ook als verdroogd aangemerkt als ter compensatie van een te lage grondwaterstand water van onvoldoende kwaliteit moet worden aangevoerd.”

Gezien het Natura 2000-doelendocument (LNV, 2006) is de focus van het beleid gericht op natuurgebieden met grondwaterafhankelijke natuur(doel)typen in de Ecologische Hoofdstructuur en Natura 2000-gebieden.

Doelstelling

Doelstelling van dit project is een methodiek te ontwikkelen waarmee informatie in kaartvorm gegenereerd kan worden over de ecologisch relevante kwelflux en kwelwaterkwaliteit in de Nederlandse natuurgebieden. Daarbij wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van recente en beschikbare meet- of modelresultaten. Bovendien wordt aangesloten op de concepten en gegevens zoals die in het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) worden gehanteerd. Met de methode moet het in de toekomst mogelijk zijn gedetailleerde kaartbeelden te generen van de kwelflux en kwelwaterkwaliteit in de wortelzone van Nederlandse natuurgebieden. De resultaten van deze methodiek wordt in het Drentse Aa-gebied aan de hand van gegevens over bodemtypen, vegetatietypen en/of humusprofiel op plausibiliteit getoetst omdat in voor dit gebied betrouwbare hydrologische modelresultaten beschikbaar zijn.

2 Werkwijze op hoofdlijnen

Om tot een landsdekkend beeld van de ecologisch relevante kwel in de Nederlandse natuurterreinen te komen, dienen een aantal stappen gezet te worden. Wellicht kan in de toekomst met het NHI een dergelijke vraag direct worden beantwoord. Dit model wordt in opdracht van de Waterdienst van Rijkswaterstaat en het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) door Deltares en Alterra ontwikkeld. In dit landsdekkend model wordt, met grids van 250 maal 250 m, het gehele hydrologische systeem gekoppeld doorgerekend (atmosfeer/onverzadigde zone, verzadigd grondwatersysteem, oppervlaktewatersysteem). In oktober 2008 is versie 1+ opgeleverd dat door PBL en de Waterdienst zal worden gebruikt. In theorie zou het mogelijk zijn op elke plek en op elke diepte aan te geven welke weg het grondwater heeft afgelegd, welke bodempakketten daarbij zijn doorstroomd en wat de mogelijke chemische veranderingen zijn. Echter, deze aanpak is om diverse redenen met versie 1+ niet haalbaar. In de voorliggende studie wordt daarom waterkwantiteit en waterkwaliteit niet berekend met alleen modelgegevens.

Voor een inschatting van de actuele kwaliteit van het ondiepe grondwater in natuurgebieden is gebruik gemaakt van gegevens uit het landelijk en provinciaal meetnet grondwaterkwaliteit, LMG en PMG genaamd (Reijnders *et al.* 2004). De meest recente gegevens uit deze beide meetnetten zijn hiervoor via DINO (Data en Informatie van de Nederlandse Ondergrond (TNO)) opgevraagd. De gegevens over de periode 2003-2007 bleken echter nog niet te zijn gecontroleerd en in een definitieve database te zijn opgenomen. Daarom is begonnen de gegevens met een aantal basale controles te checken. Vervolgens zijn de waterkwaliteitsgegevens bewerkt om ze bruikbaar te maken voor een landelijke typering van de ondiepe grondwaterkwaliteit. Per meetlocatie is aangegeven in hoeverre een watermonster overeenkomt met de verschillende referentiewatertypes. Vervolgens is middels een geostatistische interpolatie een landelijk ruimtelijk beeld van de watertypen vervaardigd.

Naast informatie over waterkwaliteit is ook informatie over grondwaterkwantiteit nodig. Grondwaterstanden en kwelfluxen kunnen met het NHI direct worden bepaald. Het NHI rekent echter voor ruimtelijke eenheden (cellen) van 250 x 250 meter. Veel natuurgebieden en locaties van grondwaterafhankelijke natuur daarbinnen zijn kleiner. Daardoor zijn onbewerkte modelgegevens beperkt bruikbaar voor uitspraken over het voorkomen van standplaatsen voor vegetatie. Er zijn verschillende neerschalingsmethoden ontwikkeld om de grofschalige modelresultaten over grondwaterstanden en kwelfluxen te verfijnen tot uitspraken op het niveau van 25 x 25 meter (Hoogewoud & Van Ek, 2002; Hoogland & Runhaar, 2006). Deltares heeft recent diverse neerschalingstechnieken ontwikkeld en getoetst in het Drentse Aa-gebied waarvan de best presterende neerschalingstechniek in dit document kort wordt besproken. Hoogland *et al.* (2008) hebben de grondwaterstand en grondwaterstandsverandering in natuurgebieden op basis van metingen en waarnemingen aan de grondwaterstand in kaart gebracht.

In dit werkdocument gaat de aandacht meer uit naar de neerschaling van de kwelflux. De kwelflux wordt in hydrologische modellen beschouwd als de flux over de eerste (bovenste) slecht doorlatende laag. Afhankelijk van de geohydrologische schematisatie is dat meestal tussen 2 en 25 meter diep. Een flux op deze diepte zegt weinig over de kwelflux die in de wortelzone terecht komt en beschikbaar is voor de vegetatie. In deze studie zijn daarom twee methoden getoetst om de kwelflux uit het MIPWA-model te vertalen naar het voorkomen van kwel in de wortelzone; we noemen dit ecologisch relevante kwel. In het proefgebied

Drentse Aa zijn twee methoden beproefd om kwelfluxen uit het hydrologisch model te vertalen naar een kwelflux tot in de wortelzone.

Door de kwelflux naar de wortelzone te koppelen aan het landsdekkende ruimtelijk beeld van watertypen dat gemaakt is, kan een uitspraak worden gedaan over het lokaal voorkomen van ecologisch relevante kwel. De voorspellingen over het al dan niet voorkomen van ecologisch relevante kwel zijn in het Drentse Aa-gebied getoetst aan gegevens die ecologisch relevante kwel indiceren, zoals de beschrijving van humusprofielen en vegetatieopnamen.

3 Definities en uitgangspunten

Kwel

De meest gebruikelijke definitie van kwel is uittredend grondwater (CHO-TNO, 1986). Deze definitie zal hier niet worden gebruikt omdat grondwater dat uittreedt afkomstig kan zijn van water dat binnen een gebied is toegevoerd (bijv. via neerslag). Het gaat in deze studie om terrestrische natuur in natuurterreinen. De meest bruikbare definitie is daarom:

Het uittreden van grondwater onder invloed van stijghoogte buiten het beschouwde gebied (figuur 1).

Maar ook deze definitie is niet goed bruikbaar omdat het water in sloten kan uittreden. Als het beschouwde gebied de wortelzone van terrestrische vegetatie is dan kunnen we de definitie versmallen tot ecologische relevante kwel. Derhalve luidt de definitie:

Het soms of vrijwel permanent door de onderkant van de wortelzone binnenstromend grondwater dat een duidelijke, van regenwater afwijkende, chemische samenstelling heeft en daardoor significant van invloed is op de chemische processen in de wortelzone die relevant zijn voor sommige natuur(doel)typen.

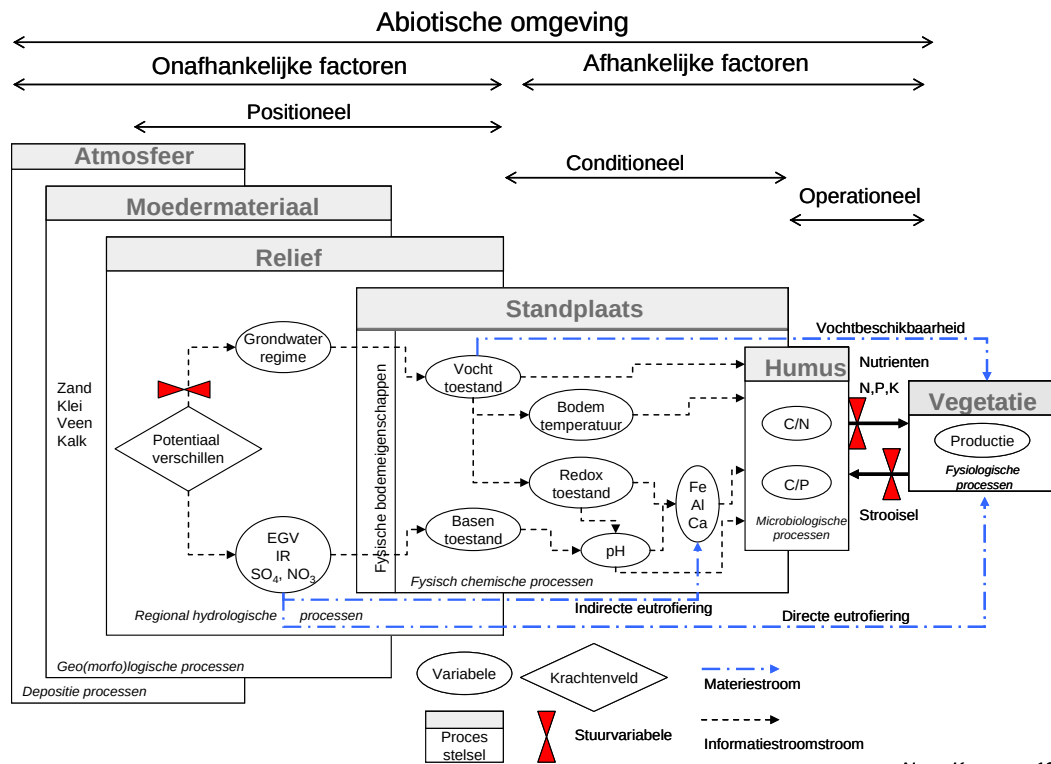
Belangrijk voor operationalisatie is om aan de termen 'soms' en 'significant' een waarde toe te kennen. Uiteindelijk gaat het om het geïntegreerde effect van kwel- en infiltratie over een langjarige periode die tot een significante verandering van de basenverzadiging leidt. Omdat afhankelijk van de zuurbuffercapaciteit van de bodem een fundamentele omkering van de hydrologische flux aan het maaiveld vertraagd tot uiting zal komen in de basentoestand van de standplaats, wordt voorgesteld een 10-jarige periode als uitgangspunt te nemen. Een significante daling van de basentoestand over een periode van 10 jaar is in lijn met de ervaring dat verzuring binnen 10 jaar niet resulteert in macroscopische veranderingen van het humusprofiel. Een dergelijke verandering van het macroscopische humusprofiel zou bodem- en ecosysteemontwikkeling sterk beïnvloeden.

Ecohydrologisch concept

Ecologisch relevante kwel zal worden beschouwd vanuit een ecohydrologisch concept. Dit concept gaat ervan uit dat hydrologische processen op landschapsschaal via fysisch-chemische bodemprocessen op standplaatsniveau zowel direct als indirect van invloed zijn op biotische en abiotische processen in de wortelzone. Deze (a)biotische processen in de wortelzone zullen bijvoorbeeld de nutriëntenvoorziening van natuurlijke vegetaties beïnvloeden. Dit concept is als schema weergegeven in figuur 1.

Moedermateriaal en reliëf zijn in Nederland de belangrijkste onafhankelijke factoren die van invloed zijn op de vegetatie. Het reliëf is de drijvende kracht achter grondwaterstromen en in combinatie met de aard van het doorstroomde moedermateriaal ontstaat hierdoor op landschapsschaal een differentiatie van ecologisch relevante watertypen. Tijdens stroming van infiltratie naar kwelgebied neemt het water vooral Ca, Fe en bicarbonaat op. Op de standplaats verlaat dit water de onderzijde van de wortelzone of stroomt het juist de wortelzone binnen. In het eerste geval is er sprake van infiltratie, in het tweede van kwel. Bij een primaire bodem- of ecosysteemontwikkeling komen daardoor verschillende processen op gang die tot uiting komen in de bodemvorming en de vegetatie. Verschillende bodemtypen in Nederland zijn kenmerkend voor infiltratie dan wel kwel en hebben daardoor een karakteristieke hydrologische positie in het landschap. Bodems bevatten informatie over hydrologische processen die zich over een periode van eeuwen hebben voltrokken. Korte termijn-

veranderingen in het hydrologisch proces komen niet tot uiting in de bodemfactoren van het Nederlandse Bodemclassificatiesysteem. Bodemkundige informatie volgens de bodemkaart kan daardoor een fossiel karakter hebben. Wel komen hydrologische veranderingen met een meer structureel karakter (decennia) tot uiting in het humusprofiel van de bodem. Het humusprofiel is het meest veranderlijke onderdeel van het bodemcompartiment. Op termijn van een tot enkele decennia kan het humusprofiel fundamenteel van karakter veranderen onder invloed van de vocht- en basentoestand aan het maaiveld. Het humusprofiel is daarom een interessante bodemvariabele om actuele patrooninformatie aan het maaiveld over kwel en infiltratie te verkrijgen.



Figuur 1. Schema van processtelsels en relevante variabelen

Positiegebonden waterkwaliteitsfactoren

Afhankelijk van de positie in een hydrologisch stroomgebied is de waterkwaliteit wezenlijk verschillend. Ecologisch relevante watertypen zijn gebonden aan een karakteristieke hydrologische positie in het landschapstelsel. Op hoofdlijnen worden atmotrofe, lithotrofe en thalassotrofe watertypen onderscheiden met een karakteristieke positie in de hydrologische kringloop. De aanvoer met kwelwater van basische kationen, waarvan Fe en Ca de belangrijkste zijn, vertaalt zich naar een hoge basenverzadiging (pH) en de aanwezigheid van ijzeroxiden in de wortelzone. Onder bijzondere condities kan de aanvoer van basen zelfs leiden tot secundaire neerslag van calciumcarbonaat (vaste kalk). Afvoer van basen via infiltratie leidt tot een lage basenverzadiging en zure omstandigheden.

Naast aanvoer van basische kationen worden ook bicarbonaat, chloride en sulfaat aangevoerd. Toestroming van bicarbonaat naar de wortelzone draagt bij aan zuurbuffering. Chloride is een betrekkelijk weinig relevant ion zolang de concentratie lager dan 500 mg.l⁻¹ blijft. Hogere concentraties spelen een rol bij zoute of brakke kwel waarbij specifieke

zouttolerante vegetaties tot ontwikkeling komen. Sulfaten zijn van oorsprong in geringe concentratie aanwezig in het grondwater en in hogere concentraties in zout (zee)water. Door de menging van ijzerrijk grondwater met zout (zee)water en de aanwezigheid van organische stof in doorstroomde sedimenten kunnen anoxische condities ontstaan waarbij het zwavel reduceert en achterblijft als pyrietachtige verbindingen in de aquifers/-tards. Onder oxische omstandigheden kan het sulfaat uiteindelijk doordringen tot in de kwelzones van locale of subregionale stroomstelsels met een gemiddelde verblijftijd van het grondwater van 50-75 jaar. Een belangrijk gevolg hiervan is dat ook veel oppervlaktewateren zijn verrijkt met sulfaat.

Conditionerende factoren

De vocht- en basentoestand in de wortelzone van natuurterreinen zijn sterk van invloed op de beschikbaarheid van nutriënten zoals N en P voor de vegetatie. De vochttoestand is bepalend voor de toetreding van lucht in de bodem en dus voor de redoxtoestand. Het verloop van veel processen in de bodem is afhankelijk van de aan- of afwezigheid van zuurstof (redoxtoestand). Onder zuurstofloze omstandigheden verloopt de afbraak van organische stof slecht waardoor weinig voedingsstoffen via mineralisatie beschikbaar komen. Onder (periodiek) aërobe omstandigheden leidt de aanvoer van Fe door het kwelwater tot ophoping van ijzeroxiden (roestvlekken, ijzerconcreties), die een sterk fosfaatadsorberend vermogen hebben. In het geval dat kwel leidt tot secundaire kalkvorming kan de aanwezigheid van kalk leiden tot buffering van fosfaat op een laag niveau door vorming van moeilijk oplosbare Ca-P zouten. De aanwezigheid van ijzeroxiden kan evenals die van kalk daarom tot een lage P-beschikbaarheid leiden. Kwelgevoede standplaatsen hebben door de continue aanvoer van vocht en basen dus niet alleen een grote zuurbuftercapaciteit, maar ook een hoge fosfaatbindingscapaciteit en een stabiele vochtuithouding.

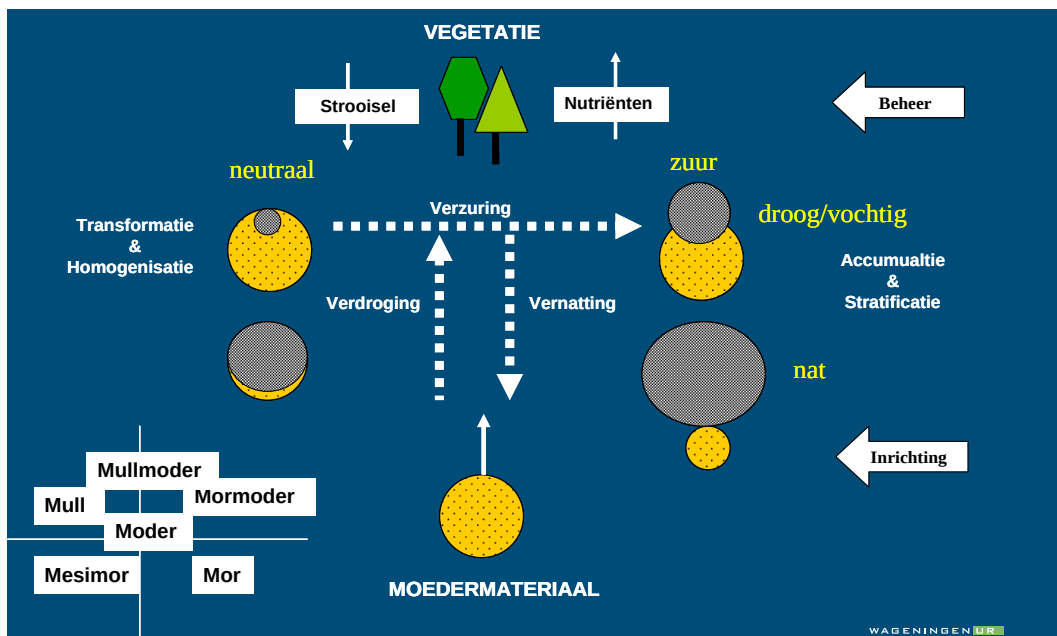
Interactie met bodemleven en humusvormen

Een hoge pH/basenverzadiging leidt tot een hoge microbiologische activiteit in de wortelzone, waarbij door een hoge afbraaksnelheid van organische stof er een snelle nutriënten-turnover plaatsvindt. Een groot deel van de bij decompositie vrijkomende nutriënten (N en P) worden weer geïmmobiliseerd door vastlegging in microbiële lichaamseiwitten (sterke humificatie) en is daardoor slechts beperkt beschikbaar voor de vegetatie. Bodemkundig ontwikkelen zich op deze standplaatsen humusvormen die tot het mull-type behoren en gekarakteriseerd worden door lage C/N en C/P verhoudingen van de organische stof (figuur 2). Deze humusvormen kenmerken zich door sterk gehomogeniseerde Ah-horizonten als gevolg van bioturbatie. Organische stof is sterk gehumificeerd en vermengd met de minerale ondergrond. Accumulatie van strooisel is afwezig. Sterk gehumificeerde organische stof heeft een veel groter kationen-adsorptiecapaciteit (nb. zuurbuftering en basenverzadiging) dan niet gehumificeerd strooisel.

Het actieve bodemleven in mull-humusvormen zorgt voor een sterke nutriëntenretentie. Door deze factoren en processen hebben basenrijke milieus een laag productief karakter (mesotrofe condities) met een hoge soortendiversiteit. Het sterk gebufferde karakter van deze milieus zorgt voor zeer voorspelbare en stabiele condities. Het betreft 'betrouwbare' milieus waar door een sterke niche differentiatie concurrentie tussen plantensoorten wordt vermeden en bijzondere soorten (specialisten) zich kunnen vestigen. Veel doelsoorten van het natuurbeleid komen in deze milieus voor.

