

# Actuele grondwaterstandsituatie in natuurgebieden

Een pilotstudie

J.W.J. van der Gaast  
H.Th.L. Massop  
H.R.J. Vroon

r a p p o r t e n



wot  
Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu



WAGENINGENUR

*For quality of life*



## **Actuele grondwaterstandsituatie in natuurgebieden**

**Dit rapport is gemaakt conform het Kwaliteitshandboek van de unit Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu.**

# **Actuele grondwaterstand- situatie in natuurgebieden**

Een pilotstudie

J.W.J. van der Gaast

H.Th.L. Massop

H.R.J. Vroon

**Rapport 94**

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu

Wageningen, juli 2009

## Referaat

Gaast, J.W.J. van der, H.Th.L. Massop en H.R.J. Vroon, 2009. *Actuele grondwaterstandsituatie in natuurgebieden; Een Pilotstudie*. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-rapport 94. 134 blz.; 48 fig.; 10 tab.; 120 ref.; 4 bijl.

Dit onderzoek is gericht op het bepalen van de actuele grondwaterstandsituatie in de vorm van grondwatertrappen (Gt's) voor natuurgebieden. Op deze manier geeft het onderzoek invulling aan een belangrijke bouwsteen die nodig is om aan te kunnen geven waar wordt voldaan aan de ecologische eisen en waar niet. Verschillende aspecten van de grondwaterstand zijn nader onderzocht en beschreven. Het gaat hierbij onder andere om de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) en het voorkomen van anisotropie in de ondiepe ondergrond. Daarnaast is de grondwaterbeschikbaarheid vastgelegd in de vorm van profieltypen. Voor een pilotgebied zijn vier verschillende Gt-karteringsmethoden toegepast en geverifieerd. Hierbij is naast gemiddelde verschillen ook gekeken naar verschillen in patronen. Een aantal onderzochte aspecten hebben tot gevolg dat de freatische grondwaterstand of de hiervan afgeleide Gt-informatie als gevolg van verkeerde meet- en/of rekentechnieken niet juist wordt geschat. Hierdoor kunnen methoden om kaarten te genereren en modelberekeningen onderhevig zijn aan numerieke verdroging, wat onjuiste, misleidende informatie tot gevolg heeft. Het niet onderkennen van 'numerieke verdroging' heeft tot gevolg dat onjuiste informatie wordt gebruikt die van invloed is op de herkenbaarheid van grondwaterstandinformatie en hiervan afgeleide gegevens. Hierdoor is numerieke verdroging direct van invloed op de inschatting van de mate van verdroging en indirect van invloed op het draagvlak voor maatregelen.

*Trefwoorden:* Anisotropie, Grondwaterstand, Grondwatertrap (Gt), Interpolatie, Karteringsmethode, Profieltype, Stijghoogte, Verdroging

## Abstract

Gaast, J.W.J. van der, H.Th. L. Massop & H.R.J. Vroon, 2009. *Current water table situation in Dutch conservation areas; A pilot study*. Wageningen, Statutory Research Tasks Unit for Nature & the Environment, WOt Report No. 94. 134 pp.; 48 figs.; 10 tables; 120 refs.; 4 annexes.

The study aimed to assess the current state of affairs as regards groundwater levels in Dutch nature conservation areas, based on water table classes. This information is required to assess which areas meet the ecological requirements and which ones do not. The study examined various aspects of water tables, including mean spring water table depth and the occurrence of anisotropy in the upper ranges of the subsoil. Groundwater availability was assessed by mapping profile types. Four methods to map water table classes were verified by applying them in a pilot area and comparing differences in values as well as in patterns. Some of the aspects considered in the study cause incorrect estimates of the phreatic water level or the water table class data derived from them, due to incorrect measurement techniques or calculations. As a result, methods used to generate maps and model simulations may be affected by 'numerical desiccation', resulting in incorrect and misleading information. Failure to recognise such 'numerical desiccation' may cause erroneous information to be used, which may mean that the information on water tables and other data derived from it runs counter to the perceptions of local parties involved. As such, 'numerical desiccation' directly affects estimates of the degree of desiccation, and indirectly influences the level of support for certain management measures.

*Key words:* Anisotropy, Water tables, Water table classes (Gt), Interpolation, mapping methods, Profile type, hydraulic head, Desiccation

## ISSN 1871-028X

©2009 **Alterra - Wageningen UR**

Postbus 47, 6700 AA Wageningen.

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

---

De reeks WOt-rapporten is een uitgave van de unit Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, onderdeel van Wageningen UR. Dit rapport is verkrijgbaar bij het secretariaat. **Het rapport is ook te downloaden via [www.wotnatuurenmilieu.wur.nl](http://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](mailto:info.wnm@wur.nl); Internet: [www.wotnatuurenmilieu.wur.nl](http://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.

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>7</b>
<b>Summary</b>	<b>9</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>11</b>
1.1 Achtergrond en probleemstelling	11
1.2 Doelstelling	11
1.3 Globale werkwijze	11
1.4 Leeswijzer	12
<b>2 Grondwaterstands­daling en verdroging</b>	<b>13</b>
2.1 Vormen van verdroging	13
2.2 Historie van het milieuthema “Verdroging”	14
2.3 Kwantificering van de verdroging	18
<b>3 Grondwaterstandswaarnemingen</b>	<b>21</b>
3.1 Theoretische achtergrond	21
3.2 Het meten van de freatische grondwaterstand	23
3.3 Verticale weerstand	24
3.4 Verticale grondwaterstroming	25
3.5 Anisotropie	29
3.6 Ruimtelijke verbreiding van anisotropie	31
3.7 Illustratie op basis van recente metingen	36
<b>4 Karakterisering van het grondwaterstands­verloop</b>	<b>43</b>
4.1 Grondwatertrap	43
4.2 De gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand GVG	44
4.3 Bepaling van de GVG	46
<b>5 Grondwaterstandswaarnemingen op peilbuislocaties</b>	<b>51</b>
5.1 Filterdieptes	51
5.2 Meetfrequentie en meetperiode	53
5.3 Ruimtelijke verdeling van landbouwbuizen	54
<b>6 Gt-karteringsmethoden</b>	<b>57</b>
6.1 Gebiedsbeschrijving van het pilotgebied	57
6.2 GD-methode	58
6.3 Gt op basis van karteerbare kenmerken	60
6.4 Gt-kartering op basis van fysische tijdreeksanalyse	62
6.5 Verwantschap met behulp van interpolatie	66
<b>7 Verificatie</b>	<b>71</b>
7.1 Materiaal	71

7.2	Methode	72
7.3	Kaartkwaliteit	72
7.4	Geschiktheid van de karteringsmethoden	77
7.5	Rangorde en discussie	78
7.6	Uiteindelijke selectie van de te hanteren methode	79
<b>8</b>	<b>Profieltypen op basis van de grondwater-beschikbaarheid</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>Discussie</b>	<b>85</b>
9.1	Technisch inhoudelijke gevolgen van numerieke verdroging	85
9.2	Maatschappelijke gevolgen	87
9.3	Oplossingsrichting	90
<b>10</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>93</b>
10.1	Conclusies	93
10.2	Aanbevelingen	94
	<b>Literatuur</b>	<b>97</b>
Bijlage 1	Projectplan	103
Bijlage 2	Begrippenkader	107
Bijlage 3	Voorbeelden van gemeten stijghoogte-verschillen uit het verleden	109
Bijlage 4	Grondwaterbeschikbaarheid	113



## Samenvatting

Al in de jaren zeventig van de vorige eeuw meldden natuurbeschermingsorganisaties dat er in de natuurgebieden in Nederland iets mis was met de grondwaterstand. In de Tweede Nota Waterhuishouding stelde het kabinet vast dat er op landelijke schaal sprake was van een aanzienlijke daling van de grondwaterstand ten opzichte van de situatie in de jaren vijftig. In de jaren daarna is de omvang van de grondwaterstands daling verder in kaart gebracht. Tot voor kort werd de verdroging vastgelegd op de verdrogingskaart, deze werd opgesteld door het Interprovinciaal Overleg (IPO). De informatie die hiervoor wordt gebruikt is zeer divers en per provincie verschillend, wat een heterogeen ruimtelijk beeld oplevert. De Commissie Integraal Waterbeheer (CIW) heeft voorgesteld om de doelen van de verdrogingsbestrijding beter hanteerbaar en afrekenbaar te maken door ze te koppelen aan het grond- en oppervlaktewaterregime. Hiervoor is het Actuele Grond- en Oppervlaktewater Regime (AGOR) een belangrijke set van parameters die de actuele situatie beschrijven. Voor de AGOR is Gt-informatie, en meer in het bijzonder de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG), één van de belangrijkste parameters. In de Natuurbalans 2008 (PBL, 2008) is aangegeven dat de grondwaterstand gemiddeld 45 tot 60 cm lager is dan gewenst voor de beoogde natuurdoeltypen.

Onder meer in het zandgebied van Nederland komen natuurgebieden voor op locaties met bijzondere/afwijkende geologische, hydrologische of bodemkundige omstandigheden. De bodems in deze gebieden kennen vaak een sterke gelaagdheid met verschillen in doorlatendheid (anisotropie). Deze gelaagdheid met verschillen in doorlatendheid speelt een belangrijke rol bij het vochttransport door de bodem en geeft vaak aanleiding tot stijghoogteverschillen. Om meer inzicht te krijgen in het voorkomen van anisotropie, die wordt veroorzaakt door zowel geologische ontstaanswijze (geogenese) als bodemvorming (pedogenese), is een anisotropiekaart (schaal 1 : 50.000) voor Nederland gemaakt. Hieruit blijkt dat voor minimaal 50% van het landelijk gebied van Nederland in meer of mindere mate sprake is van anisotropie in het bodemprofiel.

Mede door het voorkomen van gelaagdheid (anisotropie) is het voor het meten van de freatische grondwaterstand van belang dat de filterstelling van peilbuizen overeenkomt met het traject waarover de grondwaterstand fluctueert. Indien dit niet het geval is en er sprake is van weerstand tegen verticale grondwaterstroming boven het filterniveau door bijvoorbeeld gelaagdheid, dan is het mogelijk dat er afhankelijk van de verticale grondwaterstroming een andere stand dan de freatische grondwaterstand wordt gemeten. Een groot aantal freatische buizen (80%) blijkt een te diepe filterstelling te hebben, waardoor een onjuist beeld is ontstaan van de stand van het grondwater. Ook vanuit de praktijk wordt steeds vaker aangegeven dat berekende grondwaterstanden niet realistisch zijn en de grondwatersituatie veelal te droog weergeven.

Ecologische eisen vanuit de natuur worden veelal gekoppeld aan de Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand (GVG). Zowel de definitie van de GVG als de berekeningsmethode van de GVG zijn in de loop der tijd veranderd. Dit kan tot gevolg hebben dat bij vergelijking van GVG's alleen al verschillen kunnen ontstaan door het gebruik van verschillende berekenings-technieken. Deze verschillen kunnen maximaal oplopen tot 26 cm. Indien gebruik wordt gemaakt van de meest voor de handliggende vergelijking bedraagt het verschil 16 cm.

Vooraf voor natuurgebieden is de beschikbaarheid van goede Gt-informatie voor het beoordelen in hoeverre deze gebieden voldoen aan de hydrologische eisen van belang. Aangezien binnen natuurgebieden veelal een grote verscheidenheid aan hydrologische condities voorkomt, is het belangrijk om te beschikken over een karteringsmethode die deze verscheidenheid correct kan weergeven. Hierdoor is het van belang gebruik te maken van een karteringsmethode die weinig of geen afvlakking tot gevolg heeft en aansluit bij het vereiste schaalniveau van de bodemkundige informatie. Indien aan deze eis kan worden voldaan is het mogelijk aan te sluiten bij de reële situatie (praktijk), waardoor de Gt-informatie herkenbaar is voor de verschillende belanghebbenden.

Voor dit onderzoek zijn een aantal karteringsmethoden onderzocht en vergeleken. Voor een volledige vergelijking is het van belang om naast de gemiddelde verschillen ook de verschillen in Gt-klassen en de verschillen in patrooninformatie te betrekken. Interpolatie op basis van verwantschap geeft de beste mogelijkheden voor het vervaardigen van Gt-kaarten. Het is hierbij echter wel van belang dat er voldoende kwalitatief goede puntinformatie beschikbaar is. De actuele Gt bepaald op basis van karteerbare kenmerken met behulp van een neerschalingmethode is landsdekkend beschikbaar en blijkt op grond van de verificatie het Gt-patroon redelijk goed weer te geven.

Indien geredeneerd wordt vanuit de plant is vooral de vochtbeschikbaarheid voor de groei van de plant van essentieel belang is. De vochtbeschikbaarheid voor de plant wordt beïnvloed door het klimaat (neerslag en verdamping), het beschikbare bodemvocht in de wortelzone, de dikte van de wortelzone en de capillaire nalevering vanuit het grondwater. Deze laatstgenoemde bodemkundige aspecten bepalen uiteindelijk het vochtleverend vermogen van de bodem. De grondwaterstand is hier slechts een onderdeel van. Daarom is naast de verschillende Gt-karteringsmethoden ook een profieltype kaart gemaakt waarmee het mogelijk is om de grondwaterbeschikbaarheid van gebieden te bepalen.

Een aantal onderzochte aspecten hebben tot gevolg dat de freatische grondwaterstand of de hiervan afgeleide Gt-informatie als gevolg van verkeerde meet- en/of rekentechnieken niet juist wordt geschat. Hierdoor kunnen methoden om kaarten te genereren en modelberekeningen onderhevig zijn aan numerieke verdroging, wat onjuiste, misleidende informatie tot gevolg heeft. Het kan hierbij gaan om onjuiste en misleidende informatie voor grondwaterstandskaarten en hiervan afgeleide gegevens. Kennis van numerieke verdroging maakt het mogelijk, dat de werkelijke freatische grondwaterstand weer op meer locaties zal worden gemeten. Hierdoor wordt het gebruik van misleidende informatie voorkomen en sluiten de metingen beter aan bij de waarnemingen en ervaringen van agrariërs en terreinbeheerders. Daarnaast is het met deze kennis mogelijk om modellen en instrumenten zodanig aan te passen of te voorzien van invoergegevens dat de rekenresultaten ook beter overeenkomen met de waarnemingen en de ervaringen van agrariërs en terreinbeheerders. Op deze manier wordt voorkomen dat het effect van maatregelen op de grondwaterstand en de ruimtelijke interactie via het grondwater tussen gebieden door het niet meenemen van anisotropie vooral onder natte omstandigheden verkeerd worden ingeschat. Dit kan van invloed zijn op het draagvlak voor maatregelen.

## Summary

It was as early as the 1970s that nature conservation societies reported problems of falling water table problems in Dutch conservation areas. In a policy memorandum on water management, the government reported seriously falling water tables compared to the 1950s, throughout the country. In the years following the memorandum, the occurrence severity of this water table drawdown problem was further assessed. Until recently, the level of desiccation was recorded on a desiccation map, which was produced by the interprovincial consultation programme IPO. The information used to produce this map was, however, highly diverse and differed across the provinces, yielding a heterogeneous spatial distribution pattern. The Dutch expert committee on integrated water management (Commissie Integraal Waterbeheer CWI) has proposed to make the targets of the programme to combat desiccation in Dutch conservation areas more manageable and quantifiable, by linking them to the groundwater and surface water regime. An important set of parameters to describe the current situation is the 'current groundwater and surface water regime' (AGOR in Dutch). One of the main parameters in AGOR is information on water table classes, more particularly the mean spring water table depth (MSW). The 2008 Nature Balance survey reported that water tables in Dutch conservation areas are now on average 45 to 60 cm below what is needed for the intended 'nature target types' (i.e. the combination of plants and animals preferred for a particular area).

Certain parts of the Netherlands, especially those characterised by sandy soils, include conservation areas with unusual or special geological, hydrological or soil conditions. Soils in these areas are often highly stratified, with layers differing in terms of permeability (i.e. showing anisotropy), which greatly affects water transport through the soil and frequently leads to differences in hydraulic head. We developed an anisotropy map of the Netherlands (1 : 50,000) to assess the occurrence of anisotropy, which is caused by both geogenesis (geological origin) and pedogenesis (soil formation). The map shows that soil profiles in at least 50% of Dutch rural areas are characterised by some degree of anisotropy.

Anisotropy is one of the reasons why it is important when measuring phreatic water tables that the perforated part of the monitoring wells correspond to the fluctuating level of the water table. If this is not the case, and there is a certain resistance against vertical water flows above the perforated part of the monitoring pipe as a result of stratification, the piezometer may measure a different level than the actual phreatic level, depending on the vertical water flows. It turned out that 80% of the phreatic level monitoring wells are in fact piezometers whose perforations are located too deep, which may result in incorrect water table readings. Indeed, area managers have often reported that calculated water table depths were unrealistic and that water table situations are often reported to be drier than they really are.

Ecological requirements for conservation areas are often linked to the mean spring water table (MSW). But since both the definition of MSW and the method used to calculate it have changed over the years, comparisons may be hampered by differences in the outcomes of calculations, which may amount to as much as 26 cm, while the use of the most common methods leads to differences of 16 cm.

The availability of accurate information on water table classes is especially important in conservation areas, to assess whether they meet the hydrological requirements. Since conservation areas may be characterised by a great variety of hydrological conditions, there

is a need for a mapping method that enables accurate recording of this variety. This requires a method that produces little or no smoothing and fits in with the required scale level for soil information. If these demands can be met, the resulting information in terms of water table classes will reflect the real situation in a manner which is recognisable to all stakeholders.

The present study evaluated and compared a number of mapping methods. A comprehensive comparison should include not only mean values but also differences in water table classes and in spatial pattern information. The best method for the production of maps of water table classes is interpolation on the basis of similarity, provided that enough accurate data points are available. Recent data on water table classes, derived from mappable features by means of downscaling methods, are available for the entire country; our verification showed that these data reflect the pattern of water table classes with reasonable accuracy.

From the perspective of the plants, it is especially moisture availability which is essential to their growth. This availability is influenced by the climate (precipitation and evaporation), the availability of water in the root zone, the thickness of the root zone and the capillary rise from the groundwater. In the end, it is the soil characteristics described above which determine how much moisture the soil can supply to plants. Since water table depth is only one of the relevant factors, we supplemented the information obtained from the various water table mapping methods by preparing a map of profile types, allowing the moisture availability in different areas to be derived.

Some of the aspects considered in the study cause incorrect estimates of the phreatic water level or the water table class derived from it, due to incorrect measurement techniques or calculations. As a result, methods to generate maps and model simulations may be affected by 'numerical desiccation', resulting in incorrect and misleading information. This may include incorrect and misleading information used for water table maps and the data derived from them. Awareness of such 'numerical desiccation' will allow the true phreatic water tables to be measured at more locations, thus preventing the use of misleading information and ensuring that the measurements are in better agreement with the observations and experience of farmers and area managers. In addition, this knowledge can be used to adjust models and instruments, or their input, so as to improve the match between their outcomes and the experience of farmers and area managers. This will also prevent that failure to take anisotropy into account, especially in wet conditions, causes incorrect estimates of the effects of water management measures on water tables and the spatial interaction between areas via the groundwater. This may help improve the level of support for such measures.

# **1 Inleiding**

## **1.1 Achtergrond en probleemstelling**

In artikel 6 van de Kaderrichtlijn Water (KRW) wordt aangegeven, dat er een register moet worden aangelegd van beschermde gebieden. De KRW beschrijft welke gebieden in ieder geval in het register opgenomen dienen te worden. Dit zijn onder andere alle gebieden, waarvoor het oppervlakte- en grondwater bijzondere bescherming behoeven voor het behoud van habitats van rechtstreeks van water afhankelijke soorten. Als er voor deze gebieden al een richtlijn geldt, dan is de richtlijn met het strengste regime leidend bij de implementatie van de KRW. Bijvoorbeeld op grond van de Vogel- en Habitatrichtlijn (VHR) gelden voor de beschermde gebieden en soorten specifieke chemische en ecologische eisen voor oppervlakte- en grondwater, die bindend zijn voor de KRW. Op basis van de VHR en de Ecologische Hoofdstructuur (EHS) zijn gebieden aangegeven die onder deze richtlijn/definitie vallen. Of de ecologische aspecten (speciaal de hydrologische situatie) binnen de VHR en EHS voldoen aan de gestelde eisen wordt in het kader van dit deelproject onderzocht. Het project is primair gericht op het bepalen van de actuele grondwatersituatie binnen de VHR en EHS (zie Bijlage 1, Projectplan). Op deze manier geeft het project invulling aan een belangrijke bouwsteen, zodat in de toekomst aangegeven kan worden waar wordt voldaan aan de ecologische eisen en waar niet.

## **1.2 Doelstelling**

Om aan te kunnen geven in hoeverre de VHR- en EHS-gebieden voldoen aan de gestelde eisen is een kaart met de actuele grondwaterstandsituatie binnen de VHR- en EHS-gebieden noodzakelijk. Om dit op termijn mogelijk te maken zal binnen dit project concreet ingegaan worden op de mogelijkheden voor het vervaardigen van dergelijke kaarten in de vorm van een pilot. Hiervoor zijn binnen deze pilotstudie diverse relevante methodes voor het in kaart brengen van de grondwaterstandsituatie toegepast en de resultaten met elkaar vergeleken en beoordeeld op hun geschiktheid. Op basis van de geschiktheidsbeoordeling kan uiteindelijk door de gebruiker een keuze worden gemaakt voor het landsdekkend genereren van grondwaterstandsgegevens in de VHR- en EHS-gebieden.

## **1.3 Globale werkwijze**

Het onderzoek bestaat uit meerdere gedeelten. In eerste instantie wordt vooral aandacht besteed aan de grondwaterstand. Hierbij komen aspecten aan de orde voor het waarnemen van grondwaterstanden, de karakterisering van het grondwaterstandsverloop en de profieltypen. De resulterende profieltypenkaart kan worden gebruikt om een prioritering aan te brengen bij een grondwaterstandskartering, als ook bij monitoring. Voor een pilotgebied in het Berkeldal zijn een aantal relevante GT-karteringsmethoden met elkaar vergeleken en geverifieerd. Mede op basis van de verificatie is een overzicht gegeven van de geschiktheid van de gehanteerde methoden. Op basis van deze geschiktheidsbeoordeling kan een keuze worden gemaakt om de grondwaterstandsituatie in de VHR- en EHS-gebieden in kaart te brengen.

## 1.4 Leeswijzer

Na de inleiding (hoofdstuk 1) wordt in hoofdstuk 2 nader ingegaan op verdroging aangezien het milieuthema “Verdroging” de aanleiding is voor dit onderzoek. In hoofdstuk 3 worden een aantal relevante achtergronden en aspecten voor het meten van grondwaterstanden beschreven. Deze informatie is noodzakelijk om de kwaliteit van meetgegevens te kunnen schatten, wat weer van belang is voor het gebruik van deze gegevens bij het vervaardigen van kaarten met de actuele grondwaterstandsituatie in natuurgebieden. Om een ruimtelijk beeld te kunnen krijgen in de vorm van kaarten met informatie over het grondwaterstandsverloop is een karakterisering van tijdreeksgegevens van grondwaterstanden in kengetallen noodzakelijk.

In hoofdstuk 4 wordt de karakterisering van het grondwaterstandsverloop in de vorm van Gt-informatie nader beschreven. Het daaropvolgende hoofdstuk (hoofdstuk 5) geeft een beschrijving van de beschikbare peilbuisinformatie voor heel Nederland en meer specifiek binnen de VHR- en EHS-gebieden. Via Gt-karteringsmethoden wordt de puntinformatie gebruikt om een vlakdekkend beeld van de grondwaterstandsituatie te krijgen. Binnen dit onderzoek zijn verschillende relevante Gt-karteringsmethoden gebruikt en met elkaar vergeleken voor een pilotgebied.

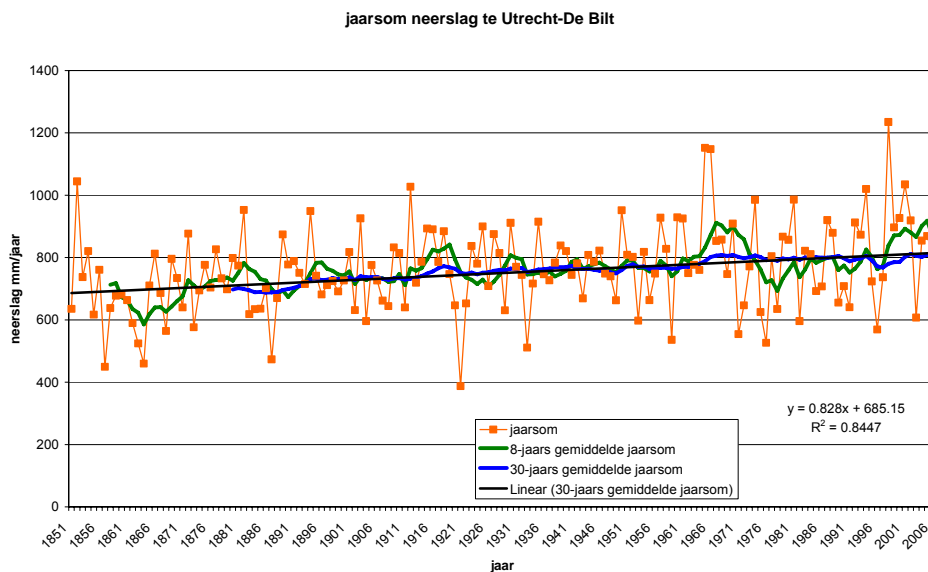
In hoofdstuk 6 worden de methoden beschreven en in hoofdstuk 7 worden de resultaten geverifieerd en op hun geschiktheid beoordeeld. De mate waarin vegetatie wordt beïnvloed door de grondwaterstand wordt echter mede bepaald door de eigenschappen van de bodem. Hierbij speelt het vochtleverend vermogen van de bodem, welke wordt bepaald door de vochtvoorraad in de wortelzone en de mogelijkheden voor capillaire nalevering, een belangrijke rol.

In hoofdstuk 8 is daarom de afhankelijkheid van grondwater in de vorm van profieltypen beschreven. Tot slot zijn in hoofdstuk 9 en 10 achtereenvolgens een discussie en de conclusies en aanbevelingen beschreven.

## 2 Grondwaterstandsaling en verdroging

### 2.1 Vormen van verdroging

Verdroging kan vanuit verschillende benaderingen worden bekeken. Indien het klimaat als uitgangspunt wordt genomen, kan worden gekeken naar de veranderingen in de neerslag (figuur 2.1). In de afgelopen anderhalve eeuw blijkt de jaargemiddelde neerslaghoeveelheid geleidelijk te zijn toegenomen van ca. 700 naar 800 mm/jaar. Deze geleidelijke stijging in de neerslaghoeveelheid is ook in het voortschrijdend gemiddelde over een klimaatperiode van 30 jaar waarneembaar (figuur 2.1). Op basis van de jaargemiddelde neerslaggegevens voor De Bilt vindt er in Nederland een geleidelijke vernatting plaats.

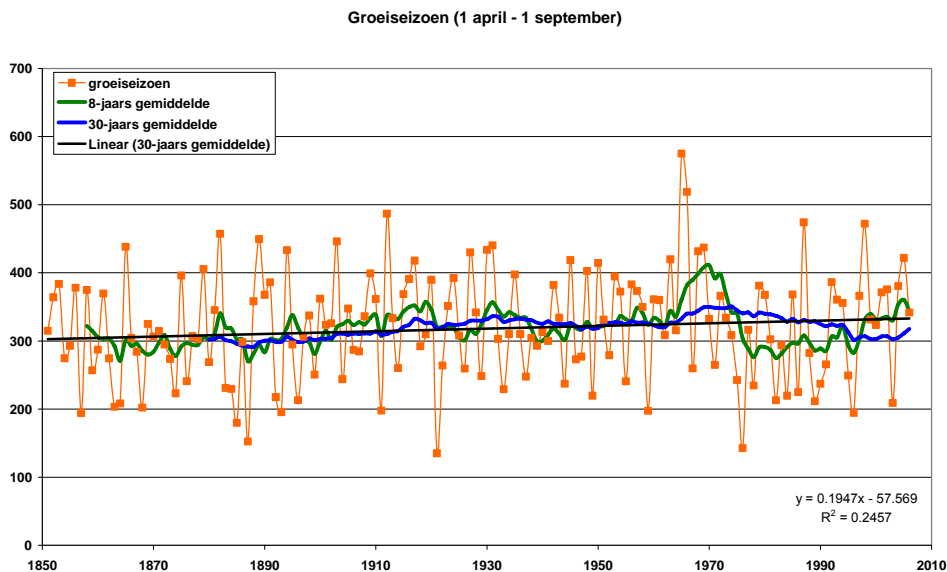


Figuur 2.1 Jaargemiddelde neerslaghoeveelheid voor het meteorologisch station De Bilt

Verdroging kan echter ook worden benaderd vanuit de plant. Voor vegetatie is vooral de waterbeschikbaarheid in het groeiseizoen (1 april tot 1 september (Van Soesbergen *et al.*, 1986) van belang. Ook blijkt de neerslaghoeveelheid gedurende het groeiseizoen geleidelijk te zijn toegenomen van ca. 300 naar 330 mm/groeiseizoen (figuur 2.2). Naast de neerslaghoeveelheid in het groeiseizoen is ook de verdamping van belang. Voor de verdamping zijn echter geen lange meetreeksen beschikbaar. Daarnaast is, niet de veelal via metingen berekende potentiële verdamping, maar de actuele verdamping van belang. Gedurende de periode 1850-2006 zijn er veel ontwikkelingen geweest die de actuele verdamping beïnvloeden. Deze ontwikkelingen hebben o.a. betrekking op een toename van de gewasopbrengsten door de komst van kunstmest, zaadveredeling en aanpassingen in de ont- en afwateringssituatie.

Daarnaast hebben er grootschalige grondgebruiksveranderingen plaatsgevonden via ontginningen en bebossing. Samenvattend komt het er op neer, dat het in beeld brengen van de actuele verdamping over de afgelopen anderhalve eeuw niet eenvoudig is. Het is gezien de toegenomen gewasproductie en bebossing wel aannemelijk dat de verdamping in het groeiseizoen in de loop der tijd is toegenomen. Deze toename van de verdamping is zeer

waarschijnlijk groter dan de geringe toename van de neerslag tijdens het groeiseizoen, waardoor er voor het groeiseizoen sprake is van verdroging in de vorm van een toename van het neerslagtekort.



*Figuur 2.2 Gemiddelde neerslaghoeveelheid voor het groeiseizoen (1 april – 1 september) voor het meteorologisch station De Bilt*

Verdroging kan ook worden benaderd vanuit het grondwater. Hierbij kan het gaan om het niveau van het grondwater of om een hiermee samenhangende bijdrage vanuit het grondwater via capillaire nalevering. In Nederland is in het verleden verdroging voornamelijk benaderd vanuit de grondwaterstand. Voor de term verdroging is hier in deze studie bij aangesloten.

Samenvattend kan worden aangegeven dat indien geredeneerd wordt vanuit de plant, vooral de vochtbeschikbaarheid voor de groei van de plant van essentieel belang is. De vochtbeschikbaarheid voor de plant wordt beïnvloed door het klimaat (neerslag en verdamping), het beschikbare bodemvocht in de wortelzone, de dikte van de wortelzone en de capillaire nalevering vanuit het grondwater. Deze laatstgenoemde bodemkundige aspecten bepalen uiteindelijk het vochtleverend vermogen van de bodem (Van Soesbergen *et al.*, 1986). De grondwaterstand is hier slechts een onderdeel van (zie ook hoofdstuk 8).

## 2.2 Historie van het milieuthema “Verdroging”

Al in de jaren zeventig (Grootjans, 1979, Gijsen, 1979, Beintema en Van den Berg, 1979; Molenaar, 1980) meldden natuurbeschermingsorganisaties dat er iets mis was met de grondwaterstand in natuurgebieden in Nederland. In 1985 reageerde het kabinet voor het eerst op deze signalen. In de Tweede Nota Waterhuishouding stelde het kabinet vast, dat er op landelijke schaal sprake was van een aanzienlijke daling van de grondwaterstand ten opzichte van de situatie in de jaren vijftig (V&W, 1985). Deze daling van de grondwaterstand was onder andere het gevolg van bewust genomen maatregelen om de grondwaterstand-situatie voor de landbouw en het stedelijk gebied te verbeteren. Naast de gewenste grondwaterstands daling in landbouw en stedelijke gebieden was ook de grondwaterstand in natuurgebieden gedaald. De daling van de grondwaterstand in natuurgebieden wordt als probleem ervaren. In de jaren tachtig van de vorige eeuw is de omvang van het probleem



verder in kaart gebracht (Braat *et al.*, 1987; Braat *et al.*, 1989a; Braat *et al.*, 1989b). Dit heeft tot gevolg gehad dat vanaf 1989 verdroging erkend is als één van de thema's van het milieubeleid. In de 3<sup>e</sup> Nota Waterhuishouding, waarin verdroging voor het eerst als landelijk milieuprobleem werd erkend, werd verdroging als volgt gedefinieerd:

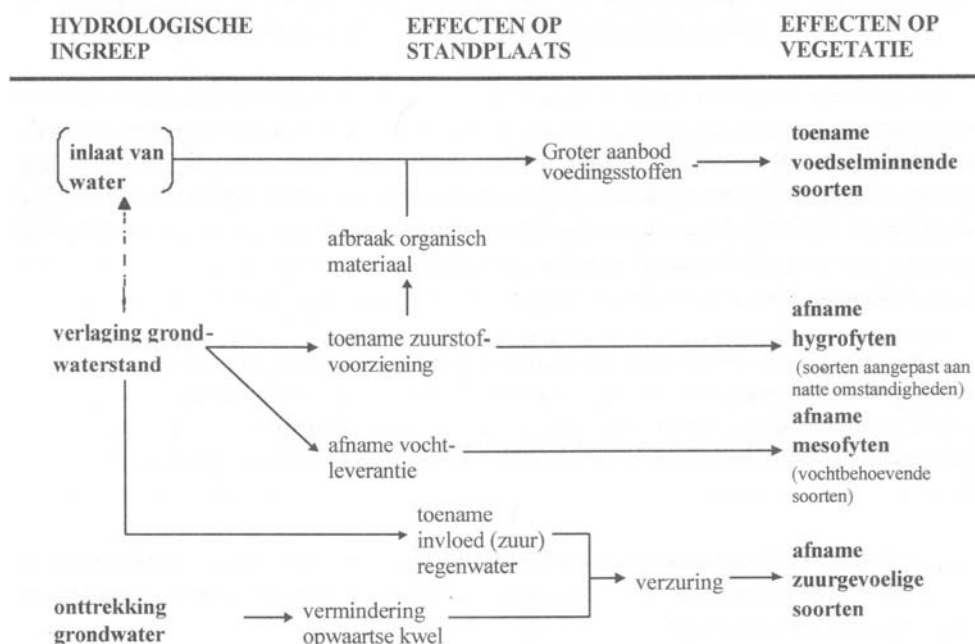
*Alle effecten als gevolg van daling van de grondwaterstand, zowel als gevolg van vochttekort als van mineralisatie en de verandering in de invloed van kwel en neerslag.*

Verdroging is dus het verschijnsel waarbij de waterspiegel van het grondwater daalt ten opzichte van het "natuurlijke" niveau, of een bepaald referentieniveau of waarbij water met een andere kwaliteit uit andere gebieden (gebiedsvreemd water) lokaal grondwater vervangt. De 4<sup>e</sup> Nota Waterhuishouding (V&W, 1998) geeft de volgende definitie voor verdroging:

*Een gebied wordt als verdroogd aangemerkt als aan dat gebied een natuurfunctie is toegekend en de grondwaterstand in het gebied onvoldoende hoog is danwel de kwel (water dat omhoog komt) onvoldoende sterk om bescherming van de karakteristieke grondwaterafhankelijke 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.*

De bovenstaande definitie geeft aan dat verdroging een containerbegrip is geworden waarbinnen grondwaterstand, grondwaterkwaliteit, een doelstelling en een maatregel zijn opgenomen. Inmiddels is beleid geformuleerd om de verdroging te bestrijden en is het begrip verdroging steeds meer verbonden geraakt met de beleidsdoelstellingen (Runhaar, 1999). De term verdroging wordt meestal gebruikt als verzamelterm om de aantasting van grondwaterafhankelijke natuur als gevolg van ongewenste verandering van (grond)waterstand en stijghoogte aan te geven (Runhaar *et al.*, 2000). Verdroging is dus verbonden met het natuurwaardebegrip, en wordt veroorzaakt door veranderingen in de waterhuishouding, vooral door intensievere ontwatering voor de landbouw en door grondwaterwinningen (Beugelink en Claessen, 1995; Runhaar *et al.*, 2000). Het gaat daarbij niet alleen om vochttekorten, maar om een omvangrijke keten van processen (figuur 2.3). In het eind van de jaren tachtig uitgevoerde Landelijke Verdrogingsonderzoek werden al deze processen die samenhangen met de daling van de grondwaterstand en de vermindering van de druk van het grondwater samengevat onder de noemer verdroging (Runhaar *et al.*, 2000).