Indien kwelfluxen in de wortelzone omslaan naar een infiltratieflux, zullen basische kationen met de neerwaartse waterstroom worden afgevoerd waardoor zich zure omstandigheden ontwikkelen aan het maaiveld en een secundaire bodemsuccesie tot ontwikkeling komt. Zeker als condities regelmatig of langdurig anaëroob zijn kunnen ijzeroxiden door reductie in oplossing gaan (ontijzering, podzolering), waardoor fosfaatadsorptiecapaciteit verloren gaat

en fosfaat gemobiliseerd kan worden. Onder zuurdere omstandigheden wordt met name de bacteriologische bodemactiviteit lager, waardoor de stikstofretentie afneemt en de N-beschikbaarheid voor de vegetatie toeneemt. Door de verminderde microbiologische activiteit stagneert de afbraak van organische stof en ontwikkelen zich in deze zure milieus organische horizonten met een lage kationenadsorptiecapaciteit (CEC) op de onderliggende minerale horizonten (horizontdifferentiatie). Onder deze omstandigheden ontwikkelen zich humusprofielen met een (mull-)moder karakter waarbij het retentievermogen van de bodem voor nutriënten afneemt en de beschikbaarheid ervan voor de vegetatie toeneemt. Door het verlies aan capaciteit van de verschillende variabelen (zuurbuftercapaciteit, fosfaatbuffercapaciteit, N-retentiecapaciteit) krijgen deze milieus een minder stabiel karakter waardoor ze minder betrouwbaar worden voor soorten. Er zal een verschuiving optreden naar soorten met een andere strategie, gebaseerd op opportunisme: snel groeien als de omstandigheden goed zijn waardoor sterkere concurrentie zal optreden, de soortenrijkdom zal afnemen en specialisten worden vervangen door algemene soorten. Het humusprofiel bevat dus bodemkundige informatie over de dominante aanwezigheid van kwel of infiltratie die gebruikt kan worden bij toetsing van ecologisch relevante kwel



Figuur 2. Schematisch overzicht van ontwikkeling van enkele humusvormtypen in relatie de factoren vocht- en basentoestand. De gele bollen symboliseren het moedermateriaal, de grijs gearceerde bollen het humuscompartiment.

4 Typering van het ondiep grondwater

4.1 Theoretische concepten waterkwaliteitsmethode

De hier toegepaste methoden zijn al veelvuldig toegepast in eerdere studies; tekst in deze paragraaf is overgenomen uit Alterra-rapport 1034 (Kemmers *et al.* 2005).

Natuurlijke ecosystemen

In natuurlijke ecosystemen is kalkrijkdom (en dus de bodemzuurgraad) één van de belangrijkste differentiërende factoren voor de vegetatieontwikkeling. De kalkrijkdom wordt bepaald door:

- De aard van het moedermateriaal (kalkrijk vs. kalkloos) dan wel
- Hydrologische differentiatie tussen kwel- en wegzijgingsgebieden in het landschap als gevolg van ‘hydrologisch’ relief.

Via neerwaartse grondwaterstroming worden basen afgevoerd en ontstaan regenwater-afhankelijke ecosystemen. Tijdens stroming door de diepere ondergrond neemt het grondwater voornamelijk calcium- en bicarbonaationen op door oplossing van vast kalk, dat in aquifers rijkelijk voorkomt. Via opwaartse stroming wordt vervolgens basenrijk grondwater aangevoerd naar het maaiveld. Aanvoer van basische kationen zorgt voor aanvulling van het kationenadsorptiecomplex van de bodem. Een hoge basenverzadiging van het adsorptie-complex impliceert:

- Een hoge pH waarde van de bodem;
- Een grotere biologische activiteit (decompositie);
- Een grote zuurbuffercapaciteit (ionenwisseling).

Waardoor de pH tijdens perioden met zuurinput (bv. zomerse perioden) of een groot neerslagoverschot (uitspoeling!) kan worden gebufferd op een hoog niveau. Door kwel wordt de basenverzadiging van de bodem dus op een hoog peil gehouden. Kwel is in dit opzicht te beschouwen als een vervanger van kalkrijk substraat.

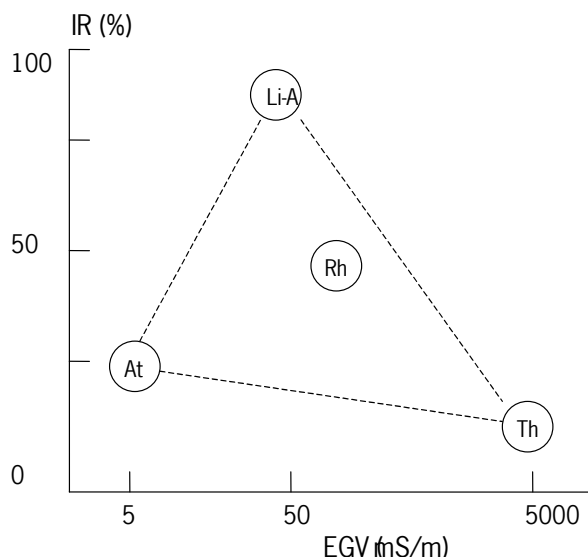
Somparameters Ionenratio en Elektrisch geleidingsvermogen

In natuurgebieden is de waterkwaliteit het best te typeren met behulp van de somparameters Ionenratio ($IR = [Ca^{2+}] / ([Ca^{2+}] + [Cl^-])$ in meq/meq) en Elektrisch geleidingsvermogen (EGV). In de hydrologische kringloop kunnen daarmee vier hoofdwatertypen worden onderscheiden. Vaak wordt bovendien een door menselijke invloed verontreinigd type onderscheiden (Rijnwater), waarmee we in het landelijk gebied vaak te maken hebben. Bij benadering zijn de referentietypen te karakteriseren zoals in tabel 1 weergegeven.

Tabel 1. Belangrijkste watertypen uit de hydrologische kringloop met hun kenmerken

Watertype	IR	EGV (mS/m)	Code
Regenwater (atmoclien)	0,19	5	At
Hard grondwater (lithoclien)	0,95	65	Li-A
Zacht grondwater	0,83	22	Li-D
Zeewater (thallassoclien)	0,04	5200	Th
Rijnwater	0,45	100	Rh

Deze watertypen kunnen als hoekpunten worden weergegeven in een referentiediagram: het zgn. IR-EGV diagram (figuur 3). Het Lithocliene, Atmocliene en Thalassocliene referentiepunt vormen een driehoek in een assenstelsel met IR en EGV als variabelen (het LAT-raamwerk). Oppervlaktewater (Rh) ligt in het zwaartepunt van deze driehoek en wordt wel als referentietype beschouwd voor verontreinigd water.



Figuur 3. IR-EGV diagram met de positie van de referentiemonsters voor regenwater (At), grondwater (Li-A), zeewater (Th) en Rijnwater (Rh).

Vaak wordt in de ecologische literatuur onderscheid gemaakt tussen 'regionale of diepe' kwel en 'lokale of ondiepe' kwel. Dit is uiterst verwarrend zolang hydrologische procesinformatie ontbreekt. Zowel water afkomstig van regionale als lokale kwel kunnen eenzelfde samenstelling aannemen, afhankelijk van de kalkrijkdom van het doorstroomde sediment. In het kader van dit project is het niet relevant om onderscheid te maken naar herkomst, juist ook omdat hydrologische procesinformatie niet expliciet in beschouwing wordt genomen. In dit project zullen we onderscheid maken op basis van uitsluitend kwaliteitscriteria. Wij zullen drie hoofdtypen onderscheiden:

1. Hard grondwater gekenmerkt door volledige verzadiging met kalk, wat zich uit in een hoge waarde van de EGV en de IR. Omdat het referentiemonster nabij Angeren is verzameld wordt dit watertype ook wel aangeduid als Li-A.
2. Zacht grondwater is onverzadigd met kalk en heeft een lagere EGV, maar wel een hoge IR waarde. Water dat bemonsterd is in de diepe ondergrond van de Veluwe nabij de Hoge Duvel wordt hiervoor als referentie genomen (Li-D).
3. Regenwater, gekenmerkt door lage waarden van EGV en IR en aangeduid als At.

Tussen deze hoofdtypen kunnen allerlei mengverhoudingen ontstaan. De hoofdwatertypen kunnen eveneens door verontreiniging van karakter veranderen.

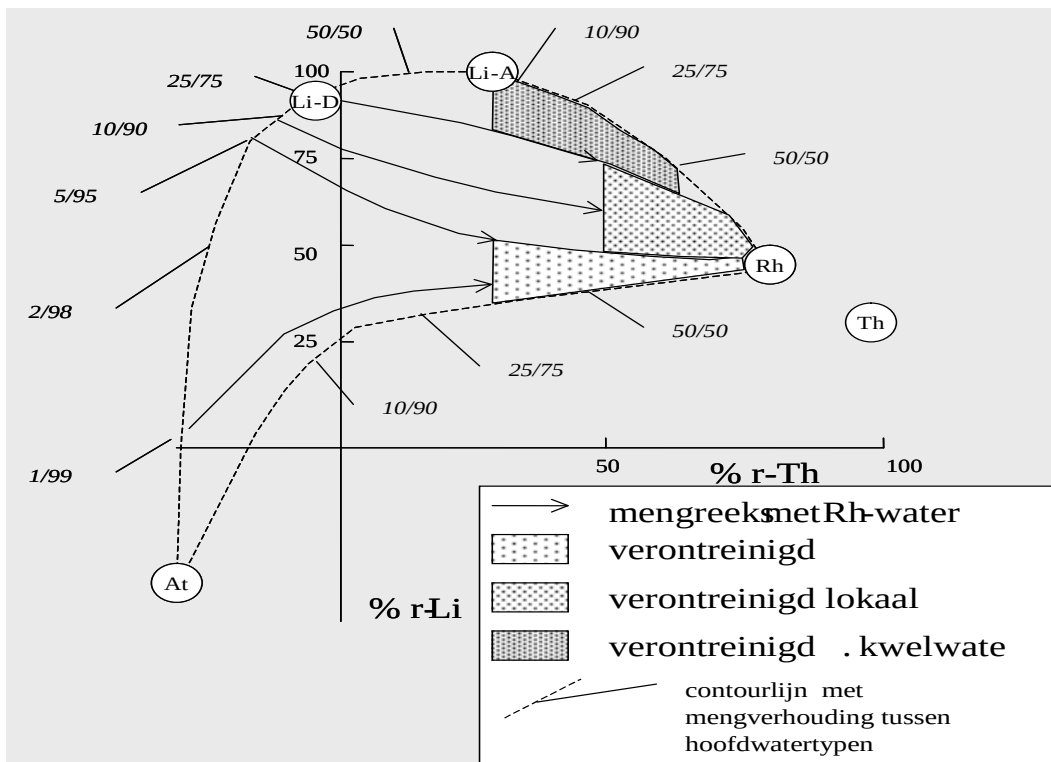
Uit vooronderzoek van Jansen (2001) bleek het EGV een goede voorspeller voor het watertype. Bovendien bleek dat ook de combinatie van ijzer- en sulfaatconcentraties naar voren kwam als voorspeller van watertypen uit het IR-EGV diagram. Als gevolg van het sterk anaërobe en reducerende karakter blijkt de samenstelling van kwelwater samen te gaan met hoge ijzer- en lage sulfaatconcentraties. Infiltratiewater bevat daarentegen nog veel zuurstof en bevat daardoor lage ijzer- en hoge sulfaatconcentraties. De bevindingen van Jansen (2001)

openden perspectieven om zowel de EGV als de redoxpotentiaal (Eh) als indicator voor het watertype te kunnen gebruiken. Beide variabelen zijn eenvoudig in het veld met sondes te meten.

Similariteitsdiagram

Voor de interpretatie van watermonsters ontwierp Van Wirdum (1990) een similariteitsdiagram. Aan dit diagram ligt een correspondentieanalyse ten grondslag, waarbij de similariteit van individuele watermonsters met elk van de referentiemonsters uit de hydrologische kringloop (grondwater: Li; regenwater: At en Zeewater: Th) kan worden vergeleken. Het blijkt dat de variatie tussen watermonsters het duidelijkst tot uiting komt in een assenstelsel met de similariteitsas van grondwater (% rLi-A) en zeewater (% rTh). De referentiepunten nemen in dit assenstelsel de uiterste posities in. Door toepassing van een mengconcept kunnen contourlijnen in het diagram worden aangegeven waarop alle denkbare mengverhoudingen tussen twee referentiemonsters zijn gelegen: de zogenaamde Mix-contouren (figuur 4).

Zo blijkt het referentiemonster voor zacht grondwater (Li-D) op de mixcontour At-LiA te liggen. De samenstelling van Li-D water kan dus worden begrepen uit een menging van 25% kalkverzadigd grondwater (Li-A) met 75% regenwater (At). Uit het mixconcept kan worden geconcludeerd dat een zeer groot volumeaandeel regenwater nodig is om een grondwatermonster een regenwaterkarakter te kunnen laten aannemen. Zo blijkt ook dat bijmenging van 25% Rijnwater het oorspronkelijke regenwatermonster (At) veel sterker beïnvloedt dan het oorspronkelijke grondwatermonster Li-A. In alle gevallen neigen monsters die op de oorspronkelijke At-LiA contour liggen op te schuiven in de richting van het Rh-referentiepunt bij verontreiniging.



Figuur 4. Similariteitsdiagram dat de verwantschap aangeeft van watermonsters met grondwater (%r-LiA) en zeewater (%r-Th) met de positie van de hoofdwatertypen uit de hydrologische kringloop en lijnen met mengverhoudingen tussen de hoofdwatertypen.

Het similariteitsdiagram is een krachtig hulpmiddel bij de interpretatie van watermonsters. Omdat de berekening van de similariteit in MAION (Van Wirdum, 1990) is gebaseerd op de concentratieverhoudingen in de watermonsters, en regenwater en zeewater wat betreft concentratieverhoudingen enige gelijkenis vertonen, ontstaan soms problemen met het berekenen van mengverhoudingen tussen deze beide referentietypen. Daarom is naast de mengverhoudingen afgeleid uit de similariteit ook een gelijkenis met de vier referentie monsters bepaald volgens de berekening van memberships zoals toegepast in fuzzy c-means clustering (Bezdek *et al.* 1984) van de verschillende referentiewatertypen.

Vervaging watertypen door verontreiniging

Door menselijke beïnvloeding (bemesten, bekalken, ontwateren) neigt de differentiatie tussen het regen- en grondwatertype (Li en At) te vervagen, doordat zich een uniform watertype ontwikkelt dat sterke gelijkenis met het Rh-type vertoont (figuur 4). Dit Rh-type heeft zich op ruime schaal verspreid in het landschap. De oorspronkelijke waterkwaliteitskenmerken in het landelijk gebied zijn hierdoor vervaagd.

Uit onderzoek van Jansen (2001) is gebleken dat dit probleem kan worden opgelost, omdat het EGV in combinatie met enkele andere variabelen een goede voorspeller blijkt te zijn voor de bepaling van het ecologische watertype in het landelijk gebied. Uit het onderzoek blijkt dat er een goede relatie bestaat tussen de EGV en de mate van verwantschap met het referentiemonster voor zeewater (% rTh). Het blijkt dat monsters met $EGV > 62,5$ als verontreinigd konden worden beschouwd. Bij monsters met een $EGV < 62,5$ bleek de EGV redelijk gecorreleerd te zijn met de verwantschap voor Li-A (%rLi-A). Het bleek dat monsters met $22,5 < EGV < 62,5$ meer dan 75% verwantschap hadden met Li-A. en konden worden beschouwd te behoren tot het harde Li-A watertype. Monsters met waarden $12 < EGV < 22,5$ bleken tot het zachte Li-D watertype te behoren. Monsters met $EGV < 12$ konden als regenwatertype worden beschouwd. Zij bezaten minder dan 50% verwantschap met Li-A.

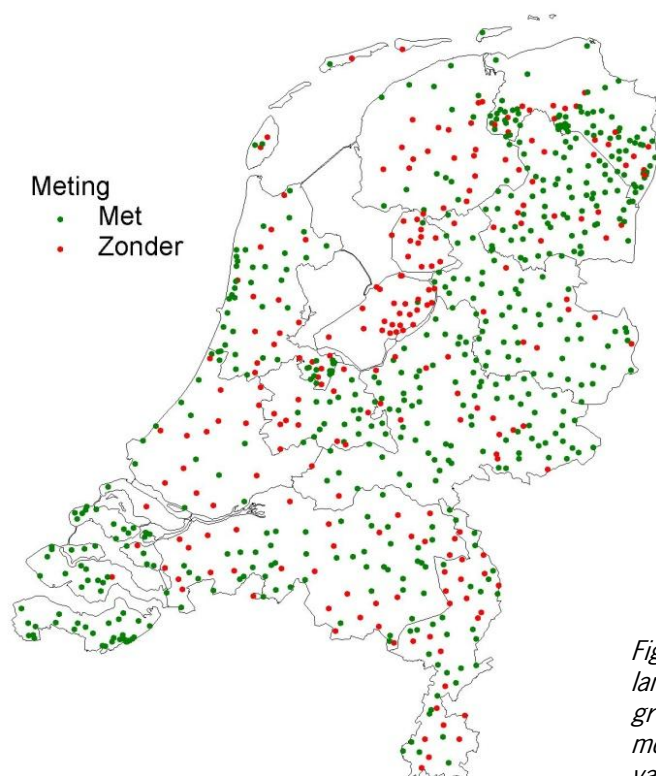
4.2 Meetgegevens van de grondwaterkwaliteit

Gegevens over de grondwaterkwaliteit zijn afkomstig uit metingen tussen 2003 en 2007 in buizen ondieper dan 15 m onder maaiveld in het landelijk- en provinciaal meetnet grondwaterkwaliteit. Dit betreft de meest recente beschikbare metingen die helaas nog geen controle bleken te hebben ondergaan en daarom nog niet in een definitieve database waren opgenomen. In dit project zijn daarom een aantal basale controles en omzettingen naar gelijksoortige eenheden uitgevoerd voor de verschillende gemeten concentraties. Hoe deze controles zich verhouden ten opzichte van de gebruikelijke controles die worden toegepast voordat analyses in de definitieve database worden opgenomen is niet bekend. De meetlocaties zijn weergegeven in figuur 5. Hierin is ook aangegeven voor welke locaties analyseresultaten van voldoende kwaliteit beschikbaar zijn. Nadat analyses zijn gecontroleerd en geharmoniseerd, is op basis van de monstercode een koppeling gelegd naar de locatie en het tijdstip van monsternamen. Voor iedere locatie is daarbij gekozen om de meest recente complete analyse van het ondiepst genomen monster te gebruiken als meerdere analyses beschikbaar zijn.

Alleen concentraties die worden gebruikt voor de typering van watertypen volgens Van Wirdum (1990) zijn gecontroleerd en worden in deze studie gebruikt; het gaat om calcium-, magnesium-, natrium-, kalium-, chloride- en sulfaatconcentraties en de pH en het elektrisch geleidingsvermogen (EC). De gehanteerde controles hebben betrekking op elektroneutraliteit van het monster en de overeenkomst tussen gemeten en geschatte EC's volgens de systematiek beschreven door Van Wirdum (1990). Voor elk watermonster is met de applicatie

MAION de similariteit met de vier referentiewatertypen berekend. De berekende similariteit is vervolgens gebruikt om een mengverhouding tussen de vier referentiewatertypen te berekenen (Jansen, 2001). Vooral het aandeel hard grondwater en zeewater zijn ecologisch gezien relevant omdat hierbij de aanvoer van basen of zout relevant voor respectievelijk kalkgebufferde standplaatsen of brakke standplaatsen kan worden geschat. Omdat de berekening van de similariteit in MAION is gebaseerd op de concentratieverhoudingen in de watermonsters, en regenwater en zeewater wat betreft concentratieverhoudingen enige gelijkenis vertonen, ontstaan soms problemen met het berekenen van mengverhoudingen tussen deze beide referentietypen.

Daarom is naast de typering door Van Wirdum (1990) ook een van fuzzy c-means clustering (Bezdek *et al.* 1984) afgeleide methode gehanteerd om de overeenkomsten van geanalyseerde watermonsters met vier referentiewatertypen uit te drukken. Clusteringtechnieken zijn eerder met succes toegepast voor de typering van de grondwaterkwaliteit in het landelijk meetnet grondwaterkwaliteit (Frapporti *et al.* 1993). Hierbij wordt gebruik gemaakt van het begrip 'membership': de mate van overeenkomst tussen het watermonster en een referentiewatertype. De membership wordt in clusteranalyse ten opzichte van de clustercentra berekend, waarbij de ligging van de clusters eerst wordt geoptimaliseerd om zoveel mogelijk variatie in de dataset te verklaren. In deze studie is de mate van overeenkomst ten opzichte van dezelfde vier referentiewatertypen berekend: regenwater, hard grondwater, Rijnwater en zeewater. Omdat met de mate van overeenkomst voor vier referentietypen wordt gewerkt is een interpretatie van de resultaten makkelijker dan in fuzzy c-means clusteranalyse waarbij de clustercentra al een mengwatertype zijn. Omdat zowel de mengverhoudingen als de memberships van de vier referentiewatertypen altijd tot 1 of 100% sommeren kunnen beide methoden met dezelfde geostatistische interpolatietechniek tot gebiedsdekkende kaarten voor Nederland worden geïnterpoleerd.



Figuur 5. Meetlocaties van de landelijke en provinciale grondwaterkwaliteitsmeetnetten met en zonder analyse resultaten van voldoende kwaliteit

4.3 Gebiedsdekkende geostatistische interpolatie van watertypen

Op meetlocaties is de mengverhouding tussen de vier referentiewatertypes of zijn de memberships voor de vier referentiewatertypes vastgesteld. Met behulp van geostatistische interpolatie (compositional kriging) is daaruit een gebiedsdekkend beeld van de onderlinge verhouding tussen de watertypen te vervaardigen. Compositional kriging is een techniek waarmee een geostatistische interpolatie plaatsvindt waarbij gelijktijdig rekening wordt gehouden met de onderlinge afhankelijkheid (compositie) van de te interpoleren variabelen; in dit geval het sommeren tot 1 of 100%. Walvoort *et al.* (1994) ontwikkelden een methode voor compositional kriging met de volgende eigenschappen:

- maakt gebruik van ruimtelijke patronen in de data;
- geeft een zuivere schatter (unbiased);
- minimaliseert de (variantie van de) predictiefout;
- geeft voor afzonderlijke variabelen altijd predicties in $[0, 1]$;
- geeft predicties waarvan de variabelen sommeren tot 1 of 100%.

De eerste drie eigenschappen gelden voor de geostatistische interpolatietechniek kriging in het algemeen. De toevoeging van de laatste twee eigenschappen zijn specifiek voor compositional kriging.

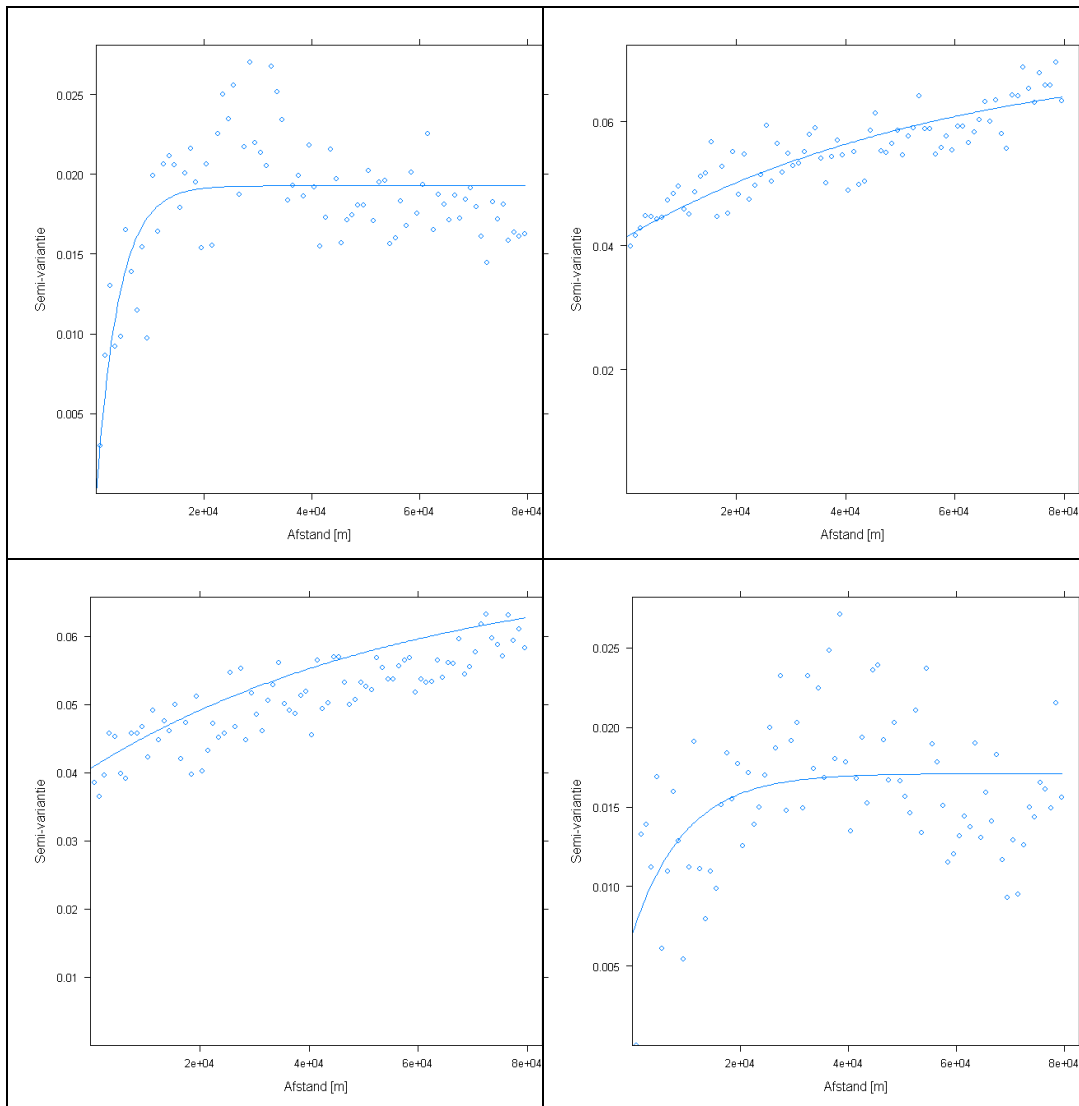
De ruimtelijke auto-correlatie (ruimtelijke afhankelijkheid) tussen de mate van overeenkomst voor elk van de vier referentietypen wordt in vier variogrammen weergegeven. Deze vier variogrammen, weergegeven in figuur 6, zijn gebruikt voor de gebiedsdekkende interpolatie waarvan de resultaten zijn afgebeeld in figuur 7.

De ruimtelijke autocorrelatie (ruimtelijke afhankelijkheid) tussen de mengverhoudingen voor elk van de vier referentietypen wordt in vier variogrammen weergegeven. Deze vier variogrammen, weergegeven in figuur 8, zijn gebruikt voor de gebiedsdekkende interpolatie waarvan de resultaten zijn afgebeeld in figuur 9. In het semivariogram voor de mate van overeenkomst van regenwater (figuur 6) is zichtbaar dat alleen op korte afstand vergelijkbare regenwaterinvloed optreedt en op grotere afstand de variatie in regenwater invloed fors toeneemt. In het semivariogram voor de mengverhoudingen van regenwater (figuur 8) is een gelijkmatigere toename van de variatie met afstand zichtbaar. Als naar alle variogrammen wordt gekeken, lijkt de mate van overeenkomst voor het maken van kaarten marginaal beter geschikt omdat er iets meer structuur waarneembaar is in de variogrammen.

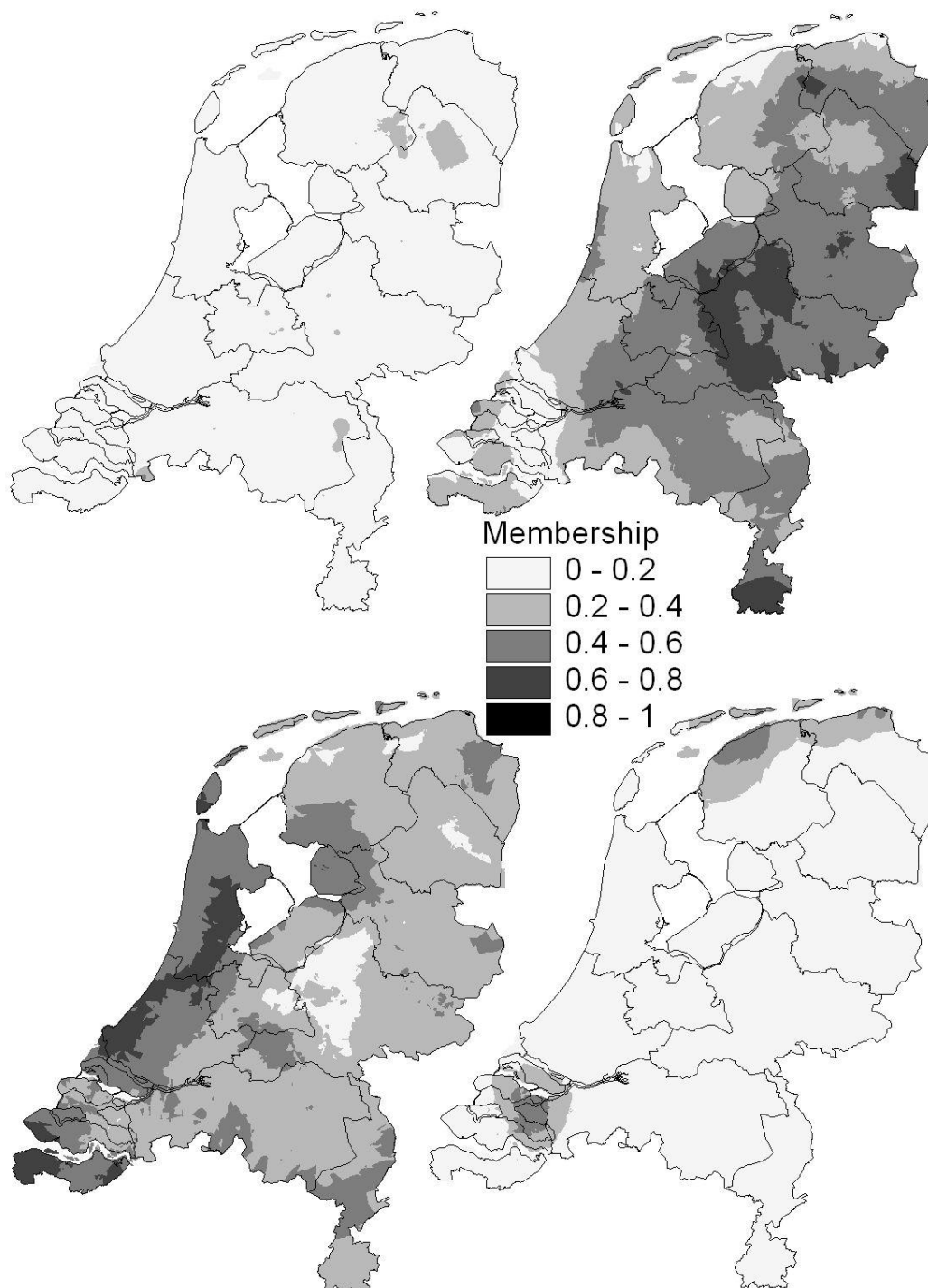
Kaartbeelden van de mate van overeenkomst (figuur 7) en mengverhoudingen (figuur 9) voor de vier referentiewatertypen in Nederland leveren in grote lijnen vergelijkbare patronen. In Zeeland, Noord-Groningen en Noord-Friesland is de invloed van zeewater zichtbaar in zowel de mate van overeenkomst als de mengverhoudingenkaarten. Echter, PMG en LMG hebben relatief weinig meetlocaties in het kustgebied waardoor kaarten minder betrouwbaar zijn. Regenwaterinvloed is prominenter aanwezig in de kaart met mengverhoudingen; in Drenthe, Brabant en de kop van de Veluwe is regenwaterinvloed zichtbaar. De mate van overeenkomst laat alleen in Drenthe regenwaterinvloed zien. De invloed van hard grondwater verschilt als naar de mate van overeenkomst of mengverhoudingen wordt gekeken: de mate van overeenkomst laten grondwaterinvloed op de flanken van de Veluwe zien, de mengverhoudingen niet. Hoge mengverhoudingen van hard grondwater komen voor in het groene hart, terwijl dat in de mate van overeenkomst met hard grondwater niet zichtbaar is.

Welk van beide type kaarten, mate van overeenkomst of mengverhouding, beter geschikt is zal afhangen van de beoogde toepassing. Daarvoor moeten relaties tussen mate van overeenkomst of mengverhoudingen met relevante eigenschappen of factoren onderzocht worden. De bruikbaarheid van dit type kaarten om de waterkwaliteit voor natuurlijke vegetatie te typeren moet nog verder worden onderzocht. Door het geringe aantal meetpunten en het feit dat voor vegetatie vooral van belang is wat er in de wortelzone plaatsvindt, is de waarde van dit type kaarten op standplaatsniveau waarschijnlijk gering maar op regionaal niveau wellicht wel bruikbaar.

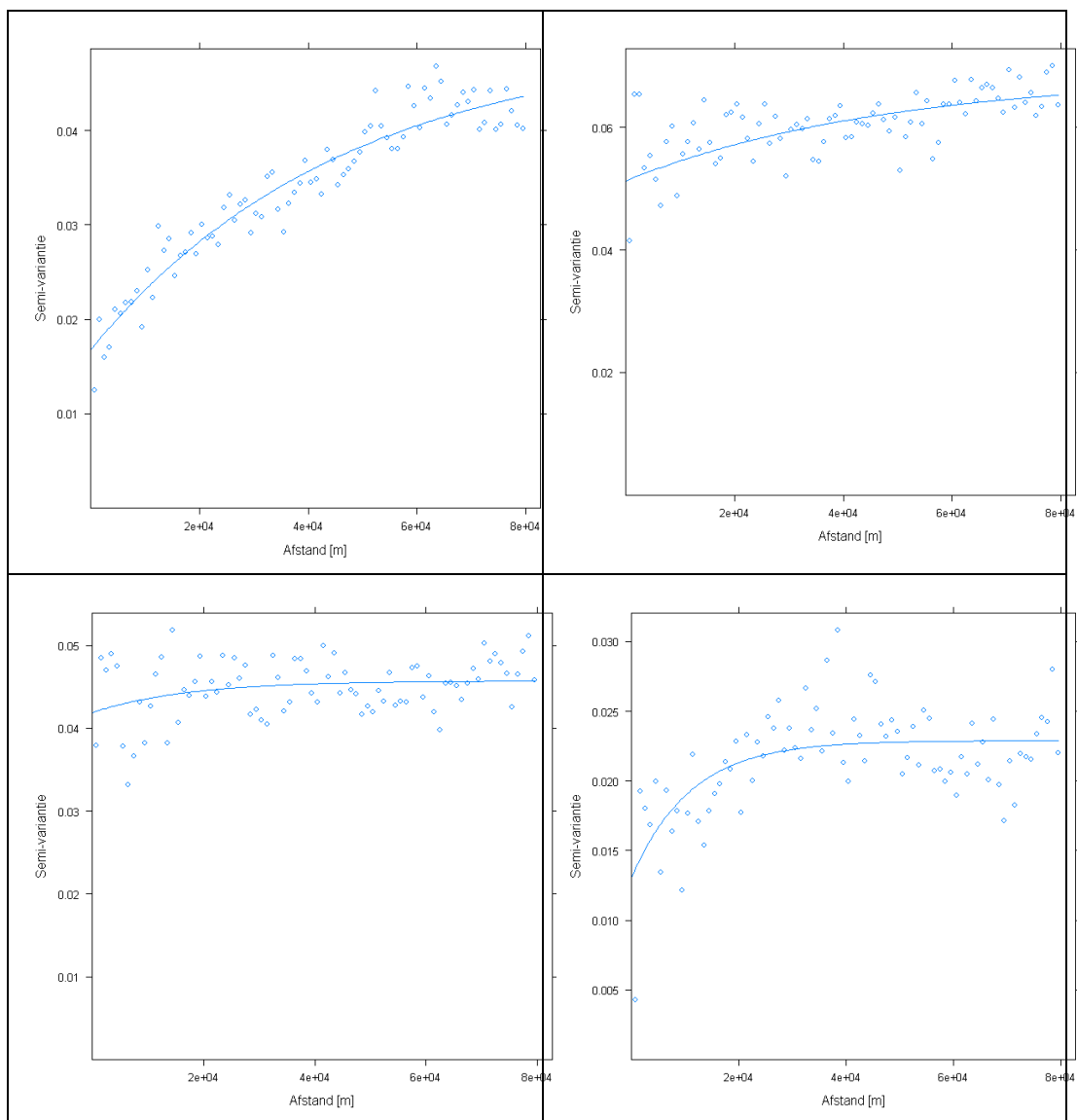
Wenselijk zou zijn om grenswaardes van mate van overeenkomst en mengverhoudingen tussen de vier watertypes aan te geven die voor het realiseren van bepaalde vegetatietypes gewenst zijn.



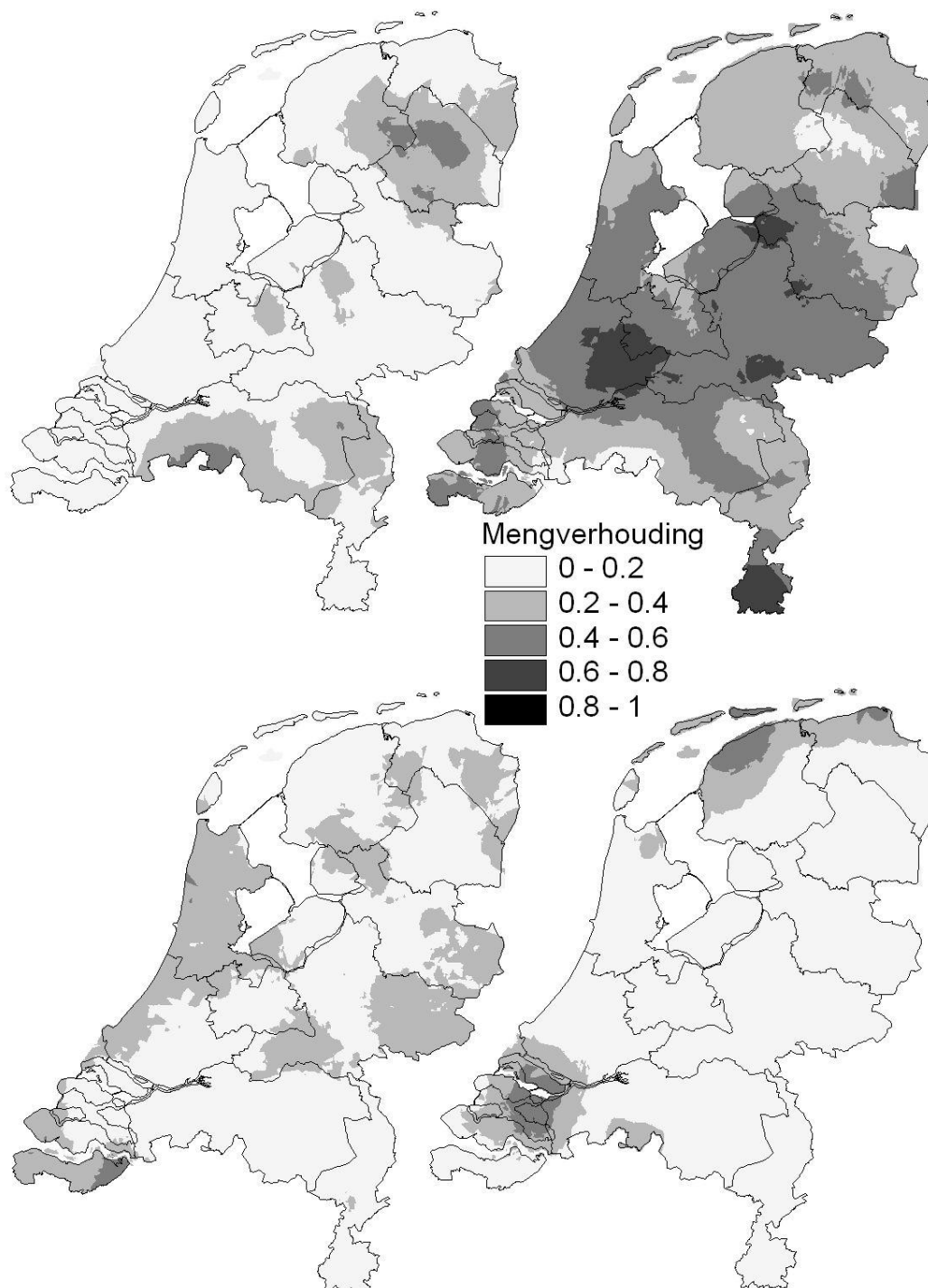
Figuur 6. Semivariogrammen voor de mate van overeenkomst voor de vier referentie watertypen. Van linksboven naar rechtsonder: Atmosclien-, Lithoclien-, Rijnwater en Thalassoclienwater.



Figuur 7. Kaarten met de mate van overeenkomst voor de vier referentie watertypen. Van linksboven naar rechtsonder: Atmosoclien-, Lithoclien-, Rijnwater en Thalassoclienwater.