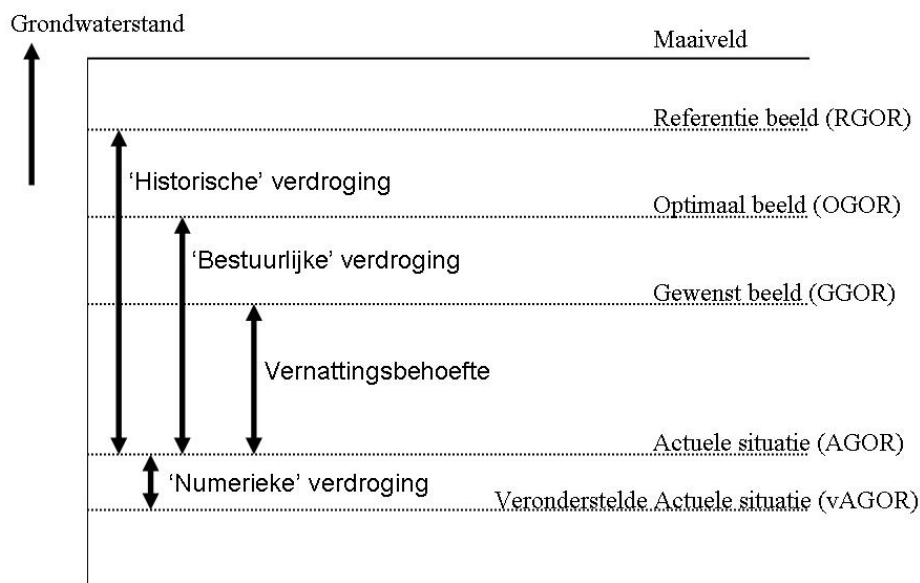
Op dit moment wordt de verdroging vastgelegd op de Verdrogingskaart, die wordt opgesteld door het Interprovinciaal Overleg (IPO). De informatie, die hiervoor wordt gebruikt, is zeer divers en per provincie verschillend, wat een heterogeen ruimtelijk beeld oplevert. Indien gebruik wordt gemaakt van vegetatieopnamen om de verdroging te bepalen, dient te worden opgemerkt dat uit vegetatieverandering niet altijd met zekerheid valt af te leiden in hoeverre sprake is van verdroging (Runhaar *et al.*, 2000). Zo kunnen in natte heideterreinen veranderingen in beheer en toename van atmosferische depositie leiden tot vegetatieveranderingen die niet of nauwelijks te scheiden zijn van de veranderingen in de hydrologie. Het belangrijkste probleem bij toepassing voor monitoringsdoeleinden is echter dat de soortensamenstelling van de vegetatie vertraagd (nauwlijng) reageert op hydrologische veranderingen. Er dient rekening te worden gehouden met een periode van ca. 10 jaar voordat de vegetatie weer in een nieuw (dynamisch) evenwicht verkeert met de gewijzigde hydrologische omstandigheden (Runhaar en Jansen, 1999). Daarnaast vindt er van nature vaak een successie plaats, waardoor de vegetatie kan veranderen. Er zijn ook een aantal provincies die grondwaterstandsgegevens gebruiken om de mate van verdroging vast te stellen (Werkgroep Verdrogingskaart 2004; Stuurman *et al.*, 2003; in Noord-Brabant).



Figuur 2.3 Enkele oorzaken van verdroging en hun effecten op de standplaatscondities en de vegetatie (naar Runhaar et al., 2000)

Het verschijnen van het Alterra-rapport "Blauw voor groen, nog veel te doen", medio 2002, is aanleiding geweest de Commissie Integraal Waterbeheer (CIW) om advies te vragen over de verbetering van de verdrogingsbestrijding. De CIW stelt voor om de doelen van de verdrogingsbestrijding beter hanteerbaar en afrekenbaar te maken door ze te koppelen aan de begrippen GGOR, OGOR en AGOR (zie hieronder). Op deze wijze wordt de verdrogingsbestrijding integraal onderdeel van het regionale waterbeheer. Voor het GGOR adviseert de CIW deze te koppelen aan de termijn waarop zij moet worden gerealiseerd. Het OGOR is het Optimale Grond- en Oppervlaktewater Regime. Voor verschillende functies kan aan de hand van wetenschappelijke gegevens een OGOR worden opgesteld (bijvoorbeeld voor natuur en landbouw). Het GGOR is het Gewenste Grond- en Oppervlaktewater Regime. Het GGOR voor een gebied wordt vastgesteld op basis van een afweging van verschillende belangen in dat gebied. Het AGOR is het Actuele Grond- en Oppervlaktewater Regime. Het AGOR kan op basis van metingen en veldschattingen, zonodig aangevuld met modelberekeningen, in een gebied worden bepaald. De onderlinge samenhang tussen het grondwaterregime en verdroging is in figuur 2.4 schematisch weergegeven.

Het Actuele Grond- en Oppervlaktewater Regime (AGOR) geeft de actuele toestand aan. Het wordt beschreven met dezelfde parameters die ook in het GGOR een rol spelen. Het AGOR is niet per definitie één (set van) parameterwaarde(n), maar kan bestaan uit bijvoorbeeld een gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG), een gemiddeld oppervlaktewaterpeil en een aantal parameters die de chemische toestand beschrijven. In feite schommelt het AGOR binnen een bandbreedte. Het varieert van seizoen tot seizoen en van jaar tot jaar. Iets vergelijkbaars geldt voor de Gemiddeld Hoogste en Laagste Grondwaterstand (GHG en GLG). Gezamenlijk beschrijven ze een gemiddeld traject van grondwaterstanden binnen een periode van ten minste acht jaar en zijn maatgevend voor de grondwatertrap.



*Figuur 2.4 Schematische weergave van de onderlinge samenhang van begrippen met betrekking tot het grondwaterregime en verdroging (aangepast Naar: Runhaar et al., 2000; CIW, 2003; Stuurman et al., 2003; Runhaar et al., 2005; Van der Gaast, 2006)*

Het OGOR (het Optimaal of 'Ongewogen' Grond- en Oppervlakte-water Regime) geeft de waarden van deze parameters aan als ze op de beschouwde locatie volledig zouden zijn afgestemd op de plaatselijke functie. Het OGOR is louter afhankelijk van de grondsoort en de beschouwde functie, en kan bij wijze van spreken in het laboratorium worden bepaald. Onder voorwaarde dat de beschouwde functie overeenstemt met de mogelijkheden van het hydrologisch systeem, beschrijft het OGOR de potenties van een gebied en is als zodanig gebiedspecifiek en geografisch bepaald. Het OGOR is in de meeste gevallen op kortere termijn niet te verwezenlijken, maar toch is het goed om het als uiteindelijke doelstelling voor het waterhuishoudkundig beleid voor ogen te houden.

Het GGOR (het Gewenste of 'Gewogen' Grond- en Oppervlaktewater Regime) is de waterhuishoudkundige staat van het grond- en oppervlaktewater en omvat alle relevante kwantiteits- en kwaliteitsaspecten. Het GGOR is het resultaat van een ruimtelijke, maatschappelijke en waterhuishoudkundige afweging tussen de verschillende in het geding zijnde belangen (waaraan steeds OGOR's zijn gekoppeld). Als gevolg van deze afweging kan het GGOR minder aan de wensen van de functie tegemoetkomen dan het OGOR. Als na verloop van tijd iets verandert in factoren die in de belangenafweging een rol hebben gespeeld – denk hierbij vooral aan wijziging van functies als gevolg van veranderd beleid– is er veel voor te zeggen om het GGOR opnieuw vast te stellen, zodat het minder, maar eventueel ook meer, van het OGOR kan afwijken. Functiewijzigingen krijgen hun beslag vooral in streekplannen en (partiële) herzieningen hiervan.

Om de gewenste grondwatersituatie (GGOR) vast te stellen, wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van (agro)hydrologische modellen. Hydrologische modellen hoeven echter niet overeen te komen met de werkelijke situatie. Een veel voorkomend probleem bij het gebruik van hydrologische modellen is, dat deze in het algemeen een afgevlakt beeld van de grondwaterstands situatie weergeven. Dit komt onder andere tot uiting in de vorm van een te geringe fluctuatie van de grondwaterstand, waarbij de GHG-situatie veelal te droog en de GLG-situatie meestal te nat wordt gesimuleerd. Hierdoor komen modelresultaten veelal niet

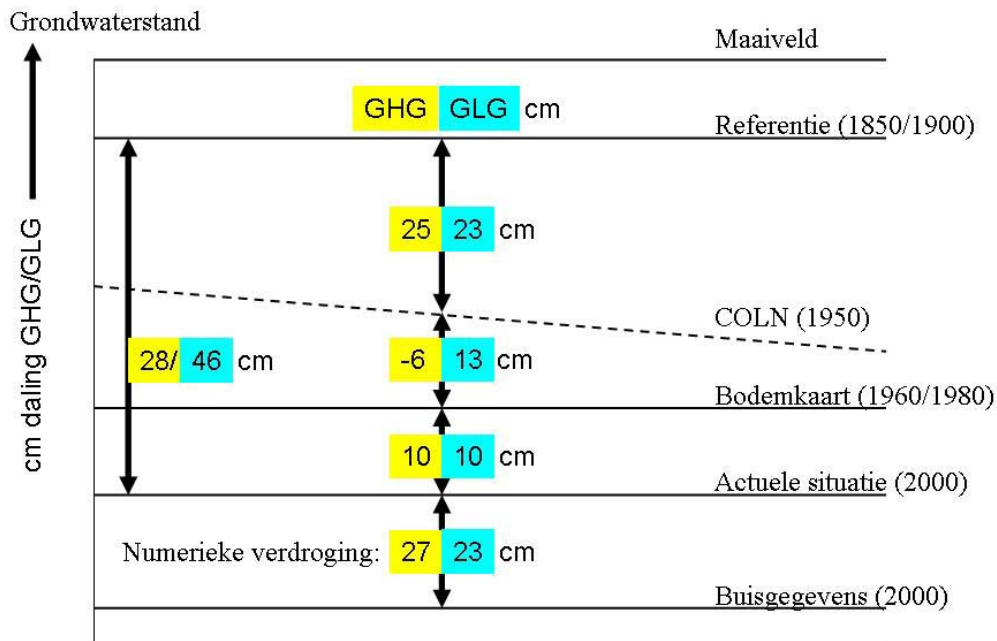
overeen met de informatie uit karteringen en de ervaringen vanuit de praktijk. De berekende geringe grondwaterstandsfluctuatie wordt onder meer veroorzaakt door een overschatting van de interactie tussen grond- en oppervlaktewater in het model. Verder geeft een model slechts een vereenvoudiging van de werkelijke situatie weer, waardoor het effect van bepaalde bodemfysische processen die van invloed zijn op de (agro)hydrologie niet wordt meegenomen danwel onvoldoende wordt herkend. Daarnaast heeft ook de schematisatie en parameterisatie van het bodemprofiel invloed op de rekenresultaten en dit zal er toe bijdragen dat de fluctuatie van het grondwater veelal afwijkt ten opzichte van de situatie in het veld. Dit alles heeft tot gevolg dat op basis van modelberekeningen bijvoorbeeld wordt voorgesteld om het oppervlaktewaterpeil te verhogen.

Vanuit de praktijk kan echter bekend zijn dat er in de huidige situatie beperkingen zijn in de bedrijfsvoering, omdat de grondgebruiker vanwege natte omstandigheden het land niet op kan. Het verhogen van het oppervlaktewaterpeil heeft tot gevolg dat dit soort beperkingen in de bedrijfsvoering alleen maar toe zullen nemen. Het model kan echter aangeven, dat deze beperkingen in de huidige situatie nagenoeg niet voorkomen, wat vanuit de agrarische praktijk anders wordt ervaren. Ook de natuurgebieden worden vaak voor de winter- en voorjaars situatie te droog gemodelleerd. Dit heeft tot gevolg, dat grondwaterafhankelijke natuur op basis van modelberekeningen vaak niet voor kan komen, terwijl er in werkelijkheid vaak kleine stukjes zijn waar de grondwaterafhankelijke natuur juist wel voorkomt. Voor deze natuur is het belangrijk dat de kleine stukjes deel uit gaan maken van een groter gebied met grondwaterafhankelijke natuur, aangezien dit de robuustheid van de natuur ten goede komt. Deze robuustheid is weer van belang om extreme weersituaties gemakkelijker te kunnen overleven.

### **2.3 Kwantificering van de verdroging**

Het veronderstelde Actuele Grond- en Oppervlaktewater Regime (vAGOR) geeft de vermeende actuele situatie aan die als gevolg van numerieke verdroging veelal te laag uitvalt. Numerieke verdroging kan worden gedefinieerd als een onjuiste inschatting (meestal te droog) van de freatische grondwaterstand als gevolg van verkeerde meet- en/of rekentechnieken die direct of indirect als gevolg van numerieke methoden zijn geïntroduceerd (Van der Gaast *et al.*, 2008). Voorbeelden van numerieke verdroging zijn het onjuist interpreteren van meetgegevens afkomstig van peilbuizen (Van der Gaast *et al.*, 2006c), het gebruik van lineaire tijdreeksanalyse (Van der Gaast en Massop, 2005c) en het onvoldoende meenemen van gelaagdheid en/of anisotropie in (agro/geo)hydrologische modellen (Van der Gaast *et al.*, 2008). Hierdoor is numerieke verdroging een containerbegrip voor methoden die een onjuiste misleidende grondwaterstand tot gevolg hebben.

Het kwantificeren van de grondwaterstands daling in Nederland is in het verleden een belangrijk aspect geweest in het verdrogingsonderzoek (Braat *et al.*, 1989a,b; Rolf, 1989). Ook in meer recent onderzoek is gekeken naar bijvoorbeeld het verschil tussen het actuele grondwaterregime (AGR) en het referentie grondwaterregime (RGR) (figuur 2.5). In een studie van Van der Gaast en Massop (2005a) bedraagt het landsdekkend gemiddelde verschil voor de GHG ca. 60 cm en de GLG ca. 70 cm. Hierbij is indertijd aangegeven dat deze verschillen overschat waren. Door Knotters en Janssen (2005) is het verschil tussen de AGR en RGR voor het zandgebied van Nederland bepaald. Deze verschillen bedragen voor de GHG ca. 30 en voor de GLG ca. 50 cm. Deze waarden komen redelijk overeen met de landsdekkend gemiddelde waarden die bepaald zijn in een studie, waarin ook de numerieke verdroging is gekwantificeerd (figuur 2.5) (Van der Gaast *et al.*, 2007).



Figuur 2.5 Schematische weergave van de grondwaterstands­daling bij vergelijking van verschillende gegevensbronnen (naar: Van der Gaast et al., 2007).

Al deze waarden hebben betrekking op de historische grondwaterstands­daling (historische verdroging in figuur 2.4), waarbij dient te worden opgemerkt, dat de waarden betrekking hebben op vlakdekkende gemiddelden voor zowel het landbouw- als het natuurgebied. Aangezien de grondwaterstands­daling in landbouwgebieden groter is en de verdroging van natuurgebieden voor een belangrijk deel is veroorzaakt door de ont- en afwatering van landbouwgebieden (Beugelink en Claessen, 1995) mogen we er van uitgaan dat de verdroging in natuurgebieden in het algemeen kleiner is. In de Natuurbalans 2008 (PBL, 2008) is aangegeven, dat de grondwaterstand gemiddeld 45 tot 60 cm lager is dan gewenst voor de beoogde natuurdoeltypen. Hierbij is niet aangegeven of het om bijvoorbeeld de GHG, GVG of GLG gaat. Het zijn waarschijnlijk wel getallen die alleen voor de natuurgebieden gelden en betrekking hebben op de bestuurlijke verdroging. Het is dan ook opmerkelijk, dat de in de natuurbalans genoemde bestuurlijke verdroging in natuurgebieden hoger is dan de gebiedsdekkende gemiddelden voor de historische verdroging. Dit kan worden veroorzaakt door een (te) hoog ambitieniveau en/of door een te lage inschatting van de actuele grondwaterstand als gevolg van het gebruik van onjuiste misleidende informatie. Aangezien er geen literatuurverwijzing in de Natuurbalans is opgenomen kunnen hierover geen nadere uitspraken worden gedaan.

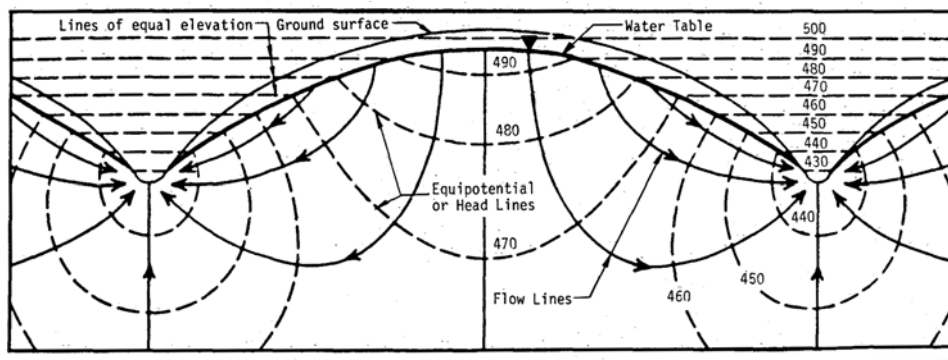


### 3 Grondwaterstandswaarnemingen

In dit hoofdstuk worden een aantal relevante achtergronden en aspecten voor het meten van grondwaterstanden beschreven. Deze informatie is noodzakelijk om de kwaliteit van meetgegevens te kunnen schatten, wat weer van belang is voor het gebruik van deze gegevens bij het vervaardigen van kaarten met de actuele grondwaterstands situatie in natuurgebieden.

#### 3.1 Theoretische achtergrond

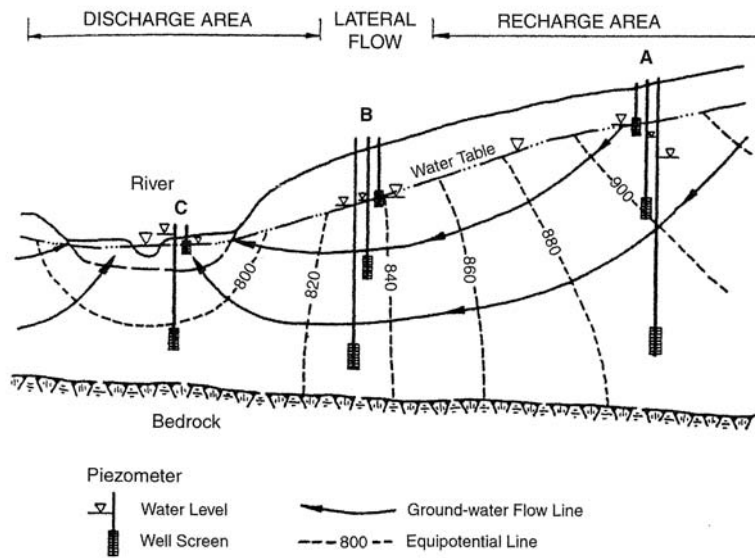
De freatische grondwaterstand is de diepte van het grondwatervlak, waarop het grondwater een druk heeft die gelijk is aan de atmosferische druk. Het wordt bepaald door het niveau waarop water voorkomt in peilbuizen, waarvan de filters net voldoende diep zijn geplaatst om vrij grondwater te bevatten. In peilbuizen waarvan de filters dieper zijn geplaatst, zal de stijghoogte, indien er verticale grondwaterstroming is, dieper of minder diep zijn dan de freatische grondwaterstand. Als gevolg van verschillen in stijghoogte zal er grondwaterstroming plaatsvinden. Grondwaterstroming vindt plaats in drie dimensies en kan daarom een horizontale en een verticale (naar beneden of naar boven gerichte) component bevatten. De stromingssterkte en -richting is afhankelijk van een aantal factoren. Gebieden met een grondwateraanvulling (wegzijgingsgebieden) worden gekenmerkt door een afname van de stijghoogte met de diepte en een hiermee samenhangende neerwaartse stroming (figuur 3.1, 3.2 en 3.3) (Hooghoudt, 1940; Saines, 1981). Deze neerwaartse verticale stromingscomponent en de hiermee samenhangende verticale stijghoogteverschillen nemen af naarmate de afstand tot de grondwaterscheiding toeneemt (figuur 3.1) (Hubbert, 1940).



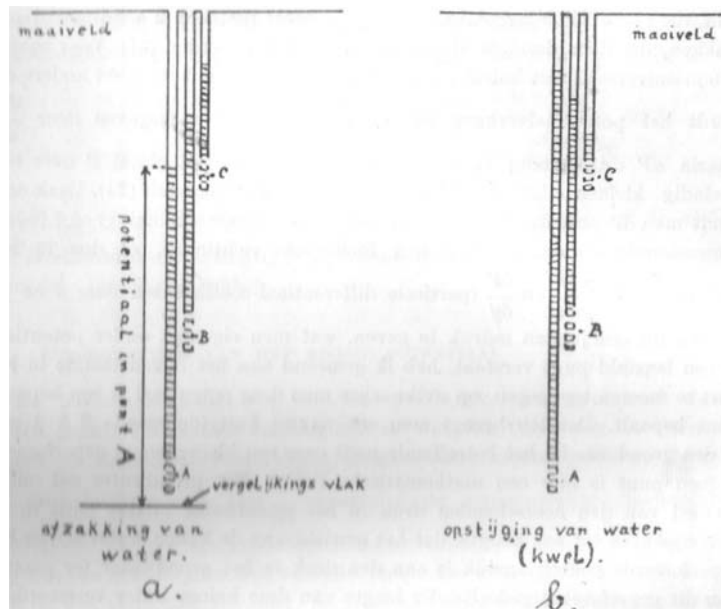
Figuur 3.1 Schematische weergave van het stromingspatroon in uniform doorlatend materiaal tussen het brongebied (wegzijgingsgebied) en het ontvangende gebied (kwelgebied) (naar: Hubbert, 1940; Saines, 1981).

Afvoergebieden (kwelgebieden) worden gekenmerkt door een toename van de stijghoogte met de diepte en een hiermee samenhangende opwaartse verticale stroming. In een kwelgebied stroomt grondwater naar het oppervlak en kan uittreden in de vorm van een bron, basisafvoer in ontwateringsmiddelen of verdamping (Fetter, 1980). Tussen het wegzijgings- en het kwelgebied is er een relatief smalle zone met hoofdzakelijk laterale (horizontale) stroming (Dalton *et al.*, 2007). Deze zone wordt gekenmerkt door vrijwel verticale equipotentiaalijnen en min of meer horizontale stroomlijnen (figuur 3.2). Piëzometers die in deze gebieden op

verschillende dieptes worden geplaatst geven nauwelijks een verschil in stijghoogte te zien. In deze zone stroomt water van het wegzijgingsgebied naar het kwelgebied en komt er weinig of geen water van boven of onderaf bij en verliest het systeem weinig of geen water. Hierdoor is de overgang van kwel naar wegzijging in theorie een lijn en in de praktijk een zone van geringe omvang. Alleen voor deze zone geldt, dat de informatie van peilbuizen met verschillende filterdiepten en lengten door elkaar gebruikt kunnen worden om bijvoorbeeld freatische grondwaterstandskarten te kunnen maken zonder dat deze kaarten onderhevig zijn aan serieuze fouten (Saines, 1981).



Figuur 3.2 Stromingspatroon in een uniform doorlatend materiaal waarin het laterale stromingsgebied tussen het wegzijgings en kwelgebied tot uiting komt (naar: Saines, 1981; Dalton et al., 2007).



Figuur 3.3 Geschematiseerde aanduiding van de wijze, waarop men de verandering van de potentiaal in verticale richting kan aantonen, resp. kan meten a: wegzijgingsgebied, b: kwelgebied (naar: Hooghoudt, 1940).



In het bovenstaande is uitgegaan van uniforme geologische omstandigheden met homogene isotrope doorlatendheid. Onregelmatigheden in stratigrafie, structuur en doorlatendheid zorgen ervoor, dat de complexiteit van de gemeten stijghoogte en zijn relatie met de diepte waarop binnen het hydrologisch systeem gemeten wordt toeneemt. Samenvattend komt het er op neer dat de grondwaterstand een functie is van de filterstelling (zowel voor de filterdiepte als voor de filterlengte) en de ruimtelijke positie ten opzichte van de grondwaterequipotentiaallijnen.

## 3.2 Het meten van de freatische grondwaterstand

In de eerste helft van de vorige eeuw is veel onderzoek gedaan op het gebied van de freatische grondwaterstand. De freatische grondwaterstand kan worden gemeten in boorgaten of, wanneer de waarnemingen zich over langere tijd uitstrekken, in buizen, die in de boorgaten worden geplaatst (Hooghoudt, 1952). De buizen hebben een diameter van enkele centimeters en zijn geheel of gedeeltelijk geperforeerd. De buizen zijn ten minste geperforeerd voor het deel dat zich in het grondwater bevindt, waardoor het water gemakkelijk in de buis kan treden. De buis wordt doorgaans omwikkeld met een filterkous, om inspoeling van bijvoorbeeld zand, klei of andere materialen te voorkomen. De boorgaten waarin de buizen worden geplaatst, hebben gewoonlijk een grotere diameter dan de buis. De ruimte tussen de buiswand en de wand van het boorgat wordt opgevuld met grof zand (Hooghoudt, 1952) of losjes opgevuld met grond (Domhof *et al.*, 1965).

In veel gevallen zal de stand van het water in deze buizen corresponderen met de freatische grondwaterspiegel (Richards, 1954). Dit zal het geval zijn wanneer het grondwater zich in een toestand van statisch evenwicht bevindt of wanneer er in de grond slechts stroming in horizontale richting optreedt. Wanneer er echter, wat vaak het geval is, een verticale stromingscomponent aanwezig is, kan de stand van het water in de buis afwijken van de werkelijke freatische grondwaterstand (Domhof *et al.*, 1965). De stand van het water in de buis geeft dan het evenwicht weer tussen in- en uitstroming in de verzadigde bodemlagen. Vooral indien er grote verschillen in doorlatendheid zijn tussen deze lagen kan de waterstand in de buis in aanzienlijke mate verschillen van de werkelijke freatische grondwaterstand.

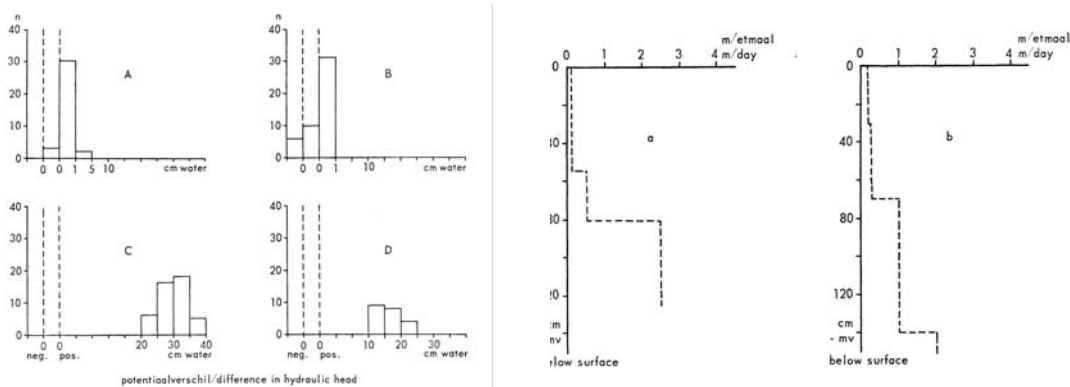
Om in deze situaties uitsluitsel te krijgen over de ligging van het freatische grondwatervlak, kan gebruik worden gemaakt van piëzometers of van potentiaalbuizen (Richards, 1954). Dit zijn ijzeren of plastic buizen die in tegenstelling tot de hiervoor besproken grondwaterstandsbuizen slechts over een kleine afstand aan de onderzijde geperforeerd zijn. Ze worden zodanig in de bodem geplaatst, dat de buiswand overal dicht tegen de grond aansluit, zodat er geen lekkage optreedt tussen grond en buiswand. De stand van het water in de buis wordt dan alleen bepaald door de druk van het grondwater ter plaatse van het filter (de potentiaal). Indien er een potentiaalverschil aanwezig is tussen twee verticaal onder elkaar gelegen punten zal er een verticale stroming van het grondwater plaats gaan vinden. Het freatische grondwatervlak wordt aangegeven door de piëzometer, waarvan de filterstelling zo kort is, dat er nog net water in komt.

In een situatie met hydrostatisch evenwicht, of wanneer er uitsluitend horizontale stroming optreedt, zijn er in verticale richting geen verschillen in potentiaal en zijn de stijghoogten in alle piëzometers gelijk (Domhof *et al.*, 1965). In de praktijk wordt momenteel veel gebruik gemaakt van piëzometers in plaats van freatische buizen. De filterlengte is veelal beperkt (0,5 of 1 m) en de buizen worden vaak diep geplaatst om droog staan te voorkomen.

### 3.3 Verticale weerstand

Om de stijghoogte te meten, is naast het voorkomen van een verticale grondwaterstroming (zie § 3.4) ook de doorlatendheid van het materiaal op en boven het filterniveau van belang. Bijvoorbeeld in humuspodzolgronden zijn in het verleden, als gevolg van geringe doorlatendheden boven in het profiel, in de winterperiode verschillen in stijghoogten van enkele tientallen centimeters gemeten tussen filters op 1, 2, 4 en 6 meter diepte (Knibbe, 1969). In figuur 3.4 zijn frequentieverdelingen van stijghoogteverschillen in piëzometers op 1 en 5 of 6 meter weergegeven voor gleygronden met kwel en humuspodzolgronden met wegzijging. Vooral in de humuspodzolgronden is als gevolg van een verschil in doorlatendheid (k-waarde) en een neergaande wegzijgingsflux in een winterperiode een aanzienlijk verschil gemeten tussen ondiepe en diepere filters.

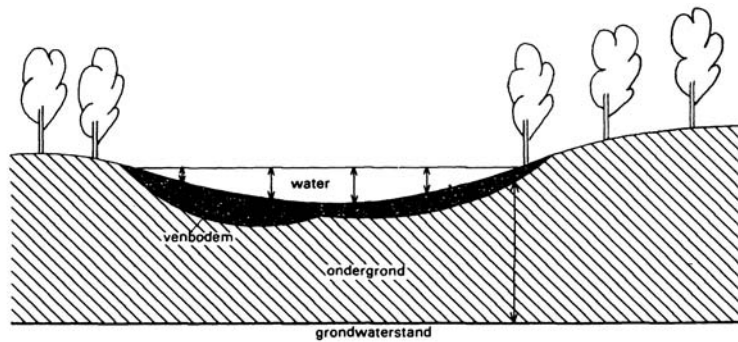
De verticale doorlatendheid is weer in hoge mate afhankelijk van eventueel aanwezige anisotropie in de vorm van onder andere leem of lutumbandjes, scherpe textuurovergangen, humus en/of ijzerinspoelingslagen en het voorkomen van storende lagen in het profiel. Een bijzondere vorm van een storende laag die in bepaalde bodemhorizonten periodiek kan optreden zijn lenzen gevuld met lucht. Hierdoor stagneert het neerslagwater in de grond periodiek op een lens van lucht, waardoor er tijdelijk hoge grondwaterstanden kunnen optreden (Lisseffect, Huizinga 1950). Dit komt vooral voor naarmate de grond lemiger of lutumrijker is. De lucht kan in deze gronden bij een relatief hoog neerslagoverschot moeilijk uit de nauwe poriën verdwijnen, waardoor de lucht als een lens opgesloten zit tussen de verzadigde bovengrond als gevolg van het neerslagoverschot en de volcapillaire zone in de ondergrond.



*Figuur 3.4 Frequentieverdeling van potentiaalverschillen tussen 1 m en 5 of 6 m buizen in gleygronden (A en B) en in humuspodzolen (C en D) (links). Schematisch verloop van de doorlatendheid in gleygronden (a) en humuspodzolgronden (b) in Salland (rechts) (naar: Knibbe, 1969).*

Door de gelaagdheid (anisotropie) van de bodem ontstaat meestal een situatie waarbij men heeft te maken met een weerstand tegen verticale grondwaterstroming. Van anisotropie wordt gesproken indien een materiaal niet in alle richtingen dezelfde eigenschappen heeft (NHV-werkgroep, 2002). Van den Berg (2003) heeft aangetoond dat de hydraulische doorlatendheid op de schaal van primaire sedimentaire structuren anisotroop is. Sedimentaire structuren zijn immers variabel georiënteerd binnen en tussen lagen als gevolg van variatie in ruimte en tijd van de aanvoerrichting van sedimenten (Van den Berg, 2003). Om anisotropie te bepalen, is het van belang in welke mate de bodemlagen afzonderlijk worden beschouwd, waardoor anisotropie mede afhankelijk is van de gehanteerde schaal (§ 3.5).

Indien er sprake is van een schijngrondwaterspiegel als gevolg van een storende laag, met daaronder een onverzadigde zone, wordt het effect van de gelaagdheid nog eens versterkt. Het onverzadigde materiaal onder een storende laag heeft een aanzienlijk lagere k-waarde, doordat er minder poriën deelnemen aan het transport van water en door een hoge luchtintredeweerstand (dit speelt vooral een rol bij grof zandig materiaal), naarmate het materiaal droger is. Hierdoor neemt de weerstand toe, waardoor het water nog moeilijker naar het grondwater kan percoleren. Het verschil in een stijghoogte in een peilbuis en de freatische grondwaterstand in de vorm van een schijnspiegel kan hierdoor zeer groot zijn (figuur 3.5).



*Figuur 3.5 Dwarsdoorsnede van een ven met een ligging van de bodem in de onverzadigde zone (naar: Bannink et al., 1989)*

De bovenstaande theoretische verklaring voor het verschil tussen een gemeten potentiaal in een piëzometer en de freatische grondwaterstand wordt echter beïnvloed door regionale stroming en het voorkomen van kwel of wegzijging. Daarnaast is niet bekend in welke gronden en in welke mate anisotropie een rol speelt. Daarom is in § 3.5 nader ingegaan op anisotropie en in § 3.6 op basis van de bodemkaart een eerste inschatting gemaakt van ruimtelijke verbreiding van ondiep voorkomende anisotropie in het bodemprofiel.

### **3.4 Verticale grondwaterstroming**

Aangezien er in de praktijk veelal gebruik wordt gemaakt van piëzometers is inzicht in de verticale stroming in de tijd van belang om te kunnen bepalen in hoeverre een gemeten stijghoogte overeenkomt met de freatische grondwaterstand. Indien gekeken wordt naar de GHG of GLG hebben we te maken met situaties die gemiddeld genomen in de orde van 20 à 40 dagen per jaar wordt overschreden. Hierdoor valt het moment waarop de grondwaterstand overeenkomt met de GHG niet direct samen met een extreem natte weerssituatie. De GHG wordt bereikt in een relatief natte situatie met een neerslagoverschot en daarom een neergaande grondwaterstroming (flux), waardoor de grondwaterafvoer en eventuele wegzijging relatief groot zijn. Op basis van langjarige neerslaggegevens voor De Bilt (1851-2006) kan worden aangegeven dat de gemiddelde neerslaghoeveelheid rond het GHG-moment varieert van 6 tot 10 mm/dag uitgaande van een overschrijdingsduur van respectievelijk 40 en 20 dagen per jaar.

Indien wordt uitgegaan van de wet van Darcy (formule 3.1), die de grondwaterstroming beschrijft, zal door het neerslagoverschot een potentiaalverschil optreden in verticale richting, met een hoge potentiaal boven in het profiel en een lagere potentiaal lager in het profiel. De mate waarin de potentiaal verschilt, zal voor een belangrijk deel afhangen van de doorlatendheid van de bodem in verticale richting. Indien gebruik wordt gemaakt van

piëzometers die relatief diep zijn geplaatst zal er in de potentiaalbus een lagere drukhoogte worden gemeten dan de freatische grondwaterstand. Het verschil in gemeten potentiaal en de freatische grondwaterstand is afhankelijk van de afstand ( $s$ ) tussen het potentiaalvlak waarin gemeten wordt, de freatische grondwaterstand, de doorlatendheid ( $k_{sat}$ ) van de bodem in verticale richting en de grondwaterstroming (flux  $q$ ).

$$q = k_{sat} \frac{\Delta H_h}{s} \quad \text{oftewel} \quad \Delta H_h = \frac{qs}{k_{sat}} \quad (3.1)$$

Naast de verticale doorlatendheid is ook de grondwaterstroming bepalend voor het verschil tussen een gemeten potentiaal in een piëzometer en de freatische grondwaterstand. Om meer inzicht te krijgen in de verticale flux door het grondwatervlak (grondwateraanvulling) zijn de gemiddeld hoogste flux (GHF) en de gemiddeld laagste flux (GLF) door het grondwatervlak bepaald. De GHF en GLF zijn de fluxen door het grondwatervlak die respectievelijk op GHG-moment en GLG-moment voorkomen (figuur 3.6). Om de fluxen te bepalen, is gebruik gemaakt van modelberekeningen met het model SWAP die in het kader van het project 'Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken' beschikbaar zijn (Van der Gaast *et al.*, 2006a). De verticale flux door het grondwatervlak kan op dagbasis worden bepaald. Deze flux op dagbasis komt overeen met de grondwateraanvulling op dagbasis. Uit de kaarten komt naar voren dat er duidelijke ruimtelijke verschillen zijn in de verticale flux door het freatisch vlak op zowel GHG- als GLG-moment. Droge gebieden met een relatief dikke onverzadigde zone zoals de Veluwe, hebben een geringe neerwaartse GHF. De GLF is voor deze gebieden eveneens naar beneden gericht en relatief laag, waardoor ook de fluctuatie in de flux gering is.

In de veelal natte klei- en veengebieden is de GHF hoog en is de GLF als gevolg van kwel en/of het aanvullen van water dat via capillaire opstijging verdwijnt, tegengesteld gericht (naar boven). Voor de GHF geldt dat deze altijd als gevolg van een neerslagoverschot naar beneden gericht is en dat de ruimtelijke verschillen redelijk groot zijn. Voor de GLF zijn de ruimtelijke verschillen kleiner, maar valt op dat de flux zowel naar boven als naar beneden gericht kan zijn. In de duidelijke wegzijgingsgebieden blijft de flux ook gedurende de GLG, als gevolg van het ontbreken van capillaire opstijging, naar beneden gericht. Gemiddeld voor heel Nederland is de GHF -2.9 mm/d en de GLF 0.4 mm/d. Daarnaast dient te worden opgemerkt dat in de gebruikte berekeningen gebruik is gemaakt van een veel gebruikte standaard bodemschematisering en bodemparametrisering waarin nagenoeg geen anisotropie is opgenomen, hetgeen van invloed kan zijn op de berekende fluxen.