Figuur 8. Semivariogrammen voor de mengverhoudingen voor de vier referentie watertypen. Van linksboven naar rechtsonder: Atmoclien-, Lithoclien-, Rijnwater en Thalassoclienwater.



Figuur 9. Kaarten voor de mengverhouding van vier referentie watertypen. Van linksboven naar rechtsonder: Atmosclien-, Lithoclien-, Rijnwater en Thalassoclienwater.

5 Neerschaling van hydrologische modelresultaten

5.1 Grootschalige modellen

Voor de koppeling van de functie natuur aan de beleidsanalytische (geo)hydrologische modellen is het noodzakelijk dat de uitkomsten van de grootschalige modellen neergeschaald kunnen worden. De neergeschaalde resultaten kunnen vervolgens gebruikt worden als input voor landelijke beleidsstudies waar (geo)hydrologische informatie noodzakelijk is. Neerschaling van uitkomsten van grootschalige modellen mag echter niet gezien worden als vervanging van de regionale gedetailleerde modellen. Het is bedoeld als optimalisatie van het landelijke model.

Het Nationaal Hydrologisch Instrumentarium (NHI) zal in de toekomst worden gebruikt om landsdekkend een schatting van de grondwatersituatie relevant voor natuur te genereren. Daarbij spelen drie knelpunten:

1. Het schaalniveau, de mate van ruimtelijk detail;
2. De diepte waarvoor de kwelflux wordt berekend;
3. De betrouwbaarheid van modelresultaten.

Voor het voorkomen van specifieke natuur(doel)typen is informatie over hydrologische condities op standplaatsniveau gewenst. Deze mate van detail is in landsdekkende hydrologische modellen vooralsnog niet haalbaar. Het landsdekkende NHI heeft een ruimtelijke resolutie (detail) van 250 x 250 meter, waarvoor resultaten worden berekend. Hierdoor worden relevante standplaatsen tot een bepaalde mate weggemiddeld. Dit is ongewenst wanneer de potentieel voorkomen van vegetaties dient te worden voorspeld op basis van aanwezige standplaatscondities. Regionale grondwatermodellen, zoals het MIPWA-model voor Noord-Nederland, hebben vaak een ruimtelijke resolutie van 25 x 25m cellen. In deze studie wordt gestreefd naar het karakteriseren van hydrologische condities per 25 x 25m cel.

5.2 Neerschaling van MIPWA-resultaten

Diverse neerschalingsmethoden

In het kader van het project “Landelijke zoetwaterverkenning” heeft Deltares (Hunink, 2009) een neerschalingsmethode ontwikkeld voor freatische grondwaterstanden en kwelfluxen. Bij de ontwikkeling van de neerschalingsmethode is gebruik gemaakt van een, voor de Drentsche Aa gecalibreerd en gevalideerd MIPWA-model (Hoogwoud, 2009). Door het model eerst op te schalen tot 250 x 250 meter (gelijk aan de uitvoeresolutie van het NHI) en daarna weer neer te schalen, kan inzicht worden verkregen in de kwaliteit van de neerschalingmethode. De neerschaling heeft alleen meerwaarde indien de betrouwbaarheid van de berekende grondwaterstand per 250 m gridcel ook voldoende is. Voor het NHI-versie 0 bleek die betrouwbaarheid nog onvoldoende. Vandaar dat een naar 250 m opgeschaald MIPWA model is gebruikt als zijnde “een betrouwbaar NHI”.

Binnen het Drentse Aa-gebied zijn een groot aantal methoden voor het neerschalen van de grondwaterstanden vergeleken. Hierbij is alleen gebruik gemaakt van landsdekkend beschikbare informatie. Het was mogelijk om de resultaten van de neerschaling te beoordelen op de kwaliteit met behulp van de aanwezige originele modelresultaten. Op basis van een vergelijking tussen de verschillende methodes is gekozen voor de beste methode. De

rapportage van de gehanteerde methoden en de uitgevoerde vergelijking worden elders gerapporteerd. Alleen de best presterende methode wordt hier kort besproken.

Grondwaterstanden

De neerschalingmethode voor de freatische grondwaterstanden gebruikt de opgeschaalde grondwaterstanden, de oppervlaktewaterpeilen (modelinvoer) en het maaiveld. Op basis van lineaire interpolatie worden de cellen neergeschaald naar cellen met afmetingen van 250 x 250 m naar 25 x 25 m. Vervolgens is er een uitsnede gemaakt van de cellen die buiten een bepaalde afstand liggen van een waterloop. De overgebleven punten zijn gecombineerd met de peilen van het oppervlaktewaterstelsel. Door middel van lineaire interpolatie tussen deze punten is een vlakdekkend grid gemaakt met een resolutie van 25 x 25 m. Bovenstaande interpolatie is een iteratief proces. Het uitgangspunt van de neerschaling is dat de gemiddelde waarde binnen de originele (grote)cellen niet veranderd. Elke stap wordt gecontroleerd hoe groot de verschillen zijn met het originele grid. Wanneer deze verschillen te groot zijn, wordt de startwaarden aangepast en opnieuw een interpolatie uitgevoerd.

De afstand van de sloot is bepaald op 50 meter. Deze afstand is bepaald door het testen van verschillende mogelijkheden. Op de locaties waar de neergeschaalde grondwaterstand boven maaiveld uit komt wordt deze gecorrigeerd.

Kwelfluxen

Het neerschalen van de kwelfluxen is gedaan door het combineren van verschillende methodes. Voor de beekdalen is gebruik gemaakt van de hierboven beschreven neergeschaalde freatische grondwaterstanden en de stijghoogte van de onderliggende modellaag. Deze stijghoogten zijn neergeschaald met behulp van lineaire interpolatie. Vervolgens is de kwel berekend volgens de formule:

$$kwel = \left(\frac{head_laag2 - head_laag1}{c_laag1} \right) * oppervlak_cel$$

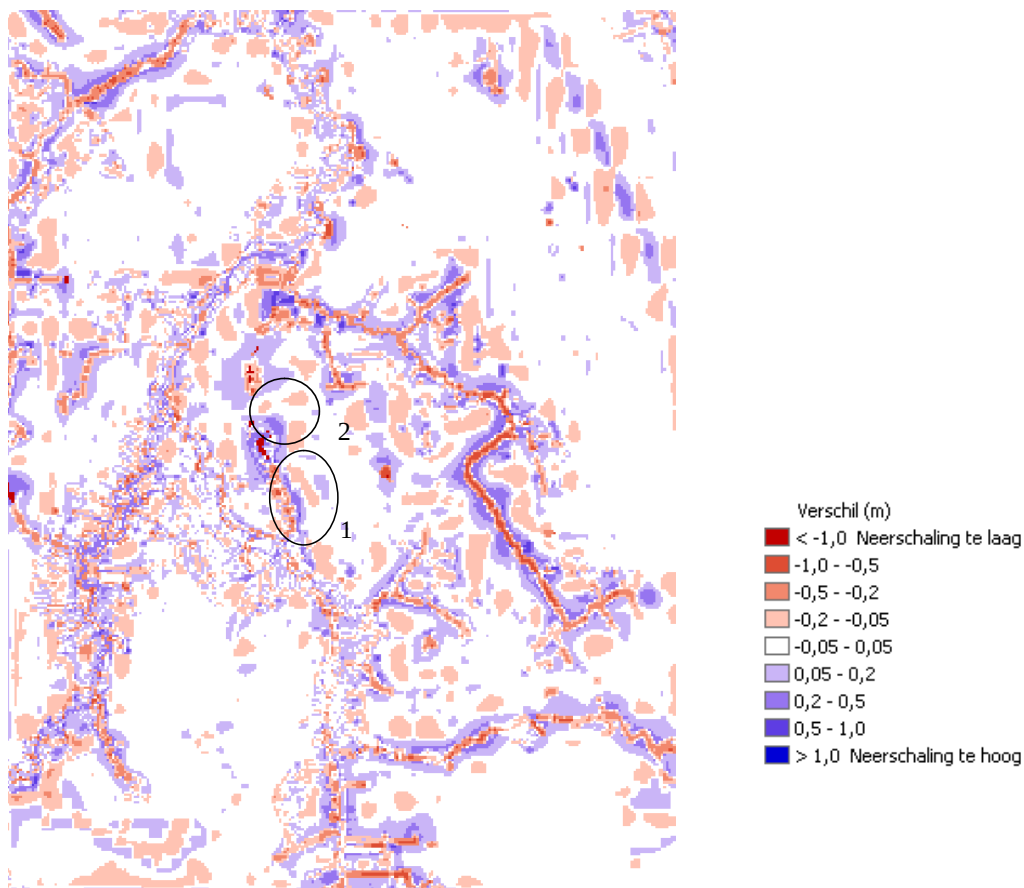
Waarbij c_laag1 de deklaagweerstand is in dagen (= weerstand tussen modellaag 1 en 2). Verder is het gebied ingedeeld in een deel met een deklaagweerstand kleiner dan 25 dagen en een gebied met een weerstand groter dan 25 dagen. In het gebied met een weerstand groter dan 25 dagen is de kwel berekend volgens bovenstaande formule. Voor het gebied met een weerstand kleiner dan 25 dagen is de berekende kwel met een resolutie van 250 x 250 m neergeschaald naar een resolutie van 25 x 25 m. Het criterium van 25 dagen is gekozen op basis van verschillende testen. Bij een kleine deklaagweerstand is gekozen om een neergeschaalde kwel te gebruiken in plaats van een berekende kwel op basis van neergeschaalde grondwaterstanden. Dit komt omdat de combinatie van kleine fouten in de neergeschaalde grondwaterstanden en een lage deklaagweerstand grote variatie in berekende fluxen mogelijk zijn. De berekende fluxen worden hierdoor minder betrouwbaar.

5.3 Resultaten

Grondwaterstanden

Zoals vermeld zijn er verschillende beekafstanden getest. Bij een afstand van 50 meter worden de beste resultaten behaald. Elke methode is vergeleken op basis van visuele inspectie (figuur 10) van de verschillen en statistiek van de verschillen.

De verschillen ten opzichte van het originele grid zijn relatief klein. Wat opvalt zijn de verschillen bij de beek in het westelijk gedeelte van het gebied. De grondwaterstanden van de beek worden te laag neersgeschaald en de directe omgeving te hoog. Vergroten van de interpolatieruimte tussen de beek en de overige waarden heeft geen positief effect op de verschillen. De grote afwijkingen bij cirkels 1 en 2 worden veroorzaakt door een depressie in het maaiveld. De grondwaterstanden van het huidige MIPWA-grid bevinden zich hier boven het maaiveld. Door de correctie die in deze methode wordt toegepast wordt een afwijking berekend.



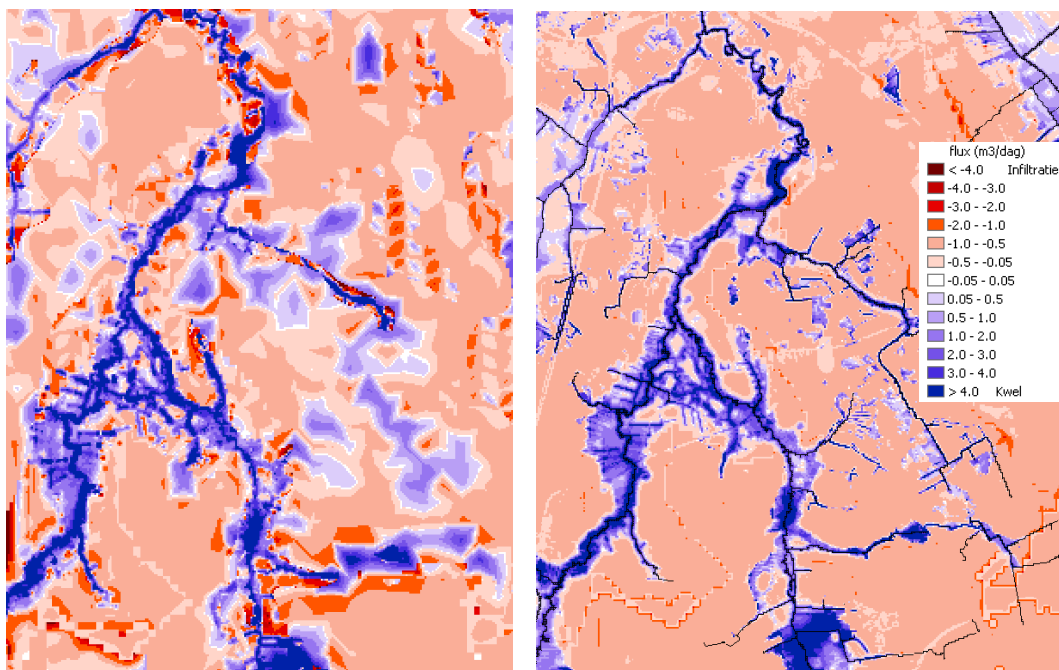
Figuur 10. Verschillen tussen originele grondwaterstanden en neersgeschaalde grondwaterstanden.

Als test is er ook gekeken of het verschil uitmaakt wanneer de gekozen afstand afhankelijk is van het type waterloop. Hiervoor is een afstand van 150 m voor de leggerwaterlopen gekozen en 50 meter voor de overige waterlopen. Deze methode gaf duidelijk geen betere resultaten.

Kwelfluxen

In figuur 11 is de neersgeschaalde kwelflux en de berekende kwelflux door het huidige MIPWA-model weergegeven. Het is duidelijk dat er nog grote verschillen mogelijk zijn.

Gebieden met een substantiële kwelflux rondom de waterlopen worden door neerscaling nauwelijks anders. De infiltratie zones rondom deze waterlopen vertonen echter grote verschillen ten opzichte van het oorspronkelijke model resultaat (vergelijk figuur 11 links en rechts). Voor de schatting in de kwelgebieden rondom de waterlopen lijkt deze neerschalings-techniek bruikbaar voor de infiltratiegebieden levert deze techniek echter een vertekend beeld.



Figuur 11. Resultaten neerschaling kwel (links) en berekende kwel MIPWA (rechts).

6 Kwel in de wortelzone

6.1 Uitgangspunten

De kwelflux wordt in hydrologische modellen beschouwd als de flux over de eerste (bovenste) slechtdoorlatende laag. Afhankelijk van de geohydrologische schematisatie is dat meestal tussen 2 en 25 meter diep. Een flux op deze diepte zegt weinig over de kwelflux die in de wortelzone terecht komt en beschikbaar is voor de natuurlijke vegetatie. In deze studie zijn daarom twee methoden getoetst om de kwelflux uit het MIPWA-model te vertalen naar het voorkomen van kwel in de wortelzone. Kwel van het juiste type dat de wortelzone bereikt zorgt voor een hogere basenverzadiging in de wortelzone en een betere gebufferd en stabielere omstandigheden met een hoger pH, deze kwel wordt verder aangeduid als ecologisch relevante kwel (zie Hoofdstuk 3, Positiegebonden waterkwaliteitsfactoren).

Op basis van vuistregels is een schatting gemaakt van kwel die de wortelzone bereikt. Daarnaast heeft KWR in opdracht van STOWA een verkennende rekenmethode ontwikkeld om op basis van breed beschikbare modelresultaten en kaartmateriaal een inschatting te maken van de kwelflux naar de wortelzone. De rekenmethode ('de neerslaglensmodule') wordt hieronder beschreven met een tekst overgenomen uit het concept-rapport voor STOWA (De Haan *et al.*, 2010)

In de meeste regionale hydrologische modellen wordt de kwel berekend als de hoeveelheid grondwater die een scheidende laag passeert. Voor voorspelling van de standplaatscondities en de vegetatiesamenstelling is echter alleen de hoeveelheid kwelwater die daadwerkelijk de wortelzone bereikt van belang. Voor het berekenen van de kwelinvloed in de wortelzone op regionale schaal zijn twee mogelijkheden. Allereerst zijn er door Van Immerzeel *et al.* (1996), Poot en Schot, (2000) en Van Walsum (2002) methodes ontwikkeld om als nabewerking op het hydrologische model een schatting te maken van de hoeveelheid kwelwater die de wortelzone bereikt. Dat heeft als voordeel dat gebruik kan worden gemaakt van de informatie die al gebruikt is om het hydrologische model op te zetten.

Een tweede optie is om achteraf op basis van berekende grondwaterstanden en kwelfluxen, in combinatie met informatie uit landelijke gegevensbestanden, een schatting te maken van de hoeveelheid kwelwater die de wortelzone bereikt. In dit hoofdstuk wordt hiervoor een eerste aanzet gepresenteerd die is gebaseerd op een door Kees Maas ontwikkelde analytische formule (De Raat, 1999) voor de maximale dikte van een neerslaglens. Deze dikte is een functie van de kwelintensiteit over de scheidende laag, de gemiddelde grondwateraanvulling, de slootafstand, en de verticale en horizontale doorlatendheid. Op basis van de maximale dikte van de neerslaglens wordt vervolgens middels het bijhouden van een waterbalans bepaald hoe lang het duurt voordat al het regenwater is afgevoerd. Vanaf dat moment wordt de hoeveelheid kwelwater berekend die de wortelzone daadwerkelijk kan bereiken. Ten slotte is voor een deel van het Drentse Aa-gebied kwalitatief getest of de methode leidt tot realistische resultaten.

6.2 Rekenmethodiek neerslagensmodule

6.2.1 Berekenen vochtprofiel en bergingsvermogen (stap 1)

De eerste stap is het berekenen van een vochtprofiel bij statisch evenwicht afhankelijk van de opgegeven grondwaterstand (afkomstig uit regionaal model) en de bodemeigenschappen. Voor de bodemeigenschappen zijn de bodemeenheden van de 1:50.000 Bodemkaart geaggregeerd tot 31 unieke bodemeenheden. Vervolgens zijn aan de bodemeenheden bodemfysische eigenschappen op basis van de Staringreeks toegekend (tabel 2).

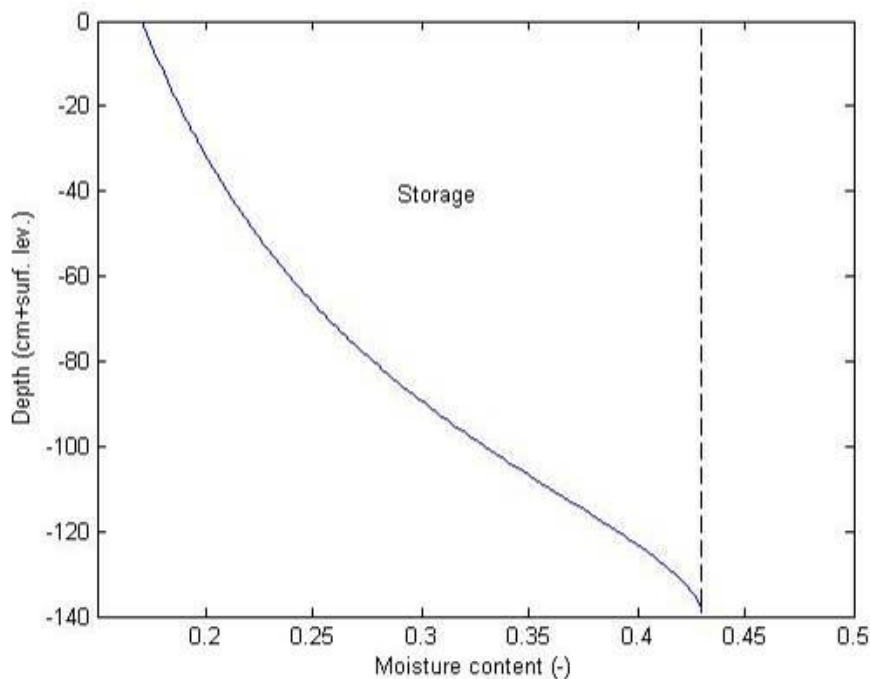
Het vochtprofiel bij statisch evenwicht is berekend met behulp van de volgende vergelijking (Van Genuchten, 1980):

$$\theta = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + |\alpha h|^n)^{\frac{1}{n}}} \quad (1)$$

waarin:

- θ_{res} = Residueel vochtgehalte (-)
- θ_{sat} = verzadigd vochtgehalte (-)
- α = empirische vorm parameter (-)
- h = drukhoogte (tussen 0 en minus de grondwaterdiepte aan maaiveld) (cm)
- n = empirische vorm parameter (-)

Uit het vochtprofiel bij statisch evenwicht (figuur 12) wordt vervolgens het totale bergingsvermogen van het profiel berekend. Vooralsnog is uitgegaan van een constante grondwaterspiegel over het jaar.



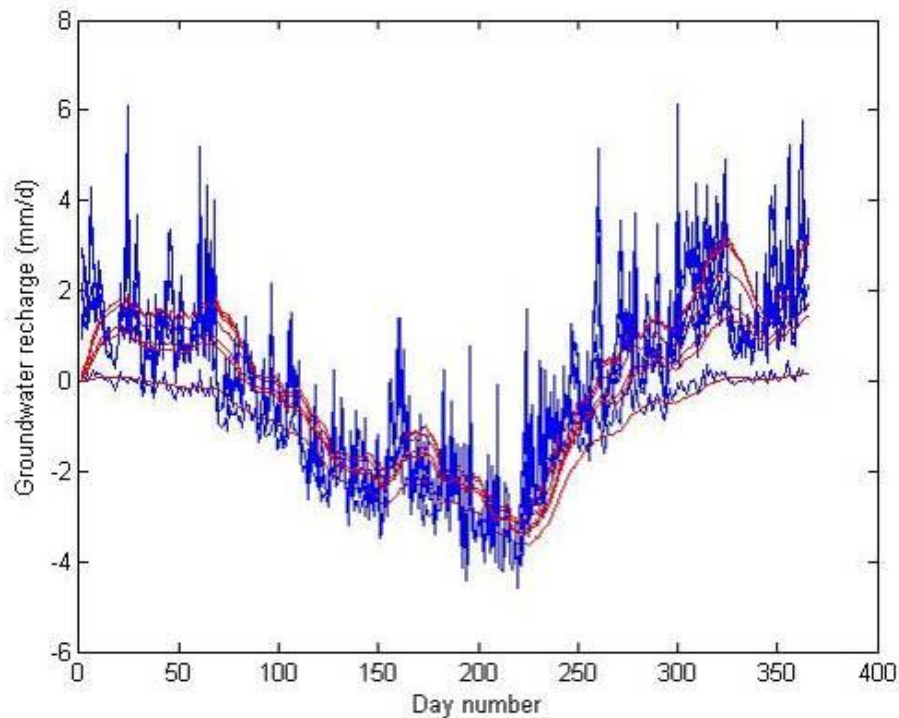
Figuur 12. Vochtprofiel bij statisch evenwicht en het bergingsvermogen

Tabel 2. Eigenschappen per onderscheiden bodemeenheid

Bodem eenheid	Omschrijving	Staring code	θ_{res}	θ_{sat}	α	N	Anisotropie doorlatendheid
			(-)	(-)	(cm ⁻¹)	(-)	(-)
1	leemarm fijn zand	B1	0.02	0.43	0.0234	1.801	0.1
2	leemarm fijn zand	B1	0.02	0.43	0.0234	1.801	0.1
3	leemarm fijn zand	B1	0.02	0.43	0.0234	1.801	0.1
4	zwak lemig fijn zand	B2	0.02	0.42	0.0276	1.491	0.1
5	zwak lemig fijn zand	B2	0.02	0.42	0.0276	1.491	0.1
6	zwak lemig fijn zand	B2	0.02	0.42	0.0276	1.491	0.1
7	sterk lemig fijn zand	B3	0.02	0.46	0.0144	1.534	0.1
8	sterk lemig fijn zand	B3	0.02	0.46	0.0144	1.534	0.1
9	sterk lemig fijn zand	B3	0.02	0.46	0.0144	1.534	0.1
10	zeer sterk lemig fijn zand	B4	0.02	0.46	0.0156	1.406	0.1
11	zeer sterk lemig fijn zand	B4	0.02	0.46	0.0156	1.406	0.1
12	zeer sterk lemig fijn zand	B4	0.02	0.46	0.0156	1.406	0.1
13	leemarm matig grof zand	B1	0.02	0.43	0.0234	1.801	0.1
14	leemarm matig grof zand	B1	0.02	0.43	0.0234	1.801	0.1
15	leemarm matig grof zand	B1	0.02	0.43	0.0234	1.801	0.1
16	zwak lemig matig grof zand	B2	0.02	0.42	0.0276	1.491	0.1
17	zwak lemig matig grof zand	B2	0.02	0.42	0.0276	1.491	0.1
18	zwak lemig matig grof zand	B2	0.02	0.42	0.0276	1.491	0.1
19	grof zand	B5	0.01	0.36	0.0452	1.933	0.1
20	grof zand	B5	0.01	0.36	0.0452	1.933	0.1
21	grof zand	B5	0.01	0.36	0.0452	1.933	0.1
22	lichte klei	B10	0.01	0.43	0.0064	1.210	0.1
23	lichte klei	B10	0.01	0.43	0.0064	1.210	0.1
24	lichte klei	B10	0.01	0.43	0.0064	1.210	0.1
25	zeer zware klei	B12	0.01	0.54	0.0239	1.094	0.1
26	zeer zware klei	B12	0.01	0.54	0.0239	1.094	0.1
27	zeer zware klei	B12	0.01	0.54	0.0239	1.094	0.1
28	siltige leem	B14	0.01	0.42	0.0051	1.305	0.1
29	siltige leem	B14	0.01	0.42	0.0051	1.305	0.1
30	siltige leem	B14	0.01	0.42	0.0051	1.305	0.1
99	overig	B16	0.01	0.80	0.0176	1.293	0.1

6.2.2 Berekenen grondwateraanvulling en runoff (stap 2)

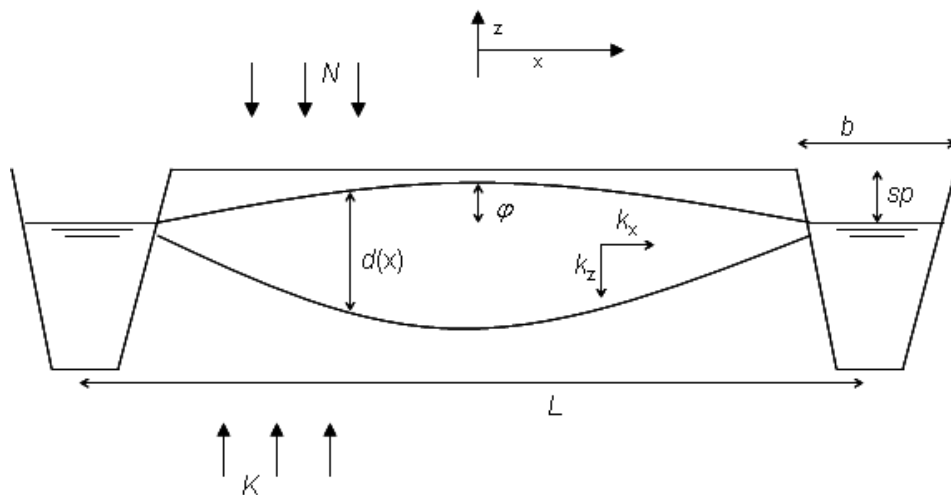
Nu het totale bergingsvermogen van het profiel bekend is, kan worden berekend wanneer en hoeveel water er oppervlakkig zal afstromen tijdens een regenperiode. Hierbij is aangenomen dat de berging na elke dag weer leeg is. Per dag wordt de grondwateraanvulling berekend als Grondwateraanvulling = neerslag – potentiële verdamping. De kwelgebieden worden dus gezien als potentieel verdampende graslanden (Eggelsman, 1981; Koerselman & Beltman, 1988; Schouwenaars, 1993; Jansen, 1995; Moors *et al.*, 1995). Als de grondwateraanvulling per dag de waarde van de berging overschrijdt wordt het overtollige water oppervlakkig afgevoerd. Dit geeft een voor oppervlakkige afstroming gecorrigeerde grondwateraanvulling reeks. Uit deze reeks wordt de gemiddelde aanvulling berekend en een regimecurve opgesteld. De regimecurve geeft het gemiddelde verloop van de grondwateraanvulling over het jaar weer. In figuur 13 zijn de regimecurves voor een aantal verschillende combinaties van bodemtype en grondwaterstand weergegeven.



Figuur 13. Regimecurves grondwateraanvulling berekend op basis van 10 jaar meteorologische gegevens en het effect van bergingsoverschrijding (rode lijn is een lopend gemiddelde per regime curve).

6.2.3 Berekening maximale dikte neerslaglens (stap 3)

De maximale dikte van de neerslaglens bij jaargemiddelde grondwateraanvulling wordt berekend met behulp van de door Kees Maas afgeleide vergelijkingen voor een stationaire neerslaglens (De Raat, 1999). Voor de afleiding van de formules is uitgegaan van de in figuur 14 weergegeven schematisatie:



Figuur 14. Schematisatie en gebruikte variabelen

De dikte van de lens wordt berekend met de volgende vergelijking:

$$d(x) = -0.5 \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{k_z}{k_x}} \ln\left(\frac{\sin((1+\alpha)\xi)}{\sin((1-\alpha)\xi)}\right) \quad (2)$$

Waarin:

$$\alpha = x^* \pi / L$$

$$\xi = N / (K + M)$$

Met vergelijking (2) is het niet mogelijk om de maximale dikte in het midden van het perceel te berekenen, hiervoor is de volgende vergelijking afgeleid:

$$d_{\max} = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \operatorname{arctgh} \frac{R}{R + K} \quad (3)$$

waarin:

$d_{\max}$ = maximale dikte neerslaglens (m)

L = slootafstand (m)

k_y = verticale doorlatendheid (m/d)

k_x = horizontale doorlatendheid (m/d)

R = gemiddelde grondwateraanvulling (m/d)

K = kwelintensiteit over een scheidende laag (m/d)

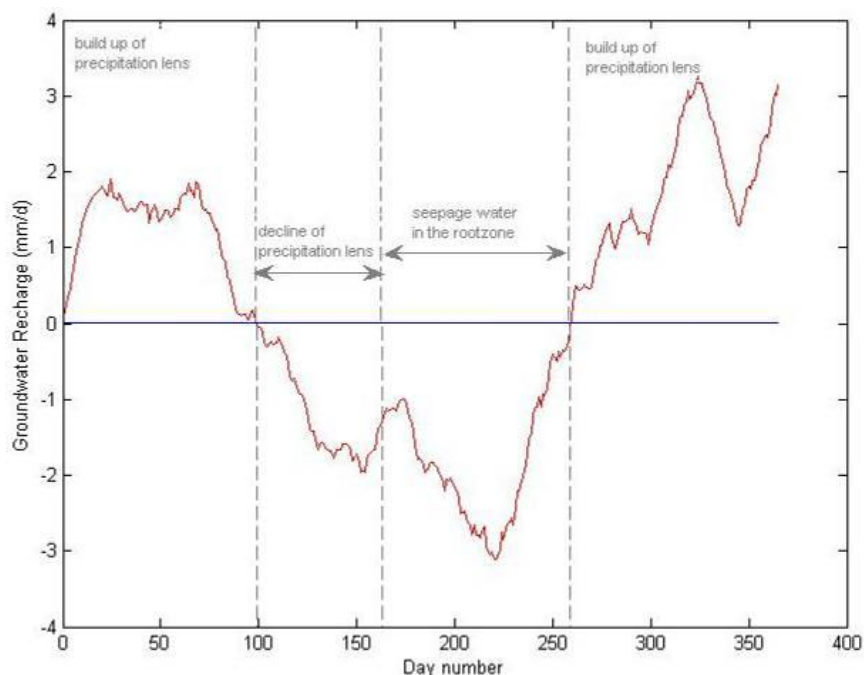
De maximale hoeveelheid af te voeren neerslagwater bedraagt:

$$d_{\max} * \theta_{\text{sat}} \text{ (m)}$$

In vergelijking (3) is voor de grondwateraanvulling het langjarig gemiddelde van de voor runoff gecorrigeerde reeksen uit stap 2 genomen, voor de kwelintensiteit de door Mipwa berekende fluxen over de scheidende laag en voor de slootafstand de gemiddelde slootafstand per 25*25 gridcel conform Van der Gaast en Stuyt (2000) en Van der Gaast en Massop (2003)

6.2.4 Berekening moment van doorbraak en flux naar de wortelzone (stap 4)

Voor de berekening van het moment van doorbraak van kwelwater door de neerslaglens wordt allereerst het moment in het jaar gezocht wat representatief is voor de gemiddelde grondwateraanvulling (snijpunt gemiddelde aanvulling met de regimecurve voor grondwateraanvulling, zie figuur 15). De maximale dikte van neerslaglens die op dit moment optreedt, wordt gelijk verondersteld aan de maximale dikte van de neerslaglens bij jaargemiddelde grondwateraanvulling volgens uit vergelijking (3).



Figuur 15. Berekening periode waarbij kwelwater in de wortelzone kan komen (rode lijn is gemiddelde regimecurve voor de grondwateraanvulling, blauwe lijn is gemiddelde grondwateraanvulling)

Vanaf dit moment wordt het cumulatieve neerslagoverschot/(-tekort) bij de berekende maximale hoeveelheid neerslagwater in de lens opgeteld. Op het moment dat de gehele lens is verdwenen wordt de flux naar de wortelzone berekend. Hierbij wordt rekening gehouden met het volgende:

- Ligging van de grondwaterspiegel;
- Kritieke stijgafstand van het betreffende bodemtype (tabel 3) Dit is de afstand tussen grondwaterspiegel en de onderkant van de wortelzone, waarbij een voor het gewas voldoende capillaire aanvoer kan worden gerealiseerd. (capillaire flux 1,5 à 2 mm/d);
- Dikte van de wortelzone (vooralsnog is een standaard dikte van 30 cm aangehouden);
- Ligging van de onderkant van de neerslaglens.

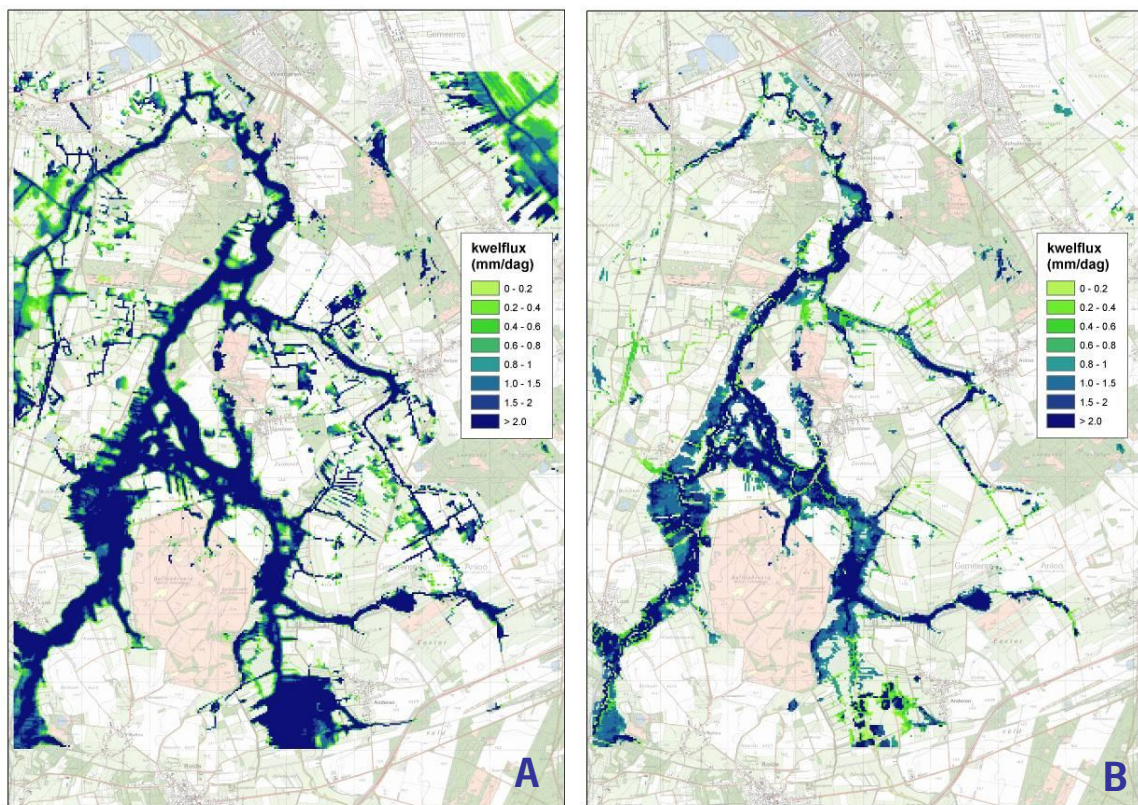
Tabel 3. Kritieke stijgafstand (cm) (Locher & De Bakker, 1990; Houben, 1977)

Aard van de ondergrond	Gemiddelde kritieke stijghoogte
Kleiarm zeezand	40
Kleiig zeezand	70
Kleiarm, matig grof rivierzand	40
Leemarm dekzand	70
Zwak lemig, fijn dekzand	110
Sterk lemig fijn dekzand	160
Lichte zavel	130
Zware zavel	90
Lichte klei	70
Matig zware klei	60
Zeer zware klei	40
Oud veenmosveen	30
Zeggeveen	40

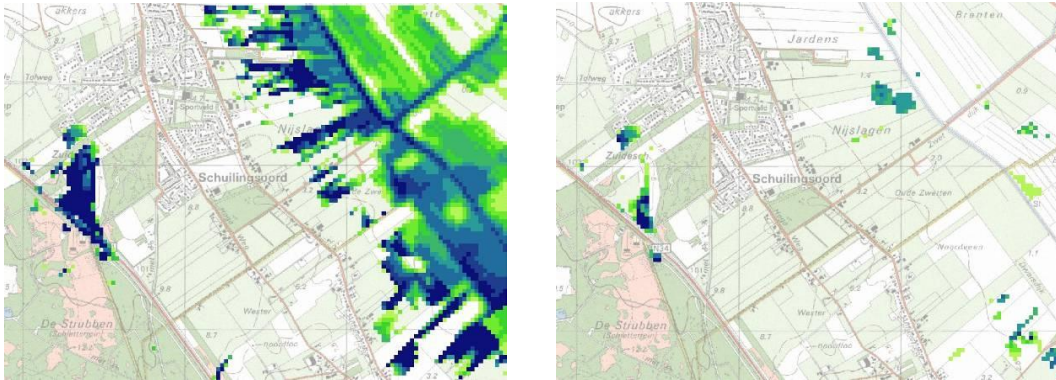
Voor de flux naar de wortelzone wordt ervan uitgegaan dat de vegetatie goed van water is voorzien: de afstand van de grondwaterspiegel tot de onderkant van de wortelzone is kleiner dan de kritieke stijgafstand. De capillaire opstijging is daarbij gelijk verondersteld aan het neerslagtekort. Als niet aan de voorwaarde van de kritieke stijgafstand wordt voldaan, wordt de flux naar de wortelzone op 0 gezet (hangwater profiel). Als de onderkant van de berekende neerslaglens zich in de wortelzone bevindt, wordt de minimale flux naar de wortelzone gelijk gesteld aan de door het MIPWA-model berekende kwelintensiteit. De flux naar de wortelzone wordt berekend over de periode vanaf het moment van doorbraak tot het moment dat de gemiddelde regimecurve voor grondwateraanvulling omschakelt van een neerslagtekort naar een neerslagoverschot. De methode genereert als uitvoer de maximale dikte van de neerslaglens, de periode (in dagen) dat de neerslaglens volledig verdwenen is, de gemiddelde flux naar de wortelzone over deze periode en de jaargemiddelde flux naar de wortelzone.

6.3 Resultaten in het Drentse Aa-gebied

Om te bepalen of de nabewerking met de neerslaglensmodule realistische resultaten geeft, is de methodiek getoetst op een deel van het Drentse Aa-gebied. Hierbij is in kwalitatieve zin gekeken of de verkregen kwelpatronen een realistisch beeld geven. Bij gebrek aan gegevens is een kwantitatieve toetsing in deze fase niet mogelijk. In figuur 16 is (A) de kwelflux over de scheidende laag en (B) de door de neerslaglens module gecorrigeerde flux naar de wortelzone weergegeven.



Figuur 16. (A) berekende kwelflux over de scheidende laag volgens het MIPWA-model en (B) de berekende flux van kwelwater naar de wortelzone volgens nabewerking met de neerslaglens module.