Op basis van het voorgaande kan voor de verticale flux ( $q$ ) rond GHG-moment uitgegaan worden van een neerwaartse flux van 3 mm/d. Indien daarnaast als rekenvoorbeeld wordt uitgegaan van een verticale doorlatendheid ( $k_{sat}$ ) van 0.05 m/d en een afstand ( $s$ ) van 3 meter, dan is de  $c$ -waarde 60 dagen ( $c = s/k$ ). Het stijghoogteverschil ( $\Delta H_h = c * q$ ) bij deze flux bedraagt hierdoor 18 cm. Een verticale weerstand van 60 dagen is ook voor het zandgebied van Nederland geen uitzondering. Voor een pompproef nabij Coevorden zijn afhankelijk van de locatie  $c$ -waarden van 10-50 en 260-330 dagen gevonden (De Ridder en Wit, 1962). In de Achterhoek zijn bijvoorbeeld nabij Varsseveld waarden van 20-25 dagen gevonden (De Ridder, 1966). In een geohydrologisch onderzoek in Noord-Limburg wordt op basis van pompproeven aangegeven dat voor het stroomgebied van de Lollebeek naar schatting voor de helft van het gebied rekening moet worden gehouden met een verticale weerstand van 100-300 dagen. (Ernst, 1958). Hierbij is expliciet aangegeven dat het gaat om lagen die op een diepte van 1 tot 3 meter voorkomen. Daarnaast dient vermeld te worden dat de verticale weerstand ( $c$ -waarde) op basis van pompproeven in het zandgebied kan worden onderschat indien als gevolg van het pompen weerstandbiedende laagjes hoog in het profiel droogvallen.

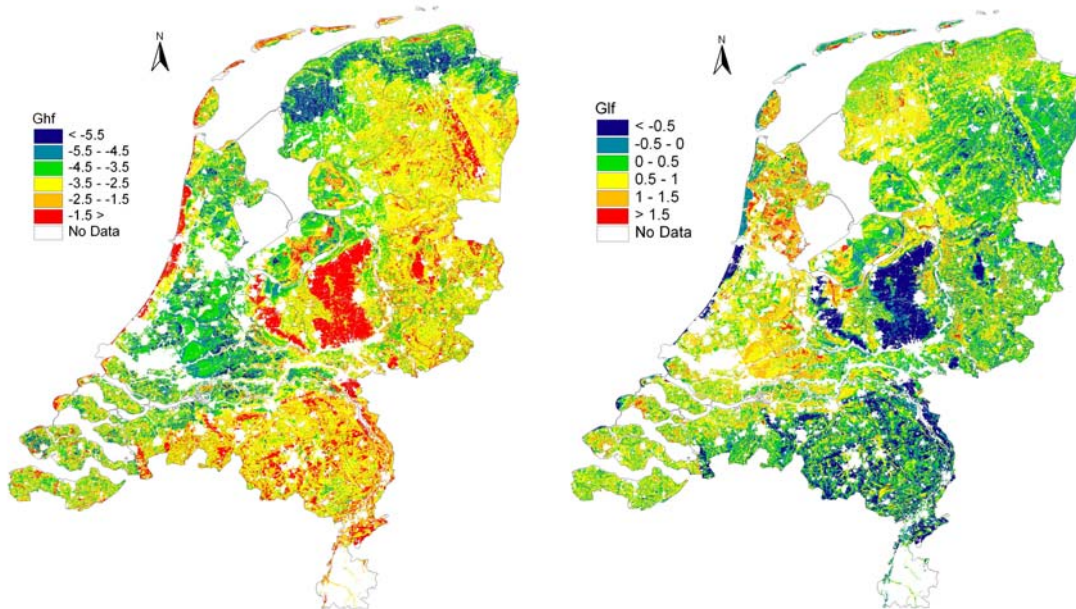
In het beschreven rekenvoorbeeld wordt de ondergrond homogeen verondersteld. In de praktijk is de ondergrond echter zelden homogeen. Afwijkende laagjes (textuursprongen, leembandjes, ijzerfibers, grofzandige en/of grindige laagjes, gliedelaagjes etc.) zijn eerder regel dan uitzondering, zowel naar plaats als in dikte en diepte en zijn daardoor niet of nauwelijks in kaart te brengen. Wel kan deze (micro)gelaagdheid een relatief grote invloed hebben op de doorlatendheid (Vereniging voor Landinrichting, 2000). Ook Van Nes (1960) geeft aan dat een pleistoceen zandpakket niet homogeen van samenstelling is, maar doorschoten is door moeilijk waterdoorlatende lenzen. Voor de horizontale doorlatendheid betekenen deze lenzen slechts een betrekkelijk onbelangrijke vernauwing van het doorstroomprofiel, maar hun invloed op de waterdoorlatendheid in verticale richting is zeer belangrijk. Dit soort lenzen en (micro)gelaagdheid zullen in het zandgebied van Nederland de voornaamste oorzaak zijn van niet verwaarloosbare verticale stijghoogteverschillen. De doorlatendheid van deze lenzen en (micro)gelaagdheid is echter lastig in het laboratorium te bepalen (Vroon *et al.*, 1988; Dekker *et al.*, 1990). De verzadigde doorlatendheid wordt thans voornamelijk in het laboratorium bepaald. De verzadigde doorlatendheid van bodemhorizonten wordt meestal gemeten in ca. 20 cm brede en 10 cm hoge PVC-ringen.

Het principe en de wijze waarop het monster genomen dient te worden en op welke wijze de doorlatendheid in het laboratorium wordt bepaald, staat uitvoerig beschreven in Bouma en Dekker (1983). De in het laboratorium bepaalde doorlatendheden komen echter zelden overeen met in situ metingen (Soil Survey Staff, 1993). De verschillen kunnen zelfs oplopen tot een factor 100. Veldmethoden zijn normaal gesproken betrouwbaarder dan laboratoriummethoden (Soil Survey Staff, 1993). Daarnaast dient te worden opgemerkt dat de gehanteerde doorlatendheid van 0.05 m/d in Nederland wordt gezien als een slechte doorlatendheid (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988) terwijl deze in de Verenigde Staten wordt gezien als matige doorlatendheid (Soil Survey Staff, 1993). Verder zal men de stromingsweerstand van de boven- en ondiepe ondergrond aan bodemkundige eigenschappen moeten ontleen en is het gewenst in verschillende gebieden het verband tussen bodemtype en doorlatendheid vast te stellen (Van Hoorn, 1960).

Hooghoudt (1955) heeft tijdens een CHO-bijeenkomst in 1951 het volgende aangegeven: *"Onverschillig of men de oplossing van een stromingsvraagstuk nu via een berekening dan wel via een modelproef oplost, in beide gevallen moeten de randvoorwaarden en de fysische bodemconstanten bekend zijn. Nu is het duidelijk, dat de nauwkeurigheid, waarmee deze gegevens kunnen worden vastgesteld, tevens de vereiste nauwkeurigheid van de oplossingsmethodiek bepaalt. Deze laatste nauwkeurigheid kan geringer zijn, naarmate de onzekerheden in de randvoorwaarden en fysische constanten groter zijn. Voor een oplossing via berekening wil dit zeggen, dat vereenvoudigde en (of) snellere methodieken toelaatbaar zijn."* Tot slot kan worden opgemerkt, dat volgens Felius (1963) *"niet de hem ter beschikking staande wiskundige en modelexperimentele bewerkingsmethode, maar zijn kennis van de geohydrologische gesteldheid van de ondergrond de hedendaagse hydroloog beperkt in het streven de hem voorgelegde vraagstukken met grote nauwkeurigheid op te lossen"*. Gezien de modelontwikkelingen ten opzichte van de ontwikkelingen in de databeschikbaarheid is deze conclusie nog steeds van kracht.

De GLG heeft betrekking op een droge situatie met een verdampingsoverschot en daarom veelal een opwaartse flux (figuur 3.6) in de onverzadigde zone. Vooral bij natte Gt's met kwel kan dit tot gevolg hebben dat het water, dat via capillaire opstijging verdwijnt, weer aangevuld wordt via het grondwater. Als gevolg van deze situatie mag men verwachten, dat de diepere potentiaal iets hoger is dan de freatische potentiaal, waardoor toestroming van kwelwater plaats kan vinden. Het potentiaalverschil is in deze situatie tegengesteld aan de situatie rond het GHG-moment (figuur 3.7). Bij de veelal hoger gelegen drogere Gt's vindt er rond het GLG-

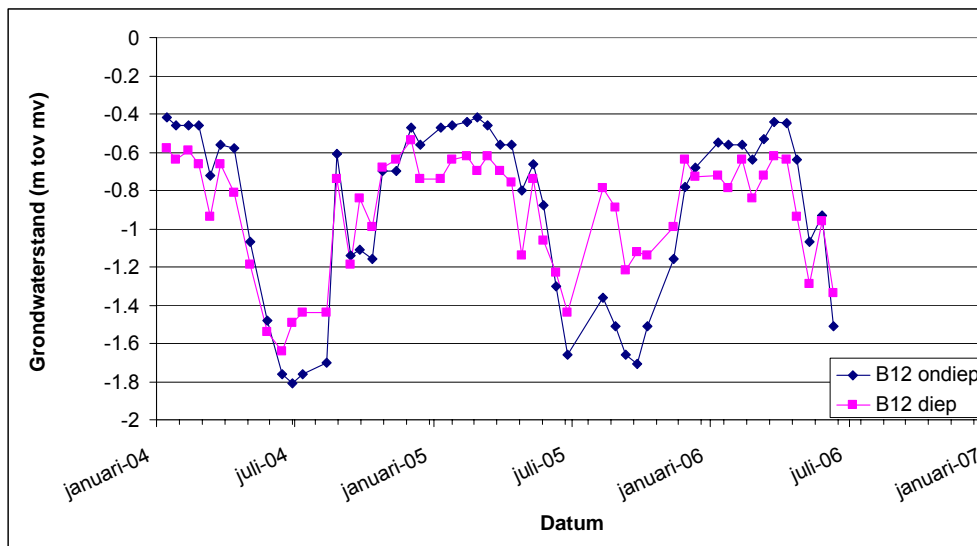
moment eveneens capillaire opstijging van grondwater plaats. Deze onttrekking van het grondwater heeft echter niet tot gevolg dat er grondwater wordt aangevoerd om dit verdampingsverlies te compenseren. De capillaire opstijging van het grondwater heeft dan alleen maar tot gevolg, dat de grondwaterstand sneller uitzakt. Indien de situatie nog droger is en er een situatie is met permanente wegzijging (hangwaterprofielen) vindt capillaire opstijging niet meer plaats. De flux door het grondwatervlak (grondwateraanvulling) wordt in droge perioden wel kleiner, maar blijft naar beneden gericht.



Gemiddelde GHF: -2.9 mm/d

Gemiddelde GLF: 0.4 mm/d

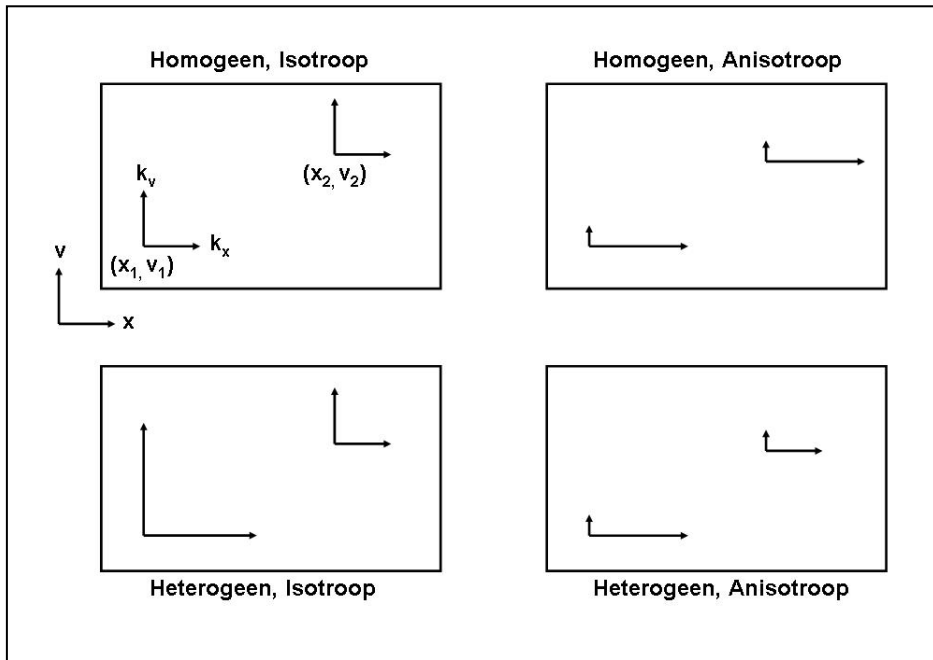
Figuur 3.6 Berekende gemiddelde flux door het grondwatervlak op GHG-moment (gemiddeld hoogste flux (GHF) (links) en op GLG-moment (gemiddeld laagste flux (GLF) (rechts)



Figuur 3.7 Stijghoogteverloop in peilbuizen met een filter boven (ondiep) en onder (diep) een keileemlaag (naar: Van der Gaast en Kiestra, 2008).

### 3.5 Anisotropie

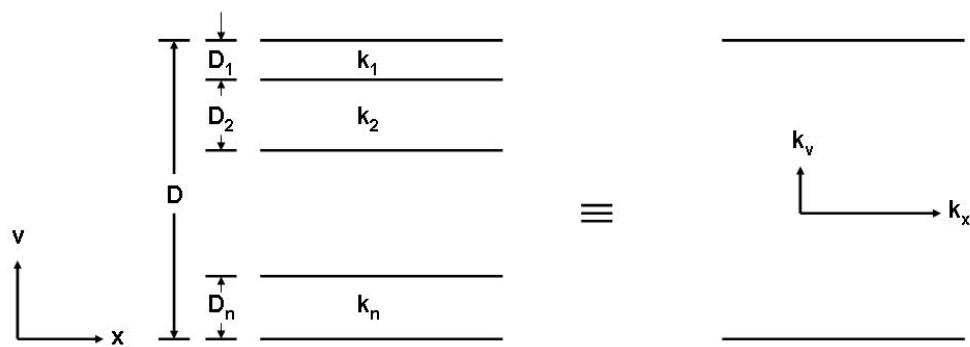
Om de doorlatendheid van de bodem te kunnen beschrijven zijn twee aspecten van belang. Het gaat hierbij om heterogeniteit en anisotropie die in vier mogelijke combinaties voor kunnen komen (figuur 3.8). De lengte van de peilen in figuur 3.8 geven de relatieve grootte van doorlatendheid in de x- en v-richting aan. In een homogeen medium zijn de hydraulische eigenschappen van het grondwatersysteem onafhankelijk van de plaats binnen de geologische formatie. In een isotroop medium zijn de eigenschappen op een locatie binnen het medium in alle richtingen hetzelfde. De primaire oorzaak van anisotropie op een gedetailleerd schaalniveau is bijvoorbeeld de oriëntatie van kleimineralen.



Figuur 3.8 Vier mogelijke combinaties van heterogeniteit en anisotropie (Naar Freeze en Cherry, 1979)

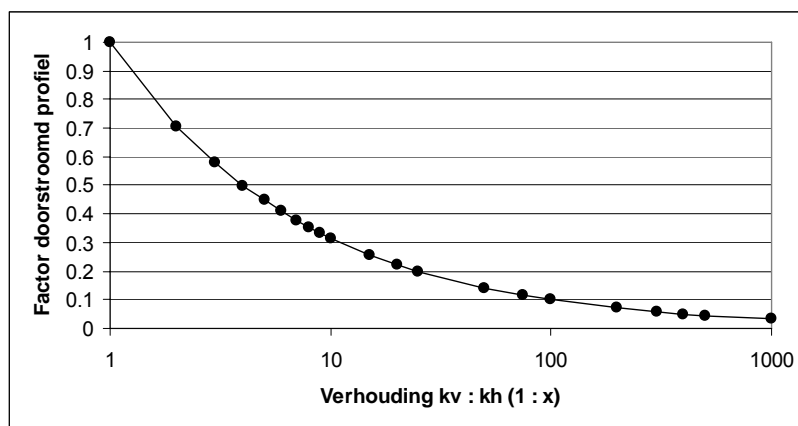
Op een grotere schaal bestaat er een relatie tussen heterogeniteit en anisotropie (figuur 3.9). Indien een gelaagde formatie bestaat uit afzonderlijke homogene en isotrope lagen dan zal de formatie als geheel zich gedragen als een homogene anisotrope laag (figuur 3.8 rechtsboven). Aangezien bij verticale stroming de lagen in serie voorkomen wordt de verticale doorlatendheid van de formatie berekend op basis van het harmonisch gemiddelde. Bij horizontale stroming komen de lagen parallel voor, waardoor de horizontale doorlatendheid wordt berekend op basis van het rekenkundig gemiddelde. De verticale doorlatendheid ( $k_v$ ) en de horizontale doorlatendheid ( $k_x$ ) kunnen met de volgende formules worden berekend (Freeze en Cherry, 1979):

$$k_v = \frac{D}{\sum_{i=1}^n D_i / k_i} \quad k_x = \sum_{i=1}^n \frac{k_i D_i}{D} \quad (3.2)$$



Figuur 3.9 Relatie tussen gelaagde heterogeniteit en anisotropie (naar: Freeze en Cherry, 1979)

De formules geven de horizontale en verticale doorlatendheid voor een homogene maar anisotrope afzetting indien niet alle lagen afzonderlijk worden beschouwd. Op basis van deze formules kan worden geconcludeerd dat de horizontale doorlatendheid van gelaagde afzettingen met een verschil in doorlatendheid altijd hoger is dan de verticale doorlatendheid. Veel watervoerende pakketten zijn afgezet in min of meer gelaagde structuren, waardoor de horizontale doorlatendheid groter is dan de verticale doorlatendheid (Dalton *et al.*, 2007). Dit heeft mede tot gevolg dat de verticale stijghoogteverschillen groter zijn (Fetter, 1980) en de grondwaterstroming minder diep zal zijn (Vreedenburgh, 1935; De Vries, 1974; Dalton *et al.*, 2007). De diepte van de grondwaterstroming in een homogeen isotroop pakket is gelijk aan  $\frac{1}{4}$  maal de slootafstand. De diepte van de grondwaterstroming in een homogene anisotrope aquifer is altijd minder diep en dient te worden vermenigvuldigd met de factor  $\sqrt{k_v/k_x}$  (Vreedenburgh, 1935; De Vries, 1974), die gezien het voorgaande per definitie kleiner is dan 1. De diepte van de grondwaterstroming wordt bij een geringe anisotropie al sterk verminderd (figuur 3.10).



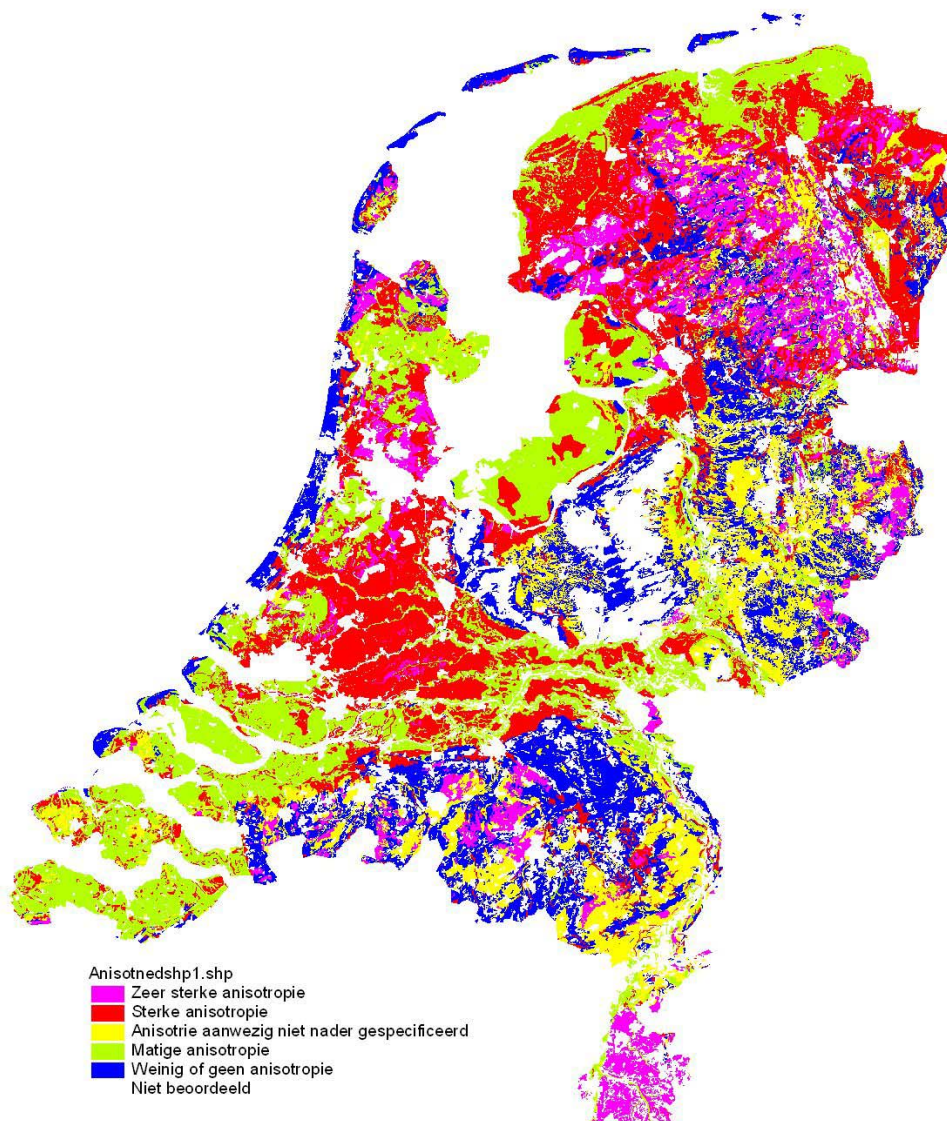
Figuur 3.10 Relatie tussen het doorstroomd profiel bij een homogeen isotroop pakket en een homogeen anisotroop pakket voor verschillende factoren van  $\sqrt{k_v/k_x}$

Anisotropie is dus mede afhankelijk van de gehanteerde schaal. Bij bodemkarteringen kunnen niet altijd alle afzonderlijke laagjes worden meegenomen. Dit heeft vaak tot gevolg dat de aanwezige laagjes in een bodemprofiel in zijn geheel als een bodemhorizont wordt beschreven (bijv. lössleem). Daarnaast wordt de bodem bij modellering veelal in een gering aantal lagen gemodelleerd. Daarom is de mate van deze gelaagdheid en de invloed hiervan op de grondwaterstand in de vorm van een anisotropiekaart vastgelegd (§ 3.6).



### 3.6 Ruimtelijke verbreiding van anisotropie

Om een indruk te krijgen van de ruimtelijke verbreiding van anisotropie en daarmee van gebieden met potentieel grotere verschillen tussen de freatische grondwaterstand en de grondwaterstand in peilbuizen, is een landsdekkende anisotropiekaart gemaakt (figuur 3.11). Deze kaart is op basis van bodemkundige kenmerken afgeleid van de landsdekkend digitaal beschikbare bodemkaart 1:50.000 en heeft daarom betrekking op de bodem tussen maaiveld en 1,20 m-mv. In de kaart zijn in totaal zes klassen onderscheiden, die aangeven in welke mate anisotropie en de daarmee samenhangende effecten op de freatische grondwaterstand, als gevolg van potentiaalverschillen, verwacht kunnen worden. Hiervoor zijn de bodemcodes op de bodemkaart vertaald naar een anisotropieklasse. Bij het vertalen van de bodemcodes naar een anisotropieklasse is vooral gekeken naar de opbouw van het bodemprofiel. In de praktijk is het bodemprofiel echter zelden homogeen opgebouwd. Dit geldt in feite voor de meeste gronden in Nederland.



*Figuur 3.11 Anisotropiekaart*

Het afzettingsmilieu is een belangrijke factor, waardoor uiteindelijk anisotropie een rol gaat spelen tijdens het gehele vochttransport in de bodem. In zandgronden (o.a. in oud dekzand) treedt veelal een micro-gelaagdheid op, waardoor binnen een bepaalde horizont laagjes met afwijkende granulaire samenstelling en dichtheid voorkomen. Deze afwijkende laagjes in de vorm van leembandjes, kazige B-horizonten, waterhardlagen, humusfibers, gliede laagjes etc. variëren zowel naar plaats als in dikte en diepte en zijn hierdoor nauwelijks in kaart te brengen. Deze microgelaagdheid kan een relatief grote invloed hebben op zowel de verzadigde als ook op de onverzadigde doorlatendheid. Doordat deze gelaagdheid tijdens het karteren van de bodem veelal niet afzonderlijk wordt meegenomen en/of dat de aanwezige laagjes in een bodemprofiel in zijn geheel als een bodemhorizont wordt beschreven heeft dit vooral gevolgen voor de af te leiden/toe te kennen horizontale en verticale doorlatendheid in vergelijking met overeenkomstige horizonten waarvoor de microgelaagdheid ontbreekt.

De verschillen treden vooral op in de bodemprofielen die bijvoorbeeld gelegen zijn in de overstromingsgebieden van beeksystemen (o.a. beekerdgronden) in Nederland. In deze profielen wordt veelal een sterk wisselende opbouw van diverse bodemhorizonten aangetroffen. In deze profielen wisselen klei, zand en soms veenlaagjes elkaar af en vertonen deze klei-, zand- en veenhorizonten veelal ook afzonderlijk een microgelaagdheid, waardoor het gehele bodemprofiel een extreme gelaagdheid te zien geeft. Dit wordt in sommige situaties versterkt, indien er als gevolg van een extreme ijzeraanrijking tevens verkittingen in bepaalde delen van het bodemprofiel optreden. Hierdoor komen er als gevolg van deze meer extreme vorm van anisotropie in het bodemprofiel (tijdelijk) stijghoogteverschillen voor die zich in meer extremere situaties manifesteren in de vorm van schijnspiegels. Doordat het meeste moedermateriaal in meer of mindere mate horizontaal is afgezet, zal in het algemeen de horizontale doorlatendheid van een gekarteerd en/of geschematiseerd bodemhorizont groter zijn dan de verticale doorlatendheid. In oud dekzand werd dit o.a. aangetoond door het onderzoek van Vroon en Dekker (1988, 1990) naar de verticale en horizontale doorlatendheid van waterhardlagen in diverse zandgebieden van Nederland.

Op basis van de anisotropiekaart kan worden geconcludeerd dat ongeveer 50% van het areaal in Nederland in meer of mindere mate te maken heeft met het voorkomen van anisotropie (tabel 3.1; klasse 1 t/m 4). Hierbij dient te worden opgemerkt dat de bodem- en Gt-kaart is gebaseerd op een beperkte boordiepte, waardoor alleen de informatie over de eerste 1,2 meter kan worden meegenomen. Dit kan tot gevolg hebben dat de mate van anisotropie en de invloed hiervan op stijghoogteverschillen wordt onderschat. De anisotropie in het onverzadigde deel van de bodem is van minder belang voor verschillen in stijghoogte.

*Tabel 3.1 Verdeling van de anisotropieklassen over Nederland.*

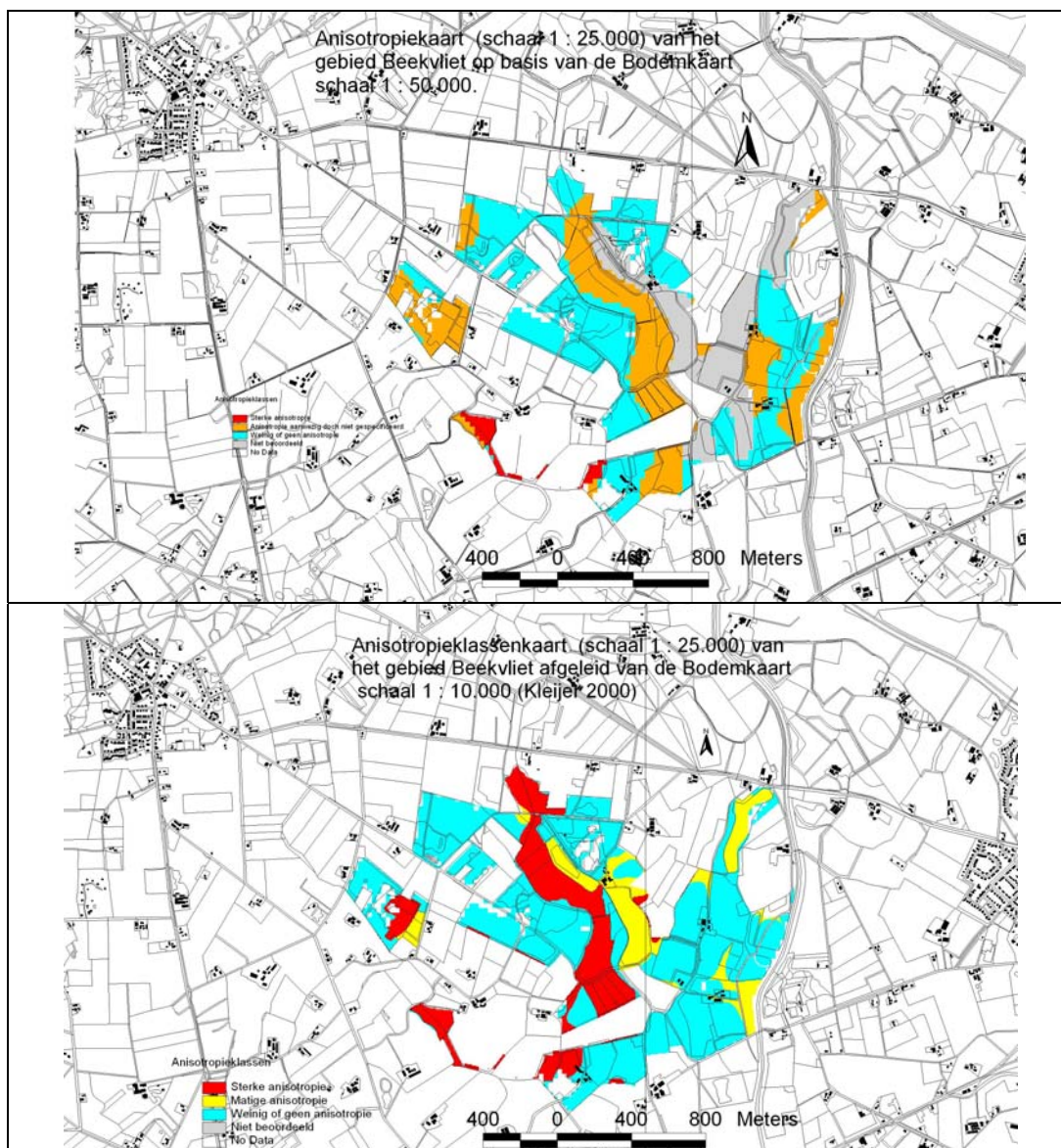
Anisotropieklasse	Oppervlakte	
	(ha)	(%)
1 Zeer sterk	319 555	7.0
2 Sterk	795 199	17.5
3 Aanwezig	379 154	8.3
4 Matig	680 802	15.0
5 Weinig of geen	546 615	12.0
6 Niet beoordeeld	1 827 161	40.2
Totaal	4 548 486	100.0

In Kader 1 worden de onderscheiden klassen op de anisotropiekaart toegelicht.

### **Kader 1. Onderscheiden klassen op de anisotropiekaart:**

- 1) Klasse 1: Zeer sterke anisotropie. Deze gronden hebben een extreme vorm van anisotropie. Dit uit zich in het veelvuldig optreden van schijnspiegels tijdens periodiek nattere perioden. Deze schijnspiegels zijn langdurig aanwezig (bv KX, keileemgronden).
- 2) Klasse 2: Sterke anisotropie. Deze gronden hebben een minder extreme vorm van anisotropie, doch treden er ook hier tijdelijk schijnspiegels op alleen in een minder extreme vorm. Dit geeft bijvoorbeeld problemen bij het plaatsen van grondwaterstandsbuizen. De diepte van de buis bepaalt in zekere mate ook de 'stand' van het grondwater (bv Rn44c; kalkloze, zware kleigronden rustend op een ondergrond van zware klei)
- 3) Klasse 3: Anisotropie aanwezig doch niet gespecificeerd. De bodemkaart geeft bij een aantal bodemtypen onvoldoende detailinformatie voor het toekennen van een bepaalde vorm van anisotropie. Er is in het bodemprofiel van dit bodemtype echter wel een vorm van anisotropie aanwezig. Een mooi voorbeeld hiervan zijn de lemige podzolgronden (Hn23) in het zuidoostelijk deel van Brabant. Dit zijn meestal zeer sterk lemige podzolgronden (hebben meestal een sterke of zeer sterke vorm van anisotropie in het bodemprofiel), die zijn ontwikkeld in lössleemachtig materiaal. Op de bodemkaart schaal 1 : 50.000 worden deze gronden aangeduid als Hn23. Op basis van deze informatie is een nadere indeling niet mogelijk. Hierdoor is besloten deze groepen van gronden onder te brengen in klasse 3. In deze klasse zitten dus gronden met een anisotropie klasse 1, 2 of 4.
- 4) Klasse 4: Matige anisotropie. Als gevolg van deze mate van anisotropie in het bodemprofiel treden alleen tijdens periodiek natte perioden korte momenten van schijnspiegels op. Deze kleine schijnspiegels zijn meestal enkele dagen aanwezig. Een mooi voorbeeld zijn de zavelgronden met bijv zand beginnend binnen 120 cm-mv (Rn12c; kalkloze, lichte zavelgronden rustend op een zandondergrond). Tijdens nattere perioden treden in deze gronden tijdelijk schijnspiegels op die soms duidelijk in de vorm van plassen op de percelen zijn waar te nemen. Een probleem binnen deze groep zijn de beekkleigronden. Deze gronden vallen namelijk ook binnen de bodemcode "Rn" doch hebben een extremere vorm van anisotropie dan de rivierkleigronden. Deze gronden zijn niet in een andere klasse in te delen (veelal 1 klasse verschil), omdat de bodemkaart schaal 1 : 50.000 hierover onvoldoende informatie geeft. Dit heeft tot gevolg dat de toegekende anisotropieklasse aan de beekkleigronden (Rn\*\*) in het oostelijke en zuidelijke deel van Nederland meestal is onderschat. Deze gronden hebben meestal een extremere vorm van anisotropie dan de rivierkleigronden (Rn\*\*) afgezet door de grote rivieren in Nederland.
- 5) Klasse 5: Weinig of geen anisotropie. Dit zijn de zogenaamde 'open' profielen. In deze gronden treedt nauwelijks of geen anisotropie op. Als gevolg hiervan zijn er ook weinig of geen verschillen te verwachten in de stand van het 'grondwater' in peilbuizen die zijn geplaatst op verschillende dieptes naast elkaar (bv pZn21, leemarme en zwaklemige, fijnzandige gooreerdgronden).
- 6) Klasse 6: Niet beoordeeld. Een grote groep van bodemtypen kan op basis van de informatie op de bodemkaart schaal 1 : 50.000 niet worden beoordeeld, omdat zij onvoldoende informatie geeft over de opbouw van het bodemprofiel (b.v. Y23, lemige, fijnzandige moderpodzolgronden). Het betreft meestal de droge of zeer droge gronden op Gt VII en VIII.

Voor het gekozen pilotgebied Beekvliet in deze studie (§ 6.1) is aan het eind van de jaren negentig uit de vorige eeuw ook een gedetailleerde bodemkaart schaal 1 : 10.000 gemaakt (Kleijer, 2000). Om een indruk te krijgen van de kwaliteit van de landelijke kaart is voor het pilotgebied Beekvliet een vergelijking gemaakt tussen de anisotropieklassenkaart op basis van de landsdekkend beschikbare bodem- en grondwatertrappenkaart (1 : 50 000) en deze detailkaart. Op basis van de bodemkundige informatie op deze kaart en de bodemkundige informatie uit de boorbeschrijvingen is van hetzelfde gebied een gedetailleerde anisotropie kaart gemaakt (zie figuur 3.12). Indien beide anisotropiekaarten met elkaar worden vergeleken blijkt, dat ca. 45 % van het gebied een overeenkomstige anisotropieklasse heeft.