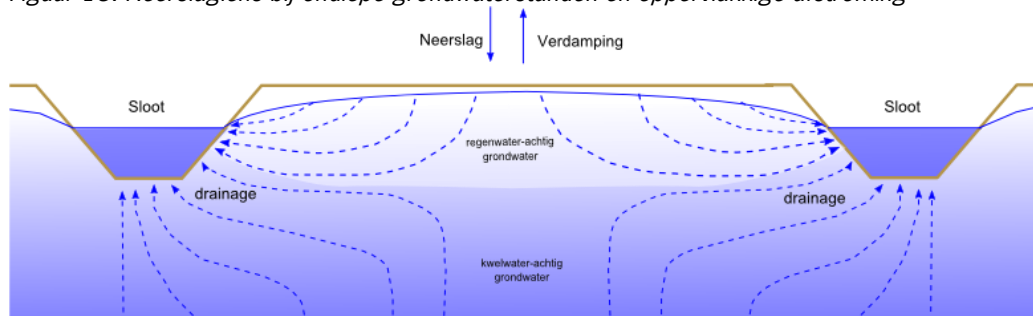


Figuur 17. Effect landbouw ontwatering op de vorming van neerslaglenzen. Links berekende kwel over de scheidende laag met MIPWA model, rechts berekende kwel naar de wortelzone

In sommige goed ontwaterde landbouwgebieden wordt door het MIPWA-model een flinke kwelflux berekend. Een voorbeeld hiervan is het landbouwgebied ten oosten van Schuilingsoord. Uit de nabewerking met de neerslaglensmodule (rechterplaatje in figuur 17) blijkt dat het kwelwater vrijwel nergens in de wortelzone kan komen. Diepe ontwatering leidt door verlaging van de freatische grondwaterstand tot een grotere flux over de scheidende laag (het potentiaal verschil wordt groter). Nabij sloten is de kwelflux over de scheidende laag dan ook het grootst (linker plaatje figuur 17). De diepe freatische grondwaterstanden leiden echter ook tot een betere infiltratiecapaciteit van de bodem en daarmee tot de vorming van neerslaglenzen. In situaties met ondiepe grondwaterstanden en oppervlakkige afstroming zal de neerslaglens in het midden van het perceel periodiek dun of geheel afwezig zijn, maar nabij de watergangen juist relatief dik (figuur 18) (Cirkel, 2003; Schot *et al.*, 2004). In situaties met diepere grondwaterstanden en geen oppervlakkige afstroming is de lens permanent aanwezig en het dikste in het midden van het perceel (figuur 19).



Figuur 18. Neerslaglens bij ondiepe grondwaterstanden en oppervlakkige afstroming



Figuur 19. Neerslaglens bij diepere grondwaterstanden en géén oppervlakkige afstroming

De neerslaglensmodule blijkt deze patronen goed te reproduceren. In gebieden met landbouw ontwatering (dikke neerslaglensen) wordt geen kwel naar de wortelzone berekend (patroon Figuur 19). In de nattere gebieden in het beekdal (bijvoorbeeld het gebied ten noordwesten van het Balloërveld) wordt nabij de ontwateringsmiddelen geen of zeer beperkte toestroom van kwelwater naar de wortelzone berekend terwijl op grotere afstand van de waterlopen er wel kwelwater in de wortelzone kan komen (patroon Figuur 18).

In kwantitatief opzicht leidt het toepassen van de neerslaglensmodule tot een reductie van de flux. Bij grondwaterstanden beneden de wortelzone wordt de flux van kwelwater naar de wortelzone bepaald door de verdamping van de vegetatie.

6.4 Vuistregels voor kwel in de wortelzone

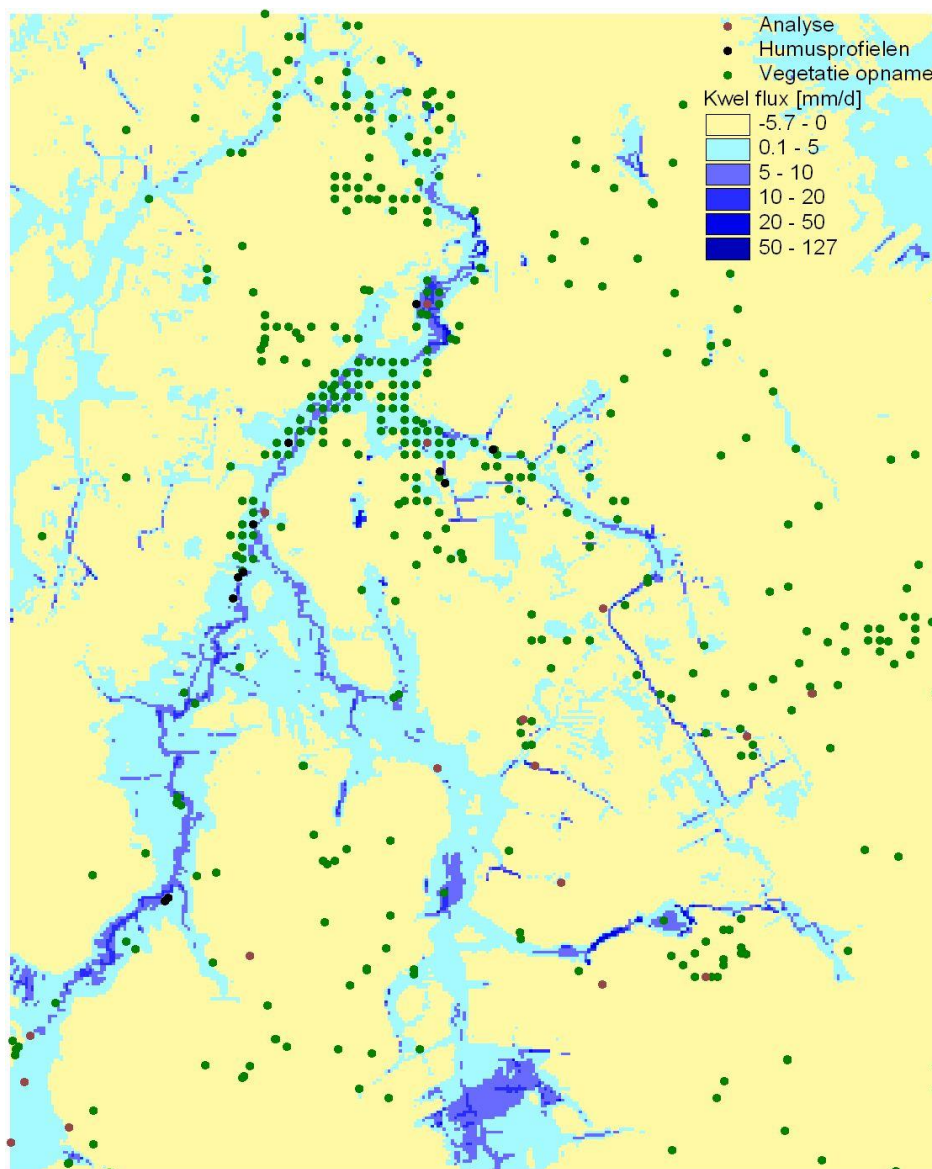
In gebieden waar met een grondwaterstromingsmodel een kwelflux over de eerste scheidende laag berekend is kan op basis van eenvoudige vuistregels een inschatting gemaakt worden of deze kwelflux ook de wortelzone bereikt. Achtergrond voor deze vuistregels is gebaseerd op de figuren 18 en 19 met en zonder oppervlakkige afstroming. Op locaties waar de grondwaterstand zeer dicht bij het maaiveld ligt bestaat een grote kans op oppervlakkige afvoer. Door geringe maaiveldhoogte verschillen kan al water worden afgevoerd via lokale laagtes tussen bolgelegde percelen als het grondwater zich nog 10-20 cm onder de gemiddelde lokale maaiveldhoogte bevindt. Het water dat oppervlakkig wordt afgevoerd is in eerste instantie de neerslaglens die is opgebouwd uit het neerslagoverschot. Op het moment dat deze neerslaglens is verdwenen, kan het kwelwater verder omhoog treden en de wortelzone bereiken. Dit gebeurt het eerst op de plekken met zeer ondiepe kleine greppeltjes waar het grondwater al zeer ondiep zit, vaak verder af van grotere ontwateringsmiddelen. Op basis van modelresultaten van de kwelflux en de grondwaterstand wordt in GIS berekend waar de kwel de wortelzone bereikt. Hier is gekozen voor alleen de gebieden waar een kwelflux over de eerste scheidende laag optreedt en de grondwaterstand ondieper is dan 20 cm onder maaiveld. Er wordt alleen een schatting gemaakt waar dit gebeurt en niet van de grootte van de kwelflux tot in de wortelzone.

6.5 Conclusies en discussie

De neerslaglensmodule lijkt een bruikbare tool om ecologisch relevante kwelwaterpatronen te genereren op basis van breed beschikbare hydrologische modeluitkomsten (grondwaterstanden, kwel over een scheidende laag) en landelijke gegevensbestanden. In kwantitatieve zin geeft de nabewerking plausibele resultaten, in hoeverre de fluxen ook daadwerkelijk overeenkomen met de werkelijkheid is in deze fase niet vast te stellen; dat zal de toetsing in Hoofdstuk 7 moeten uitwijzen. Ten opzichte van het gebied met een kwelflux over de eerste scheidende laag neemt het areaal met kwel in de wortelzone duidelijk af, wat overeenkomt met de verwachtingen. De beschreven methode kent een groot aantal versimpelingen. Zo is vooralsnog drainage van de lens niet meegenomen, is het bodemvochtbakje een sterke versimpeling van de werkelijkheid en is de methode niet geschikt voor sterk hellende gebieden (laterale toestrooming). In Nederlandse situaties, zal dit meestal geen probleem vormen.

7 Toetsing aan onafhankelijke gegevens

Voor de toetsing van berekeningsresultaten over kwel naar de wortelzone zijn drie onafhankelijke gegevensbronnen gebruikt: vegetatieopnamen, humusprofielen en analyse-resultaten van bodemonsters. De locaties van deze opnamen zijn weergegeven in figuur 20 samen met door MIPWA berekende kwelflux. Op deze locaties is uit vegetatieopnamen, bodemchemische analyses of beschrijvingen van het humusprofiel een indicator voor het al dan niet voorkomen van basenrijke kwel in de wortelzone afgeleid. Deze kwelindicatoren zijn vergeleken met de modelvoorspelling over het voorkomen van kwel in de wortelzone.

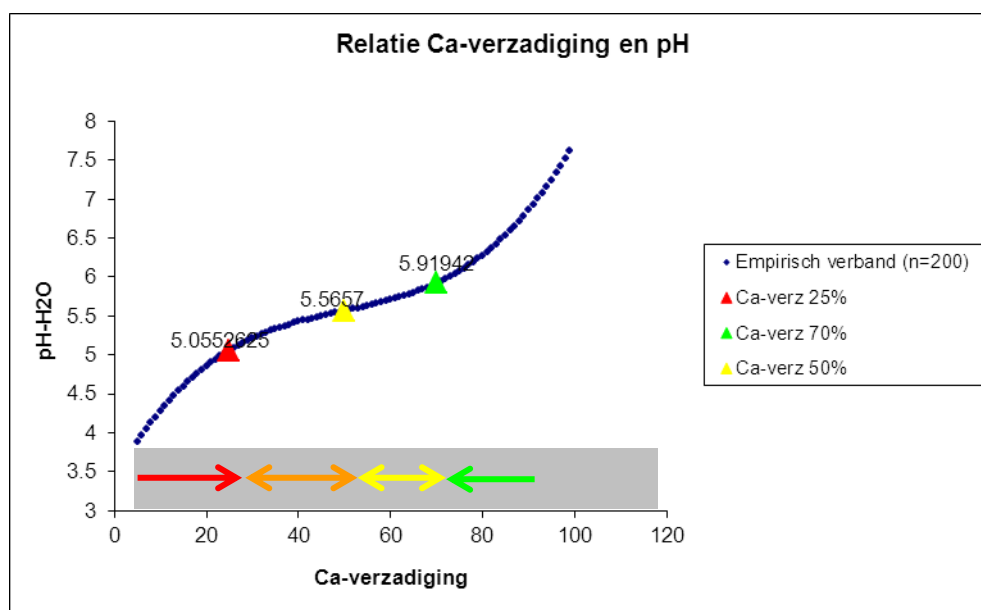


Figuur 20. Locaties met bodemchemische analyses (bruine punten), humusprofielbeschrijvingen (zwarte punten) en vegetatie opnames (groene punten) ten opzichte van de met MIPWA berekende kwelflux over de eerste scheidende laag.

7.1 Bodemchemische indicatoren

Voor de bodemonsters wordt basenrijke kwel tot in de wortelzone geïndiceerd door een Ca-verzadiging van meer dan 50% en een daarbij horende $\text{pH} > 5.57$ zoals weergegeven in figuur 21 (Van Delft, 2002). Voor elk van de 17 bodemonsters in het Drentse Aa-modelgebied is op basis van de gemeten pH kleiner of groter dan 5.57 de indicator voor kwel tot in de wortelzone berekend. Het idee hierachter is dat de Ca-verzadiging wordt veroorzaakt door basenrijke kwel tot in de wortelzone. Hierbij zijn echter twee kanttekeningen te plaatsen:

1. Sommige sedimenten van marine oorsprong bevatten kalk in dit soort gebieden hoeft een hoge Ca-verzadiging dus geen basenrijke kwel te indiceren; dit kan voorkomen in gebieden met keileem.
2. Het ondiepe grondwater in het Drentse Aa-gebied lijkt op regenwater (zie figuren 7 en 9) en via deze route wordt daardoor minder calcium aangevoerd dan in gebieden met hardgrondwater. Er zou wel kwel tot in de wortelzone kunnen optreden alleen voert het type kwelwater te weinig calcium aan voor een hoge Ca-verzadiging.



Figuur 21. Empirische relatie tussen pH en Ca-verzadiging.

Bij de interpretatie van gevonden verschillen tussen de voorspelde kwelflux in de wortelzone en indicatoren voor kwel afgeleid uit bodem- of vegetatieopnamen bemoeilijken de genoemde verschijnselen de vergelijking. Kwel van het regenwatertype uit zich niet in een hoge Ca-verzadiging of de aanwezigheid van kwelminnende vegetatie terwijl met het modelmatig wel een kwelflux voorspeld wordt. Volgens de onafhankelijke opnamen aan bodemeigenschappen, het humusprofiel of de vegetatie zou er dan minder vaak kwel voorkomen dan volgens de modelberekening.

7.2 Vegetatie-indicatoren

Bij de 734 vegetatieopnamen in het Drentse Aa-gebied is op basis van de vegetatiesamenstelling de verwachte pH bepaald. Hiervoor is een systematiek ontwikkeld (www.abiotic.wur.nl), Wamelink *et al*, 2005) waarbij per soort de abiotische randvoorwaarden, waaronder de pH, zijn geschat. De hiermee geschatte pH ter plaatse van de vegetatieopnamen wordt net als bij de bodemonsters gebruikt als een indicator over het voorkomen van basenrijke kwel in de wortelzone.

7.3 Humusprofielindicator voor kwel

De pH is mede afhankelijk van de mate waarin basenrijk kwelwater de wortelzone kan bereiken. In het studiegebied wordt het voorkomen van lithotroof grondwater in de ondergrond verondersteld. Onduidelijk is of dit water de wortelzone bereikt. Het kan zijn dat lithotroof water wel aanwezig is, maar verdrongen wordt door een regenwaterlens, of dat de kweldruk onvoldoende is en de standplaats wordt gedomineerd door infiltratie van neerslagwater.

Door het beschrijven van pH-profielen is onderzocht waar kwelwater mogelijk in de wortelzone komt of door neerslaglenzen weggedrukt wordt. Hiervoor is bij alle humusprofielen een pH profiel bepaald, waarbij op een aantal relevante dieptes de pH bepaald is door middel van indicatorstrookjes. Aldus is de pH als voorspeller van de kwelinvloed in het bodemprofiel gebruikt, ofwel wat de invloed van neerslagwater in het profiel is. Deze indicator van kwel is als codering opgenomen bij de beschreven humusprofielen in het toetsingsgebied Drentse Aa.

7.4 Toetsingsmethoden en kwaliteitsmaten

De toetsing betreft de aanwezigheid van basenrijke kwel in de wortelzone volgens modelresultaten en waarnemingen aan, bodemchemie, vegetatie en humusprofielen. Het gaat om toetsing van een zogenaamde boolean variable, er is wel of niet sprake van kwel in de wortelzone. Het gaat dus niet om de grootte van de berekende kwelflux maar alleen of kwel de wortelzone bereikt. Als dat het geval is wordt dit aangeduid met een score 1; als er geen kwel in de wortelzone komt wordt dat aangeduid met score 0, dit geldt zowel voor de waarnemingen als voor de berekende kwel. Voor iedere locatie waar een opname aan bodem, vegetatie of humusprofiel is verricht wordt een toetsing uitgevoerd. Er zijn vier mogelijke resultaten van deze toetsing:

1. Zowel de opname als berekening indiceren kwel in de wortelzone (1;1);
2. Zowel de opname als berekening indiceren geen kwel in de wortelzone (0;0);
3. De opname indiceert wel kwel in de wortelzone, de berekening niet (1;0);
4. De opname indiceert geen kwel in de wortelzone, de berekening wel (0;1).

Toetsing van de kwaliteit van de berekende kwelflux naar de wortelzone vindt plaats door het verschil van de scores (ϵ_i) tussen de berekening en de opname. Mogelijke uitkomsten hiervan zijn: 1, 0, -1. Toetsingsresultaat ($\epsilon_i = -1$) ontstaat als de opname wel kwel in de wortelzone indiceert terwijl de berekening dat niet aangeeft; Toetsingsresultaat 1 ontstaat als de opname geen kwel in de wortelzone indiceert terwijl de berekening dat wel aangeeft. De toetsing (ϵ_i) levert 0 op als zowel de opname als de berekening hetzelfde resultaat leveren; dat kan zijn beide indiceren wel of beide indiceren geen kwel in de wortelzone.

In Tabel 4 is ter illustratie het aantal locaties weergegeven per combinatie van het berekeningsresultaat volgens de neerslaglensmodule en de indicatorwaarde voor kwel uit een opname. Op $172 + 323 = 495$ van de 770 locaties is de berekening gelijk aan de opname, dus op 275, of 36% van de locaties zijn de resultaten afwijkend.

Tabel 4. Aanwezigheid van kwel volgens de neerslaglensmodule en volgens de indicator voor de wortelzone (WZ) op waarnemingslocaties.

Resultaat neerslaglensmodule	Wel Kwel in WZ (1)opname indicator	Geen Kwel in WZ (0)opname indicator	Totaal
Wel Kwel (1)	($\epsilon_i = 0$) 172	($\epsilon_i = 1$) 40	212
Geen Kwel (0)	($\epsilon_i = -1$) 235	($\epsilon_i = 0$) 323	558
Totaal	407	363	770

Het aandeel van locaties waarop de indicator waarden en kwelkaarten hetzelfde resultaat tonen ($\varepsilon_i=0$) geeft het percentage dat correct is geclassificeerd. Op basis van alle 770 opnamen zijn in totaal drie berekeningsresultaten getoetst. Het gaat om de volgende kaarten:

1. Kwel naar de wortelzone volgens de neerslagensmodule;
2. Kwel naar de wortelzone volgens de vuistregels;
3. Kwel over de eerste scheidende laag volgens het MIPWA-model.

Voor deze drie berekeningsresultaten (kwelkaarten) is een Chi-kwadraattoets voor onafhankelijkheid uitgevoerd. Hiermee kan worden vastgesteld of er meer overeenkomst bestaat tussen de voorspelde kwel en de indicatoren voor kwel dan op basis van toeval mag worden verwacht. Daarnaast is de mate van overeenkomst tussen de kwelindicatoren en de drie kwelkaarten bepaald met Cohen's-Kappa (κ).

Op basis van de verschilwaarden tussen kwelindicatoren en de drie kwelkaarten zijn de volgende statistieken berekend:

Gemiddelde fout (ME):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i,$$

Gemiddelde gekwadrateerde fout (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2.$$

Ruimtelijke variantie van de fout (VE):

$$VE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i - ME)^2 = MSE - ME^2.$$

De gemiddelde fout (ME) geeft inzicht in een eventuele systematische over- of onderschatting van het aantal locaties waar kwel optreedt. Het gemiddelde van alle scores (ε_i) onder of boven 0, geeft aan of er systematisch meer of minder kwel wordt berekend dan blijkt uit de opnamen. $ME < 0$ betekent dat meer opnamen kwel indiceren dan op de kaart wordt aangegeven.

De gemiddelde gekwadrateerde fout (MSE) geeft aan in welk aandeel van de opname locaties een afwijkende indicator van kwel wordt berekend maar hierin is ook de systematische fout opgenomen. De waarde van MSE geeft aan voor welk aandeel van de opnamen het berekende resultaat een afwijkende kwel indicator oplevert. $MSE = 0.33$, betekent dat op 1/3 de opname locaties het berekeningsresultaat een afwijkende kwelindicator oplevert.

Voor het kwantificeren van alleen de toevallige fout wordt de ruimtelijke variantie van de fout (VE) gehanteerd; waarin wordt gecorrigeerd voor de gemiddelde fout.

7.5 Toetsingsresultaten

Voor deze drie kwelkaarten is een Chi-kwadraattoets voor onafhankelijkheid uitgevoerd. Hieruit blijkt dat alle drie de kwelkaarten een significante ($p < 0.01$) afhankelijkheid vertonen met de indicatorwaarden voor kwel op de waarnemingslocaties. Dit houdt in dat er meer overeenkomst bestaat tussen de voorspelde kwel en de indicatoren voor kwel dan op basis

van toeval mag worden verwacht. Alle drie de kwelkaarten vertonen dus een overeenkomst met de waarnemingen van kwelindicatoren zoals beoogd bij het maken van de kwelkaarten. De mate van overeenkomst tussen de kwelindicatoren en de drie kwelkaarten is bepaald met Cohen's-Kappa (κ): kwel volgens de vuistregels vertoont weinig overeenstemming ($\kappa=0.17$), kwel volgens de neerslaglensmodule vertoont matige overeenstemming ($\kappa=0.30$) en kwel volgens MIPWA vertoont redelijke overeenstemming ($\kappa=0.46$).

Als naar alle 770 opnamen wordt gekeken leveren de drie kaarten van kwel een systematische onderschatting van het aantal locaties met kwel (zie tabel 5). Voor de 770 locaties is ME overal < 0 ; dat wil zeggen dat er meer opnamelocaties zijn waar kwel in de wortelzone wordt geïndiceerd dan de kaarten met berekende kwel aangeven. De kleinste systematische onderschatting wordt gemaakt met het MIPWA-resultaat van de kwelflux over de eerste scheidende laag. Dit is een verrassende uitkomst omdat verwacht mocht worden dat de kwelflux over de eerste scheidende laag niet overal tot in de wortelzone doordringt, toch stemt juist deze kaart het best overeen met indicatoren voor kwel in de wortelzone horend bij de opnames.

MSE geeft aan dat op ongeveer een derde van de locaties een andere waarde voor de kwelindicator wordt berekend dan de opname aangeeft. Op ongeveer één van de drie locaties wordt met het berekeningsresultaat de aanwezigheid van kwel in de wortelzone verkeerd getypeerd. Ook hier presteert het MIPWA-resultaat het best, gevolgd door de neerslaglensmodule; het slechtst presteert de berekeningswijze met vuistregels.

VE geeft aan hoeverre ook de ruimtelijke patronen tussen de kwelindicatoren en berekende kwel overeenkomen, waarbij al een correctie voor de systematische fout heeft plaatsgevonden. Ook hier blijken de ruimtelijke patronen in het MIPWA-resultaat het best overeen te stemmen met de indicatoren voor kwel in de wortelzone zoals ook blijkt uit de mate van overeenstemming volgens Cohen's-Kappa.

Tabel 5. Kwaliteitsmaten van de drie kwelkaarten volgens de neerslaglensmodule, de vuistregels en de modeluitkomsten van MIPWA.

Statistic	Locaties	Neerslaglens-module	Vuistregels	MIPWA
ME	770	-0.253	-0.377	-0.135
MSE	770	0.357	0.431	0.273
VE	770	0.293	0.290	0.255
ME	36	0.000	-0.250	0.167
MSE	36	0.333	0.417	0.278
VE	36	0.343	0.364	0.257

Als gekeken wordt naar alleen de locaties met bodemchemische analyses en beschrijvingen van het humusprofiel, in totaal 36, blijkt de systematische fout (ME) dichterbij 0 te liggen. De berekende kwel naar de wortelzone volgens de neerslaglensmodule levert hier een systematische fout van exact 0.

MSE geeft aan dat op één van de drie opnamelocaties het berekeningsresultaat een verkeerde typering levert. Ook hier presteert het MIPWA-resultaat het best gevolgd door de neerslaglensmodule; het slechtst presteert de berekeningswijze met vuistregels.

Als naar de overeenkomsten tussen de ruimtelijke patronen van kwelindicatoren en berekende kwel wordt gekeken, levert het MIPWA-resultaat de beste overeenkomst en verschillen de andere twee berekeningswijzen slecht marginaal van elkaar.

Conclusies over de best presterende berekeningsresultaten van kwel in de wortelzone zijn nagenoeg hetzelfde als naar alle 770 opnames wordt gekeken of alleen naar de 36 locaties met een beschrijving van het humusprofiel of een bodemchemische analyse. In beide gevallen levert het MIPWA-model een kwelkaart die het best overeenstemt met opnames, gevolgd door de neerslaglensmodule van kwel naar de wortelzone.

De aanwezigheid van keileem in de bodem kan zorgen voor een groter basenrijkdom zonder dat daarvoor een kwelflux van basenrijk grondwater noodzakelijk is. Hierdoor kan het toetsingsresultaat worden vertekend. Om te verifiëren of deze vertekening optreedt, is dezelfde toetsing uitgevoerd alleen voor die 747 locaties waar volgens de 1:50 000 bodemkaart geen keileem voorkomt. De resultaten van de toetsing voor alleen locaties zonder keileem van de drie kwelkaarten staat in tabel 6.

Tabel 6. Kwaliteitsmaten voor locaties zonder keileem van de drie kwelkaarten volgens de neerslaglensmodule, de vuistregels en de modeluitkomsten van MIPWA.

Statistic	Locaties	Neerslaglens-module	Vuistregels	MIPWA
ME	747	-0.240	-0.365	-0.119
MSE	747	0.344	0.419	0.258
VE	747	0.287	0.286	0.244
ME	33	0.000	-0.242	0.182
MSE	33	0.364	0.424	0.303
VE	33	0.375	0.377	0.278

Vergelijking van tabel 5 en tabel 6 geeft aan dat een indicatie voor kwel afgeleid uit vegetatieopnames, humusprofielen of bodemchemische analyses deels door de aanwezigheid van keileem in de bodem kan worden verklaard. De toetsingsresultaten in tabel 6 zijn namelijk op alle onderdelen beter dan die in tabel 5 maar de onderlinge verschillen tussen de drie kwelkaarten blijven onveranderd. Ook hier presteert het MIPWA-resultaat het best, gevolgd door de neerslaglensmodule; het slechtst presteert de berekeningswijze met vuistregels. Het MIPWA-resultaat levert, als alleen naar de 747 locaties zonder keileem wordt gekeken, maar in één op de vier locaties een afwijkende voorspelling voor kwel dan de opnames indiceren. Voor alle 770 opnames was dat bijna in één op de drie locaties het geval.

7.6 Conclusies en discussie

De drie kwelkaarten, gebaseerd op directe uitkomst van MIPWA (1) of gecorrigeerd met (2) de neerslaglensmodule, of (3) volgens de vuistregels, verschillen alle op ongeveer een derde van de opnamelocaties van de veronderstelde kwel in de wortelzone. Dus op ongeveer twee derde van de locaties bestaat overstemming tussen de waarneming en de voorspelling van kwel op kaart. De overeenkomsten van alle drie de kaarten en de kwelindicatoren zijn groter dan op basis van toeval verwacht mag worden; de patronen op de kwelkaarten vertonen gelijkenis met de kwelindicatoren. De kaart met de beste overeenstemming is het directe MIPWA-resultaat van de flux over de eerste scheidende laag. Dit is een verrassende uitkomst omdat verwacht mocht worden dat de kwelflux over de eerste scheidende laag niet overal tot in de wortelzone doordringt, toch stemt juist deze kaart het best overeen met indicatoren voor kwel in de wortelzone op de waarnemingslocaties. De nabewerking die hier wordt toegepast om de MIPWA-resultaten via de neerslaglensmodule of via de vuistregels te vertalen naar de flux tot in de wortelzone, levert dus niet de verwachte verbetering.

Alle drie de kwelkaarten onderschatten het aantal waarnemingslocaties met kwel. De geringste onderschatting wordt gemaakt met de MIPWA-kwelkaart van de flux over de eerste scheidende laag. Voor het feit dat de MIPWA-kwelkaart het best overeen komt met indicatoren voor kwel in de wortelzone op de waarnemingslocaties zijn een aantal redenen aan te dragen:

- Omdat bij de nabewerkingen wordt uitgegaan van de MIPWA-uitkomsten zal bij beide methodes altijd een verdere vermindering van kwel optreden en dus een grotere fout optreden.
- Er bestaat een minder scherpe scheiding tussen regenwaterlens en kwelwater dan aangenomen in de methodes. Bij een meer dispers front kan sprake zijn van toevoer van basen naar de wortelzone ondanks de 'theoretische' aanwezigheid van een neerslaglens.
- In de neerslaglensmodule wordt vooralsnog drainage van regenwater uit de lens verwaarloosd. De invloed van kwel wordt hierdoor onderschat.
- De neerslaglensmodule is zeer gevoelig voor de nauwkeurigheid van de ingevoerde grondwaterstanden. Bij een te lage grondwaterstand zal te weinig runoff worden berekend en de lens niet doorbreken. De in de methode gehanteerde over het jaar constante grondwaterspiegel is waarschijnlijk onvoldoende nauwkeurig.
- Diep ontwaterde gebieden met kwel zijn vaak in landbouwkundig gebruik. Juist in deze gebieden geeft de neerslaglensmodule een sterke reductie van de berekende kwel. Doordat dergelijke percelen veelal worden bekalkt en weinig vegetatieopnames bevatten is het onduidelijk of dit ook tot uitdrukking komt in de indicatoren.
- Het toetsen van het wel of niet voorkomen van een neerslaglens op basis van bodemchemische factoren of vegetatieindicaties kan sterk worden verstoord door na-ijling: bij hydrologisch nagenoeg neutrale condities (zoals optredend in dunne neerslaglenzen) kan het jaren duren voordat het basenverzadigingscomplex zover is uitgeput dat je inderdaad te maken krijgt met te zure standplaatscondities.
- De aanwezigheid van keileem kan ook zorgen voor een hogere basenverzadiging en daardoor voor een pH groter dan 5,57. Als we de waarnemingslocaties waar volgens de 1:50.000 bodemkaart keileem voorkomt buiten de analyse houden, wordt de onderschatting van het aantal waarnemingslocaties met kwel afgeleid van de kwelkaarten geringer maar blijft wel bestaan. Dit geeft aan dat een deel van de basenverzadiging voortkomt uit de aanwezigheid van keileem en niet door basenrijke kwel wordt verklaard.

8 Conclusies en discussie

Het maken van een landsdekkend beeld van de ecologisch relevante kwel in de Nederlandse natuurterreinen met behulp van de huidige versie van het NHI is om diverse redenen nog niet haalbaar. In deze studie is daarom een nabewerking op modelresultaten ontwikkeld en getoetst waarmee een schatting van de kwantiteit en kwaliteit van het kwelwater dat de wortelzone bereikt, wordt gemaakt.

Voor een schatting van de actuele grondwaterkwaliteit in het ondiepe grondwater is gebruik gemaakt van de meest recente gegevens uit het landelijk en provinciaal meetnet grondwaterkwaliteit, LMG en PMG genaamd (Reijnders *et al.* 2004). Deze gegevens over de periode 2003-2007 bleken nog niet te zijn gecontroleerd. Daarom zijn een aantal basale controles uitgevoerd om de waterkwaliteitsgegevens bruikbaar te maken voor een landelijke typering van de grondwaterkwaliteit ondieper dan 15 m. Op de meetlocaties is aangegeven in hoeverre de watermonsters overeenkomen met bepaalde referentiewatertypes en vervolgens is landsdekkend middels een geostatistische interpolatie een ruimtelijk beeld van de watertypen vervaardigd. De kaartbeelden waarin de invloed van regenwater, hard grondwater, Rijnwater en zeewater is weergegeven laten plausibele patronen zien maar verschillen op een aantal punten van andere kaarten. Waarschijnlijk is dit het gevolg van het beperkte aantal waarnemingen in sommige gebieden; zoals het Hollands veenweidegebied. Ook de bruikbaarheid van dit type kaarten om de waterkwaliteit voor natuurlijke vegetatie te typeren moet nog verder worden onderzocht. Dit zou kunnen door grenswaarden en optima in mengverhoudingen te toetsen aan het voorkomen van specifieke vegetaties. Daarbij moet wel bedacht worden dat de hier gepresenteerde kaarten gebaseerd zijn op waterkwaliteitsgegevens op grotere dieptes. Als dezelfde typering, uitgedrukt in mengverhoudingen of de mate van overeenkomst, wordt toegepast op watermonsters uit het grondwater dat beschikbaar is voor de vegetatie zou deze toetsing aan vegetatieopnames kunnen plaatsvinden. Wenselijk zou zijn om grenswaarden van mate van overeenkomst en mengverhoudingen tussen de vier watertypes aan te geven die voor het realiseren van bepaalde vegetatietypes gewenst zijn, zodat een directe relatie wordt gelegd met de geschiktheid voor bepaalde natuurdoelen.

De grondwaterstanden en kwelfluxen in natuurterreinen kunnen in principe met het NHI worden bepaald. Het NHI rekent echter voor ruimtelijke eenheden (cellen) van 250 x 250 meter en is daardoor minder geschikt voor uitspraken op het niveau van vegetatiestandplaatsen. Daarom zijn verschillende neerschalingsmethoden ontwikkeld om de grofschalige modelresultaten over grondwaterstanden en kwelfluxen te verfijnen tot uitspraken op het niveau van 25 x 25 meter. In het Drentse Aa-gebied zijn op basis van het MIPWA-model door Deltares diverse neerschalingstechnieken ontwikkeld (Hunink, 2009) die in deze studie zijn toegepast en getoetst. Een rapportage hierover van Deltares is in voorbereiding; een aantal resultaten zijn in dit werkdocument getoond. Eerder ontwikkelde neerschalingstechnieken (Hoogland en Runhaar, 2006) gericht op resultaten van het Landelijk grondwatermodel sluiten niet direct aan op het MIPWA- en NHI-model en zijn daarom niet gebruikt. Een vergelijking van de eerdere neerschalingsmethoden en de nieuwe methoden is wenselijk om een afgewogen keuze te maken over de te hanteren neerschalingstechniek. De bruikbaarheid van de neergeschaalde resultaten hangt naast de kwaliteit van de neerschaling vooral af van het grondwatermodel zelf af. De kwaliteit van het NHI zal ten opzichte van de huidige versie nog verbeterd moeten worden alvorens hiermee toepassingen voor natuur worden doorgerekend.

De kwelflux in het MIPWA-model heeft betrekking op een flux over de eerste slechtdoorlatende laag, voor natuur is echter de flux en samenstelling in de wortelzone relevant. We noemen dit ecologisch relevante kwel. Een flux op grotere diepte zegt, in theorie, weinig over de kwelflux die in de wortelzone terecht komt en beschikbaar is voor de natuurlijke vegetatie. In deze studie zijn daarom twee methoden getoetst om de kwelflux uit het MIPWA-model te vertalen naar het voorkomen van kwel in de wortelzone. In het proefgebied Drentse Aa, zijn naast de kwelflux volgens MIPWA twee methoden beproefd om kwelfluxen uit het MIPWA-model te vertalen naar een kwelflux tot in de wortelzone. Deze drie modeluitkomsten over het al dan niet voorkomen van (ecologisch relevante) kwel zijn in het Drentse Aa-gebied getoetst aan gegevens die ecologisch relevante kwel indiceren, zoals humusprofielen, vegetatieopnames en bodemchemische analyses. De waarnemingen gebruikt voor toetsing van de gemodelleerde kwel zijn middels een schatting of meting van pH getransformeerd tot een indicator waarde voor kwel in de wortelzone.

In deze studie wordt voor de schatting van kwel naar de wortelzone een door KWR ontwikkelde berekeningsmethode ('neerslaglensmodule') gehanteerd die is gebaseerd op een analytische formule (De Raat, 1999) voor de maximale dikte van een neerslaglens. Deze dikte is een functie van de kwelintensiteit over de scheidende laag, de gemiddelde grondwateraanvulling, de slootafstand, en de verticale en horizontale doorlatendheid. Op basis van de maximale dikte van de neerslaglens wordt vervolgens middels het bijhouden van een waterbalans bepaald hoe lang het duurt voordat al het regenwater is afgevoerd. Vanaf dat moment wordt de hoeveelheid kwelwater berekend die de wortelzone daadwerkelijk kan bereiken. Daarnaast is met een tweede methode een schatting van kwel naar de wortelzone gemaakt met behulp van simpele vuistregels uitgaande van de gemodelleerde grondwaterstand en de kwelflux over de eerste scheidende laag. Als derde is ook de kwelflux over de eerste scheidende laag direct uit MIPWA getoetst.

De drie verschillende kwelkaarten volgens: (1) de neerslaglensmodule, (2) volgens vuistregels of (3) de directe uitkomst van MIPWA zijn in deze studie getoetst aan onafhankelijke gegevens. Alle drie de kwelkaarten verschillen op ongeveer een derde van de waarnemingslocaties van de indicatoren voor kwel in de wortelzone. De modelkaart met de beste overeenstemming is het directe, niet neergeschaalde, MIPWA-resultaat van de flux over de eerste scheidende laag. Dit is een verrassende uitkomst omdat verwacht mocht worden dat de kwelflux over de eerste scheidende laag niet overal tot in de wortelzone doordringt, toch stemt juist deze kaart het best overeen met indicatoren voor kwel in de wortelzone op de waarnemingslocaties. Alle drie de kwelkaarten onderschatten het aantal waarnemingslocaties met kwel. De geringste onderschatting wordt gemaakt met de MIPWA-kwelkaart van de flux over de eerste scheidende laag. Omdat bij de nabewerkingen wordt uitgegaan van de MIPWA-uitkomsten zal bij beide methodes altijd een verdere vermindering van kwel optreden en dus een grotere onderschatting ontstaan.