*Figuur 3.12 Anisotropiekaart voor Beekvliet op basis van de bodemkaart 1 : 50.000 (boven) en op basis van een detailkartering met een schaal 1 : 10.000 (beneden).*

Hierbij dient echter wel te worden opgemerkt, dat de klasse niet beoordeeld (anisotropiekaart afgeleid van de bodemkaart schaal 1 : 50.000) wel in de vergelijking is meegenomen. Uit de gedetailleerde anisotropiekaart blijkt ook dat het oppervlakteaandeel van de klasse 'sterke anisotropie' aanzienlijk groter is (ca. 20 %) dan het oppervlakteaandeel van 2 %, zoals die is afgeleid uit de bodemkaart schaal 1 : 50.000. Dit wordt met name veroorzaakt door de aanwezigheid van beekerdgronden met een slecht tot zeer slecht doorlatend kleidek (Kleijer, 2000). Dit kleidek is op de bodemkaart schaal 1 : 50.000 in een groot deel van het gebied Beekvliet niet onderscheiden. Op de anisotropiekaart (afgeleid van de bodemkaart schaal 1 : 50.000) zijn deze gronden geklassificeerd als zijnde gronden waarin anisotropie voorkomt doch door het ontbreken van voldoende bodemkundige informatie niet nader is gespecificeerd. Uit de informatie afkomstig van de gedetailleerde bodemkaart en de bodemkundige boorpuntinformatie, is het ook mogelijk om de mate van anisotropie in de droge gronden (Gt VII en VIII) te klassificeren. Ook in deze droge gronden komt anisotropie

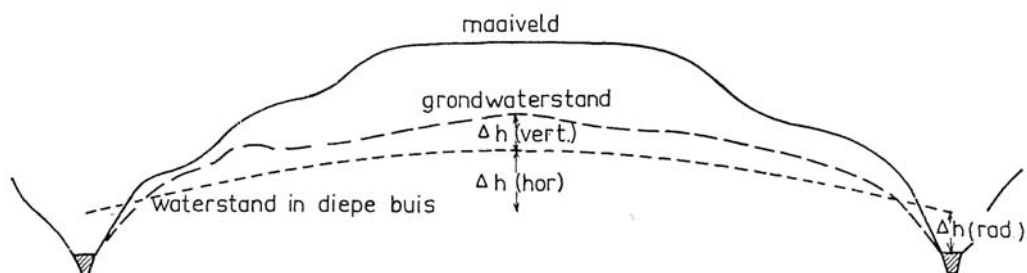


voor. Het betreft vooral waterstagnerende verkitte bodem- en/of leemlagen. Indien de gedetailleerde anisotropiekaart wordt vergeleken met de anisotropiekaart die is afgeleid op basis van de bodemkaart schaal 1 : 50.000 blijkt dat het aandeel 'open gronden' met een oppervlak van ca. 112 ha (67 %) ook op deze kaart het meest is vertegenwoordigd.

In het algemeen blijkt verder dat de anisotropiekaart die is afgeleid van de bodemkaart schaal 1 : 50.000 redelijk overeenkomt met de anisotropiekaart die is afgeleid van de gedetailleerde bodemkaart. De verschillen in anisotropie tussen beide kaarten zijn vooral het gevolg van verschillen in kaartschaal ((schaal 1 : 10.000 (gedetailleerde informatie) versus schaal 1 : 50.000 (globalere informatie)) en boordiepte 1,20 m-mv. (schaal 1 : 50.000) versus 1,80 m-mv (schaal 1 : 10.000).

Uit deze vergelijking komt naar voren dat in het pilotgebied de mate van anisotropie, indien gebruik wordt gemaakt van de 1 : 50.000 bodem- en Gt-kaart, wordt onderschat. Vooral het aandeel sterke anisotropie is op basis van de detailkaart groter. Daarnaast kan door de grotere boordiepte een groter areaal voor anisotropie worden beoordeeld, waaruit blijkt dat ook op grotere diepte storende lagen voorkomen.

De anisotropiekaart geeft een beoordeling van het gehele bodemprofiel tot 1,20 m-mv. Voor de grondwaterstand is echter de anisotropie van het verzadigde deel van de bodem van belang. Aangezien de grondwaterstand in de tijd fluctueert, zal ook het traject van de bodem waarvoor anisotropie van belang is in de tijd variëren. Daarnaast kan ook voor de lagen dieper dan 1,2 m-mv anisotropie voorkomen. Hierdoor geeft de bodemkaart slechts inzicht in een deel van de totale anisotropie, die van belang is bij meten van grondwaterstanden. Indien gekeken wordt naar het belang van gelaagdheid en de invloed daarvan op de grondwaterstroming is door Ernst (1958), in het kader van een studie in een stroomgebied in Noord-Limburg, aangegeven dat voor de verticale weerstand de slecht doorlatende lagen op geringe diepte van belang zijn. De afvoer van overtollig regenwater gaat bij dergelijke lagen met een diepte van 3 à 4 meter verticaal naar beneden, aangezien het geleidend vermogen meestal pas in hieronder gelegen grove lagen voldoende is om een horizontaal transport over grote afstanden mogelijk te maken. Een verhoging van de opbolling van de grondwaterspiegel is hiervan het gevolg (figuur 3.13). Het is ook mogelijk om de drie verschillende weerstandscomponenten van de drainageweerstand (verticaal, horizontaal en radiaal) uit de grondwaterstroming te bepalen (van Hoorn, 1960).



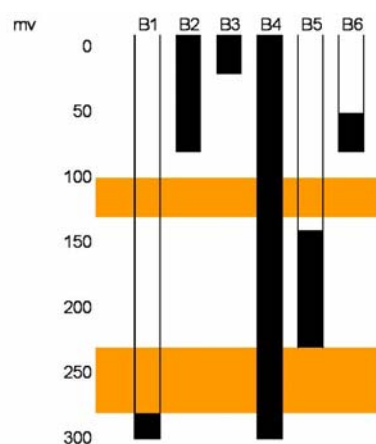
Figuur 3.13 Schematische weergave van de stijghoogteverschillen die de verschillende componenten van de drainageweerstand bepalen (naar: van Hoorn, 1960).

Bij de bepaling van de weerstanden uit de grondwaterstroming is het noodzakelijk de totale drukhoogte te splitsen in drie componenten. De verticale drukhoogte wordt gevonden als het verschil tussen de stand van het grondwater in een ondiepe buis en de stand van het (semi)spanningswater in een diepe buis ( $\Delta h$  (vert)). De horizontale drukhoogte als het verschil tussen de stand van het (semi)spanningswater midden tussen de open watergangen en ter hoogte van de open watergang (in het algemeen te extrapoleren volgens een parabolisch verloop) ( $\Delta h$  (hor)). De radiale en intree drukhoogte als het verschil tussen de stand van het

(semi)spanningswater ter hoogte van de open watergang en de waterstand in de open watergang ( $\Delta h$ (rad) figuur 3.13).

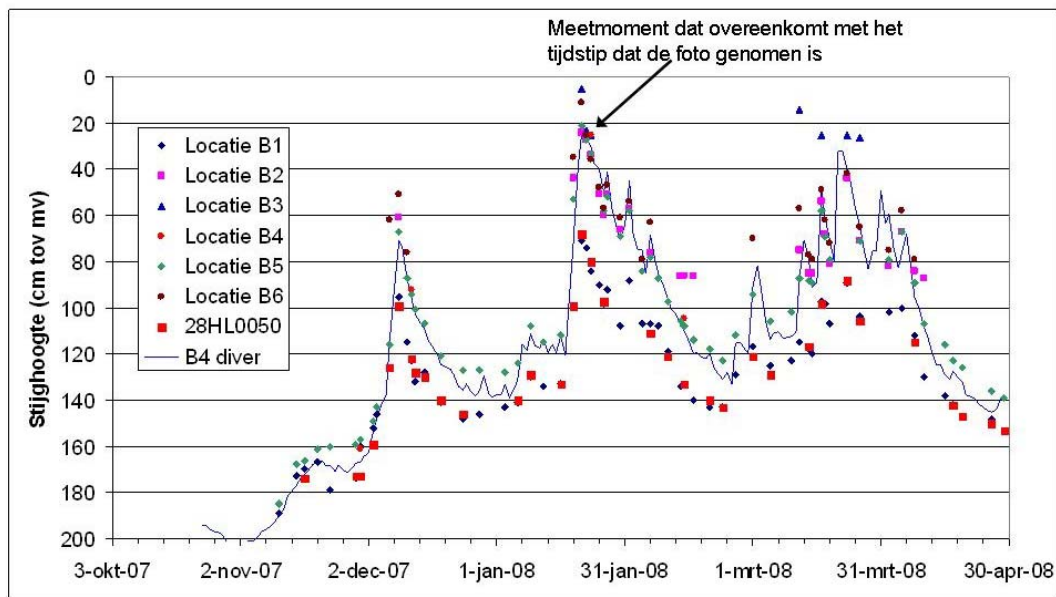
### 3.7 Illustratie op basis van recente metingen

Voor voorbeelden van gemeten stijghoogteverschillen in zandgebieden die in het verleden gemeten zijn wordt verwezen naar Bijlage 3. Recentelijk zijn in de buurt van Weerselo op korte afstand van een bestaande peilbuis, die binnen het invloedsgebied van een drinkwaterwinning gelegen is, metingen uitgevoerd waarbij gebruik is gemaakt van meerdere peilbuizen op verschillende dieptes op één locatie. Op deze locatie zijn 6 peilfilters geplaatst waarbij de filterstelling zo goed mogelijk is afgestemd op de bodemkundige situatie (figuur 3.14). In figuur 3.14 zijn de filters weergegeven in de vorm van een zwarte kolom. In het bodemprofiel, een sterk lemige zeer fijnzandige humuspodzolgrond (Hn35), komen enkele sterk tot zeer sterk lemige laagjes voor (veelal lössleemlaagjes) die in figuur 3.14 met bruine banden zijn weergegeven. In figuur 3.15 zijn de meetgegevens voor de verschillende peilbuizen weergegeven.



*Figuur 3.14 Schematische weergave van de filterstelling (het geperforeerde deel van de peilbuizen is als een zwart blok weergegeven; leemlagen zijn in de vorm van een bruine band weergegeven) en foto van de meetlocatie onder natte omstandigheden (23 januari 2008)*

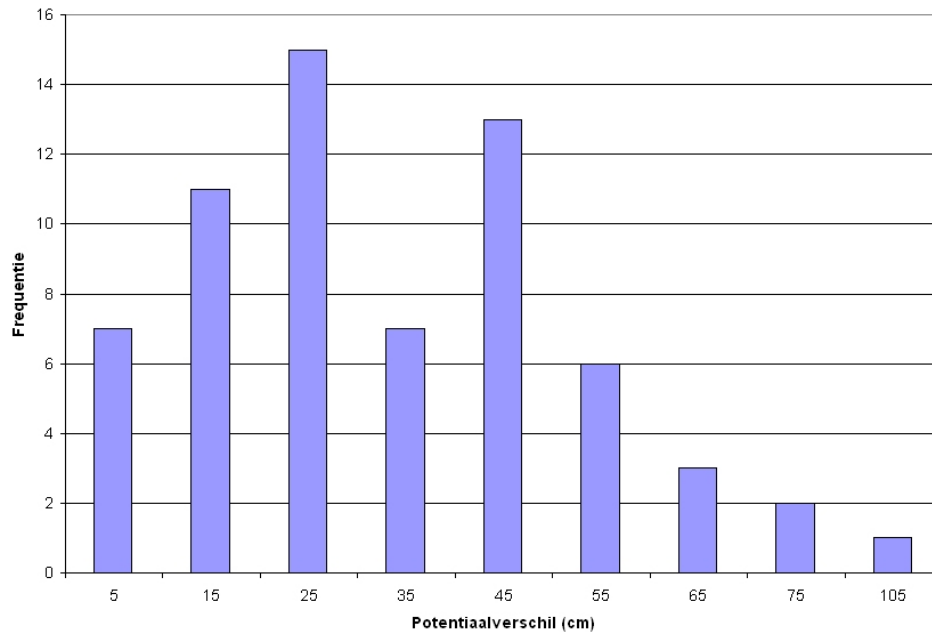
De peilfilters zijn onderling op enkele meters afstand geplaatst (zie foto). In het totaal geperforeerde filter (B4) is een drukopnemer geplaatst, hetgeen is weergegeven in de vorm van een doorgetrokken lijn (figuur 3.15).



Figuur 3.15 Tijd-stijghoogtelijnen voor alle peilfilters

Op ongeveer 10 meter afstand staat een peilbuis (28HL0050) welke waargenomen wordt in het kader van een drinkwaterwinning. De stijghoogte in deze peilbuis komt goed overeen met het diep geplaatste peilfilter (Locatie B1). In figuur 3.15 zijn de stijghoogteverschillen tussen de verschillende peilbuizen duidelijk waarneembaar. Om een indruk te krijgen van de verschillen tussen de stijghoogte in een diep geplaatst peilfilter en de freatische grondwaterstand is een frequentieverdeling gemaakt van het maximale verschil (figuur 3.16). Het maximale verschil is gebruikt aangezien het freatische vlak wordt aangegeven door de piëzometer die zo kort is dat er nog net water in komt. Uit deze analyse blijkt dat de verschillen in de gemeten stijghoogten tussen de diverse peilbuizen langdurig kunnen voorkomen en zelfs op kunnen lopen tot ca. 1 meter. Daarnaast kan worden opgemerkt dat de gemeten stijghoogte-verschillen voor het merendeel betrekking hebben op een situatie, waarbij zowel de diepe als de ondiepe stijghoogte boven het niveau van de leemlaag(en), die het merendeel van het peilverschil veroorzaken, uitkomen. Hierdoor kan men aannemen, dat het voornamelijk gaat om een verzadigde grondwatersituatie en er niet of nauwelijks gesproken kan worden over een schijngrondwaterstand. Ook blijkt dat het gebruik van een totaal geperforeerd filter een min of meer gemiddelde grondwaterstand aangeeft en in deze situatie ook de freatische grondwaterstand niet reëel weergeeft. Dit aspect is indertijd bij de COLN-kartering ook onderkend en gezien de indertijd gehanteerde geringe meetdiepte geaccepteerd (Visser, 1958).

Deze constatering kan tot gevolg hebben, dat het incidenteel meten van de grondwaterstand met behulp van open boorgaten, de zogenaamde gerichte opnames, indien te diep is doorgeboord, niet altijd overeen hoeft te komen met de freatische grondwaterstand. De meetgegevens geven ook aan dat het correleren van incidentele metingen aan peilbuizen bedenkelijk is en dat het resultaat wordt bepaald door het moment van opname en de filterstelling van de peilbuizen die gebruikt worden bij de correlatie.



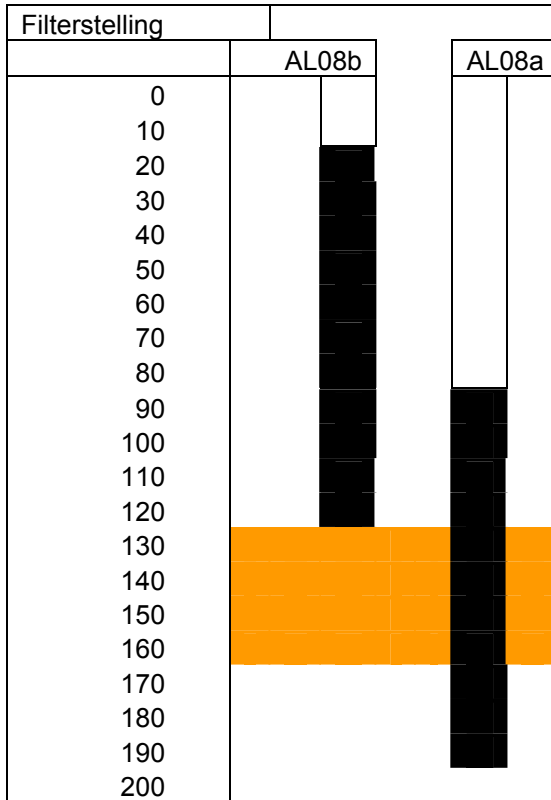
*Figuur 3.16 Frequenties van het maximale potentiaalverschil tussen de diepe peilbuis (B1) en één van de ondiepere peilfilters*

In een bodemkundig-hydrologisch onderzoek, dat in 2007 en 2008 (Vroon en Brouwer, 2008) in het waterwingebied Vierlingsbeek is uitgevoerd zijn recentelijk eveneens metingen verricht. Tijdens het veldbodemkundig onderzoek zijn in dit gebied, als gevolg van weerstandbiedende lagen (o.a. lössleem laagjes of kazige B-horizonten) in het bodemprofiel, op veel plaatsen stijghoogteverschillen waargenomen. Dit werd zowel in boorgaten als ook in grondwaterstandsbuizen geconstateerd. Om het effect van deze storende lagen op de grondwaterstand, met behulp van metingen te kunnen aantonen, zijn op diverse locaties in het gebied buizen geplaatst met het filter tot vlak boven de lössleemlaag (of sterk lemige laag) en door de leemlaag heen. In figuur 3.17 staat als voorbeeld de filterstelling van de grondwaterstandsbuizen AL08a en AL08b weergegeven. In figuur 3.17 zijn de filters weergegeven in de vorm van een zwarte kolom. In het bodemprofiel (zwak lemig, matig fijnzandige gooreerdgrond: tZn53) komt een lössleemlaag voor die in de figuur met een bruine band is weergegeven. De ondergrond net onder de bouwvoor (ca. 30 cm dik) is tot deze laag opgebouwd uit goed tot zeer goed doorlatend, matig fijn, leemarm dekzand. De laag net onder de lössleem bestaat uit een zeer goed doorlatende grofzandige laag.

De peilfilters zijn onderling op ca. 1,3 meter afstand geplaatst (figuur 3.18). In figuur 3.19 zijn de meetgegevens van de twee peilbuizen weergegeven. In de figuur zijn de stijghoogteverschillen tussen de beide peilbuizen duidelijk waarneembaar. De gemeten stijghoogteverschillen kunnen oplopen tot ongeveer 50 cm. Het diepste peilfilter geeft meestal de diepste stijghoogte. Het stijghoogteverschil bedraagt in natte perioden al snel enkele decimeters. In drogere perioden neemt het stijghoogteverschil af naar enkele centimeters. In sommige perioden (b.v. mei en juni 2008) is de stijghoogte in het diepste peilfilter enkele decimeters ondieper dan de stijghoogte in het ondiepe filter. Dat de stijghoogte in het diepste peilfilter in drogere situaties ondieper is dan de stijghoogte in het ondiepe peilfilter heeft te maken met het feit dat de stijghoogte onder de lössleem in drogere periode hoger is als gevolg van de voeding vanuit de direct aangrenzende dekzandruggen. Deze kwel in droge periode wordt voor een deel gekeerd door de hoge verticale weerstand van de lössleem. Het



stijghoogteverschil in droge perioden wordt beïnvloed door de verdampingsvraag boven de lössleem en het verloop van de stijghoogte onder de lössleem in de tijd (fase). Door de afwisseling van kwel en wegzijging kunnen gedurende het jaar aanzienlijke verschillen optreden tussen de grondwaterstanden boven en onder de lössleemlaag. Daarnaast heeft de afwisseling van kwel in droge perioden en wegzijging in natte perioden tot gevolg dat de diepe stijghoogte minder fluctuatie heeft dan de ondiepe freatische stijghoogte, wat ook tot uiting komt in figuur 3.7.

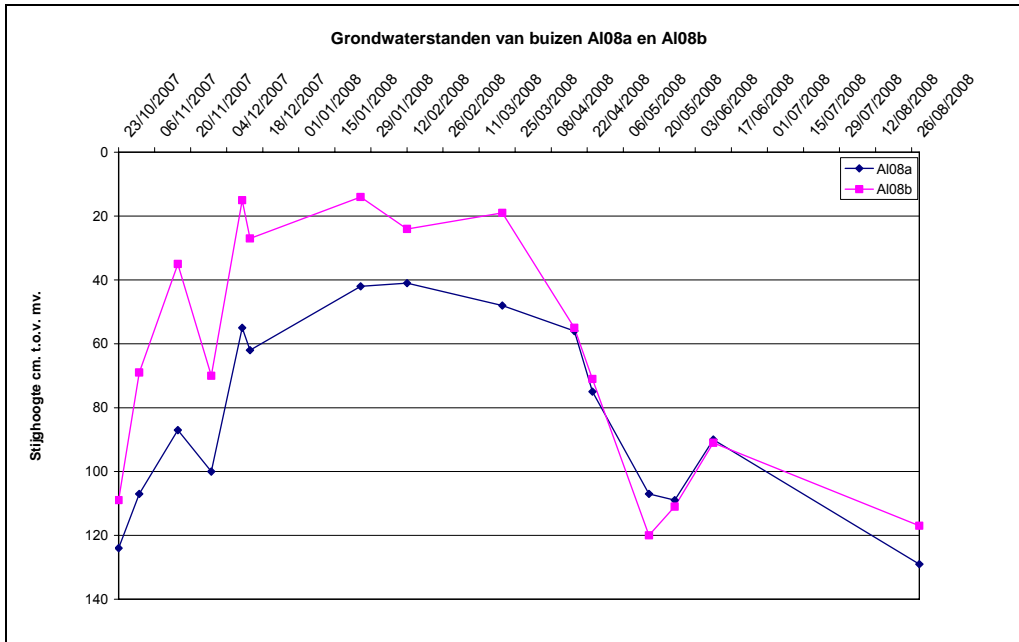


*Figuur 3.17 Schematische weergave van de filterstelling van buizen AL08a en AL08b (het geperforeerde deel van de peilbuizen is als een zwart blok weergegeven; de lössleemlaag is in de vorm van een bruine band weergegeven)*

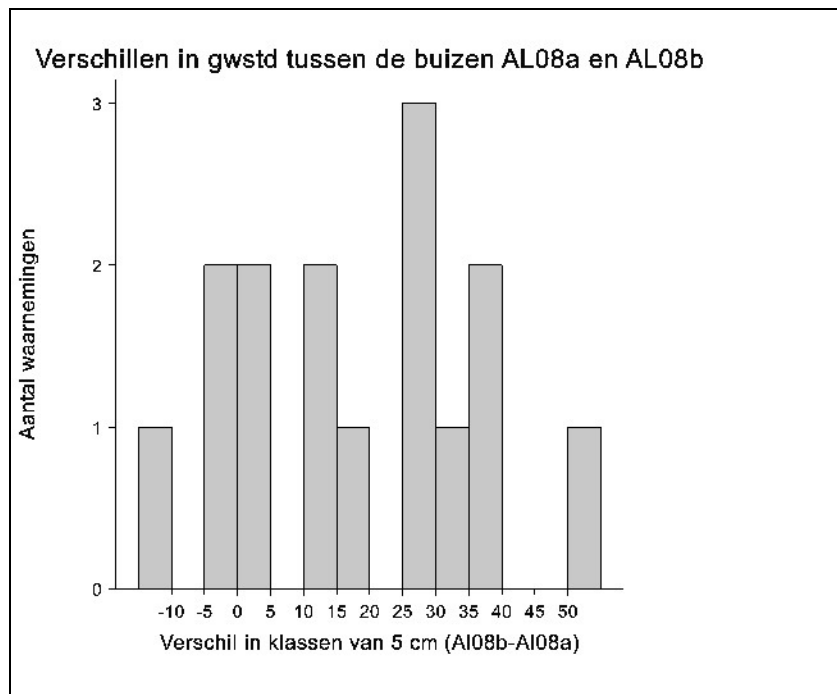


*Figuur 3.18 Ligging van twee door Alterra geplaatste grondwaterstandsbuizen (AL08b (ondiep) en AL08a (diep) op een locatie met een storende laag (lössleem) in het bodemprofiel*

Er dient voor het bovenstaande nog te worden opgemerkt, dat het gebruik van een totaal geperforeerd filter een min of meer gemiddelde grondwaterstand aangeeft en dit peilfilter de grondwaterstand zowel onder de lössleemlaag als ook boven deze laag niet goed weergeeft. Om een indruk te krijgen van de verschillen tussen de stijghoogte in het diep geplaatste peilfilter (AL08b) en de freatische grondwaterstand (AL08a) is een frequentieverdeling (klassen van 5 cm) gemaakt van het verschil (Figuur 3.20).



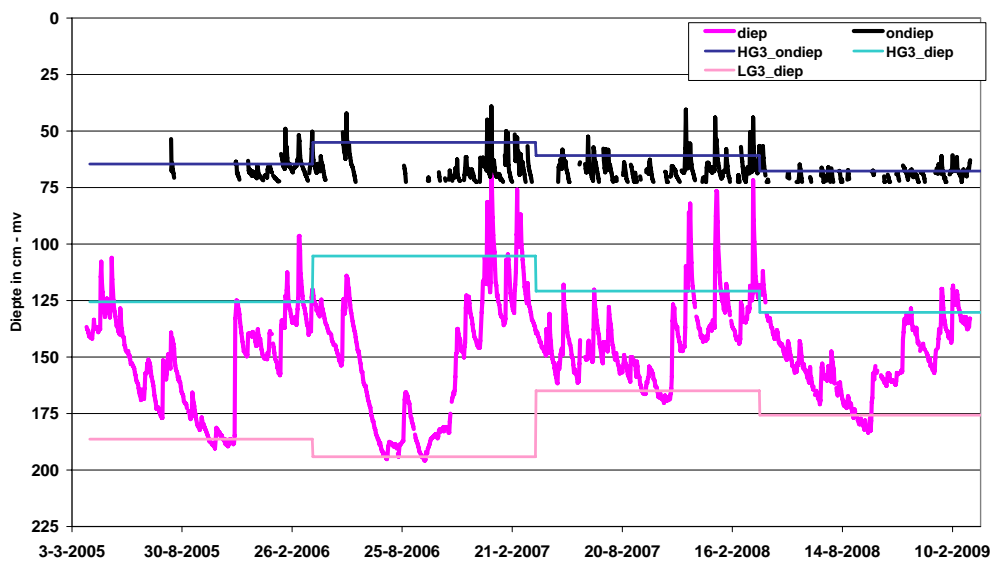
Figuur 3.19 Tijdstijghoogte grafiek van de grondwaterstanden in de buizen AL08a en AL08b



Figuur 3.20 Frequentieverdeling in klassen van 5 cm van het verschil in grondwaterstanden tussen buis AL08a en AL08b

Uit figuur 3.20 blijkt dat de verschillen langdurig voorkomen en op kunnen lopen tot ruim 50 cm. Uit een statistische analyse (two sample nonparametric test, de Wilcoxon matched-pairs test) van de gemeten grondwaterstanden in de buizen AL08a en AL08b blijkt, dat de grondwaterstanden in beide buizen significant (probability = 0.003, (tweezijdig bij een overschrijdingskans van 5 %)) van elkaar verschillen. Op basis van deze informatie heeft men bij het schatten van de GHG en GLG rekening gehouden met het voorkomen van weerstandbiedende lagen in het bodemprofiel. In dit gebied zijn niet alleen weerstandbiedende lagen in de vorm van lösslemlagen aangetroffen, maar uit metingen is ook gebleken dat b.v. een sterk lemige laag of een dichte pakking van het moedermateriaal of een kazige B-horizont effect heeft op de diepte van de freatische grondwaterstand.

In de jaren zestig is een onderzoek uitgevoerd naar de bodemgesteldheid in het gebied van de ruilverkaveling Bevermeer (Kloosterhuis, 1965). Dit gebied is gesitueerd tussen Zevenaar, Angerlo en Doetinchem. Bij dit onderzoek is tevens gekeken naar het voorkomen van schijnspiegels. De schijnspiegels zijn vooral merkbaar bij rivierkleigronden met zware kleilagen. De storende invloed van kleilagen kan goed worden aangetoond met grondwaterstandsbuizen, door een buis boven de zware laag te plaatsen en één op de normale opnamediepte. Ook bij zandgronden, waar lemlagen in de ondergrond voorkomen, treden waarschijnlijk voor kortere tijd schijnspiegels op, gezien de aanwezigheid van sterke roest(vormingen) en grijze vlekken boven de lemlaag. Deze situatie komt ook voor in gebieden grenzend aan deze kartering (figuur 3.21)



Figuur 3.21 Tijdstijghoogte grafiek van twee grondwaterstanden te Duiven met onderkant filter op 72 en 240 cm-mv.

Uit figuur 3.21 kan worden afgeleid dat schijnspiegels gedurende ten minste de helft van de tijd voorkomen. De metingen in de ondiepe buis zijn begonnen in augustus 2005. Voor hydrologische jaren zijn de HG3 en LG3 bepaald voor het diepe filter, daarnaast is ook de HG3 voor het ondiepe filter bepaald. Op basis van het diepe filter zou deze locatie als een GTVII\* worden geclassificeerd, indien rekening wordt gehouden met de schijnspiegel is dit een GT VI.



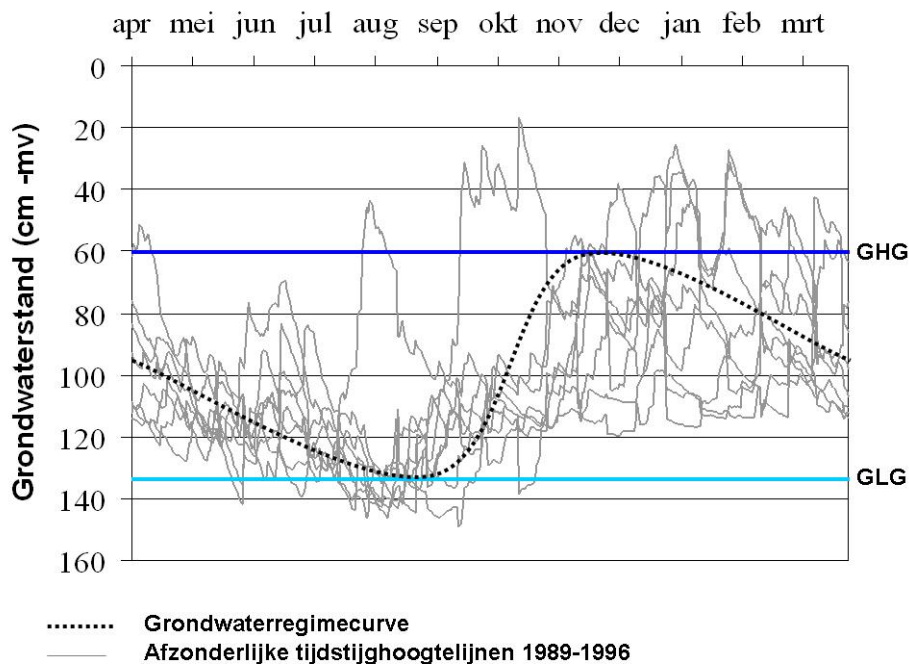
## 4 Karakterisering van het grondwaterstandsverloop

Om een ruimtelijk beeld te kunnen krijgen in de vorm van kaarten met informatie over het grondwaterstandsverloop is een karakterisering van tijdreeksgegevens van grondwaterstanden in kengetallen noodzakelijk. Hiervoor is in de jaren zestig van de vorige eeuw het systeem van grondwatertrappen (Gt) ontwikkeld. Kenmerken die samenhangen met de Gt, zoals de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) worden binnen het natuuronderzoek veelvuldig gebruikt. Daarom wordt de karakterisering van het grondwaterstandsverloop in de vorm van Gt-informatie in de volgende paragrafen nader beschreven.

### 4.1 Grondwatertrap

Het verloop van de grondwaterstand wordt van oudsher gekarakteriseerd met een grondwatertrap (Gt), die de fluctuatie en het niveau van de freatische grondwaterstand t.o.v. maaiveld weergeeft. Als gevolg van variaties in de grondwateraanvulling, veroorzaakt door verschillen in neerslag, verdamping en wegzijging of kwel, en de verdeling hiervan, is het verloop van de grondwaterstand in een jaar, maar ook van jaar tot jaar verschillend. Dit is te zien in figuur 4.1, waarin de grondwaterstanden voor een aantal afzonderlijke hydrologische jaren (1 april t/m 31 maart) zijn weergegeven. Door deze variatie zijn de jaarlijkse tijd-stijghoogtelijnen, die het grondwaterstandsverloop in een specifiek jaar weergeven, weinig hanteerbaar als karakteristiek van de grondwaterstand. De tijd-stijghoogtelijnen van de afzonderlijke hydrologische jaren werden daarom vervangen door een gemiddelde curve, die men kan beschouwen als de curve, die het verloop weergeeft van de grondwaterstand in een jaar met gemiddelde weersomstandigheden (Stol, 1958; Van Heesen, 1971). Door de jaren heen zijn er veel verschillende termen voor deze curve gehanteerd. In de jaren vijftig maakte men vooral gebruik van de term gemiddelde tijd-stijghoogtelijn. In de jaren zeventig is voornamelijk de term gemiddelde grondwaterstandscurve gehanteerd, terwijl recentelijk gebruik wordt gemaakt van de term grondwaterregimecurve of kortweg regimecurve (Projectgroep Waternood, 1998; Vereniging voor Landinrichting, 2000). In deze studie wordt voor deze curve de term grondwaterregimecurve gehanteerd (Van der Gaast en Massop, 2005b).

Bij de afleiding van de grondwaterregimecurve zijn een aantal aspecten van belang (Stol, 1960; Knibbe en Marsman, 1961; Van Heesen en Westerveld, 1966). De afzonderlijke tijd-stijghoogtelijnen laten een geleidelijke daling van het grondwater in het voorjaar zien. De bundel van deze lijnen vernauwt zich dan opvallend. Na het bereiken van de laagste stand volgt tijdens de periode waarin de neerslag de verdamping gaat overtreffen, een snelle stijging. De snelheid van stijgen in de afzonderlijke jaren is redelijk constant, met andere woorden de lijnen lopen bij benadering evenwijdig. Alleen het tijdstip waarop deze stijging begint is meestal verschillend. De grondwaterregimecurve dient dan ook een stijgende tak te hebben met dezelfde helling als de curven van de afzonderlijke jaren. De top en het dal van de grondwaterregimecurve geven het niveau aan tot waar de grondwaterstand gemiddeld in de winter stijgt (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand, GHG) en in de zomer daalt (Gemiddeld Laagste Grondwaterstand, GLG) (figuur 4.1) (Knibbe en Marsman, 1961; Van Heesen en Westerveld 1966; Van Heesen, 1971; Van der Gaast en Massop, 2005b).



Figuur 4.1 Tijdstijghoogtelijnen en grondwaterregimecurve over de jaren 1989-1998 op basis van dagwaarden voor hydrologische jaren (naar: Van der Gaast en Massop, 2005b).

Het samenstellen van een grondwaterregimecurve was vroeger bewerkelijk en enigszins subjectief. Ondanks de automatisering blijkt het nu nog steeds moeilijk dergelijke grondwaterregimecurves automatisch te genereren. Aangezien men vroeger voor het karakteriseren van het grondwaterstandsverloop alleen de top en het dal uit de gemiddelde curve hanteerde, is gezocht naar een eenvoudiger werkwijze. Uit hydrologisch onderzoek in de jaren zestig is gebleken dat, wanneer gedurende een groot aantal jaren (minimaal 8) de grondwaterstand tweemaal per maand (op of omstreeks de 14<sup>e</sup> en de 28<sup>e</sup>) gemeten is, uit deze gegevens de top van de curve in de vorm van de GHG en het dal van de curve in de vorm van de GLG vrij eenvoudig te berekenen zijn (Knibbe en Marsman, 1961; Van Heesen en Westerveld 1966; Van Heesen, 1971). Deze worden berekend door het middelen van respectievelijk de drie hoogst gemeten (HG3) en de drie laagst gemeten (LG3) standen in een hydrologisch jaar; dit is proefondervindelijk vastgesteld (Knibbe en Marsman, 1961; Van der Sluijs en van Egmond, 1976). Om uiteindelijk de GHG en de GLG te berekenen, worden respectievelijk de HG3 en de LG3 over ten minste acht opeenvolgende hydrologische jaren gemiddeld.

## 4.2 De gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand GVG

De gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) is bepalend voor de aeratie en de vochtvoorziening aan de plant rond het begin van het groeiseizoen. Bij voorjaarsgrondwaterstanden rond maaiveld is de zuurstofvoorziening zo slecht dat alleen aan natte omstandigheden aangepaste planten kunnen overleven. Bijvoorbeeld riet, zeggen en biezten, die in staat zijn om door middel van luchtweefsels zuurstof naar de wortels te transporteren. Voor veel grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen zijn hoge voorjaarsgrondwaterstanden gewenst. Hierdoor is de GVG een belangrijke stuurvariabele voor het al dan niet voorkomen van soorten en derhalve een belangrijke variabele om in kaart te brengen indien gekeken wordt naar de grondwatersituatie in natuurgebieden. Ook in natuurevaluatie-instrumenten zoals

Natles (Runhaar *et al.*, 2003) en Waterlood (Van Bakel *et al.*, 2002) wordt onder andere de GVG gebruikt om de potenties voor natuur, dan wel de doelrealisatie voor natuur te bepalen. Daarom wordt in dit hoofdstuk nader ingegaan op de GVG.

Om het vochtleverend vermogen van de ondergrond te berekenen, is de grondwaterstand op het tijdstip dat het verdampingsoverschot begint op te treden van groot belang. De verdeling en de grootte van de neerslag voorafgaande aan de periode met verdampingsoverschot zal bepalend zijn voor de uiteindelijke voorjaarsgrondwaterstand (Rijtema, 1971). Op basis hiervan kan de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) worden gedefinieerd als de gemiddelde grondwaterstand op het tijdstip dat er een verdampingsoverschot gaat optreden. Dit tijdstip wordt ook gezien als het begin van het groeiseizoen. De gehanteerde datum voor de GVG is echter in de loop der tijd veranderd. Voor de GVG is de gemiddelde grondwaterstand aan het begin van het groeiseizoen aangehouden. In de jaren zeventig is hiervoor 15 april aangehouden. In de loop van de jaren tachtig is voor het begin van het groeiseizoen 1 april aangehouden. Hierdoor is ook de representatieve datum voor de GVG verschoven van 15 april naar 1 april. In tabel 4.1 is per Gt op basis van tijdreeksanalyse voor buisgegevens (Van der Gaast en Massop, 2003a) de GVG voor de verschillende gehanteerde definities weergegeven.