Literatuur

- Bezdek, J.C., R. Ehrlich, W. Full (1984). FCM: The fuzzy C-means clustering algorithm, Computers & Geosciences Vol. 10, No. 2-3, pp. 191-203.
- Braat, L., van Amstel, A., Gerritsen, A., van Gool, C., Gremmen, N., Groen, C., Rolf, H., Runhaar, J., and Wiertz, J. (1989). Verdroging van natuur en landschap in Nederland. Beschrijving en analyse. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 's-Gravenhage.
- Cirkel, D.G. (2003). Neerslaglenzen in natte natuurgebieden, een modelstudie naar vorm en functioneren van neerslaglenzen in blauwgraslanden en trilvenen. Afstudeerscriptie Wageningen Universiteit, Wageningen.
- CHO-TNO (1986). Verklarende hydrologische woordenlijst. Commissie Hydrologisch Onderzoek, Den Haag.
- De Haan, M.W.A., H.J. Runhaar & D.G. Cirkel (2010). Waternood Kansrijkdommodule; Pilotstudie in Noord-Nederland en toepassing voor vervaardiging waterkansenkaarten voor natuur. KWR Water, in opdracht van STOWA in combinatie met de Noordelijke Waterschappen. Rapport kwr2010.106.
- De Raat, G.A. (1999). Neerslaglenzen in kwelgebieden. SWI 99.157 Kiwa N.V., Nieuwegein
- Poot, A. & P.P. Schot (2000). Neerslaglenzen: vorm en dynamiek, STROMINGEN 6, no. 4
- Delft, S.P.J. van, R.H. Kemmers & R.W. de Waal (2002). Ecologische typering van bodems onder korte vegetaties; het humusprofiel als graadmeter voor standplaatsontwikkeling. Landschap 19(3): 153-163.
- Eggelsman, R. (1981). Oekologische Aspekte von antropogen beeinflussten und unbeeinflussten Mooren Norddeutschlands. Universität Oldenburg, Bremen.
- Koerselman, W. & B. Beltman (1988). De verdamping van moerasvegetaties, H₂O (21) 1988, nr. 8
- Finke, P.A., D.J. Brus, M.F.P. Bierkens, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries (2004). Mapping groundwater dynamics using multiple sources of exhaustive high resolution data. Geoderma 123: 23 - 39.
- Frapporti, G., Vriend, S.P., van Gaans, P.F.M. (1993). Hydrogeochemistry of the shallow Dutch groundwater: interpretation of the National Groundwater Monitoring Network. Water Resources Research 29 (9), 2993–3004.
- Gaast, J.W.J. van der en L.C.P.M. Stuyt. (2000). Drainagevergunningen. Methodiek voor de beoordeling van aanvragen voor de aanleg van buisdrainage. Alterra-rapport 12. Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen
- Gaast, J.W.J. van der en H. Th. L. Massop (2003). Spreidingslengte voor het beheersgebied van waterschap Veluwe, Een maat voor het bufferzone beleid. Alterra-rapport 653, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen
- Hoogewoud, J. en R. van Ek (2002). Regionale standplaatsmodellering voor terrestrische vegetatie; Naar een generieke methode voor het neerschalen van hydrologische modeluitkomsten ten behoeve van ecohydrologische toepassingen. RIZA rapport 2002.035. RIZA, Lelystad.
- Hoogewoud, J. (2009). GWNatura2000; Verbeteringen aan het regionale grondwatermodel MIPWA ten behoeve van Natura2000 toepassingen - deel 1: aanpassing van de grondwaterstanden in de Drentsche Aa. Deltares-rapport 2009-U-R81012

- Hoogland, T. en J. Runhaar (2006). Neerschaling van de freatische grondwaterstand uit modelresultaten en de Gt-kaart; Methodiek en eerste resultaten. Wageningen, WOT Natuur & Milieu, WOt-rapport 26.
- Hoogland, T., G.B.M. Heuvelink & M. Knotters (2008). De seizoensfluctuatie van de grondwaterstand in natuurgebieden vanaf 1985 in kaart gebracht. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-rapport 89. 60 blz.
- Houben, J.M.M.Th (1979). Bodemgesteldheid en diepte van beworteling. Rapport 1459, Stichting voor Bodemkartering, Wageningen
- Immerzeel, C.H. van, Vegter, U. en P.P. Schot (1996). Toepassing van een neerslaglenzen-model bij hydro-ecologische herstelprojecten; in: *H₂O*, jrg 26, nr 10, pag 293-296.
- Jansen, P.C. (1995). Verdamping van korte vegetaties in natte natuurgebieden *H₂O* (28) 1995, nr. 15
- Jansen, P.C. (2001) Inventarisatie van waterkwaliteit voor ecologische doeleinden. Alterra-rapport 185. Alterra, Wageningen.
- Kemmers, R.H., S.P.J. van Delft & J.W.J. van der Gaast (2005). Kwel en Waternood; ontwikkeling van een methode voor kartering van kwel en de evaluatie van de gevolgen van peilbeheer voor kwelpatronen. Alterra-rapport 1034. Alterra, Wageningen.
- LNV (2006). Natura 2000 doelendocument. Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Den Haag.
- Locher, W.P. & H. de Bakker (1990). Bodemkunde van Nederland, Malmberg Den Bosch
- Milieu- en Natuurplanbureau, Egmond P van ; Vonk M. (eds). (2007). Natuurbalans 2007. Rapportnr. 500402005, ISBN: 9789069601786
- Moors, E., J.N.M. Stricker and G.D. van de Abeele (1995). Evapotranspiration of cut-over bog covered by *Molinia Caerulea*. Report Department of water resources, Wag. Agric.Univ.
- Reijnders H.F.R, G. van Drecht, H.F. Prins, J.J.B. Bronswijk, L.J.M. Boumans (2004). De kwaliteit van ondiep en middeldiep grondwater in Nederland in het jaar 2000 en verandering daarvan in de periode 1984-2000. RIVM rapport 714801030/2004. RIVM, Bilthoven
- Schot, P.P., S.C. Dekker & A. Poot (2004). The dynamic form of rainwater lenses in drained fens, *Journal of Hydrology* 293: 74-84.
- Schouwenaars, J.M. (1993) De verdamping van pijpestrootje (*Molinia caerulea*) en veenmos (*Sphagnum papillosum*) in hoogveenengebieden en haar betekenis voor het waterbeheer, *H₂O* (26) 1993, nr. 14
- Hunink, J. (2009). Neerschalingstechnieken freatische grondwaterstanden. Deltares memo, dd. 19 juni 2009.
- Van Wirdum (1990). Vegetation and hydrology of floating rich-fens; PhD-thesis. Datawyse, Maastricht.
- Walsum, P.E.V. van, P.F.M Verdonshot en J. Runhaar (2002). Effects of climate and land-use change on lowland stream ecosystems; Alterra-rapport 523, Alterra, Wageningen.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- Walvoort, D.J.J.; Gruijter, J.J. de (2002). Compositional kriging : a spatial interpolation method for compositional data, *Mathematical Geology* 33 (2001) 8 - p. 951 – 966.

Verschenen documenten in de reeks Werkdocumenten van de Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu vanaf 2009

Werkdocumenten zijn verkrijgbaar bij het secretariaat van Unit Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, te Wageningen. T 0317 – 48 54 71; F 0317 – 41 90 00; E info.wnm@wur.nl

De werkdocumenten zijn ook te downloaden via de WOT-website www.wotnatuurenmilieu.wur.nl

2009

- 126 *Kamphorst, D.A.* Keuzes in het internationale biodiversiteitsbeleid; Verkenning van de beleidstheorie achter de internationale aspecten van het Beleidsprogramma Biodiversiteit (2008-2011)
- 127 *Dirkx, G.H.P. & F.J.P. van den Bosch.* Quick scan gebruik Catalogus groenblauwe diensten
- 128 *Loeb, R. & P.F.M. Verdonschot.* Complexiteit van nutriëntenlimitaties in oppervlaktewateren
- 129 *Kruit, J. & P.M. Veer.* Herfotografie van landschappen; Landschapsfoto's van de 'Collectie de Boer' als uitgangspunt voor het in beeld brengen van ontwikkelingen in het landschap in de periode 1976-2008
- 130 *Oenema, O., A. Smit & J.W.H. van der Kolk.* Indicatoren Landelijk Gebied; werkwijze en eerste resultaten
- 131 *Agricola, H.J.A.J. van Strien, J.A. Boone, M.A. Dolman, C.M. Goossen, S. de Vries, N.Y. van der Wulp, L.M.G. Groenemeijer, W.F. Lukey & R.J. van Til.* Achtergrond-document Nulmeting Effectindicatoren Monitor Agenda Vitaal Platteland
- 132 *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-001 – Koepel
- 133 *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-002 – Onderbouwend Onderzoek
- 134 *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-003 – Advisering Natuur & Milieu
- 135 *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-005 – M-AVP
- 136 *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-006 – Natuurplanbureauafunctie
- 137 *Jaarrapportage 2008.* WOT-04-007 – Milieuplanbureauafunctie
- 138 *Jong de, J.J., J. van Os & R.A. Smidt.* Inventarisatie en beheerskosten van landschapselementen
- 139 *Dirkx, G.H.P., R.W. Verburg & P. van der Wielen.* Tegenkrachten Natuur. Korte verkenning van de weerstand tegen aankopen van landbouwgrond voor natuur
- 140 *Annual reports for 2008; Programme WOT-04*
- 141 *Vullings, L.A.E., C. Blok, G. Vonk, M. van Heusden, A. Huisman, J.M. van Linge, S. Keijzer, J. Oldengarm & J.D. Bulens.* Omgaan met digitale nationale beleidskaarten
- 142 *Vreke, J., A.L. Gerritsen, R.P. Kranendonk, M. Pleijte, P.H. Kersten & F.J.P. van den Bosch.* Maatlat Government – Governance
- 143 *Gerritsen, A.L., R.P. Kranendonk, J. Vreke, F.J.P. van den Bosch & M. Pleijte.* Verdrogingsbestrijding in het tijdperk van het Investeringsbudget Landelijk Gebied. Een verslag van casusonderzoek in de provincies Drenthe, Noord-Brabant en Noord-Holland.
- 144 *Luesink, H.H., P.W. Blokland, M.W. Hoogeveen & J.H. Wisman.* Ammoniakemissie uit de landbouw in 2006 en 2007
- 145 *Bakker de, H.C.M. & C.S.A. van Koppen.* Draagvlakonderzoek in de steigers. Een voorstudie naar indicatoren om maatschappelijk draagvlak voor natuur en landschap te meten
- 146 *Goossen, C.M.,* Monitoring recreatiegedrag van Nederlanders in landelijke gebieden. Jaar 2006/2007
- 147 *Hoefs, R.M.A., J. van Os & T.J.A. Gies.* Kavelruil en Landschap. Een korte verkenning naar ruimtelijke effecten van kavelruil.
- 148 *Klok, T.L., R. Hille Ris Lambers, P. de Vries, J.E. Tamis & J.W.M. Wijsman.* Quick scan model instruments for marine biodiversity policy.
- 149 *Spruijt, J., P. Spoorenberg & R. Schreuder.* Milieueffectiviteit en kosten van maatregelen gewasbescherming.
- 150 *Ehlert, P.A.I. (rapporteur).* Advies Bemonstering bodem voor differentiatie van fosfaatgebruiksnormen.
- 151 *Wulp van der, N.Y.* Storende elementen in het landschap: welke, waar en voor wie? Bijlage bij WOT-paper 1 – Krassen op het landschap
- 152 *Oltmer, K., K.H.M. van Bommel, J. Clement, J.J. de Jong, D.P. Rudrum & E.P.A.G. Schouwenberg.* Kosten voor habitattypen in Natura 2000-gebieden. Toepassing van de methode Kosteneffectiviteit natuurbesluit.
- 153 *Adrichem van, M.H.C., F.G. Wortelboer & G.W.W. Wamelink (2010).* MOVE. Model for terrestrial Vegetation. Version 4.0
- 154 *Wamelink, G.W.W., R.M. Winkler & F.G. Wortelboer.* User documentation MOVE4 v 1.0
- 155 *Gies de, T.J.A., L.J.J. Jeurissen, I. Staritsky & A. Bleeker.* Leefomgevingsindicatoren Landelijk gebied. Inventarisatie naar stand van zaken over geurhinder, lichthinder en fijn stof.
- 156 *Tamminga, S., A.W. Jongbloed, P. Bikker, L. Sebek, C. van Bruggen & O. Oenema.* Actualisatie excretiecijfers landbouwhuisdieren voor forfaits regeling Meststoffenwet
- 157 *Van der Salm, C., L. M. Boumans, G.B.M. Heuvelink & T.C. van Leeuwen.* Protocol voor validatie van het nutriëntenemissiemodel STONE op meetgegevens uit het Landelijk Meetnet effecten Mestbeleid
- 158 *Bouwma, I.M.* Quicksan Natura 2000 en Programma Beheer. Een vergelijking van Programma Beheer met de soorten en habitats van Natura 2000
- 159 *Gerritsen, A.L., D.A. Kamphorst, T.A. Selnes, M. van Veen, F.J.P. van den Bosch, L. van den Broek, M.E.A. Broekmeyer, J.L.M. Donders, R.J. Fontein, S. van Tol, G.W.W. Wamelink & P. van der Wielen.* Dilemma's en barrières in de praktijk van het natuur- en landschapsbeleid; Achtergronddocument bij Natuurbalans 2009.
- 160 *Fontein R.J., T.A. de Boer, B. Breman, C.M. Goossen, R.J.H.G. Henkens, J. Luttik & S. de Vries.* Relatie recreatie en natuur; Achtergronddocument bij Natuurbalans 2009
- 161 *Deneer, J.W. & R. Kruijine. (2010).* Atmosferische depositie van gewasbeschermingsmiddelen. Een verkenning van de literatuur verschenen na 2003.
- 162 *Verburg, R.W., M.E. Sanders, G.H.P. Dirkx, B. de Knecht & J.W. Kuhlman.* Natuur, landschap en landelijk gebied. Achtergronddocument bij Natuurbalans 2009.
- 163 *Doorn van, A.M. & M.P.C.P. Paulissen.* Natuurgericht milieubeleid voor Natura 2000-gebieden in Europees perspectief: een verkenning.
- 164 *Smidt, R.A., J. van Os & I. Staritsky.* Samenstellen van landelijke kaarten met landschapselementen, grondeigendom en beheer. Technisch achtergronddocument bij de opgeleverde bestanden.
- 165 *Pouwels, R., R.P.B. Foppen, M.F. Wallis de Vries, R. Jochem, M.J.S.M. Reijnen & A. van Kleunen.* Verkenning LARCH: omgaan met kwaliteit binnen ecologische netwerken.
- 166 *Born van den, G.J., H.H. Luesink, H.A.C. Verkerk, H.J. Mulder, J.N. Bosma, M.J.C. de Bode & O. Oenema,* Protocol voor monitoring landelijke mestmarkt onder een stelsel van gebruiksnormen, versie 2009.
- 167 *Dijk, T.A. van, J.J.M. Driessen, P.A.I. Ehlert, P.H. Hotsma, M.H.M.M. Montforts, S.F. Plessius & O. Oenema.* Protocol beoordeling stoffen Meststoffenwet- Versie 2.1
- 168 *Smits, M.J., M.J. Bogaardt, D. Eaton, A. Karbauskas & P. Roza.* De vermaatschappelijking van het Gemeenschappelijk Landbouwbeleid. Een inventarisatie van visies in Brussel en diverse EU-lidstaten.
- 169 *Vreke, J. & I.E. Salverda.* Kwaliteit leefomgeving en stedelijk groen.
- 170 *Hengsdijk, H. & J.W.A. Langeveld.* Yield trends and yield gap analysis of major crops in the World.
- 171 *Horst, M.M.S. ter & J.G. Groenwold.* Tool to determine the coefficient of variation of DegT50 values of plant protection

- products in water-sediment systems for different values of the sorption coefficient
- 172 Boons-Prins, E., P. Leffelaar, L. Bouman & E. Stehfest (2010) Grassland simulation with the LPJmL model
- 173 Smit, A., O. Oenema & J.W.H. van der Kolk. Indicatoren Kwaliteit Landelijk Gebied
- ## 2010
- 174 Boer de, S., M.J. Bogaardt, P.H. Kersten, F.H. Kistenkas, M.G.G. Neven & M. van der Zouwen. Zoektocht naar nationale beleidsruimte in de EU-richtlijnen voor het milieu- en natuurbeleid. Een vergelijking van de implementatie van de Vogel- en Habitatrichtlijn, de Kaderrichtlijn Water en de Nitraatrichtlijn in Nederland, Engeland en Noordrijn-Westfalen
- 175 Jaarrapportage 2009. WOT-04-001 – Koepel
- 176 Jaarrapportage 2009. WOT-04-002 – Onderbouwend Onderzoek
- 177 Jaarrapportage 2009. WOT-04-003 – Advisering Natuur & Milieu
- 178 Jaarrapportage 2009. WOT-04-005 – M-AVP
- 179 Jaarrapportage 2009. WOT-04-006 – Natuurplanbureau functie
- 180 Jaarrapportage 2009. WOT-04-007 – Milieuplanbureau functie
- 181 Annual reports for 2009; Programme WOT-04
- 182 Oenema, O., P. Bikker, J. van Harn, E.A.A. Smolders, L.B. Sebek, M. van den Berg, E. Stehfest & H. Westhoek. Quicksan opbrengsten en efficiëntie in de gangbare en biologische akkerbouw, melkveehouderij, varkenshouderij en pluimveehouderij. Deelstudie van project 'Duurzame Eiwitvoorziening'.
- 183 Smits, M.J.W., N.B.P. Polman & J. Westerink. Uitbreidingsmogelijkheden voor groene en blauwe diensten in Nederland; Ervaringen uit het buitenland
- 184 Dirx, G.H.P. (red.). Quick responsefunctie 2009. Verslag van de werkzaamheden.
- 185 Kuhlman, J.W., J. Luijt, J. van Dijk, A.D. Schouten & M.J. Voskuilen. Grondprijsskaarten 1998-2008
- 186 Slangen, L.H.G., R.A. Jongeneel, N.B.P. Polman, E. Lianouridis, H. Leneman & M.P.W. Sonneveld. Rol en betekenis van commissies voor gebiedsgericht beleid.
- 187 Temme, A.J.A.M. & P.H. Verburg. Modelling of intensive and extensive farming in CLUE
- 188 Vreke, J. Financieringsconstructies voor landschap
- 189 Slangen, L.H.G. Economische concepten voor beleidsanalyse van milieu, natuur en landschap
- 190 Knotters, M., G.B.M. Heuvelink, T. Hoogland & D.J.J. Walvoort. A disposition of interpolation techniques
- 191 Hoogeveen, M.W., P.W. Blokland, H. van Kernebeek, H.H. Luesink & J.H. Wisman. Ammoniakemissie uit de landbouw in 1990 en 2005-2008
- 192 Beekman, V., A. Pronk & A. de Smet. De consumptie van dierlijke producten. Ontwikkeling, determinanten, actoren en interventies.
- 193 Polman, N.B.P., L.H.G. Slangen, A.T. de Blaeij, J. Vader & J. van Dijk. Baten van de EHS; De locatie van recreatiebedrijven
- 194 Veeneklaas, F.R. & J. Vader. Demografie in de Natuurverkenning 2011; Bijlage bij WOT-paper 3
- 195 Wascher, D.M., M. van Eupen, C.A. Múcher & I.R. Geijzendorffer. Biodiversity of European Agricultural landscapes. Enhancing a High Nature Value Farmland Indicator
- 196 Apeldoorn van, R.C., I.M. Bouwma, A.M. van Doorn, H.S.D. Naeff, R.M.A. Hoefs, B.S. Elbersen & B.J.R. van Rooij. Natuurgebieden in Europa: bescherming en financiering
- 197 Brus, D.J., R. Vasat, G. B. M. Heuvelink, M. Knotters, F. de Vries & D. J. J. Walvoort. Towards a Soil Information System with quantified accuracy; A prototype for mapping continuous soil properties
- 198 Groot, A.M.E. & A.L. Gerritsen, m.m.v. M.H. Borgstein, E.J. Bos & P. van der Wielen. Verantwoording van de methodiek Achtergronddocument bij 'Kwalitatieve monitor Systeeminnovaties verduurzaming landbouw'
- 199 Bos, E.J. & M.H. Borgstein. Monitoring Gesloten voer-mest kringlopen. Achtergronddocument bij 'Kwalitatieve monitor Systeeminnovaties verduurzaming landbouw'
- 200 Kennismarkt 27 april 2010; Van onderbouwend onderzoek Wageningen UR naar producten Planbureau voor de Leefomgeving.
- 201 Wielen van der, P. Monitoring Integrale duurzame stallen. Achtergronddocument bij 'Kwalitatieve monitor Systeeminnovaties verduurzaming landbouw'
- 202 Groot, A.M.E. & A.L. Gerritsen. Monitoring Functionele agrobiodiversiteit. Achtergrond-document bij 'Kwalitatieve monitor Systeeminnovaties verduurzaming landbouw'
- 203 Jongeneel, R.A. & L. Ge. Farmers' behavior and the provision of public goods: Towards an analytical framework.
- 204 Vries, S. de, M.H.G. Custers & J. Boers. Storende elementen in beeld; de impact van menselijke artefacten op de landschapsbeleving nader onderzocht.
- 205 Vader, J. J.L.M. Donders & H.W.B. Bredenoord. Zicht op natuur- en landschapsorganisaties; Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011.
- 206 Jongeneel, R.A., L.H.G. Slangen & N.B.P. Polman. Groene en Blauwe Diensten; Een raamwerk voor de analyse van doelen, maatregelen en instrumenten
- 207 Letourneau, A.P., P.H. Verburg & E. Stehfest. Global change of land use systems; IMAGE: a new land allocation module
- 208 Heer, M. de. Het Park van de Toekomst. Achtergronddocument bij Natuurverkenning 2011
- 209 Knotters, M., J. Lahr, A.M. van Oosten-Siedlecka & P.F.M. Verdonschot, 2010. Aggregation of ecological indicators for mapping aquatic nature quality. Overview of existing methods and case studies.
- 210 Verdonschot, P.F.M. & A.M. van Oosten-Siedlecka. Graadmeters Aquatische natuur. Analyse gegevenskwaliteit Limnodata
- 211 Linderhof, V.G.M. & Hans Leneman, 2010. Quicksan kosteneffectiviteitsanalyse aquatische natuur
- 212 Leneman, H. V.G.M. Linderhof & R. Michels, 2010. Mogelijkheden voor het inbrengen van informatie uit de 'KRW database' in de 'KE database'
- 213 Schrijver, R.A.M., A. Corporaal, W.A. Ozinga & D.P. Rudrum. Naar een nieuwe methode voor het bepalen van effecten van maatregelen voor de verhoging van de biodiversiteit in landbouwgebieden. Een test in twee gebieden in Twente en Zeeuws-Vlaanderen
- 214 Hoogland, T., R.H. Kemmers, D.G. Cirkel & J. Hunink. Standplaatsfactoren afgeleid van hydrologische modeluitkomsten; Methodeontwikkeling en toetsing in het Drentse Aa-gebied.
- 230 Jaarrapportage 2009. WOT-04-001 – Koepel
- 231 Jaarrapportage 2009. WOT-04-002 – Onderbouwend Onderzoek
- 232 Jaarrapportage 2009. WOT-04-003 – Advisering Natuur & Milieu
- 233 Jaarrapportage 2009. WOT-04-005 – M-AVP
- 234 Jaarrapportage 2009. WOT-04-006 – Natuurplanbureau functie
- 235 Jaarrapportage 2009. WOT-04-007 – Milieuplanbureau functie