*Tabel 4.1 De GVG bij het hanteren van verschillende definities voor de representatieve datum op basis van peilbuisgegevens waarbij gebruik is gemaakt van een indeling naar Gt afkomstig van de bodem en Gt-kaart met een schaal 1:50 000.*

Grondwatertrap	Oppervlakte op de bodemkaart (ha)	Aantal peilbuizen	Gemiddelde GVG (cm – mv)			
			15april <sup>1</sup>	1april <sup>2</sup>	VG3 <sup>3</sup>	15maart <sup>4</sup>
I	2 832	102	13,4	10,4	10,6	9,1
II	136 778	178	32,2	27,8	28,1	25,7
II*	452	44	56,0	53,3	53,4	52,0
III	121 437	177	48,9	42,6	43,4	39,8
III*	432 577	108	65,3	60,1	60,4	57,8
IV	125 459	176	81,9	77,9	78,2	76,3
V	62 652	58	64,3	55,6	56,1	51,6
V*	240 229	118	77,9	69,8	70,5	66,4
VI	990 608	716	102,2	95,1	95,6	92,2
VII	394 237	1005	139,5	133,5	134,1	131,4
VII*	169 516	437	232,7	227,8	228,6	226,9
<b>Totaal</b>	<b>2 676 774</b>	<b>3119</b>				
Oppervlakte gewogen gemiddelde			99,9	93,6	94,1	91,1
Verskil tov voorgaande definitie				6,3	-0,5	3,1

<sup>1</sup> Gemiddelde grondwaterstand op 15 april (Van Heesen en van der Sluijs, 1974)

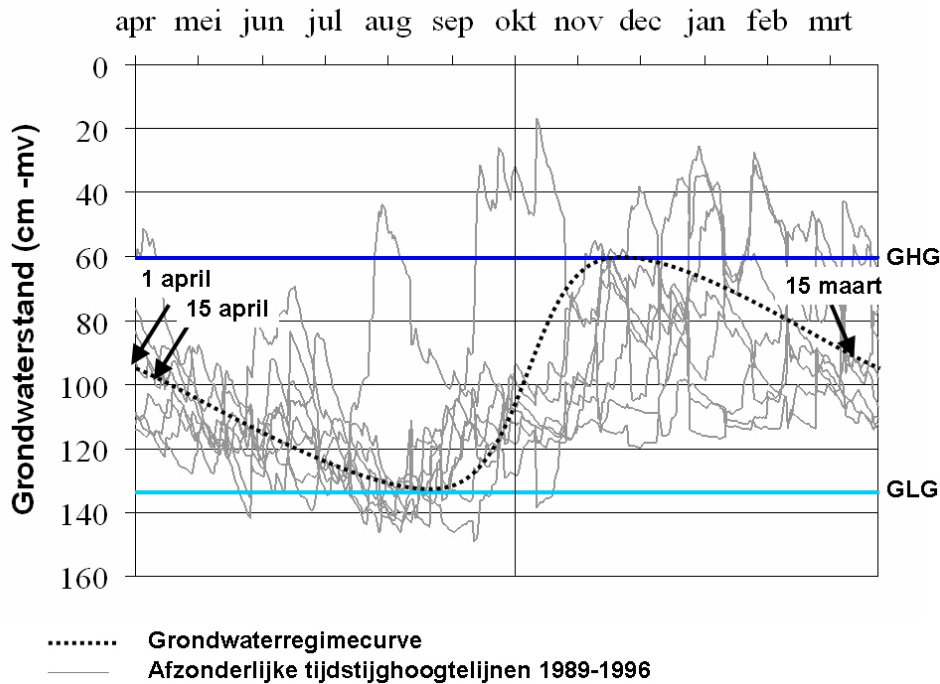
<sup>2</sup> Gemiddelde grondwaterstand op 1 april (Van der Sluijs, 1982)

<sup>3</sup> Gemiddelde grondwaterstand op 14 en 28 maart en 14 april VG3 (Finke *et al.*, 1999a,b).

<sup>4</sup> Gemiddelde grondwaterstand op 15 maart (Vereniging voor Landinrichting, 2000)

Op basis van de grondwaterregimecurve (Van der Gaast en Massop, 2005b) kan worden verklaard dat het vervroegen van de datum van 15 april naar 1 april en recentelijk naar 15 maart gepaard gaat met een gemiddeld nattere situatie (figuur 4.2). Het verschuiven van de datum van 15 april naar 1 april heeft tot gevolg dat, gewogen op basis van het Gt-areaal in de bodem- en Gt-kaart 1 : 50.000, de GVG gemiddeld ongeveer 6 cm natter is. Het vervroegen van de datum van 1 april naar 15 maart heeft tot gevolg dat er wordt uitgegaan van een situatie die gemiddeld 3 cm natter is. Aan het eind van de jaren negentig is men gebruik gaan

maken van de VG3-methode, welke beter aansluit bij de methoden waarop de GHG en GLG wordt berekend. Op basis van de resultaten komt naar voren dat de VG3 methode goed overeenkomt met de gehanteerde datum van 1 april.



Figuur 4.2 Grondwaterregimecurve die geldt voor een gemiddeld hydrologisch jaar

### 4.3 Bepaling van de GVG

Voor het bepalen van de vochtleverantie aan gewassen wordt sinds de jaren zeventig gebruik gemaakt van de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG). De GVG was indertijd gedefinieerd als de gemiddelde grondwaterstand op 15 april, het begin van het groeiseizoen. Uit de analyse van de grondwaterstand van een honderdtal stambuizen kon voor de GVG in zandgronden de volgende relatie met de GHG en de GLG worden afgeleid (Van Heesen en Van der Sluijs, 1974):

$$GVG = 0.2 (GLG - GHG) + GHG + 12 \quad (4.1)$$

Bij berekening van de vochtleverantie volgens de door Rijtema (1971) ontwikkelde methode wordt uitgegaan van een bepaalde grondwaterstand aan het begin van het groeiseizoen. Hiervoor wordt de gemiddelde grondwaterstand op 14 april genomen. Deze wordt aangeduid als de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG). De GVG dient te liggen tussen de GHG en de GLG. Uit grondwaterstandsgegevens van 147 in zandgrond gelegen stambuizen is de volgende relatie gevonden (Van der Sluijs en Van Egmond, 1976):

$$GVG = 0.15 (GLG - GHG) + (1.01 * GHG) + 14.3 \quad (4.2)$$

De formule laat zien dat de GHG een veel grotere invloed heeft op de GVG dan de fluctuatie tussen de GHG en GLG. Gezien de beperkte bijdrage van de fluctuatie in de bepaling van de GVG kan zonder bezwaar een vereenvoudiging worden toegepast. Vervanging van de fluctuatie door een gemiddelde fluctuatie, d.w.z. door een constante zal de nauwkeurigheid slechts



weinig beïnvloeden. In de vereenvoudigde vergelijking komt dan alleen de GHG als onafhankelijke variabele voor (Van der Sluijs en van Egmond, 1976):

$$GVG = 1.03 * GHG + 27.3 \quad (4.3)$$

Uit de bovenstaande formule kan worden afgeleid dat als vuistregel de GVG ongeveer 25 tot 30 cm lager is dan de GHG

Vanaf het begin van de jaren tachtig van de vorige eeuw is voor het begin van het groeiseizoen 1 april aangehouden. Hierdoor is de definitie van de GVG veranderd. De GVG geeft dus de grondwaterstand die onder normale weersomstandigheden aan het begin van het groeiseizoen mag worden verwacht. De GVG zal altijd dieper zijn dan de GHG en des te dieper, naarmate de fluctuatie tussen de GHG en GLG groter is. Uit grondwaterstandsgegevens van 550 meetpunten is voor de GVG de volgende relatie met de GHG en GLG afgeleid (Van der Sluijs, 1982; Van der Sluijs, 1990; Ten Cate *et al.*, 1995):

$$GVG = 0.83 * GHG + 0.19 * GLG + 5.4 \quad (4.4a)$$

$$GVG = 0.19 (GLG - GHG) + 1.02 * GHG + 5.4 \quad (4.4b)$$

Deze laatste formule is in het Cultuurtechnisch Vademecum (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988) opgenomen in de volgende vorm:

$$GVG = GHG + 0.2 * (GLG - GHG) + 5 \quad (4.4c)$$

Uit de bovenstaande relatie kan worden afgeleid dat bij een geringe fluctuatie (<50 cm, Gt I, II en VI) de GVG ongeveer 15 cm lager is dan de GHG en voor de overige gronden de GVG ongeveer 25 cm lager is dan de GHG.

Aan het eind van de jaren tachtig van de vorige eeuw is door Van der Sluijs en Van Heesen (1989) voorgesteld de GHG en GLG berekening te veranderen. Zij hebben voorgesteld de GHG en GLG te berekenen uit respectievelijk het winterhalfjaar en het zomerhalfjaar in plaats van het hydrologische jaar. Dit heeft tot gevolg dat ook de GVG berekening verandert. Daarnaast zijn twee verschillende functies afgeleid. Een functie voor polders en een functie voor stroomgebieden.

$$\text{Polders: } GVG = 0.17 (GLG - GHG) + 0.96 * GHG + 12 \quad (4.5)$$

$$\text{Stroomgebieden: } GVG = 0.15 (GLG - GHG) + 0.97 * GHG + 4 \quad (4.6)$$

Rond de eeuwwisseling is de berekeningswijze voor de GVG veranderd. Voor de bepaling van de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand is een gemiddelde gebruikt van de drie gemeten tweewekelijkse standen die het dichtst bij 1 april liggen nl: 14 en 28 maart en 14 april (Finke *et al.*, 1999a,b). Deze werkwijze heeft tot gevolg dat de berekeningswijze van de GVG meer overeenkomt met de berekening van de GHG en de GLG.

In het nieuwe Cultuurtechnisch Vademecum (Cultuurtechnische Vereniging, 2000) wordt voor de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) de grondwaterstand rond 15 maart aangehouden. In bodems die zijn gedraineerd komt de GVG midden tussen de drains ongeveer overeen met een grondwaterstand van 10 cm boven drainniveau. In bodems met een natuurlijke grondwaterstandsfluctuatie kan de GVG worden benaderd met de volgende formule:

$$GVG = GHG + 1/6 (GLG - GHG) \quad (4.7)$$

Door Van der Gaast *et al.*, 2006c is op basis van een aantal stambuizen binnen het beheergebied van Waterschap Regge en Dinkel, gebruik makend van de nieuwe berekeningswijze de volgende relatie afgeleid:

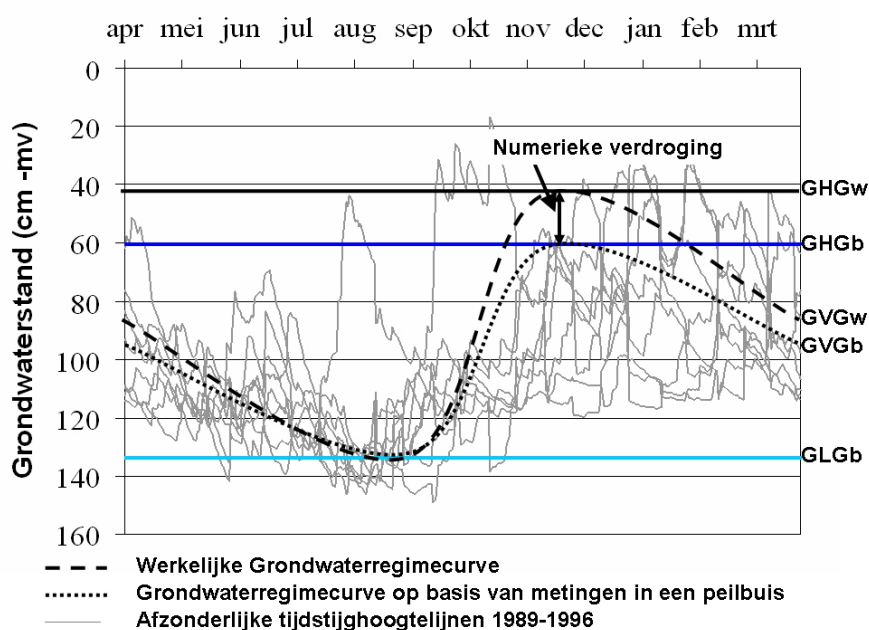
$$GVG = 0,70 GHG + 0,25 GLG + 13,7 \quad (se = 5,69) \quad (4.8)$$

Voor het afleiden van de relatie is gebruik gemaakt van 93 stambuizen.

Om het verschil tussen de formules inzichtelijk te maken is een nadere analyse uitgevoerd. De analyse heeft betrekking op buislocaties waarvoor tijdreeksen van 30 jaar op basis van tijdreeksanalyse beschikbaar zijn (Van der Gaast en Massop, 2003a). De berekende GHG en GLG op basis van de tijdreeksanalyse is gebruikt als invoer voor de beschikbare formules. Uit de vergelijking (tabel 4.2) komt naar voren dat de oude formules goed overeenkomen met de uit de tijdreeks gegenereerde GVG. De definitie en de berekeningswijze is echter verschillend. De GVG uit de tijdreeksen is het gemiddelde van drie standen (de VG3) terwijl de eerste formules betrekking hebben op de gemiddelde grondwaterstand op 15 april. Hierdoor mag verwacht worden dat formules 1, 2 en 3 ongeveer 6 cm droger uitkomen (zie tabel 2.1). De formules vanaf 1982 zijn structureel natter dan de GVG op basis van de tijdreeks. Deze nattere berekende situatie is ook gepaard gegaan met een verandering in de definitie. Vanaf 1982 is de GVG representatief voor 1 april in plaats van 15 april, wat samengaat met een nattere situatie. Voor formule (4.4a), (b) en (c) mag verwacht worden dat deze overeenkomt met de GVG op basis van de tijdreeksen, aangezien de berekeningsmethoden ongeveer overeenkomen. De formules uit 1989 hebben betrekking op een andere berekening (half hydrologisch jaar) van de GHG en GLG. Bij het gebruik van deze formules komt de GVG hierdoor nog natter uit. Dit kan worden verklaard, doordat vooral de GHG op basis van een berekening over alleen het winterhalfjaar alleen gelijk kan zijn of droger uit kan vallen dan de berekening over het gehele hydrologische jaar. Deze formules kunnen alleen gebruikt worden indien de GHG en GLG bepaald is op basis van het winter en zomerhalfjaar. De formule uit 2006 komt redelijk overeen met de tijdreeks GVG. De resultaten zijn over het algemeen enkele cm droger; dit kan waarschijnlijk verklaard worden doordat de functie is opgezet op basis van regionale gegevens.

In bijna alle situaties geeft het gebruik van de functie een nattere GVG dan de GVG op basis van de tijdreeksen. Alleen formule (4.8) geeft een drogere GVG. Dit is overigens de enige formule die gebaseerd is op een deelverzameling van de gebruikte peilbuisinformatie en dus ook gebaseerd is op GVG's uit tijdreeksanalyse.

De verschillen kunnen mogelijk worden verklaard door de gebruikte dataset. In de loop der tijd is bij het bepalen van de GxG steeds meer gebruik gemaakt van diepere buizen (Van der Gaast *et al.*, 2006c). Dit heeft tot gevolg dat er in buizen een stijghoogte wordt gemeten die niet overeen hoeft te komen met de freatische grondwaterstand. Dit verschil kan worden veroorzaakt door het voorkomen van anisotropie op geringe diepte. Naast het voorkomen van anisotropie is ook de aanwezigheid van een verticale flux van belang, welke rond GVG-moment gemiddeld voor heel Nederland ongeveer -1 mm/dag bedraagt (Van der Gaast *et al.*, 2006c). Door deze neerwaartse grondwaterstroming en de aanwezigheid van ont- en afwateringsmiddelen kan in tegenstelling tot de verwachting ook in kwelgebieden een neerwaartse grondwatergradiënt voorkomen (Van der Gaast *et al.*, 2006c; Dalton *et al.*, 2007). Het effect van numerieke verdroging als gevolg van anisotropie op onder meer de GVG is in figuur 4.3 schematisch weergegeven.



Figuur 4.3 Schematische weergave van het effect van anisotropie op het grondwaterregime. De toevoeging w heeft betrekking op de werkelijke GxG, de toevoeging b heeft betrekking op een GxG op basis van buismetingen.

Tabel 4.2 Vergelijking van de GVG op basis van de beschikbare formules voor peilbuisgegevens waarbij gebruik is gemaakt van een indeling naar Gt afkomstig van de bodem en Gt-kaart met een schaal 1:50 000.

Gt	Gemiddelde GVG (cm – mv)								
	Tijdreeks	Gehanteerde formule							
		$4.1^{15/j}$	$4.2^{15/j}$	$4.3^{15/j}$	$4.4a/b^{1/j}$	$4.4c^{1/j}$	$4.5/6^* 1/h$	$4.7^{15m/.}$	$4.8^{VG3/j}$
I	10,6	15,0	15,2	21,8	7,9	3,0	5,4	1,6	19,1
II	28,1	29,0	28,3	32,3	21,9	17,0	14,6	15,0	33,5
II*	53,4	55,4	56,2	64,3	49,2	43,4	41,2	42,2	57,2
III	43,4	42,1	40,3	41,0	35,0	30,1	19,5	27,3	47,4
III*	60,4	58,5	57,6	61,0	51,9	46,5	38,7	44,2	62,1
IV	78,2	78,7	79,0	85,7	72,7	66,7	63,4	65,0	80,1
V	56,1	53,4	49,7	44,7	45,9	41,4	21,5	37,3	60,4
V*	70,5	67,9	64,9	61,8	60,9	55,9	37,4	52,2	73,6
VI	95,6	93,7	91,8	91,6	87,4	81,7	66,2	78,5	97,2
VII	134,1	134,7	133,7	136,1	129,4	122,7	108,6	119,8	135,4
VII*	228,6	231,8	231,4	234,5	228,3	219,8	203,8	216,7	228,2
Oppervlaktegewogen gemiddelde (cm – mv), waarbij de oppervlakte afkomstig is uit de bodem en Gt-kaart 1:50.000 (zie tabel 2.1)									
	94,1	93,1	91,6	92,8	86,9	81,1	68,1	78,2	96,1
Verschil ten opzichte van de tijdreeksresultaten (cm)									
		1,0	2,5	1,3	7,2	13,0	26,0	15,9	-2,0

Definitie/berekeningsperiode

15: 15 april; 1: 1 april; VG3: VG3 methode; 15m: 15 maart; J: Hydrologisch jaar; H: hydrologisch half jaar

\* formule (4.5) en (4.6) zijn ruimtelijk opgedeeld in polder (5) en stroomgebieden (6) en vervolgens gecombineerd

Indien de GVG-informatie wordt gebruikt om naar bijvoorbeeld grondwaterstands­daling of verdroging te kijken, kan op basis van tabel 4.2 geconcludeerd worden dat er alleen al door het toepassen van verschillende bewerkingen op gegevens een aanzienlijk verschil kan ontstaan. Op deze manier kan bijvoorbeeld bij het vergelijken van de bodemkaart 1 : 50.000 (in combinatie met formule 4.7) met de geactualiseerde GD-kaart (in combinatie met de VG3 uit tijdreeksen) al een gemiddeld verschil ontstaan van 16 cm. Dit verschil zal ten onrechte worden geïnterpreteerd als verdroging. Aangezien numerieke verdroging gedefinieerd is als een onjuiste inschatting (meestal te droog) van de freatische grondwaterstand als gevolg van verkeerde meet- en/of rekentechnieken (Van der Gaast *et al.*, 2008), kan ook dit GVG verschil omschreven worden als een vorm van numerieke verdroging.

De analyse geeft aan dat het van belang is bij het bepalen van grondwaterstands­daling of verdroging gebruik te maken van consistente rekenmethodes, om het gebruik van onjuiste misleidende informatie te voorkomen. Indien de GVG wordt gebruikt voor het evalueren van natuurdoelen met instrumenten zoals Natles of Waternood is het eveneens van belang dat de gehanteerde GVG overeenkomt met de GVG die aan de desbetreffende natuurdoelen zijn gekoppeld. Voor het vaststellen van de correcte rekenmethode dient te worden geredeneerd vanuit het grondwaterregime. De GVG is uitgaande van het grondwaterregime gedefinieerd als de grondwaterstand op 1 april, welke doorgaans wordt berekend op basis van het gemiddelde van de VG3 over een aaneengesloten periode van ten minste acht hydrologische jaren waarin geen waterhuishoudkundige ingrepen hebben plaatsgevonden. De formule die aansluit bij de definitie is formule (4.8). Aangezien dit een formule is die voor een regio is opgezet, is nader onderzoek naar nationale toepassing wenselijk. Daarnaast dient te worden vermeld dat eventuele toekomstige aanpassingen in de definitie of rekenmethodes van de GVG alleen plaats kunnen vinden indien ook het hydrologisch jaar en daarmee de grondwaterregimecurve wordt aangepast.

## 5 Grondwaterstandswaarnemingen op peilbuislocaties

Indien peilbuizen niet correct worden geplaatst, kan dit tot gevolg hebben dat een peilbuis of een serie peilbuizen ongeschikt zijn voor het meten van freatische grondwaterstanden. Op basis van een onderzoek naar grondwatergegevens van duizenden peilbuizen is geconstateerd dat meer dan 65% van de peilbuizen die sinds het eind van de jaren zeventig van de vorige eeuw in Noord-Amerika zijn geplaatst één of meer problemen hebben en derhalve niet correct zijn geplaatst voor de meetdoelstelling. Dit heeft tot gevolg dat voor veel van deze peilbuizen grondwaterstandsgegevens, doorlatendheidsgegevens of kwaliteitsgegevens zijn afgeleid die niet representatief zijn voor het doel waarvoor ze zijn geplaatst. De consequentie hiervan is:

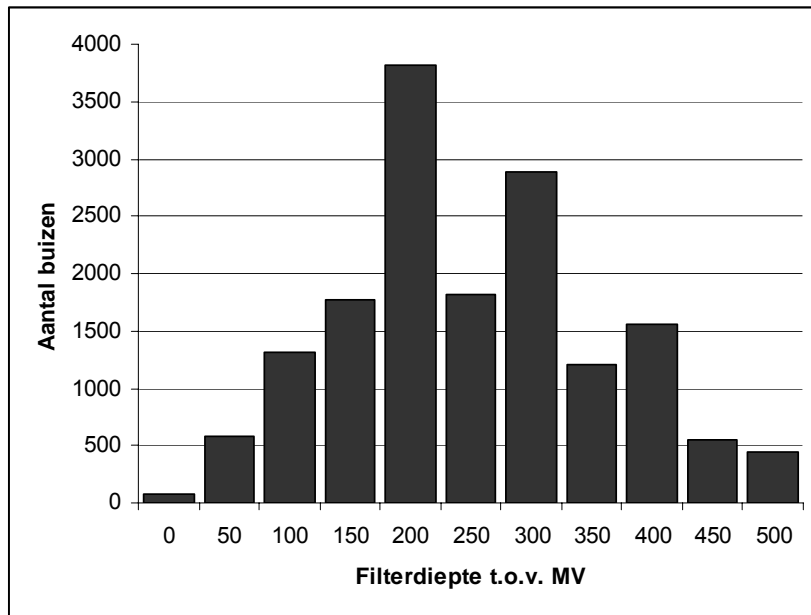
- 1) onjuiste en misleidende grondwaterstands- of stijghoogtekaarten en de hiermee samenhangende stromingsrichting en gradiënten;
- 2) onjuiste en misleidende stroomsnelheidsberekeningen;
- 3) onjuiste en misleidende grondwaterkwaliteitsgegevens.

Incorrect geplaatste peilbuizen dienen vaak opnieuw geplaatst te worden, wat extra kosten met zich meebrengt en tijdrovend is (Nielsen en Schalla, 2006). Mede op grond van deze bevindingen is binnen dit onderzoek nagegaan in hoeverre de in Nederland beschikbare ondiepe peilbuizen (landbouwbuizen) met betrekking tot de filterstelling in de verticaal potentieel onjuiste freatische grondwaterstandsinformatie kunnen geven.

### 5.1 Filterdieptes

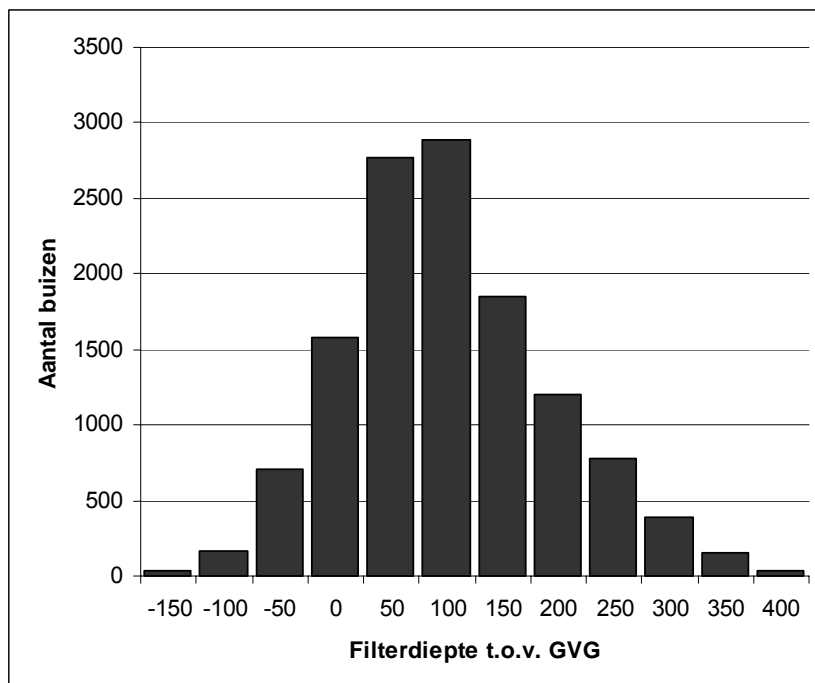
Voor natuur is vooral de freatische grondwaterstand van belang. In de DINO-database van TNO zijn onder andere landbouwbuizen opgenomen, die een maximale diepte hebben van 5 meter beneden maaiveld (Groenewoud, 1962). Deze indeling biedt echter geen goede mogelijkheden om buizen met filters in het freatisch pakket te selecteren. Daarom zijn alle landbouwbuizen met een maximale lengte van 5 meter geselecteerd. Voor het meten van de freatische grondwaterstand is het echter van belang dat de filterstelling overeenkomt met het traject waarover de grondwaterstand fluctueert (§ 3.2). Vanwege anisotropie verdient het de voorkeur om de GxG (GHG, GVG en GLG) te schatten in buizen met een filter dat zich in het fluctuatietraject van de GxG bevindt. Per buis is daarom geanalyseerd hoe diep de bovenkant van het filter t.o.v. het GVG niveau ligt, hierbij is gebruik gemaakt van de GVG kaart, die via een eenvoudige neerschalingstechniek is geactualiseerd (Van der Gaast *et al.*, 2006b).

Selectie in de DINO-database van TNO op buizen met een filterdiepte kleiner dan 5 m-mv waar sinds 1990 een grondwaterstandsmeting is verricht levert in totaal 16029 buizen op. Hier is het totaal aantal ondiepe buizen, ongeacht de meetperiode en -frequentie gebruikt omdat extra metingen in deze buizen wellicht in het kader van toekomstige onderzoek mogelijk zijn. Van deze buizen is in figuur 5.1 weergegeven hoeveel buizen de onderkant van het filter op een bepaalde diepte t.o.v. maaiveld hebben. In de figuur zijn vooral de relatief hoge aantal buizen met een filterdiepte van 2 meter en 3 meter opvallend. Deze diepten komen overeen met buisdiepten die in de loop der tijd bij de kartering van de grondwaterstand zijn gebruikt. In de beginperiode van grondwaterstandskarteringen is gebruik gemaakt van peilbuizen met een maximale diepte van 2 meter beneden maaiveld. Later is ook gebruik gemaakt van peilbuizen tot 3 meter beneden maaiveld, terwijl recentelijk gebruik wordt gemaakt van buizen tot 5 meter beneden maaiveld (Van der Gaast *et al.*, 2006c).



*Figuur 5.1 Filterdieptes (onderkant van het filter) van de landbouwbuizen met een maximale diepte van 5 m.*

In figuur 5.2 staat hoeveel buizen de bovenkant van het filter op een bepaalde diepte ten opzichte van GVG-niveau hebben. Voor ongeveer 80% van de 16 029 buizen, ligt de bovenkant filter onder het GVG-niveau. Hierdoor komt het filter niet overeen met het fluctuatietraject van de grondwaterstand (zie hoofdstuk 3). Dit kan een onjuiste schatting van de GxG veroorzaken.



*Figuur 5.2 Filterdiepte (bovenkant van het filter) t.o.v. GVG van de grondwaterstandsbuizen korter dan 5 m.*

Voor de filters waarvan de bovenkant meer dan 1 m onder het GVG-niveau ligt is de freatische grondwaterstand, uitgaande van een fluctuatie van ca. 1 m, gedurende het gehele jaar boven het filterniveau. Anisotropie kan in dat geval zowel de GHG als de GLG schatting minder nauwkeurig maken. Daarom is in tabel 5.1 per anisotropie klasse een overzicht gemaakt van aantallen filters waarvan de bovenkant dieper dan 1 m onder GVG-niveau ligt.

Tabel 5.1 Aantal filters met de bovenkant > 1 m onder GVG per anisotropie-klasse en in totaal

Anisotropie-klasse	Zeer sterk	Sterk	Aanwezig	Matig	Weinig of geen	Totaal
Aantal filters	848	1962	935	840	4453	9038

## 5.2 Meetfrequentie en meetperiode

Om de GxG nauwkeurig te schatten, is het van belang om per buis over voldoende metingen per jaar te beschikken en over een zo recent en lang mogelijke periode zonder hydrologische ingrepen. Daarom is per grondwaterstandsbuis vanaf 2005 op jaarbasis over een periode van 15 jaar terug gekeken naar het aantal metingen. Voor een goede schatting van de GxG uit meetgegevens is een aaneengesloten meetperiode van 8 jaar, waarin geen hydrologische ingrepen hebben plaatsgevonden, nodig met tenminste 18 waarnemingen per hydrologisch jaar (Finke *et al.*, 2002). Voor een nauwkeurige schatting van de GxG gebruik makend van tijdreeksanalyse wordt als minimum vaak een recente periode van tenminste drie jaar met tenminste 18 waarnemingen per hydrologisch jaar gehanteerd (Van Kekem *et al.*, 2005).

De overzichten met meetfrequentie in DINO maken onderscheid in klassen van minimaal 20 waarnemingen per jaar. Omdat van deze overzichten gebruik is gemaakt, is als ondergrens voor voldoende metingen 20 per jaar gehanteerd. Van de beschikbare ondiepe buizen is geanalyseerd over hoeveel jaren in de periode 1991-2005 ten minste 20 grondwaterstandsmetingen per jaar zijn verricht. Indien de periode 1996-2005 wordt beschouwd, dan blijkt dat voor 1673 (de som van meetreeksen van 8, 9 en 10 jaar in tabel 5.2) buizen meetreeksen van ten minste 8 jaar beschikbaar zijn en op 6961 locaties meetreeksen van tenminste 3 jaar beschikbaar zijn. De aantallen buizen met meetreeksen geschikt voor schatting van GxG op basis van tijdreeksanalyse of op basis van metingen blijken vele malen kleiner dan het totaal aantal van 16 029 ondiepe landbouwbuisen. Dit komt, omdat in de meeste grondwaterstandsbuisen minder dan 20 maal per jaar wordt gemeten; vaak wordt 1 maal per kwartaal gemeten. Deze buizen zijn toch in deze inventarisatie opgenomen omdat wellicht voor toekomstige studies de meetfrequentie in de aanwezige buizen kan worden opgevoerd. Van de 6961 buizen met tenminste 3 jaren met gemeten grondwaterstanden blijkt van 38% de bovenkant van het filter minder dan 1 m onder de GVG te liggen. Van de 1673 buizen met tenminste 8 jaren met metingen blijkt voor 33% de bovenkant van het filter minder dan 1 m onder GVG te liggen.

Tabel 5.2 Aantal buizen met tenminste 20 metingen per jaar in een bepaald aantal jaren over een recente periode.

Periode	1 jaar	2 jaar	3 jaar	4jaar	5 jaar	6 jaar	7 jaar	8 jaar	9 jaar	10 jaar	Totaal
1996-2005	1193	1191	1268	1164	1131	914	811	770	633	270	9345
1997-2005	1232	1359	1334	1249	1005	961	855	725	321		9041
1998-2005	1361	1443	1402	1163	989	1058	784	373			8573
1999-2005	1584	1522	1288	1128	1171	935	396				8024
2000-2005	1657	1463	1265	1329	1087	435					7236
2001-2005	1488	1569	1528	1314	493						6392
2002-2005	1570	1701	1798	1090							6159
2003-2005	1800	2107	1342								5249

### 5.3 Ruimtelijke verdeling van landbouwbuizen

In deze studie gaat het om de schatting van de actuele grondwaterstandsituatie in natuurgebieden. Daarom is hier gekeken naar de aantallen buizen geschikt voor schatting van de GxG over de periode 1996-2005 in een Natura 2000-, VHR- of EHS-gebied. Het aantal buizen met een meetperiode van ten minste 3 of ten minste 8 jaar over de afgelopen 10 jaar voor Nederland als geheel en binnen de verschillende natuurgebieden is in tabel 5.3 weergegeven. De gemiddelde dichtheid van buizen met ten minste 3 jaren waarnemingen bedraagt 0,24 per km<sup>2</sup> in Habitatrictlijngebieden en Natura 2000-gebieden, 0,10 per km<sup>2</sup> in Vogelrichtlijngebieden en 0,26 per km<sup>2</sup> in de EHS. De Vogelrichtlijngebieden hebben ten op zichte van de andere gebiedsindelingen een relatief lage dichtheid aan goede meetreeksen van de stijghoogte, omdat in deze gebieden meer open water aanwezig is.

De gebiedsindelingen voor de Habitatrictlijngebieden, Natura 2000-gebieden en Vogelrichtlijngebieden kennen gebiedscodes, waarmee afzonderlijke gebieden worden aangeduid. In tabel 5.4 is voor de periode 1996-2005 aangegeven hoeveel landbouwbuizen met een meetreeks van bepaalde lengte beschikbaar zijn. In de tabel staat aangegeven hoeveel gebieden er zijn met een bepaald aantal buizen waarvoor een meetreeks van meer dan 3 of 8 jaar beschikbaar is. Een groot aantal natuurgebieden bevat geen buizen waarvoor nauwkeurig een GxG geschat kan worden. Om een gebiedsdekkende schatting van de GxG voor een natuurgebied te kunnen maken zijn altijd meerdere buizen nodig. Slechts 56 van de 108 Natura 2000-gebieden bevatten vijf of meer grondwaterbuizen met een meetreeks die voldoet aan de eerder gestelde eisen voor meetfrequentie en opnameperiode.

Tabel 5.3 Aantal buizen met ten minste 20 metingen per jaar over ten minste 3 of 8 jaar in de periode 1996-2005 in natuurgebieden en in Nederland.

Gebiedsindeling	Areaal [km <sup>2</sup> ]	Aantal gebieden	Jaren met Metingen	Binnen het gebied	Totaal in Nederland
Habitatrictlijn	6 250	108	≥8 jaar	272	1 673
Habitatrictlijn	6 250	108	≥3 jaar	1494	6 961
Natura-2000	6 249	108	≥8 jaar	272	1 673
Natura-2000	6 249	108	≥3 jaar	1491	6 961
Vogelrichtlijn	8 259	65	≥8 jaar	117	1 673
Vogelrichtlijn	8 259	65	≥3 jaar	785	6 961
EHS	13 999	N.v.t.	≥8 jaar	640	1 673
EHS	13 999	N.v.t.	≥3 jaar	3580	6 961

Tabel 5.4 Aantal gebieden met een bepaald aantal buizen waarvoor een meetreeks van ten minste 3 of 8 jaar beschikbaar is.

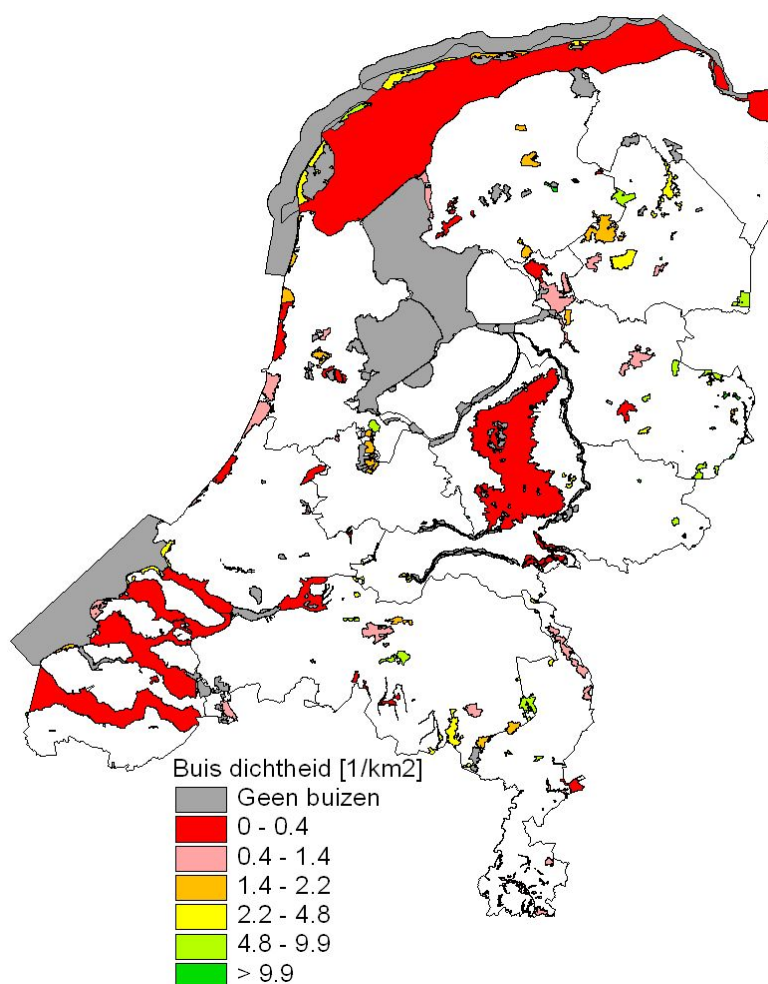
Gebiedsindeling	Jaren met Metingen	Geen buizen	1-2 buizen	3-4 buizen	5-10 buizen	>10 buizen
Habitatrictlijn	≥8 jaar	68	19	6	7	8
Habitatrictlijn	≥3 jaar	24	13	15	15	41
Natura-2000	≥8 jaar	68	19	4	9	8
Natura-2000	≥3 jaar	24	13	16	14	41
Vogelrichtlijn	≥8 jaar	14	13	6	12	20
Vogelrichtlijn	≥3 jaar	42	11	3	5	4

Om een indruk te krijgen van de ruimtelijke verdeling van de dichtheden met landbouwbuizen in natuurgebieden is in figuur 5.3 ter illustratie een kaart met dichtheden voor Natura 2000-gebieden opgenomen. Uit figuur 5.3 en tabel 5.4 wordt duidelijk dat de spreiding van buizen over de verschillende natuurgebieden onregelmatig is. Sommige gebieden bevatten helemaal geen buizen met voldoende waarnemingen terwijl in andere gebieden meerdere buizen staan.



Hoewel een groot aantal (16 029) ondiepe buizen, waarin grondwaterstanden worden gemeten, beschikbaar zijn, blijkt hiervan slechts een beperkt deel over voldoende metingen te beschikken. Indien alleen buizen waarvan de bovenkant van het filter op minder dan 0 m onder GVG ligt, worden beschouwd resteert daarvan slechts 20%. Voor een GxG schatting op basis van tijdreeksanalyse zijn ten minste 3 jaren met metingen nodig; voor 43% van alle ondiepe buizen zijn voldoende metingen beschikbaar. Voor een GxG-schatting op basis van alleen de gemeten standen is een meetreeks van ten minste 8 jaar nodig; voor 10% van de ondiepe buizen zijn hiervoor voldoende metingen beschikbaar.

Een groot aantal natuurgebieden bevat daardoor onvoldoende buizen waarvoor een GxG geschat kan worden. De analyse geeft aan in hoeverre peilbuizen voor de filterstelling in verticaal opzicht potentieel verkeerd staan en zodoende evenals in Noord-Amerika kunnen leiden tot misleidende informatie voor de freatische grondwaterstand. Daarnaast dient te worden opgemerkt dat de nauwkeurigheid van de GHG en GLG op basis van lineaire tijdreeksanalyse op peilbuislocatie vaak als gevolg van het niet verdisconteren van de modelfout wordt overschat (Van der Gaast en Massop 2005c)



*Figuur 5.3 Dichtheid aan grondwaterstandsbuizen met ten minste 3 jaar metingen in de periode 1996-2005 per Natura 2000-gebied*



## 6 Gt-karteringsmethoden

Om de grondwaterstandsituatie in kaart te brengen wordt veelal gebruik gemaakt van een bepaalde Gt-karteringsmethode. Bij het karteren wordt dan de grondwaterstand en de fluctuatie in de vorm van de GHG en GLG als samenvatting van de grondwaterregimecurve in kaart gebracht (Van Heesen en Westerveld 1966; Van Heesen, 1971; Wallenburg, 1973; Van der Gaast en Massop, 2006). Met deze afgeleide informatie wordt uiteindelijk het actuele grondwaterregime in kaart gebracht, wat weer van belang is voor het bepalen van de potenties voor natuurgebieden en de mate van verdroging.

Door Winters en Van den Berg (2006) is een overzicht gegeven van een groot aantal GxG-karteringsmethoden. In dit overzicht zijn naast landsdekkend beschikbare methoden ook methoden opgenomen die nog niet beschikbaar zijn of geen vlakdekkend beeld geven van de Gt. Daarnaast is het gezien de invloed van de bodemkundige situatie (o.a. anisotropie) op de freatische grondwaterstand van belang dat de karteringsmethode zo goed mogelijk aansluit of samengaat met bodemkundige informatie. Daarom zijn in dit onderzoek alleen methoden gebruikt die een directe koppeling hebben met bodemkundige informatie. Alleen de GD-methode vormt hierop een uitzondering. Deze methode is echter wel gebruikt, omdat deze methode voor het gehele zandgebied van Nederland beschikbaar is en via stratificatie een globale koppeling heeft met de bodemkundige informatie op de bodemkaart van Nederland schaal 1 : 50.000.

Binnen dit onderzoek zijn de volgende Gt-karteringsmethoden gebruikt en vergeleken voor een pilotgebied:

- GD-methode;
- Gt op basis van karteerbare kenmerken;
- Fysische tijdreeks modellering (FTM);
- Verwantschap met behulp van interpolatie;
  - Gebruikmakend van peilbuisgegevens;
  - Gebruikmakend van veldschattingen.

Het gebied Beekvliet is als pilotgebied gekozen aangezien er een kwalitatief goede detailkartering (bodem en Gt) beschikbaar is. Dergelijke detailkarteringen zijn echter niet voor alle natuurgebieden in Nederland beschikbaar. Het uitvoeren van detailkarteringen voor alle natuurgebieden in Nederland verdient in principe de voorkeur, omdat er bij de Gt-schattingen in situ rekening wordt gehouden met alle facetten van de bodemgesteldheid. De methode is meestal tijdrovend en kan soms met relatief hoge kosten gepaard gaan. Op grond van deze bezwaren zijn in deze studie alternatieve methoden toegepast die in dit hoofdstuk worden beschreven.

### 6.1 Gebiedsbeschrijving van het pilotgebied

De informatie die voor het pilotgebied Beekvliet is gebruikt, is ontleend aan Van Delft *et al.* (2002). Het gebied heeft een oppervlakte van 186 ha en is gelegen ten zuiden van de weg Barchem-Borculo in de Achterhoek. Aan de oostzijde grenst het aan de Lebbinkbeek (Groenlosche Slinge).

De diepe ondergrond bestaat tot 30 á 35 m. uit grof, grindrijk zand van de Formatie van Kreftenheye. De ondiepe ondergrond van het studiegebied bestaat tot 10 á 12 m diepte voornamelijk uit fluvioperiglaciale afzettingen van de Formatie van Twente. In het Weichselien is de basis gelegd voor het huidige landschap dat zich in dit gebied manifesteert door min of

meer vlakke dekzandgebieden met hoge ruggen van jong dekzand. Deze ruggen grenzen vaak aan beekdalen. De latere holocene afzettingen, zoals beekklei, broek- en zeggeveen zijn alleen terug te vinden in de beekdalen en laagtes in de dekzandgebieden (Formatie van Singraven).

De bodemkaart weerspiegelt in grote lijnen de geologische opbouw van het gebied. De hoge en relatief droge dekzandruggen en koppen zijn al decennia lang in gebruik geweest en nog steeds in gebruik als bouwland. Als gevolg van eeuwenlange bemesting met materiaal uit de potstal worden in deze gebieden vooral de oude cultuurgonden in de vorm van enkeerd- en laarpodzolgronden aangetroffen. Hierdoor zijn de oorspronkelijke ruggen nog verder opgehoogd. De lage delen zijn op de bodemkaart te herkennen als beekerd- en vlakvaaggronden. Op de overgang tussen de dekzandruggen en de beekdalen liggen de podzolgronden (o.a. gehele Stelkampsveld). Binnen de beekdalen liggen nog enkele kleine arealen moerige en veengronden.

De afwatering van het gebied geschiedt in noordelijke richting via enkele beken. Langs het zuidwesten en westen stroomt de Visserij. Centraal door het gebied stroomt de Oude beek. In de loop van de 20<sup>e</sup> eeuw is de Afwatering van Schuurman gegraven. Langs de oostkant stroomt de Lebbinkbeek of Groenlosche Slinge. De hoogteligging van Beekvliet varieert globaal van 12,50 m tot 16,75 m +NAP, met een flauwe helling van ZZO naar NNW. Deze helling komt overeen met de stromingsrichting van het grond- en oppervlaktewater.

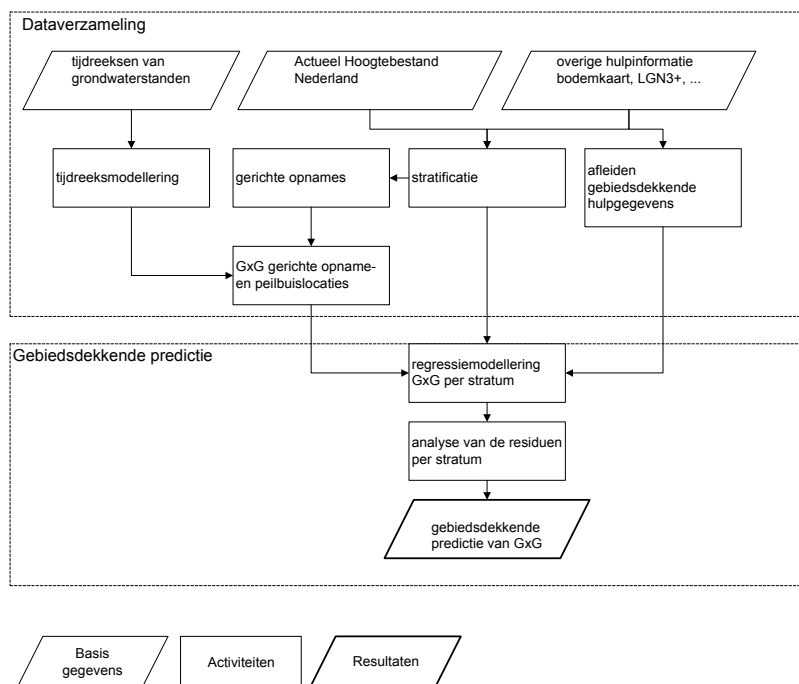
## 6.2 GD-methode

Sinds het eind van de vorige eeuw wordt gebruik gemaakt van een nieuwe methode waarmee de grondwaterdynamiek kan worden gekarteerd en geactualiseerd. De methode is sterk gebaseerd op statistische technieken. Deze methode is door Finke *et al.* (1999a,b, 2002, 2004, 2005) en De Gruijter *et al.* (2004) beschreven. De globale werkwijze bij de gebiedsdekkende voorspelling van GxG is weergegeven in figuur 6.1. Voor een uitgebreide beschrijving van de methode inclusief een plausibiliteitstoets per onderdeel wordt verwezen naar een Gt-actualisatie studie die is uitgevoerd voor het Waterschap Regge en Dinkel (Van der Gaast *et al.*, 2006b).

### ***Globale beschrijving van de werkwijze***

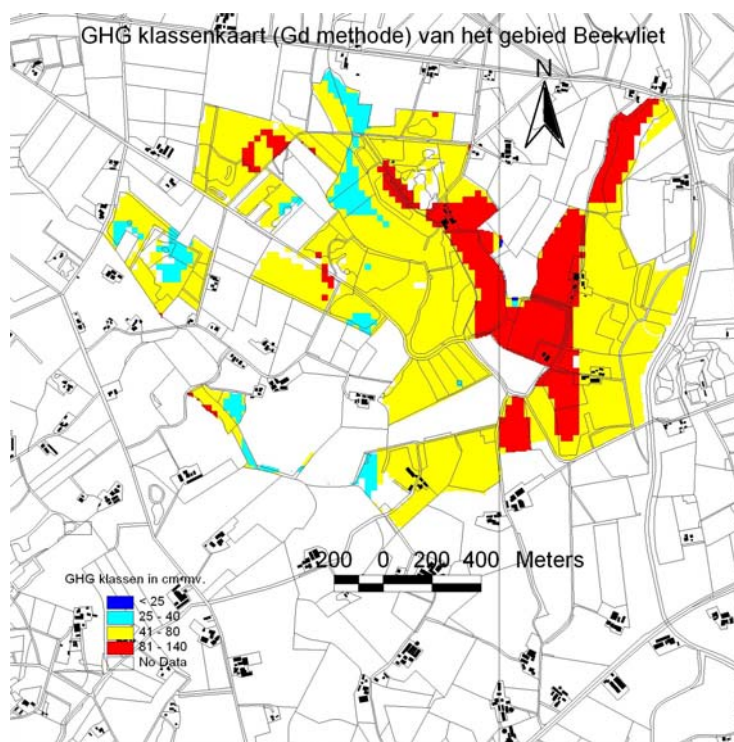
De ontwikkelde methode bestaat uit de volgende fasen:

1. *Stratificatie:* In deze eerste fase worden binnen het te karteren gebied hydrologisch homogene deelgebieden (strata) onderscheiden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van voornamelijk globale bodemkundige en geologische informatie.
2. *Tijdreeksanalyse:* Binnen de strata worden vervolgens tijdreeksen van grondwaterstandsgegevens voor stambuizen verzameld, die vervolgens door middel van tijdreeksanalyse worden omgezet naar een klimaatrepresentatieve GxG.
3. *Stambuisregressie:* Om het meetnet te verdichten worden metingen uitgevoerd in boorgaten. In de boorgaten worden zogenaamde 'gerichte opnamen' uitgevoerd op tijdstippen, dat de grondwaterstand zich rond GHG- of GLG-niveau bevindt. Middels stambuisregressie worden de gerichte opnamen vertaald naar een klimaatrepresentatieve GxG.
4. *Geostatistische interpolatie:* Voor deze fase wordt gebiedsdekkende hulpinformatie over topografie en waterhuishouding verzameld. Vervolgens wordt de GxG's ruimtelijk geïnterpoleerd tussen de meetpunten, gebruik makend van de gebiedsdekkende hulpinformatie.
5. *Karakterisering van het grondwaterstandsverloop:* In deze fase wordt het geïnterpoleerde GHG- en GLG-vlak omgezet in Gt-vlakken, en worden deze cartografisch weergegeven. Naast het bepalen van de Gt worden duurlijnen en daggemiddelde regimecurves gegenereerd om het grondwaterstandsverloop te karakteriseren.



*Figuur 6.1 Stroomschema van de gevolgde werkwijze bij een Gd-kartering*

Voor het pilotgebied Beekvliet is een uitsnede van de GD-kaart gemaakt (figuur 6.2). In de kaart is te zien dat in het grootste gedeelte van het pilotgebied een GHG klasse tussen de 40 en 80 cm voorkomt. Daarnaast komt de relatief hoge droge rug in de kaart tot uiting. Het natte gedeelte aan weerszijde van de relatief hoge rug komt echter niet tot uiting in de kaart.



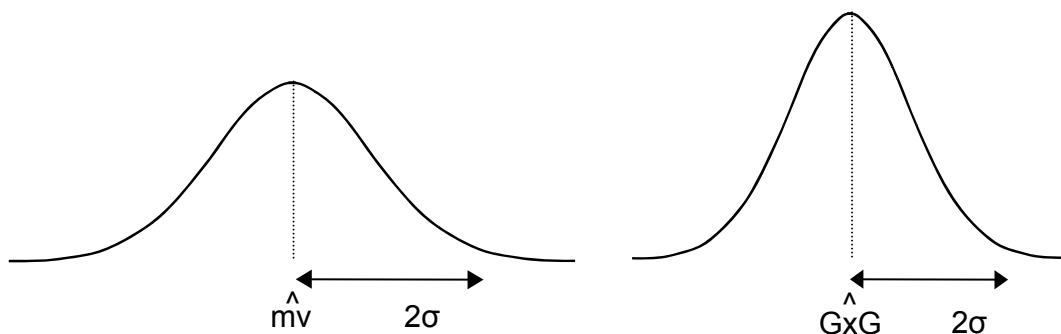
*Figuur 6.2 GHG-klassenkaart voor het pilotgebied Beekvliet op basis van de landelijke GD-methode*

### 6.3 Gt op basis van karteerbare kenmerken

Aangezien de Gd-methode kaarten oplevert die een aanzienlijke afvlakking van de GxG tot gevolg hebben, komt de landschappelijke patrooninformatie minder goed tot uiting in de kaart (Van der Gaast *et al.*, 2006a). Voor een landelijke studie is een methode ontwikkeld waarbij vooral is gelet op het behoud van patrooninformatie (Van der Gaast en Massop, 2005a; Van der Gaast *et al.*, 2005). Deze methode is toegepast om op een snelle en eenvoudige wijze een indruk te krijgen van de actuele Gt, waarbij aangesloten wordt bij de beschikbare bodemkundige informatie en derhalve rekening wordt gehouden met patronen die herkenbaar zijn in het landschap. De resultaten van de methode zijn in het beheergebied van Waterschap Regge en Dinkel gevalideerd (Van der Gaast *et al.*, 2006b).

Door Van der Sluijs (1990) is onderzoek gedaan naar de gemiddelde waarden van de GHG en GLG voor de verschillende Gt's. Hierbij is gebruik gemaakt van peilbuizen, waarin langjarig grondwaterstanden zijn gemeten. Dit onderzoek heeft geresulteerd in de bekende 'Van der Sluijs tabel'. Recent is een onderzoek uitgevoerd naar de karakterisering van de freatische grondwaterstand op basis van puntgegevens (Van der Gaast en Massop, 2003a). Hiervoor is de fluctuatie van de grondwaterstand op een groot aantal peilbuislocaties onderzocht, wat heeft geresulteerd in een uitgebreide dataset die bestaat uit 3117 buislocaties. Op basis van deze gegevens is eveneens een tabel opgezet die de relatie weergeeft tussen de Gt en de GxG, die bestaat uit de GHG, GVG en GLG (tabel 6.1).

De gegevens in tabel 6.1 kunnen worden vertaald in een kansverdeling. Deze kansverdeling komt dus ongeveer overeen met het klassegemiddelde van de desbetreffende Gt en de totale klassebreedte. Deze informatie kan worden gebruikt om de Gt-vlakken in de bestaande bodem- en Gt-kaart schaal 1 : 50 000 nader in te delen. Naast de kansverdeling van de Gt is immers ook de maaiveldverdeling bekend. Door gebruik te maken van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) (25 x 25) kan ook voor het maaiveld een kansverdeling worden gemaakt. In figuur 6.3 zijn beide verdelingen schematisch weergegeven. Door de kansverdeling voor het maaiveld binnen een bodem/Gt-vlak op de bodem- en Gt-kaart schaal 1 : 50 000 te transformeren naar een kansverdeling voor de GxG, is het vervolgens mogelijk om kaarten te maken van de GxG. Op deze manier wordt op een eenvoudige wijze een neerschaling van de Gt naar gridcellen van 25 meter bewerkstelligd (Van der Gaast *et al.*, 2005). Het gebruik van tabel 6.1 voor het neerschalen van de Gt levert kaartbeelden van de GxG voor de situatie tijdens de karteringsperiode van de bodem- en Gt-kaart schaal 1 : 50 000.



Figuur 6.3 Schematische weergave van de kansverdeling voor het maaiveld ( $m_v$ ) en de GxG (naar: Van der Gaast en Massop, 2005a).

Tabel 6.1 Relatie tussen de Gt en de GxG op basis van tijdreeksresultaten voor peilbuisgegevens (cm min maaiveld) (naar: Van der Gaast en Massop, 2005a)

Gt	Aantal	GHG		GVG		GLG			
		Gemiddeld (cm)	Std (cm)	Gemiddeld (cm)	Std (cm)	Gemiddeld (cm)	Std (cm)		
I	102	-5,3	(-5)	12,2	10,6	11,0	36,5	(38)	9,2
II	178	4,8	(7)	14,4	28,1	13,5	65,6	(66)	8,7
II*	44	35,9	(32)	9,1	53,4	6,6	73,4	(67)	6,0
III	177	13,3	(17)	9,0	43,4	11,0	97,7	(103)	11,4
III*	108	32,7	(32)	4,2	60,4	7,0	101,9	(102)	11,0
IV	176	56,7	(56)	11,7	78,2	10,2	106,9	(104)	10,4
V	58	16,8	(17)	6,2	56,1	10,6	139,7	(135)	16,9
V*	118	33,5	(32)	4,3	70,5	10,1	145,6	(142)	22,4
VI	716	62,4	(61)	11,2	95,6	12,8	159,2	(155)	26,1
VII	1005	105,6	(101)	16,3	134,1	17,7	191,1	(190)	33,0
VIII	437	201,1	(185)	81,0	228,6	81,9	294,6	(281)	87,3

() waarde in de Van der Sluijs tabel

Door de jaren heen hebben allerlei ingrepen in de waterhuishouding plaatsgevonden die voornamelijk tot lagere grondwaterstanden hebben geleid (Braat *et al.*, 1989). Daarnaast is een deel van de grondwaterstands daling (vooral in de laatste decennia) ook toe te schrijven aan een aanzienlijke toename van de droge stofproductie (toename waterverbruik) bij de meeste landbouwgewassen door o.a. veredeling en de keuze van andere landbouwgewassen. Om meer inzicht in de verschuiving van de Gt te krijgen zijn in de eerder genoemde landsdekkende studie de buislocaties over de bodem/Gt-vlakken van de bodemkaart 1 : 50 000 gelegd (Van der Gaast en Massop, 2005a; Van der Gaast *et al.*, 2005). Vervolgens is het actuele zwaartepunt van de bodem/Gt-kaartvlakken die zijn weergegeven op de bodemkaart schaal 1 : 50.000 bepaald. Op basis van deze gegevens kan worden geconcludeerd dat er een grondwaterstands daling en derhalve verdroging heeft plaatsgevonden.

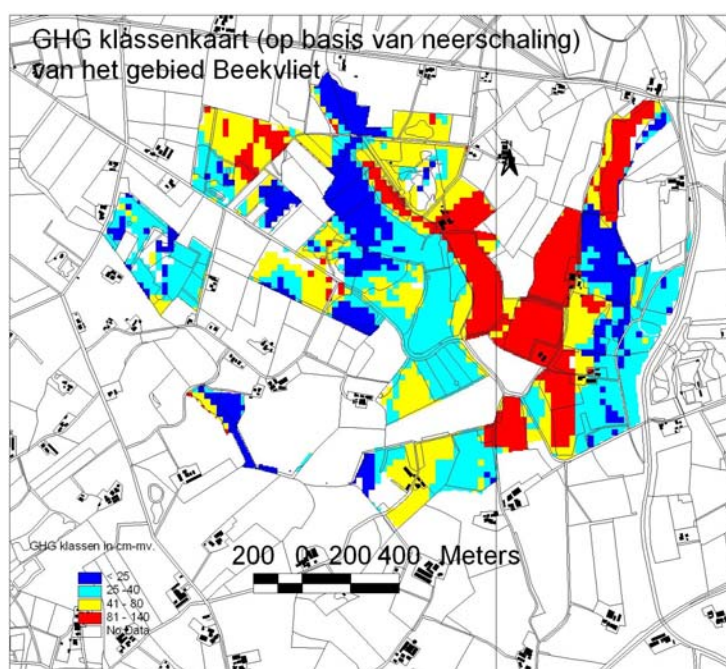
Het bepalen van de verdroging op basis van buisgegevens blijkt echter te resulteren in een overschatting van de grondwaterstands daling en de hiermee samenhangende verdroging. Deze overschatting wordt in belangrijke mate veroorzaakt door anisotropie, hoog in het bodemprofiel en kan worden omschreven als numerieke verdroging (Van der Gaast *et al.*, 2006b; Van der Gaast *et al.*, 2008). Door gebruik te maken van de veldschattingen uit detailkarteringen is dit probleem te ondervangen. Hierbij worden de puntgegevens uit de detailkarteringen in plaats van buisgegevens over de bodemkaart 1 : 50 000 gelegd om de verschuiving van de Gt te bepalen. In tabel 6.2 is het gemiddelde en de spreiding op basis van de detailkarteringsinformatie weergegeven. De tabel is opgezet op basis van 111 208 veldschattingen, verdeeld over een groot aantal detailkarteringen in het zandgebied binnen Nederland (Van der Gaast *et al.*, 2006a).

In figuur 6.4 is de met deze methode afgeleide GHG-lassenkaart voor het pilotgebied weergegeven. In de kaart komen zowel de relatief hoog gelegen droge dekzandrug als het natte natuurgebied goed tot uiting.

Tabel 6.2 Relatie tussen de Gt en de GxG op basis van puntinformatie uit recente detailkarteringen in het zandgebied van Nederland in kaartvlakken van de bodemkaart 1 : 50 000 (cm min maaiveld)

Gt	Aantal	GHG		GVG		GLG	
		Gemiddelde (cm)	Std (cm)	Gemiddelde (cm)	Std (cm)	Gemiddelde (cm)	Std (cm)
I	1 193	14,8	10,0	40,9	20	65,9	12,9
II	10 314	22,9	17,3	62,8	23,4	84,3	24,8
II*	1 045	35,2	16,3	62,8	23,4	98,7	25,1
III	16 156	33,9	20,7	69,1	21,0	117,4	28,5
III*	9 369	38,4	20,3	66,9	18,4	114,6	25,5
IV	3 968	47,7	21,8	73,4	22,1	117,8	24,1
V	16 662	35,2	24,0	76,7	19,9	156,1	31,4
V*	10 015	46,8	26,5	81,3	21,1	151,2	36,7
VI	25 929	62,3	33,1	95,8	30,9	157,4	37,1
VII	10 475	100,1	50,4	126,0	48,0	178,6	40,5
VIII	6 082	129,8	51,8	138,0	41,4	184,6	36,2

\*GVG gegevens zijn gebaseerd op detailkarteringsinformatie binnen het Waterschap Regge en Dinkel



Figuur 6.4 GHG-lassenkaart voor het pilotgebied Beekvliet op basis van de karteerbare kenmerken-methode

## 6.4 Gt-kartering op basis van fysieke tijdreeksanalyse

Voor een grondwaterregime dat gedurende het jaar fluctueert door het neerslagoverschot (neerslag minus verdamping) is het niet alleen van belang dat de gemiddelde grondwaterstand representatief is, maar ook dat er op die locatie sprake is van een representatieve grondwaterstandsfluctuatie (dynamiek). Een goede maat voor de dynamiek van een grondwaterstand die voornamelijk afhankelijk is van het neerslagoverschot is de responskarakteristiek (Lankester en Maas, 1996). Een grondwaterstand reageert op een



bepaalde manier op een neerslaggebeurtenis. In figuur 6.5 zijn een aantal responskarakteristieken schematisch weergegeven. Stel dat we te maken hebben met een vlakke grondwaterspiegel. Op  $t=0$  gaat het regenen met een constante intensiteit van 1 mm per tijdseenheid. We meten hoe de grondwaterstand naar zijn eindwaarde stijgt. De parameter  $b_1$  geeft aan hoe hoog de grondwaterstand uiteindelijk zal stijgen. Deze is voor gebieden met grotere drainageweerstanden groter dan gebieden met kleine drainageweerstanden. De parameter  $b_2$  geeft de traagheid van het systeem weer. Hoe groter de berging of hoe groter de drainageweerstand, des te trager het systeem. Curve 1 zou kunnen gelden voor een goed gedraineerde kleigrond, curve 2 voor een goed gedraineerde zandgrond en curve 3 voor een open zandgrond ver van een waterloop (bijv. dekzandrug met Gt VII). Dus naast de gemiddelde grondwaterstand  $h_{\text{gem}}$  kan de mate van gelijkheid van een grondwaterregime worden afgeleid uit de parameters  $b_1$  en  $b_2$ .

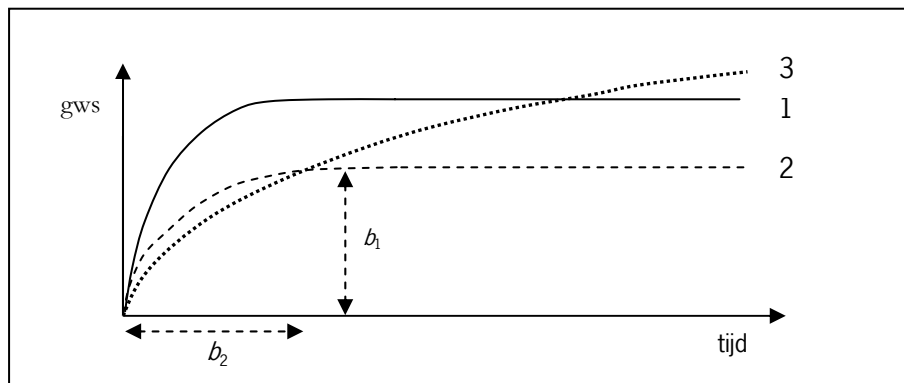


Fig 6.5 Responskarakteristieken van de grondwaterstand op het neerslagoverschot (Bierkens en Massop, 2000).

De grondwaterstand als functie van het neerslagoverschot op een locatie kan meestal goed worden gemodelleerd met het volgende model (Knotters en Bierkens, 1999):

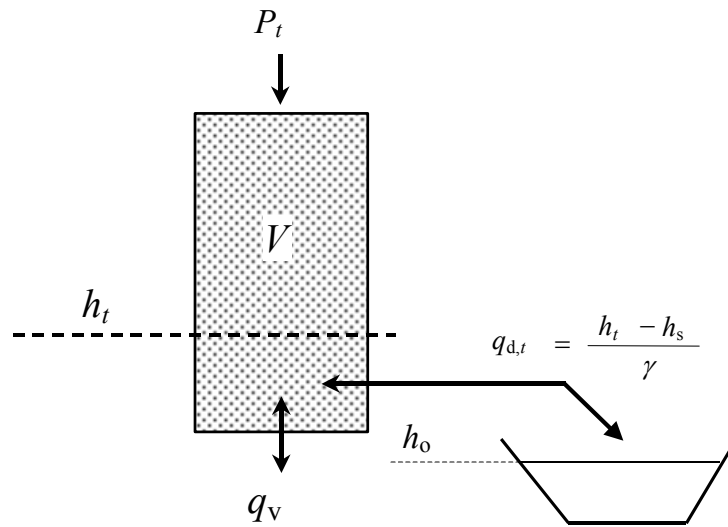
$$h_t = c + \delta(b_{t-\Delta t} - c) + \omega P_t \quad (6.1)$$

Hierbij is  $h_t$  de grondwaterstand op tijdstip  $t$  (cm -mv),  $c$  is de basisgrondwaterstand (cm -mv) (dat is de grondwaterstand die zou optreden als het neerslagoverschot voor langere tijd gelijk aan 0 zou zijn<sup>1</sup>),  $t$  de tijd (dagen),  $\Delta t$  de discrete tijdstap (dagen) en  $P_t$  het cumulatieve neerslagoverschot (cm) over tijdstap  $[t - \Delta t, t]$ . De parameters  $\delta$  en  $\omega$  bepalen de grondwaterdynamiek. Deze parameters zijn één op één verwant met de parameters  $b_1$  en  $b_2$  van de responsiekarakteristiek (Knotters en Bierkens, 1999; Bierkens en Massop, 2000):

$$\begin{aligned} \delta = \exp\left(\frac{-3\Delta t}{b_2}\right) & \Leftrightarrow b_2 = \frac{-3\Delta t}{\ln(\delta)} \\ \omega = b_1 \left[1 - \exp\left(\frac{-3\Delta t}{b_2}\right)\right] & \Leftrightarrow b_1 = \frac{\omega}{1 - \delta} \end{aligned} \quad (6.2)$$

<sup>1</sup> Als er geen kwel of infiltratie is dan is  $c$  gelijk aan de oppervlaktewaterstand. In geval van kwel is  $c$  hoger dan de oppervlaktewaterstand, in geval van infiltratie lager (zie vergelijking 3).

Dus in plaats van het gebruik van  $b_1$  en  $b_2$  zouden we ook  $\delta$  en  $\omega$  kunnen gebruiken. Deze parameters zijn meer herkenbaar en zijn ook voor de tijdreeksanalyse bekend (Bierkens en Massop, 2000).



Figuur 6.6 Schematische weergave van de waterbalans van een grondkolom (Bierkens en Bron, 2000).

Overigens geldt voor model (1) dat de parameters  $\delta$  en  $\omega$  niet alleen de respons van de grondwaterstand op het neerslagoverschot beschrijven, maar ook de respons op een verandering van het oppervlaktewaterpeil. Dit kan als volgt worden afgeleid. Door een waterbalans van de bodem en het ondiepe grondwater op te stellen (figuur 6.6) kunnen de parameters  $c$ ,  $\delta$  en  $\omega$  gerelateerd worden aan de meer bekende fysische parameters drainageweerstand  $\gamma$ , effectieve bergingscoëfficiënt  $\mu$ , de oppervlaktewaterstand  $h_o$  en de kwel/wegzijing  $q_v$  (Knotters en Bierkens, 1999):

$$\begin{aligned} \delta &= \exp\left(\frac{-\Delta t}{\mu\gamma}\right) \\ \omega &= \gamma(1 - \delta) \\ c &= \gamma q_v + h_o \end{aligned} \quad (6.3)$$

Stel nu dat het oppervlaktewaterpeil niet constant is, maar verandert in de tijd. Als we in vergelijking (1) invullen  $c = \gamma q_v + h_{o,t}$  met  $h_{o,t}$  als de in de tijd variërende oppervlaktewaterstand dan resulteert dit in:

$$h_t = (1 - \delta)\gamma q_v + \delta h_{t-\Delta t} + (1 - \delta)h_{o,t} + \omega P_t \quad (6.4)$$

Formule (6.4) geeft aan dat de reactie van de grondwaterstand op een verandering van de oppervlaktewaterstand bepaald wordt door dezelfde parameter  $\delta$  die op zijn beurt weer afhankelijk is van de drainageweerstand en de bergingscoëfficiënt (zie formule 6.3). We kunnen dus concluderen dat de parameters  $\delta$  en  $\omega$  de respons bepalen van de grondwaterstand op zowel het neerslagoverschot als het oppervlaktewaterpeil.

Bij het gebruik van het tijdreeksmodel KALTFN (Bierkens en Bron, 2000) kan men een fysische interpretatie maken van de gekalibreerde tijdreeksparameters. Het deterministische gedeelte van KALTFN is weergegeven in formule (6.1). Indien men er van uitgaat dat het drainageniveau

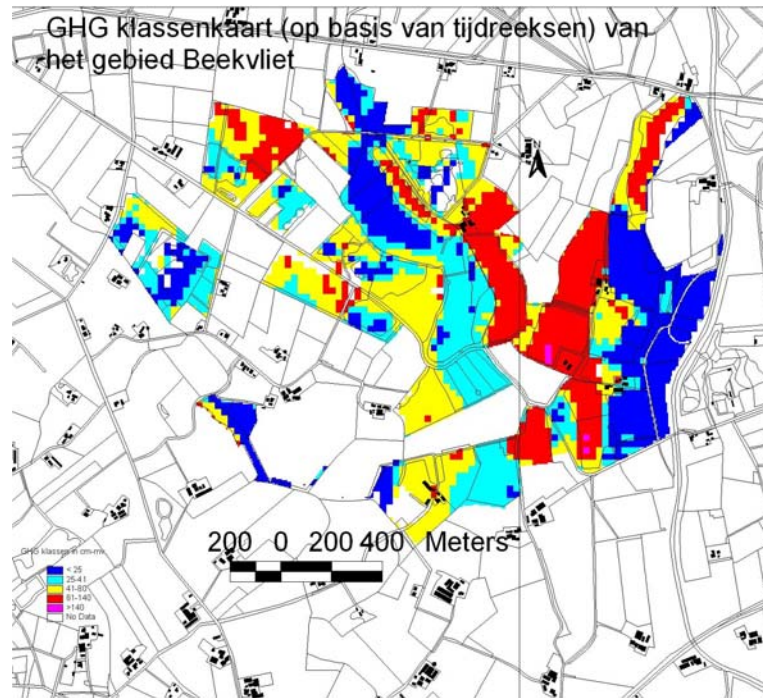
$h_0$  (ten opzichte van maaiveld) constant is, dan kunnen de drainageweerstand  $\gamma$  [T], de effectieve bergingscoëfficiënt  $\mu$  [-] en de onderrandflux (kwel/wegzijging)  $q_v$  [LT<sup>-1</sup>] uit de parameters  $\delta$ ,  $\omega$  en  $c$  en de tijdstap  $\Delta t$  als volgt worden berekend (Knotters en Bierkens, 1999):

$$\gamma = \frac{\omega}{1 - \delta} \quad \mu = \frac{-\Delta t}{\gamma \ln \delta} \quad q_v = \frac{c - h_0}{\gamma} \quad (6.5)$$

Bovenstaande analyse maakt duidelijk dat indien de drainageweerstand, de bergingscoëfficiënt, de ontwateringsbasis en de kwel/wegzijging bekend is er voor die locatie een tijdreeks van de grondwaterstand kan worden gegenereerd. Deze tijdreeks kan vervolgens worden omgezet naar een GxG. In het kader van een aantal recente onderzoeken zijn de benodigde fysische gegevens landsdekkend op een hoge resolutie beschikbaar gekomen.

- *Drainageweerstand*: De drainageweerstand is in het kader van het onderzoek 'Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken' (Van der Gaast *et al.*, 2006a) beschikbaar gekomen. Voor dit onderzoek is het model SWAP (Van Dam *et al.*, 1997) voor een groot aantal peilbuislocaties gekalibreerd. Bij deze kalibratie is een factor gekalibreerd die in combinatie met de slootdichtheid, die met een resolutie van 25 x 25 meter beschikbaar is, de drainageweerstand bepaald.
- *Bergingscoëfficiënt*: De bergingscoëfficiënt is in het kader van het onderzoek 'Monitoring van Verdroging' (Van der Gaast *et al.*, 2005) beschikbaar gekomen. In dit onderzoek zijn op basis van modelberekeningen met CAPSEV (Wesseling, 1991) voor een aantal standaard-bodemprofielen berekeningen uitgevoerd. Uit de modelresultaten is de effectieve bergingscoëfficiënt voor verschillende grondwaterstandsniveaus bepaald. Deze informatie is vervolgens omgezet naar metamodellen die per standaardbodemprofiel de relatie tussen de grondwaterstand en de bergingscoëfficiënt weergeven (Van der Gaast *et al.*, 2005).
- *Basisgrondwaterstand*: Hiervoor wordt aangenomen dat deze ongeveer overeenkomt met de gemiddelde grondwaterstand. De waarde van de gemiddelde grondwaterstand is geschat met het gemiddelde van de geactualiseerde GHG en de GLG, die bepaald zijn in het project 'Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken' (Van der Gaast *et al.*, 2006a). Met de eerdergenoemde formules kan de basisgrondwaterstand met behulp van gegevens van de kwel/wegzijging en de drainageweerstand worden omgezet naar een drainagebasis (oppervlaktewaterpeil).
- *Kwel/wegzijging*: De kwel/wegzijging is in het kader van het onderzoek 'Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken' (Van der Gaast *et al.*, 2006a) bepaald. In dat onderzoek is de onderrand van het model SWAP in de vorm van een diepe stijghoogte en een weerstand gekalibreerd. Op deze manier zijn kwel/wegzijgingsgegevens beschikbaar gekomen.

Voor het vervaardigen van een Gt-kaart is er op basis van de bovenstaande gegevens in combinatie met een fysische tijdreeks van het neerslagoverschot, voor ieder pixel van 25 bij 25 meter een tijdreeks van 30 jaar van de grondwaterstand gegenereerd. Hieruit is vervolgens de benodigde GxG informatie afgeleid. In figuur 6.7 is de GHG-lassenkaart voor het pilotgebied weergegeven. In de kaart komen zowel de relatief hoog gelegen droge dekzandrug als het natte natuurgebied goed tot uiting.



*Figuur 6.7 GHG-lassenkaart voor het pilotgebied Beekvliet op basis van tijdreeksanalyse*

## 6.5 Verwantschap met behulp van interpolatie

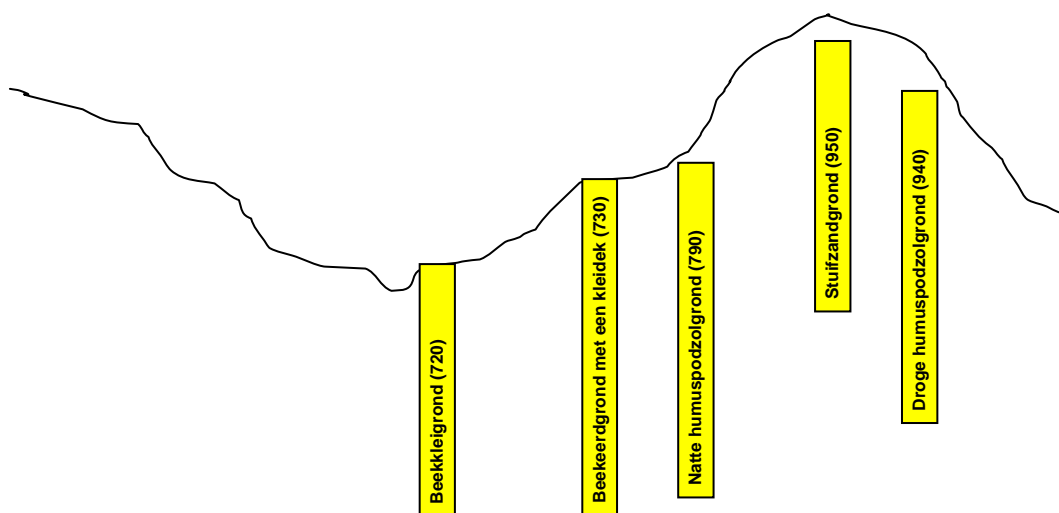
Bij interpolatietechnieken wordt meestal een onderlinge samenhang van punten verondersteld die groter is naarmate de afstand tussen de punten kleiner is (Burrough en McDonnell, 1998). Zowel bij 'inverse distance' als bij kriging wordt uitgegaan van dit principe. Het principe is gebaseerd op een verwantschap of samenhang (causaal verband) tussen puntlocaties op basis van de onderlinge afstand (ruimtelijke correlatie). De mate waarin de verwantschap bestaat, wordt vastgesteld op basis van puntinformatie. Indien gebruik wordt gemaakt van trendanalyse door middel van regressie dan is het mogelijk om bij interpolatie hulpinformatie mee te nemen. Ook bij co-kriging is het mogelijk een verwantschap op basis van een andere variabele mee te nemen. Afgezien van 'inverse distance' wordt bij dit soort interpolatietechnieken de samenhang voor het gehele gebied of binnen van te voren gedefinieerde deelgebieden (strata) vastgesteld. Vooral bij puntgegevens die met een hoge resolutie beschikbaar zijn, is het wenselijk de verwantschap of samenhang tussen puntlocaties lokaal vast te stellen. Daarnaast is het gebruik van strata over het algemeen niet wenselijk aangezien dit kan leiden tot scherpe overgangen tussen strata. Verder is het mogelijk om gebruik te maken van een combinatie van trendanalyse en kriging in de vorm van 'universal kriging'.

Deze techniek wordt ook gebruikt bij de Gd-actualisatie, maar heeft eveneens als nadeel dat de samenhang voor het gehele gebied of binnen van te voren gedefinieerde strata wordt vastgesteld. Bij de Gd-actualisatie wordt de trend in de vorm van een regressie met hulpinformatie per stratum vastgesteld, waarna de residuen voor het gehele gebied worden gebruikt voor het opstellen van het semivariogram. Bij de interpolatie van de detailkarteringsinformatie is het gezien de hoge punt dichtheid mogelijk om moving window kriging toe te passen. Voordelen hiervan zijn dat er gebruik wordt gemaakt van lokale informatie. Het nadeel is echter, dat op voorhand niet bekend is wat de grootte van het

window zal moeten zijn en het veel tijd vergt om deze techniek toe te passen in relatie tot de detailkarteringen. Uiteindelijk gaat het er bij de ruimtelijke interpolatie voornamelijk om dat er geïnterpoleerd wordt op basis van causale verbanden (verwantschap). Daarom is er een eenvoudige nieuwe ruimtelijke interpolatietechniek ontwikkeld welke dicht staat bij de traditionele karteringstechnieken en sturing op basis van kennis mogelijk maakt (Van der Gaast *et al.*, 2006d).

Bij de nieuwe techniek wordt gebruik gemaakt van de inverse distance techniek, waarbij er van wordt uitgegaan, dat de onderlinge samenhang tussen punten toeneemt naarmate “de afstand” tussen de punten kleiner is. De verwantschap, die bij ‘inverse distance’ interpolatie normaal gesproken een functie is van de onderlinge afstand, wordt in dit geval echter uitgebreid door andere factoren mee te nemen. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de hoogte van het maaiveld. Vooral bij het interpoleren van de freatische grondwaterstand mag men immers verwachten dat binnen hetzelfde bodemtype de verwantschap met een nabijgelegen andere locatie groter is naarmate de hoogteligging van het maaiveld meer overeenkomsten vertoont. Bij interpolatie met gebruikmaking van de hoogte van het maaiveld is het evenals bij interpolatie in de ruimte mogelijk om afstanden te bepalen. Het enige verschil is dat bij het gebruik van de hoogte van het maaiveld een ‘afstand’ in de verticale richting wordt bepaald en derhalve de afstand gelijk is aan het hoogteverschil tussen de punten.

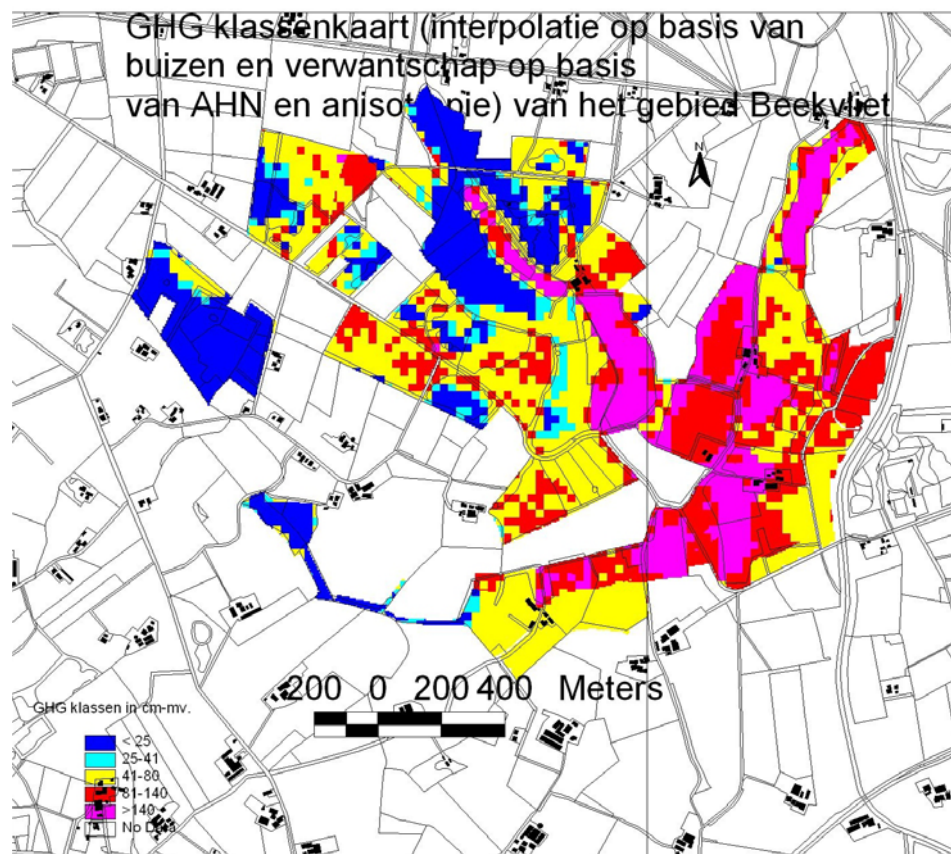
Nog een stapje verder is het gebruik van bodemtypen. Indien wederom de grondwaterstand als voorbeeld wordt gebruikt dan is het plausibel, mits er gekeken wordt binnen een voldoende kleine straal, dat de grondwaterstand binnen een bodemtype meestal meer overeenkomst vertoont dan die tussen bodemtypen. Omdat bodemtype een categorische variabele is kunnen ‘afstanden’ tussen bodemtypen niet direct worden bepaald. Het is echter wel mogelijk om bodemtypen op basis van hun landschappelijke ligging om te zetten naar een ratio schaal (figuur 6.8). Van bodemtypen die in het landschap naast elkaar liggen mag men verwachten dat de onderlinge samenhang en verwantschap groter is dan bij bodemtypen die in het landschap ver uit elkaar liggen. Het naar ratio opdelen van bodemtypen op basis van hun landschappelijke ligging maakt het mogelijk om ‘afstanden’ tussen bodems te bepalen.



*Figuur 6.8 Schematische weergave van het landschap waarbij de bodemtypen naar een ratio schaal zijn omgezet.*

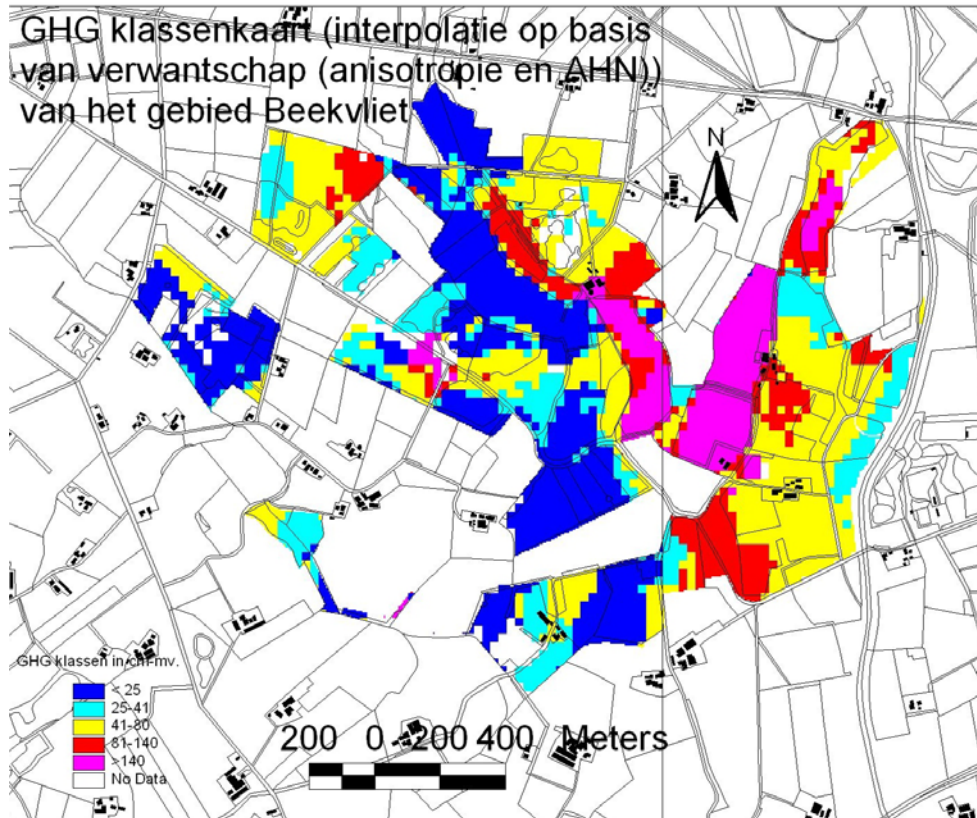
Door deze benadering en door gebruik te maken van verschillende 'afstanden' is het mogelijk te interpoleren op basis van verschillende soorten van verwantschappen (causale verbanden). Naast de afstand hebben we nu ook de mogelijkheid om te interpoleren op basis van hoogte van het maaiveld en bodemtypen. Combinatie van dergelijke verwantschap parameters is door gebruik te maken van weging eenvoudig te realiseren. Doordat de verschillende 'afstanden' die gebruikt worden een duidelijk verschillende schaal hebben, waardoor onderling vergelijk lastig is, is er voor gekozen de afstand te normaliseren alvorens een weging toe te passen. Bij deze techniek is het tevens mogelijk om bij de interpolatie de ruimtelijke samenhang sneller of langzamer af te laten nemen door simpelweg gebruik te maken van lineaire, kwadratische of kubische machtsfuncties. In een onderzoek naar de grondwaterdynamiek in het Waterschap Regge en Dinkel is deze techniek toegepast en vergeleken met andere Gt-karteringsmethoden (Van der Gaast *et al.*, 2006b).

In figuur 6.9 en 6.10 zijn de GHG-lassenkaart voor het pilotgebied weergegeven, waarbij naast de anisotropiekaart gebruik is gemaakt van peilbuisgegevens (figuur 6.9) of van veldschattingen (figuur 6.10). In beide kaarten komen zowel de relatief hoog gelegen droge dekzandrug als het natte natuurgebied goed tot uiting. Afvlakking van de meetgegevens, hetgeen door alle interpolatietechnieken in meer of mindere mate plaatsvindt, wordt door het gebruik van deze techniek tot een minimum beperkt.



Figuur 6.9 GHG-lassenkaart voor het pilotgebied Beekvliet op basis van de verwantschapsmethode waarbij gebruik is gemaakt van peilbuisgegevens.





*Figuur 6.10 GHG-klassenkaart voor het pilotgebied Beekvliet op basis van de verwantschapsmethode waarbij gebruik is gemaakt van veldschattingen.*





## 7 Verificatie

### 7.1 Materiaal

Voor natuur is de GVG een belangrijke variabele. Aangezien de GVG niet direct karteerbaar is en deze wordt afgeleid van de GHG en GLG (§ 4.3) is er bij de vergelijking van de gebruikte karteringsmethoden voor gekozen om gebruik te maken van de GHG-kaarten. De in hoofdstuk 6 afgeleide GHG-kaarten voor het pilotgebied Beekvliet zijn vergeleken met veldwaarnemingen. Hierbij is gebruik gemaakt van de detailkartering die in Beekvliet is uitgevoerd (Van Delft *et al.*, 2002). Deze Gt-kartering is uitgevoerd op een schaal 1 : 5000. Het betreft een relatief klein gebied van ca. 167 ha, waarbinnen op 171 puntlocaties metingen en/of schattingen zijn uitgevoerd. Voor de boorpuntinformatie wordt verwezen naar het onderzoek dat door Van Delft *et al.* (2002) is uitgevoerd. De gerichte opnames op puntlocaties zijn door middel van stambuisregressie omgezet naar GxG's. Vervolgens is een vlakdekkende kaart gemaakt met een resolutie van 5 x 5 meter. Hierbij is gebruik gemaakt van interpolatie met behulp van de inverse distance methode en maaiveldshoogte informatie uit het AHN.

Voorafgaande aan de verificatie heeft de projectgroep onder leiding van Van Delft een veldbezoek gebracht aan het pilotgebied (foto 7.1). Op basis van het veldbezoek kon worden vastgesteld, dat de detailkaart van Beekvliet een goed beeld geeft van de GxG. De GHG wordt minder goed geschat (te diep) op de locaties, waar anisotropie hoog in het bodemprofiel voorkomt. De goede kwaliteit van de kaart maakt het mogelijk om de kaart te gebruiken als verificatiekaart. Aangezien de informatie over de GxG voor zowel de puntinformatie als ook voor de vlakdekkende informatie is berekend met modellen en deze geen betrekking heeft op de werkelijke GxG betreft de vergelijking een verificatie in plaats van een validatie. Daarnaast dient echter wel te worden opgemerkt dat uit het veldbezoek naar voren is gekomen, dat het op een juiste manier in beeld brengen van de GxG voor dit soort natuurgebieden alleen mogelijk is, indien gebruik wordt gemaakt van een zeer gedetailleerd schaalniveau.



Foto 7.1 Steltkampsveld in het natuurgebied Beekvliet

Om een objectieve vergelijking tussen de gebruikte methoden mogelijk te maken, is vanwege het feit dat de karteringsdiepte van de verschillende methoden begrensd is, alleen gebruik gemaakt van gegevens tot een diepte van 150 cm -m.v.. De verificatie is uitgevoerd voor de volgende vijf Gt-karteringsmethoden:

- *GD-methode*: Gd-kaart conform de beschreven Gd-methode welke voor het zandgebied van Nederland beschikbaar is (paragraaf 6.2);
- *Karteerbare kenmerken*: Actuele Gt op basis van karteerbare kenmerken waarbij gebruik is gemaakt van een neergeschalingstechniek op basis van een verschuivingstabel conform de beschrijving. De kaart is landsdekkend beschikbaar (paragraaf 6.3);
- *Tijdreeks (FTM)*: GxG informatie afgeleid van fysische tijdreeksen per pixel, gebaseerd op karteerbare kenmerken (paragraaf 6.4);
- *Verwantschapsmethode*:
  - Geïnterpoleerde GxG met behulp van een nieuwe interpolatiemethode op basis van verwantschap (AHN (25 m grid) en anisotropie (bodemkaart schaal 1 : 50.000)), waarbij gebruik is gemaakt van buisinformatie (paragraaf 6.5);
  - Geïnterpoleerde GxG met behulp van een nieuwe interpolatiemethode op basis van verwantschap (AHN (25 m grid) en anisotropie (bodemkaart schaal 1 : 50.000)), waarbij gebruik is gemaakt van veldschattingen uit een detailkartering (paragraaf 6.5).

## 7.2 Methode

Voor de verificatie is het van belang inzicht te hebben in de gebruikte methode. Hierbij gaat het zowel om de methode die gebruikt is voor het verkrijgen van puntinformatie als om de methode die gebruikt is om het kaartbeeld vlakdekkend in te vullen. Bij de detailkartering van Beekvliet is gebruik gemaakt van gerichte opnames die op basis van stambuisregressie worden omgezet naar een GxG (Van Delft *et al.*, 2002). Deze methode, om puntinformatie op de kaart te zetten, wordt ook toegepast bij de GD-methode (Van Kekem *et al.*, 2005). Hierdoor is er een gedeeltelijke methodische overlap, waardoor de verificatie niet toereikend is voor het gehele traject om te komen tot een vlakdekkende kaart. Dit heeft tot gevolg dat de verificatieresultaten voor de GD-methode mogelijk te optimistisch worden geschat. De gebruikte stambuizen set is voor beide kaarten echter verschillend, waardoor de methodische overlap naar verwachting weinig effect heeft op de verificatie.

Voor het vlakdekkend in kaart brengen van de GxG is bij de kartering in Beekvliet gebruik gemaakt van de inverse distance methode in combinatie met maaiveldshoogtegegevens uit het AHN. Bij alle te verifiëren methoden wordt gebruik gemaakt van het AHN, waardoor deze, afgezien van de gebruikte resolutie, geen onderscheid geeft tussen de methoden. Bij de twee verwantschapsmethoden is gebruik gemaakt van een interpolatie op basis van verwantschap. De methode is afgeleid van de inverse distance methode, wat een methodische overlap suggereert. Aangezien de methode is aangepast en er geen gebruik wordt gemaakt van een afstandsrelatie, zoals bij inverse distance, is de methodische overlap waarschijnlijk te verwaarlozen.

## 7.3 Kaartkwaliteit

In tabel 7.1 is het gemiddelde verschil (me) tussen de detailkartering Beekvliet en de vijf gebruikte karteringsmethoden weergegeven. In de tabel is te zien dat bij het gebruik van de gehele kaart alle karteringen systematisch natter uitvallen dan de detailkartering Beekvliet. Dit resultaat wordt veroorzaakt door het droge deel van het natuurgebied. Voor het droge deel worden in de detailkartering Beekvliet GHG's tot ongeveer 3 m -mv weergegeven. Aangezien

de andere karteringen geen diepe GHG's weergeven, wordt het gemiddelde verschil in hoge mate door het droge gebied bepaald. Op grond hiervan is het droge gebied bij de verdere analyse buiten beschouwing gelaten; dit is gerealiseerd door alleen gebruik te maken van het gebied waar de GHG in de detailkartering Beekvliet ondieper is dan 150 cm –mv. In tabel 7.1 komt het verschil duidelijk naar voren. Ook de interpretatie van de verificatieresultaten wordt sterk beïnvloed door het buiten beschouwing laten van het droge gebiedsdeel. De resultaten kunnen wellicht nog beïnvloed worden door de keuze van de grens van 150 cm.

Tabel 7.1 Verificatieresultaat voor de vijf karteringsmethoden (*me* = mean error; *Std* = Standard deviation; *RMSE* = Root Mean Squared Error)

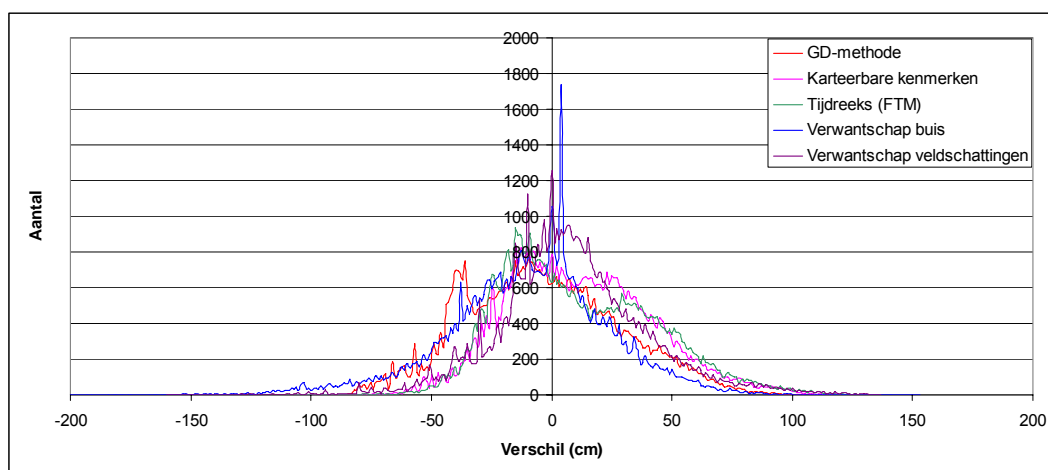
<b>Gehele karteringsgebied</b>				
<b>Karteringsmethode</b>	<b>me (cm)</b>	<b>Std (cm)</b>	<b>RMSE (cm)</b>	<b>hellingshoek (-)</b>
GD-methode	13,4	52,1	53,8	0,23
Karteerbare kenmerken	23,2	41,6	47,7	0,44
Tijdreeks (FTM)	23,5	43,5	49,4	0,42
Verwantschap buis	1,4	43,8	43,9	0,58
Verwantschap veldschattingen	17,8	39,3	43,2	0,56
<b>Gebied ondieper dan 150 cm</b>				
<b>Karteringsmethode</b>	<b>me (cm)</b>	<b>Std (cm)</b>	<b>RMSE (cm)</b>	<b>hellingshoek (-)</b>
GD-methode	-4,0	32,0	32,3	0,24
Karteerbare kenmerken	11,0	30,0	32,0	0,39
Tijdreeks (FTM)	10,8	31,8	33,6	0,39
Verwantschap buis	-9,7	33,4	34,8	0,82
Verwantschap veldschattingen	8,2	30,9	32,0	0,53

De GD-methode heeft indien alleen gekeken wordt naar het gebied met een GHG ondieper dan 150 cm, het geringste systematische verschil met de detailkartering Beekvliet (-4 cm), waardoor de zuiverheid het grootst is. De standaarddeviatie van de verschillen, de willekeurige of toevallige fout (precisie) is het kleinste bij de Gt op basis van karteerbare kenmerken. De Gt op basis van karteerbare kenmerken en de verwantschaps methode zijn het nauwkeurigst, aangezien de Root Mean Squared Error (RMSE), waarin zowel de systematische als de toevallige fout is verdisconteert, het kleinste is. Bij het gebruik van de buizen in combinatie met de verwantschapsmethode is het systematische verschil 9,7 cm droger dan de detailkartering. De beschikbare buizen liggen voornamelijk in het natte gedeelte (noorden en midden) van het natuurgebied, waardoor de GHG juist voor dit natte gebied goed wordt voorspeld. In het zuidelijke en oostelijk deel van het onderzoeksgebied ontbreken de buizen. In deze gebieden wordt de GHG juist te droog voorspeld. De afvlakkende werking van de methode is een mogelijke oorzaak voor de drogere voorspelling van de GHG op basis van buizen.

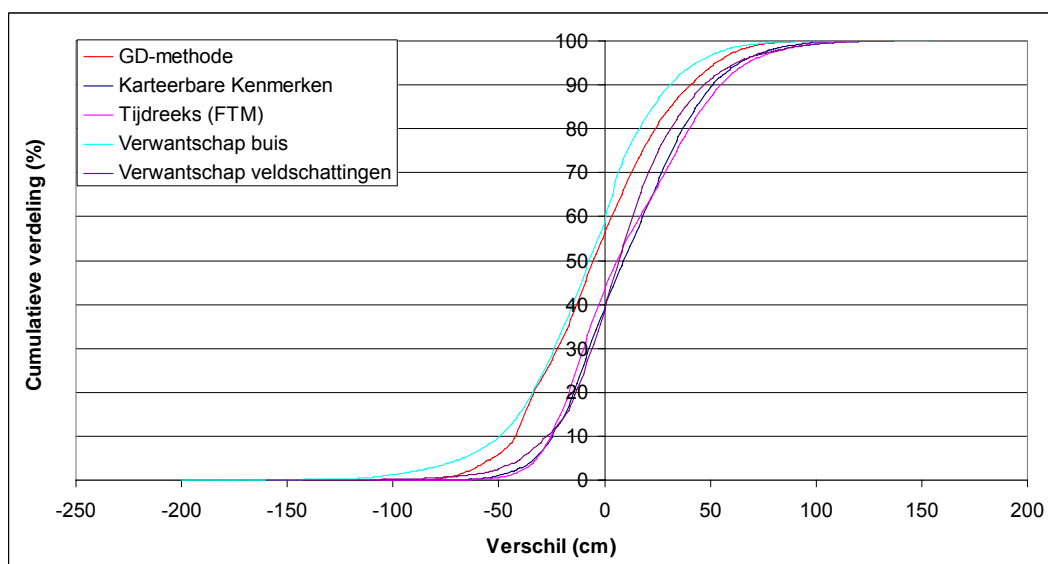
De overige methoden, karteerbare kenmerken, tijdreeks (FTM) en verwantschapsmethode mbv veldschattingen geven een systematisch nattere situatie weer van ongeveer 10 cm. Het natter uitkomen van deze kaarten is wellicht veroorzaakt door de keuze van de grens van 150 cm –mv, welke bepalend is voor het gebied dat wordt vergeleken. Daarnaast zijn deze methoden direct of indirect gebaseerd op veldschattingen die doordat hierbij rekening gehouden wordt met alle facetten van de bodemgesteldheid waaronder anisotropie, veelal natter uitkomen.

In figuur 7.1 zijn de verschillen in de vorm van een frequentieverdeling weergegeven. Opvallend in de figuur is de hoge piek voor de verwantschapsmethode met behulp van buisgegevens. Deze piek wordt veroorzaakt door de hoge buisdichtheid in een relatief nat gedeelte van het natuurgebied. Daarnaast is te zien dat er een aanzienlijke spreiding is in de

verschillen. Ook de cumulatieve verdeling van de verschillen geeft een grote spreiding aan (figuur 7.2). Daarnaast blijkt uit de cumulatieve verschillen duidelijk de scheve verdeling. Voor natuurgebieden is het vooral van belang dat relatief natte gebieden goed in de kaart tot uiting komen. Daarom is in figuur 7.3 het verschil in klassen van de GHG weergegeven. Op deze manier is het mogelijk om bij de verificatie meer gewicht te geven aan de relatief natte gebieden. Het natte traject is namelijk opgedeeld in meerdere klassen met een geringe klassebreedte terwijl het droge traject van de GHG is opgedeeld in een grotere klassebreedte. De beide interpolatietechnieken op basis van verwantschap komen voor ongeveer 50% overeen met de detailkartering Beekvliet. Indien gekeken wordt naar het percentage met een maximaal verschil van 1 klasse dan komt de verwantschapbuis voor 90 %, de Gt op basis van karteerbare kenmerken voor 86%, de verwantschapsmethode voor 84% en de beide andere methoden voor 80% overeen.

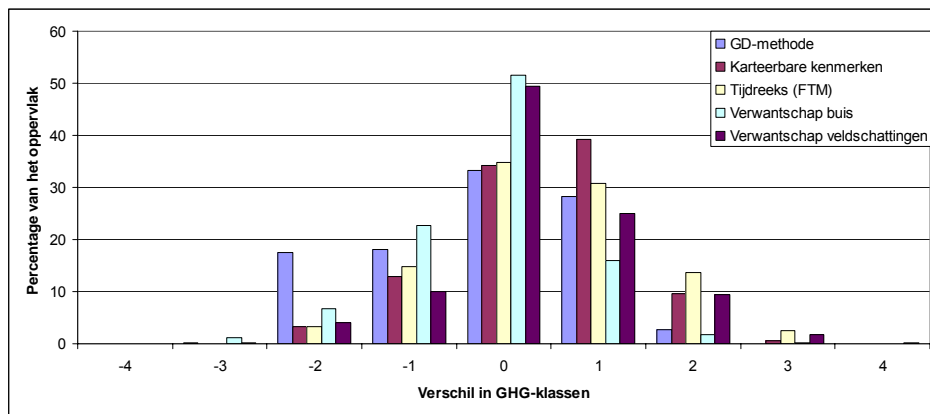


Figuur 7.1 Frequentieverdeling van de verschillen tussen de Gt-karteringsmethode en de verificatiekaart

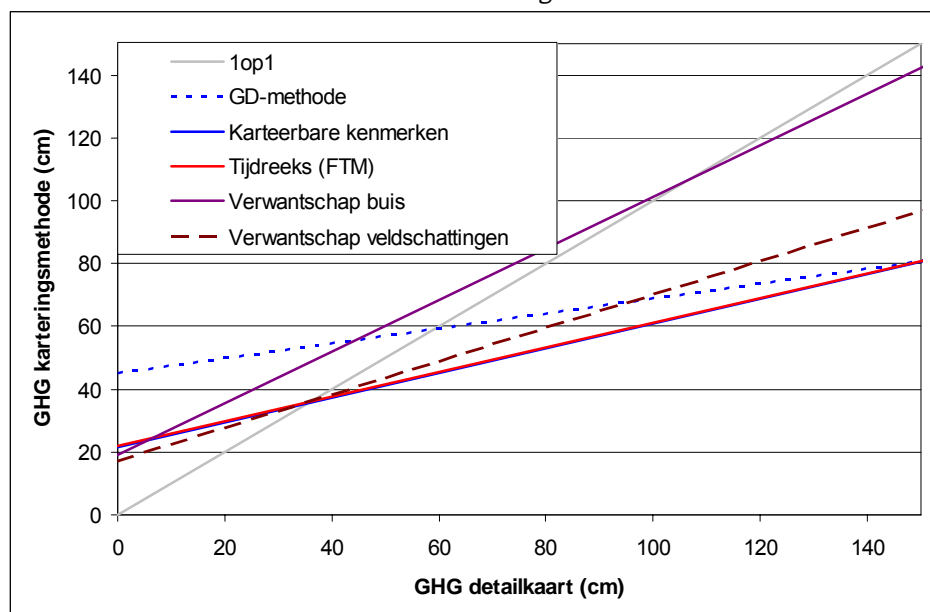


Figuur 7.2 Cumulatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de Gt-karteringsmethode en de verificatiekaart

Om nog meer inzicht in de verschillen te krijgen, is een regressieanalyse uitgevoerd. Hierbij is de GHG uit de detailkartering Beekvliet ('gemeten') uitgezet tegen de GHG volgens de verschillende karteringsmethoden (berekend). In het ideale geval zouden gemeten en berekend identiek moeten zijn. In figuur 7.4 is echter te zien dat alle methoden een afvlakking van het GHG verloop in het pilotgebied tot gevolg hebben. De natte locaties worden gemiddeld genomen droger voorspelt en de droge locaties natter. Bij alle methoden waarbij gebruik wordt gemaakt van interpolatie of regressie zal in meer of mindere mate afvlakking optreden. De afvlakking is inherent aan het gebruik van statistische interpolatie technieken en mede afhankelijk van het aantal gebruikte punten. Bij het vlakdekkend invullen van puntinformatie is het van belang de afvlakking te minimaliseren. De afvlakking is het geringst bij de kaart waarbij gebruik is gemaakt van de nieuwe interpolatietechniek op basis van verwantschap (zie ook tabel 7.1). De GD-methode geeft verreweg de grootste afvlakking, hetgeen bijvoorbeeld in de beperkte patrooninformatie tot uiting komt (zie figuur 7.5). Uit de regressielijn komt naar voren dat bij een bereik van de GHG van 0 tot 150 cm in de detailkartering Beekvliet de GD-methode slechts een bereik heeft van ruim 40 tot 80 cm, wat overeenkomt met slechts 1 GHG-klasse. Ook in de kaart komt duidelijk naar voren dat de GD-methode een sterk afgevlakt beeld van de GHG geeft (figuur 7.5).

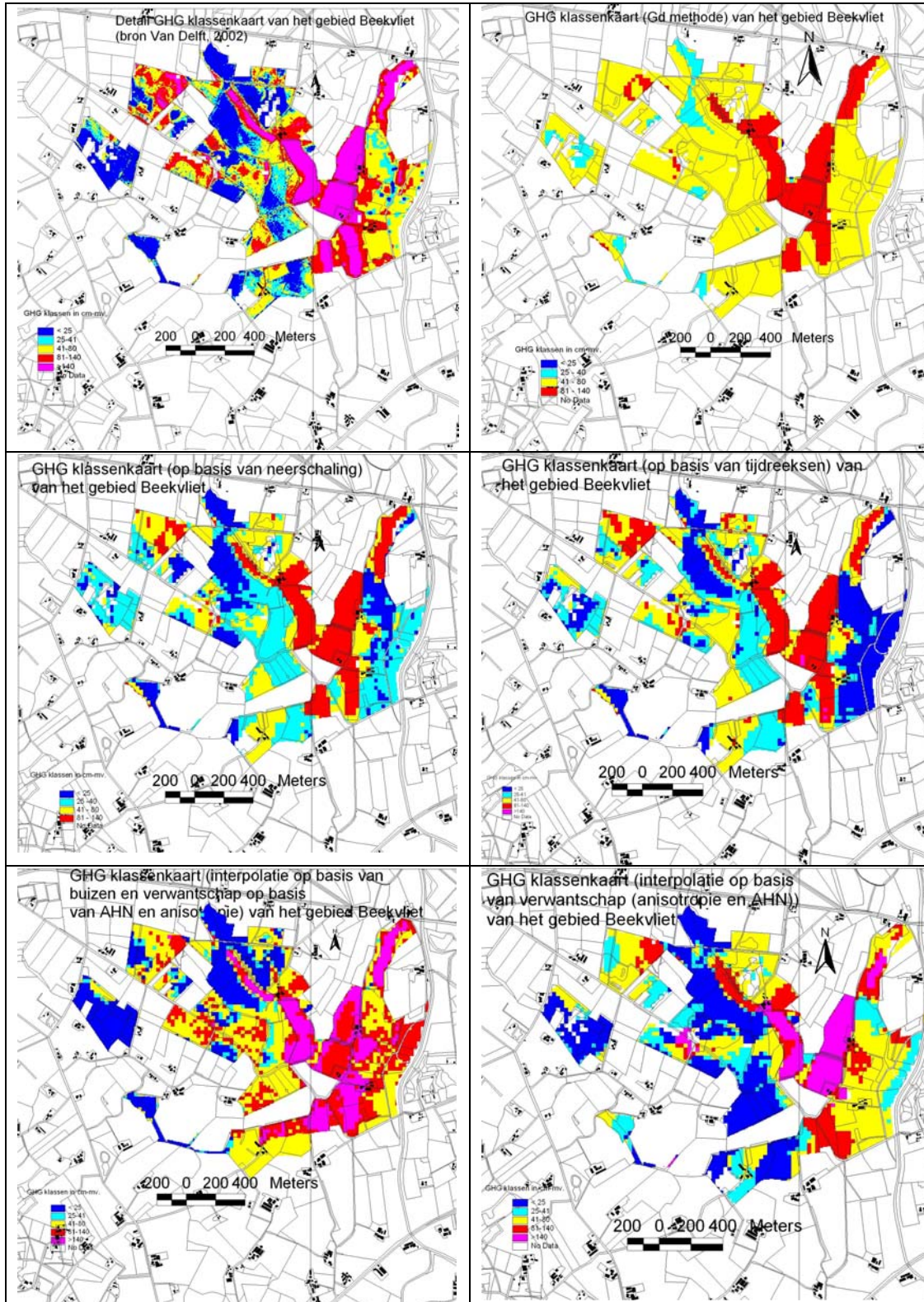


Figuur 7.3 Verschil in GHG-klassen tussen de Gt-karteringsmethode en de verificatiekaart



Figuur 7.4 Regressierelatie tussen de verificatiekaart ('gemeten') en de Gt-karteringmethoden (berekend)





Figuur 7.5 GHG-klassenkaart voor het pilotgebied Beekvliet voor zowel de verificatiekaart (detailkartering) als de kaarten die vervaardigd zijn met behulp van de vijf Gt-karteringmethoden

Op basis van alle verificatieresultaten kan een volgorde van de kwaliteit van de verschillende methoden worden bepaald. De volgorde is vastgesteld door de nauwkeurigheid (RMSE), waarin zowel de zuiverheid (me) als de precisie (std) worden meegenomen, de hellingshoek als maat voor patrooninformatie en de verschillen in GHG-klassen te scoren. De score heeft plaatsgevonden door getallen van 1 t/m 5 toe te kennen op basis van de resultaten voor de desbetreffende parameter. Hierbij is gebruik gemaakt van een rangorde en is aan het beste resultaat een waarde 1 toegekend (tabel 7.2). Hierbij dient te worden opgemerkt dat de relevantie van de onderlinge verschillen in uitkomsten niet nader is onderzocht. Daarnaast bestaat er in meer of mindere mate een correlatie tussen de gehanteerde parameters. Hierdoor is het ook lastig om bijvoorbeeld een weging van de parameters mee te nemen. Samenvattend komt het er op neer dat het hanteren van een scoretabel en de hierbij gemaakte keuzes enigszins arbitrair is.

Tabel 7.2 Scoretabel met betrekking tot de kaartkwaliteit

Karteringsmethode	RMSE	Hellingshoek	GHG-klasse	Totale score
GD-methode	3	5	4,5	12,5
Karteerbare kenmerken	1,5	3,5	2	7
Tijdreeks (FTM)	4	3,5	4,5	12
Verwantschap buis	5	1	1	7
Verwantschap veldschattingen	1,5	2	3	6,5

## 7.4 Geschiktheid van de karteringsmethoden

Naast de kwaliteit van het resultaat van de gebruikte karteringsmethode kunnen ook andere aspecten een rol spelen die mede bepalend zijn voor de bruikbaarheid of geschiktheid van een karteringsmethode. Hierbij kan gedacht worden aan de kosten, de benodigde doorlooptijd, de schaal en de mogelijkheid om voorspellingen te doen (tabel 7.3). Voor de kwaliteit van de methode is gebruik gemaakt van de scoretabel voor de kaartkwaliteit (tabel 7.2). De vergelijking tussen de karteringsmethodes is in een pilotgebied uitgevoerd waarvoor veel gegevens van goede kwaliteit beschikbaar zijn. Voor andere gebieden kunnen gegevens ontbreken of niet voldoen aan de benodigde kwaliteit. Het ontbreken van gegevens kan tot gevolg hebben dat gegevens moeten worden verzameld wat effect kan hebben op de kosten en bruikbaarheid van een karteringsmethode. De kosten zijn geschat op basis van de benodigde arbeid om de methode uit te voeren. Hierbij is rekening gehouden met bijvoorbeeld veldwerk dat naar verhouding vaak meer arbeid vergt. De doorlooptijd wordt voornamelijk bepaald door de gegevensverzameling en de mate waarin een methode kan worden geautomatiseerd. De schaal hangt vooral af van de schaal waarop de informatie over de bodemgesteldheid wordt meegenomen. Bij het karteren van de Gt wordt deze altijd achteraf bepaald. In het kader van bijvoorbeeld de GGOR is het wenselijk om niet alleen achteraf maar ook voor een toekomstige situatie de Gt te kunnen bepalen. Hierbij kan het gaan om bijvoorbeeld klimaatverandering of om het doorrekenen van maatregelen. In beide gevallen is een modelmatige aanpak noodzakelijk.

Tabel 7.3 Scoretabel met betrekking tot de geschiktheid

Karteringsmethode	Kwaliteit	Beschikbaarheid gegevens	Kosten	Doorlooptijd	Schaal	Toekomst
GD-methode	+/-	-	+/- - *	+/- - *	-	-
Karteerbare kenmerken	+	++	++	++	++	-
Tijdreeks (FTM)	-	+	+	+	+	+
Verwantschap buis	+	-	+/- - *	+/- - *	+	-
Verwantschap veldschattingen	+	-	-	-	+	-

\* Afhankelijk van de beschikbaarheid van juiste geplaatste peilbuizen

## 7.5 Rangorde en discussie

Op basis van de geschiktheid van de karteringsmethode (tabel 7.3) kan een rangorde worden gemaakt van de onderzochte karteringsmethoden:

1. **Karteerbare kenmerken:** Actuele Gt op basis van karteerbare kenmerken, waarbij gebruik is gemaakt van een verschuivingstabel conform de beschrijving. Getalsmatig is er een relatief groot verschil met de verificatiekaart. Indien naar verschillen in GHG-klassen en naar de afvlakking gekeken wordt geeft deze methode redelijk goede resultaten. De kaart is beschikbaar voor heel Nederland waardoor de kosten en de doorlooptijd gering zijn. Aangezien de grondwaterstandsfluctuatie in hoge mate bepaald wordt door de bodemgesteldheid en de methode aansluit bij de bodemkundige informatie uit de 1 : 50.000 bodemkaart heeft deze methode de meest gedetailleerde gebruiksschaal (1 : 50.000). Bij de methode wordt de GxG achteraf bepaald waardoor de methode niet geschikt is voor het bepalen van de GxG voor toekomstige situaties. Hierdoor is de methode bijvoorbeeld niet geschikt voor het bepalen van de effecten van klimaatverandering of te gebruiken in het kader van het GGOR. Verbeteringen zijn met behulp van enig veldwerk mogelijk en zelfs wenselijk in die gebieden waar bepaalde bodemhorizonten voorkomen die van invloed zijn op de (agro)hydrologie en niet staan weergegeven op de bodemkaart schaal 1 : 50.000 (bijvoorbeeld lössleem) doch wel staan vermeld op de bodemkaarten van detailkarteringen, die voor een groot deel van Nederland (ca. 70 á 80 %) analoog en digitaal in het archief van Alterra aanwezig zijn.
2. **Tijdreeks (FTM):** GxG informatie op basis van tijdreeksen per pixel die zijn omgezet naar een GxG. Evenals de karteerbare kenmerkenmethode geeft deze methode een relatief groot verschil met de verificatiekaart. De patrooninformatie is echter redelijk goed en is vergelijkbaar met de karteerbare kenmerkenmethode. Dit wordt mede veroorzaakt door het gebruik van de gemiddelde waarde uit deze methode als één van de invoerparameters. De kosten en doorlooptijd van de methode zijn gezien de automatiseringsmogelijkheden relatief gering. De gebruiksschaal is gezien de koppeling met de bodemkaart relatief goed. De gebruikte bodemfysische informatie is gezien de beschikbaarheid van deze gegevens echter grofschaliger. Hierdoor is de gebruiksschaal van de kaart naar schatting 1 : 300.000. Verbeteringen zijn onder meer mogelijk door gebruik te maken van niet-lineaire tijdreeksen en betere fysische schematisaties van de gebruikte bodemprofielen. De methode kan landsdekkend worden uitgevoerd zonder aanvullend veldwerk.
3. **Verwantschap veldschattingen:** Interpolatie met behulp van een nieuwe interpolatiemethode op basis van verwantschap (AHN en anisotropie) waarbij gebruik is gemaakt van puntinformatie (GHG en GLG) uit een detailkartering. Vooral door de relatief geringe afvlakking, waardoor ook natte gebieden beter tot uiting komen, is deze methode geschikt om te hanteren bij een Gt-kartering. Een ander voordeel is, dat bij het schatten van de GHG's en GLG's in detailkarteringen rekening wordt gehouden met de aanwezigheid van anisotropie in het bodemprofiel. Momenteel zijn er echter onvoldoende puntgegevens in de vorm van veldschattingen beschikbaar voor het toepassen van de methode voor een groot aantal gebieden in Nederland, waardoor extra veldwerk noodzakelijk is. Hierdoor vallen zowel de kosten als ook de doorlooptijd hoger uit. Door het gebruik van puntinformatie uit bodemkundig onderzoek sluit de methode goed aan bij de benodigde bodemkundige informatie. Naast de puntinformatie is voor het interpoleren ook vlakdekkende informatie noodzakelijk. De gebruiksschaal van de kaart is daardoor in hoge mate afhankelijk van de gebruiksschaal van de gebruikte bodemkundige hulpinformatie.



4. **Verwantschap buis:** Interpolatie op basis van verwantschap (AHN en anisotropie) met gebruik van buisgegevens geeft vooral goede resultaten wanneer er op relatief korte afstand voldoende buizen aanwezig zijn die correct zijn geplaatst. Naast voldoende buizen dienen de buizen ook in alle landschappelijke eenheden voor te komen. In het gebied Beekvliet wordt aan beide voorwaarden niet voldaan. Het gevolg hiervan is dat de GHG met name in het oostelijk en zuidelijke deel van het onderzoeksgebied te droog wordt voorspelt. In de praktijk is het echter moeilijk een goede buizenset voor ieder natuurgebied te vinden, aangezien het peilfilter voor 80% van de peilbuizen te diep is geplaatst (Hoofdstuk 5). Hierdoor is nader onderzoek naar de bruikbaarheid van bestaande peilbuisinformatie voordat deze gebruikt kan worden noodzakelijk. Deze controle kan in eerste instantie plaatsvinden aan de hand van de bodemkundige profielopbouw voor de locaties van de beschikbare peilbuizen. Indien de profielopbouw niet bekend is, dan dient deze met behulp van een grondboring ter plaatse van de peilbuis alsnog te worden beschreven. Op basis van de profielopbouw kan een inschatting worden gemaakt in hoeverre een te diep geplaatst peilfilter bruikbaar is voor het meten van de freatische grondwaterstand. Indien hier op basis van de profielopbouw geen eenduidige uitspraken over kunnen worden gedaan, kan er naast de bestaande peilbuis gebruik worden gemaakt van (tijdelijke) peilbuizen om de bestaande peilbuis te controleren. Door het grotendeels ontbreken van kwalitatief goede peilbuisinformatie in natuurgebieden (paragraaf 5.3) zullen in de praktijk zowel de kosten als de doorlooptijd hoog uitkomen. Dit is het gevolg van relatief hoge kosten voor het plaatsen van peilbuizen en de benodigde meetperiode van meerdere jaren. De gebruiksschaal van de kaart is in hoge mate afhankelijk van de dichtheid van de gebruikte puntinformatie en de gebruiksschaal van de gebruikte bodemkundige hulpinformatie.
5. **GD-methode.** Gt kartering op basis van (geo)statistische analyse. Vooral de afvlakking heeft tot gevolg dat de natte Gt's te weinig tot uiting komen. Gemiddeld genomen is het resultaat redelijk, maar door de afvlakking minder bruikbaar voor natuurgebieden. De kaart is voor het zandgebied van Nederland beschikbaar. Bij de methode wordt gebruik gemaakt van peilbuisinformatie en gerichte opnames. Aangezien het peilfilter voor 80% van de peilbuizen te diep is geplaatst (Hoofdstuk 5) is zoals beschreven bij de voorgaande methode nader onderzoek naar de bruikbaarheid van de peilbuisgegevens noodzakelijk om het gebruik van onjuiste misleidende informatie te voorkomen. Ook het incidenteel meten van de grondwaterstand met behulp van open boorgaten, de zogenaamde gerichte opnames, hoeven indien te diep is doorgeboord de reële grondwaterstand niet weer te geven. Deze gerichte opnames worden met behulp van stambuisregressie omgezet naar een GxG. Voor deze transformatie is de keuze van het meettijdstip en de gebruikte peilbuizenset van groot belang voor een juiste interpretatie van incidentele meetgegevens (Van der Gaast *et al.*, 2006b). Deze aspecten hebben directe gevolgen voor de beschikbaarheid van kwalitatief goede meetgegevens. Het ontbreken van kwalitatief goede meetgegevens heeft ook voor deze methode tot gevolg, dat de kosten en doorlooptijd relatief hoog zijn. Aangezien de methode alleen via de schematisering in de vorm van een aggregatie van de bodemkaart een koppeling met bodemkundige informatie heeft, heeft de kaart een gering detailniveau. Verbeteringen zijn mogelijk door middel van methodeaanpassingen en het uitvoeren van extra veldwerk.

## 7.6 Uiteindelijke selectie van de te hanteren methode

Op basis van de geschiktheid van de karteringsmethode (tabel 7.3) kan een keuze worden gemaakt voor de te hanteren karteringsmethode voor het in beeld brengen van de GxG. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt in een methode voor de korte termijn en een methode voor

de langere termijn. Voor de korte termijn is de actuele Gt op basis van karteerbare kenmerken het meest geschikt. Dankzij een directe koppeling met bodemkundige informatie is de kwaliteit van de kaart relatief hoog en is de gebruiksschaal van de kaart ten opzichte van de andere methoden relatief gedetailleerd. De kaart is landsdekkend beschikbaar en kan worden verbeterd door bij de actualisatie onderscheid te maken in bijvoorbeeld zand, veen en klei. Via extra veldwerk is het ook mogelijk om de veranderingen in de GxG voor individuele vlakken bij te stellen.

Voor de langere termijn is het wenselijk om een methode te hanteren, waarmee naast een goede beschrijving van de actuele grondwaterstandsituatie ook veranderingen in beeld kunnen worden gebracht. Dit vereist een modelmatige aanpak. Van de onderzochte methoden is het alleen met de fysische tijdreeks modellen mogelijk om (toekomstige) veranderingen in beeld te brengen. Hierdoor is de methode te gebruiken voor het doorrekenen van maatregelen of het bepalen van de effecten van klimaatverandering. Hierbij dient rekening te worden gehouden met het ééndimensionale karakter van het model. Verbeteringen zijn onder meer mogelijk door gebruik te maken van niet-lineaire tijdreeksen en het gebruik van gedetailleerdere bodemkundige informatie. Het gaat hierbij om zowel de ruimtelijke schematisering, verticale schematisering als een verbetering van de bodemfysische karakteristieken.

Naast de onderzochte methoden is het ook mogelijk om gebruik te maken van andere modellen. De gebruiksschaal van modellen voor het bepalen van de grondwaterstandsituatie is evenals de beschreven methoden in hoge mate afhankelijk van de gebruikte bodemkundige informatie. Momenteel wordt bij het modelleren met hydrologische modellen de bodem veelal geschematiseerd in 21 standaardprofielen, waaraan de benodigde bodemfysische informatie via de Staringreeks wordt gekoppeld. De gebruiksschaal van modellen voor de bepaling van zowel het actuele grondwaterstandsregime (AGR) als het gewenste grondwaterregime (GGR) is hierdoor niet gedetailleerd (schaal ca. 1 : 600.000) waardoor modelresultaten vaak onderhevig zijn aan numerieke verdroging.

## 8 Profieltypen op basis van de grondwaterbeschikbaarheid

Het doel van deze pilotstudie is een methode te ontwikkelen om de actuele grondwaterstandsituatie in de VHR- en EHS-gebieden in kaart te brengen. De grondwaterstandsituatie bepaalt voor een belangrijk deel de waterbeschikbaarheid voor de natuur. De vegetatie beschikt aan het begin van het groeiseizoen over een vochtvoorraad in de wortelzone. Wanneer deze voorraad in de loop van het groeiseizoen als gevolg van het verdampingsoverschot niet meer toereikend is om de vegetatie van voldoende vocht te voorzien kan deze gedurende het groeiseizoen door capillaire nalevering vanuit het grondwater worden aangevuld. Deze aanvulling kan een gedeelte of zelfs het gehele groeiseizoen betreffen. Voorts is het ook mogelijk dat de vegetatie, als gevolg van diepe grondwaterstanden en/of zeer slechte capillaire eigenschappen van de ondergrond, geen gebruik kan maken van capillaire nalevering. De mate waarin de vegetatie via capillaire nalevering een aanvulling krijgt op de vochtvoorraad bepaald het profieltype.

Uit diverse berekeningen blijkt, dat indien de afstand tussen het niveau van de GLG en de onderzijde van de wortelzone geringer is dan de kritieke afstand, het langjarig gemiddelde vochttekort van grasland globaal beperkt blijft tot max. ca. 2%. Dit criterium is indertijd afgeleid voor landbouwgewassen (zie ook Bouwmans, 1990). Voor natuurlijke of halfnatuurlijke vegetaties kan het criterium mogelijk iets anders zijn, omdat een aantal soorten droogtetoleranter zijn of juist een hogere vochtbehoefte hebben ten opzichte van de landbouwgewassen. Hierdoor is het de vraag of deze 2% wel opgaat, omdat dit percentage voor natuur niet is berekend, danwel is vastgesteld. Om ondanks deze kanttekeningen toch een globale benadering te kunnen geven met betrekking tot capillaire nalevering is bij gebrek aan een alternatief aangesloten bij het landbouwkundige criterium. Ook de Studiecommissie Waterbeheer Natuur, Bos en Landschap (SNWBL, 1990) gebruikt de kritieke afstand voor de indeling in profieltypen (Kader 2).

### **Kader 2. Kritieke z-afstand**

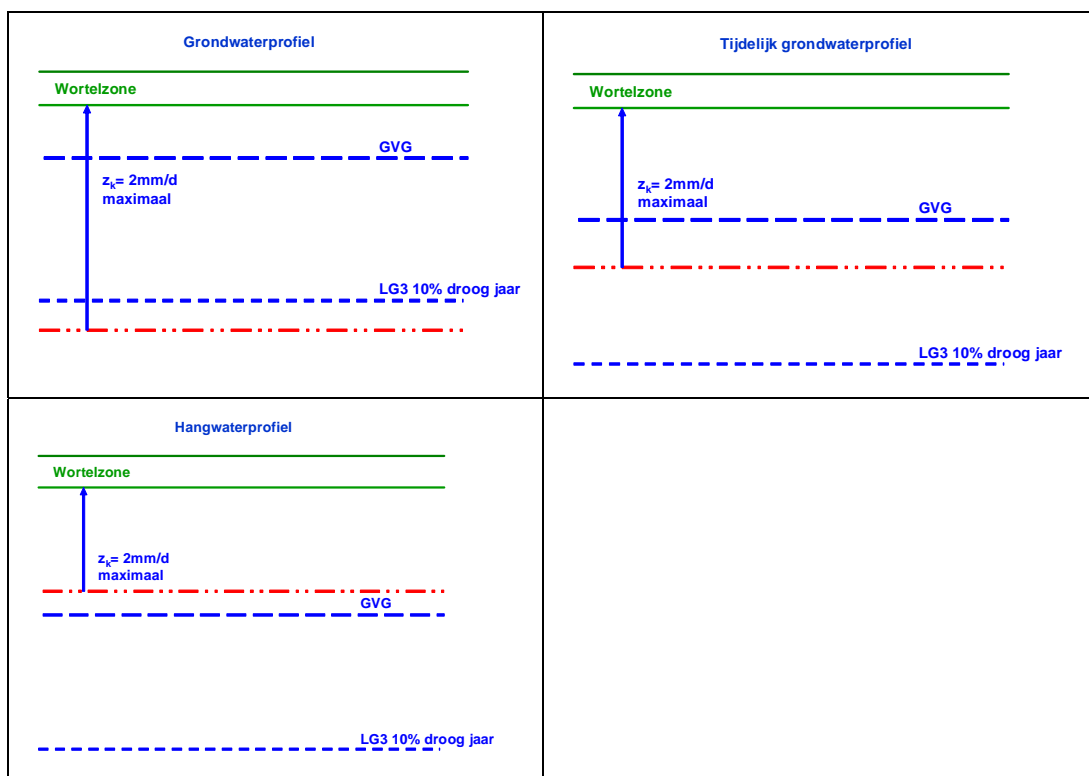
Een veel gebruikte term om de capillaire eigenschappen van bodemprofielen te karakteriseren is de zogenaamde kritieke z-afstand ( $z_k$ ); ook wel kritieke stijgafstand genoemd. Hieronder wordt verstaan de maximale afstand waarover nog een voor het gewas voldoende capillaire aanvoer naar de wortelzone kan worden gerealiseerd. Overschrijding van de kritieke z-afstand leidt tot (blijvende) verdrogingsverschijnselen van het gewas. Bij vochtleverantieberekeningen wordt de kritieke z-afstand meestal gelijk gesteld aan de afstand waarover bij een drukhoogte van -16 000 cm (pF 4,2, verwelkingspunt) een capillaire flux van 2 mm/d kan worden gerealiseerd. Uit diverse berekeningen blijkt dat indien de afstand tussen het niveau van de GLG en de onderzijde van de effectieve wortelzone geringer is dan de kritieke afstand, het langjarig gemiddelde vochttekort van grasland beperkt blijft tot max. 2 % (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988).

De kritieke afstand ( $z_k$ ) bij een flux van 2 mm/dag bepaald of er in de voorjaarsituatie (rond GVG-moment) voldoende capillaire nalevering is aan de onderzijde van de wortelzone. Hiervoor wordt de LG3 in een 10% droogjaar als uitgangspunt genomen (Bijlage 4) (Van Soesbergen *et al.* 1986). Met de beschikbare gegevens GVG, LG3 voor een 10% droog jaar, de dikte van de

effectieve wortelzone en de kritieke z-afstand ( $z_k$ ) kan worden vastgesteld of er voldoende capillaire nalevering aan de wortelzone plaats kan vinden gedurende het gehele of een gedeelte van het groeiseizoen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de indeling in profieltypen (Van der Gaast *et al.*, 2005). Er worden drie profieltypen onderscheiden (figuur 8.1), nl.

- *Grondwaterprofielen.* In een 10% droogjaar is tijdens het gehele groeiseizoen een capillaire flux van 2 mm/d tot in de wortelzone te realiseren;
- *Tijdelijk grondwaterprofiel.* In een 10% droogjaar is tijdens een deel van het groeiseizoen een capillaire flux van 2 mm/d tot in de wortelzone te realiseren;
- *Hangwaterprofiel.* In een 10% droogjaar is tijdens het groeiseizoen geen capillaire flux van 2 mm/d tot in de wortelzone mogelijk gezien de diepe ligging van het grondwater en/of zeer slechte capillaire eigenschappen van de ondergrond.

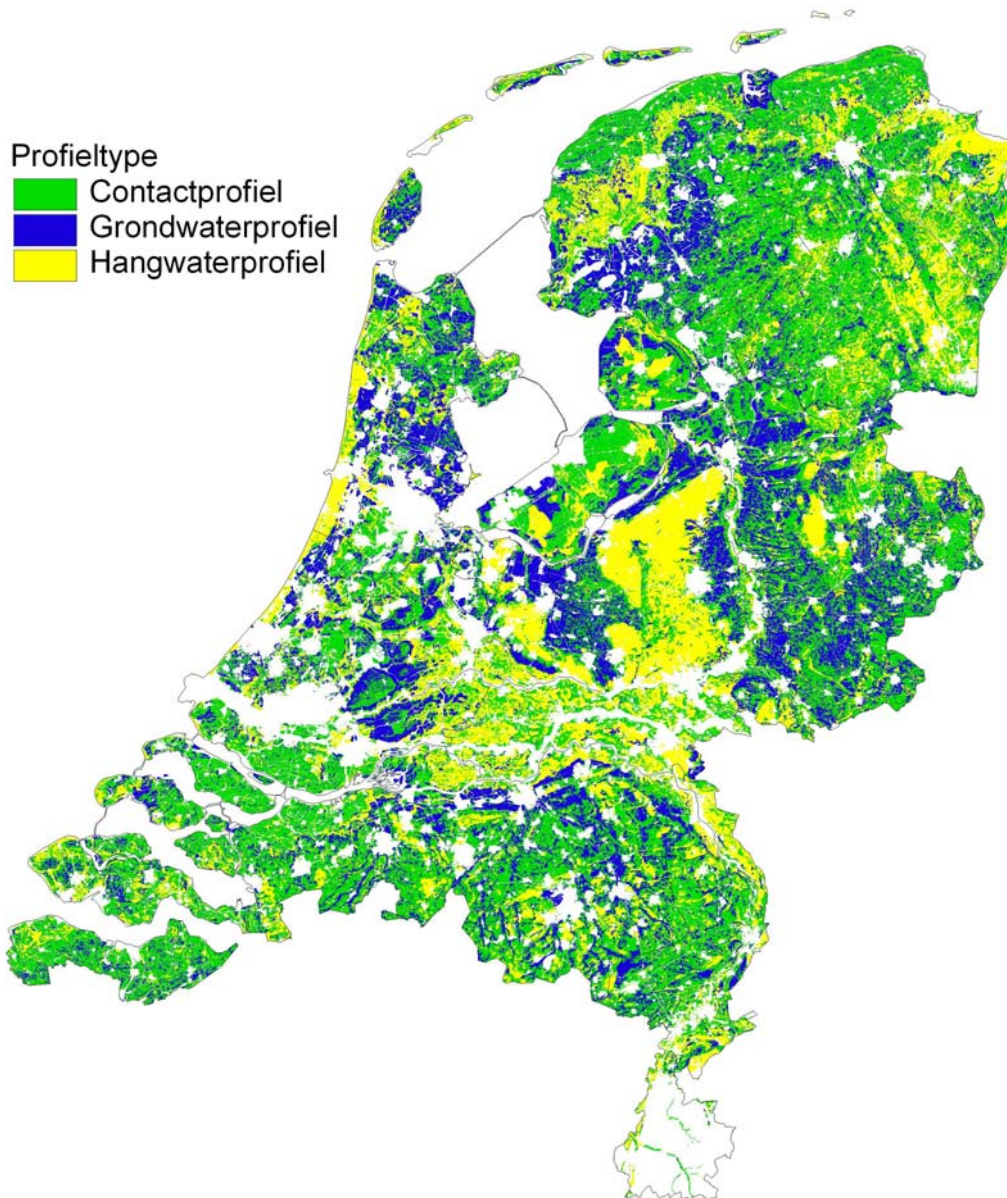
De methode is meer in detail beschreven in Bijlage 4 en resulteert in een landsdekkende kaart (figuur 8.2).



Figuur 8.1 Schematische weergave van de verschillende profieltypen op basis van de kritieke z-afstand, de GVG en LG3 voor een 10% droog jaar.

Hangwaterprofielen (figuur 8.2) treffen we vooral aan in de duinen, stuwwallen en de stuifzandcomplexen zoals in Noord-Brabant. Ook in de kleigebieden van de Dollard, Friesland en in de Betuwe komen soms hangwaterprofielen voor. Deze laatste gronden betreffen gronden behorende tot de bodemfysische eenheden 17, kleigrond met zware tussenlaag of ondergrond, en 18, kleigronden op veen. Deze eenheden hebben als gevolg van zeer slechte capillaire eigenschappen een geringe kritieke z-afstand ( $z_k$ ). De grondwaterprofielen worden vooral aangetroffen in kwelgebieden zoals de randzone Veluwe, Gelderse Vallei, in laagveengebieden en in de beekdalen in de zandgebieden. De overige gebieden kunnen in het algemeen worden beschouwd als gebieden waar het tijdelijke grondwaterprofiel het overheersende profieltype is.

Voor het tijdelijk grondwaterprofiel is een nadere gradatie te maken voor de beschikbare capillaire nalevering, op basis van de duur dat de LG3 in een 10% droog jaar wordt onderschreden, alsmede tot hoever de capillaire nalevering daarbij terugloopt, bijv. tot 1,8 mm/d of tot 0,2 mm/d. Dit laatste zou nader onderzocht moeten worden.



*Figuur 8.2 Toegekende profieltype op basis van het bodemgebruik grasachtige natuur.*



## 9 Discussie

Het verkeerd schatten van de freatische grondwaterstand (numerieke verdroging) kan onder meer leiden tot misleidende grondwaterstandskarten. Aangezien het gebruik van grondwaterstandsinformatie weer tot gevolg kan hebben dat andere hydrologische informatie misleidend kan werken wordt in de discussie hoofdzakelijk ingegaan op de mogelijke effecten van numerieke verdroging. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen meer technisch inhoudelijke gevolgen van numerieke verdroging en maatschappelijke gevolgen van numerieke verdroging. Beide aspecten worden in dit hoofdstuk tot op zekere hoogte beschreven. Tot slot worden aan het eind van het hoofdstuk een aantal mogelijke oplossingen of oplossingsrichtingen beschreven.

### 9.1 Technisch inhoudelijke gevolgen van numerieke verdroging

#### *Grondwatermodellen*

Modellen, die al dan niet geijkt zijn op freatische grondwaterstanden uit peilbuizen (ondiepe peilbuizen tot een diepte van 5 meter), kunnen numerieke verdroging introduceren. Het kalibreren van modellen op grondwaterstanden uit peilbuizen die de freatische grondwatersituatie te droog weergeven heeft tot gevolg dat de grondwaterstand met het model te droog wordt berekend. Deze te lage grondwaterstand kan alleen worden berekend indien de drainage/intreeweerstand te laag en/of de doorlatendheid van het freatische pakket te hoog wordt gekalibreerd. Hierdoor wordt de interactie tussen grond- en oppervlaktewater ten onrechte te intensief geschat, wat ook effect heeft op effectberekeningen bij het doorrekenen van maatregelen. Een te intensieve interactie tussen het grond- en oppervlaktewater heeft tevens tot gevolg dat de grondwaterstandsfluctuatie (verschil tussen gemiddeld hoogste (GHG) en gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG)) in de berekeningen te klein is. Het kan ook de c-waarde van de weerstandsbiedende laag onder het freatische pakket zijn, die door de kalibratie te laag wordt geschat. In deze situatie zal, indien het model op een juiste manier is gekalibreerd, de schatting van het doorlaatvermogen van het pakket onder deze laag hoger dienen te zijn, omdat het teveel aan water immers van boven weer weg moet stromen.

Ook grondwaterstromingsmodellen die niet zijn gekalibreerd kunnen, indien weerstandsbiedende lagen niet worden meegenomen en/of de bodemfysica niet correct zijn/is geparametriseerd, een te geringe grondwaterstandsfluctuatie geven. Een te geringe grondwaterstandsfluctuatie of een te droge inschatting van de Grondwatertrap (Gt) die met behulp van modellen zijn berekend heeft directe gevolgen voor het GGOR en voor nabewerkingen in de vorm van diverse soorten geschiktheidsbeoordelingen, zoals het WIB-C, Waterlood en Natles en instrumenten die bijvoorbeeld de gewasschade (wateroverlast en droogte) in de landbouw kunnen berekenen (Help).

#### *Afvoer*

Indien men geen rekening houdt met een verticale weerstand hoog in het bodemprofiel dan wordt de weerstand tegen de grondwaterstroming naar ontwateringsmiddelen (drainageweerstand) onderschat. Deze onderschatting van de drainageweerstand heeft op zijn beurt tot gevolg dat de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater te intensief wordt verondersteld. In de drainageformule van Ernst (1962) is wel rekening gehouden met een

mogelijke verticale weerstand. Aangezien er vooral in het zandgebied te weinig bekend is over deze verticale weerstand (zowel fysisch als ook de ruimtelijke verbreiding), kan deze moeilijk worden geparаметriseerd en wordt deze mede hierdoor vaak niet in modellen meegenomen. Voorts is deze weerstand in het ondiepe bodemprofiel ook lange tijd verwaarloosbaar geacht, omdat het effect hiervan op de grondwaterstand niet was onderkend, dan wel niet werd gemeten als gevolg van onjuist geplaatste buizen (zie ook figuur 3.13).

Een bijkomend aspect is de tijdsafhankelijkheid en de situatieafhankelijkheid van het belang van deze weerstand. Indien het waterprobleem van onderaf komt als gevolg van kwel (opwaartse grondwaterstroming) is de weerstand hoog in het bodemprofiel als gevolg van gelaagdheid (anisotropie) minder belangrijk, tenzij deze weerstandsbiedende laag dieper is dan de ontwateringsmiddelen en de kwel voor een belangrijk deel tegenhoudt. Indien het waterprobleem voornamelijk van bovenaf komt, in perioden met relatief veel neerslag, zal een groot deel van het overtollige neerslagwater (uitgezonderd afvoer over het maaiveld) door de ondiepe bodemlagen moeten stromen alvorens het naar de ontwateringsmiddelen kan worden afgevoerd. In deze situatie is de verticale weerstand hoog in het bodemprofiel van groot belang.

Daarnaast wordt de effectiviteit van maatregelen door aanpassingen in of aan het ontwateringstelsel overschat, omdat hierdoor de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater in werkelijkheid kleiner is dan gemodelleerd. Naast de overschatting van de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater heeft anisotropie hoog in het bodemprofiel ook tot gevolg dat de voeding van het grondwater veelal wordt overschat. In de voedingsweerstand wordt namelijk vooral in zandgebieden de verticale weerstand als gevolg van anisotropie hoog in het bodemprofiel doorgaans niet meegenomen. Dit heeft tot gevolg, dat de infiltratie trager verloopt en de berging op het maaiveld meestal groter is dan verondersteld, hetgeen weer effect kan hebben op de verhouding tussen de afvoer via de ondergrond en de afvoer via het maaiveld, waarbij het aandeel dat via het maaiveld wordt afgevoerd meestal groter is dan verondersteld.

### ***Ruimtelijke interactie***

Het niet verdisconteren van anisotropie hoog in het bodemprofiel heeft ook tot gevolg dat de interactie tussen gebieden anders is dan veelal wordt verondersteld. Mazure (1936) vond in het onderzoek in de Wieringermeer dat er een reductie van de kwel optreedt bij toename van de afstand tot de toenmalige Zuiderzeedijk. *“Er bleek een reductiefactor op te treden, welke een functie was van de verhouding van den straal  $R$  van den dijk en een lengte  $\lambda$ , welke wordt bepaald door de eigenschappen van den ondergrond en de bovenlaag en gelijk is aan  $\sqrt{kDc}$ .”* De spreidingslengte ( $\lambda$ ) is dus een maat voor de invloedsafstand van peilverschillen tussen gebieden. De formule van Mazure is, zoals eerder aangegeven, gebaseerd op effectberekeningen in het eerste watervoerende pakket. In de meeste situaties is men echter geïnteresseerd in de beïnvloeding van de freatische grondwaterstand.

Voor effectberekeningen op de freatische grondwaterstand dient naast het toevoegen van de drainageweerstand, ook rekening gehouden te worden met de weerstand die aanwezig is tussen het eerste watervoerend pakket en het freatische pakket. De spreidingslengte heeft betrekking op de ruimtelijke interactie in het eerste watervoerende pakket. Door de hogere weerstand, als gevolg van anisotropie hoog in het bodemprofiel, is de ruimtelijke interactie via het watervoerende pakket tussen gebieden groter. De weerstandswaarde  $c$  is immers groter, waardoor ook de spreidingslengte ( $\lambda$ ) groter is. Aangezien we vooral geïnteresseerd zijn in de freatische beïnvloeding in plaats van de beïnvloeding van het watervoerende pakket, dient men echter rekening te houden met de doorwerking vanuit het watervoerende pakket naar de freatische grondwaterstand. Deze doorwerking hangt af van de verhouding tussen de



weerstand van het afdekkende pakket en de drainageweerstand (Van der Gaast en Massop, 2003b). Naarmate de weerstand van het afdekkende pakket groter is zal de freatische beïnvloeding kleiner zijn.

### ***Grondwateronttrekkingen***

De anisotropie in het bodemprofiel heeft ook gevolgen voor het berekenen van de doorwerkingen van de veranderingen van de grondwaterstand in het freatische pakket naar het ondiepe grondwater als gevolg van grondwaterwinningen. Meestal wordt het effect van anisotropie in het bodemprofiel op de doorwerking niet of nauwelijks meegenomen, waardoor veranderingen in de grondwaterstand in het freatische pakket te veel doorwerken richting het ondiepe grondwater. Daarnaast zal ook het door de grondwaterwinning beïnvloede gebied in werkelijkheid groter zijn dan in eerste instantie wordt bepaald, omdat de spreidingslengte als gevolg van deze veelal niet verdisconteerde weerstand in werkelijkheid groter is, wat ook effect heeft op de grondwateraanvulling (zie ook laatste alinea van de vorige paragraaf).

## **9.2 Maatschappelijke gevolgen**

### ***Verdroging***

Om de mate van verdroging vast te stellen, wordt veelal gebruik gemaakt van grondwaterstands-informatie (Braat *et al.*, 1989; Beugelink *et al.*, 2006). Numerieke verdroging heeft tot gevolg dat het verdrogingsprobleem in termen van een freatische grondwaterstands-daling minder groot is dan tot nu toe verondersteld is (zie § 2.3). Hierdoor is het verdrogingsprobleem voor zover het betrekking heeft op een grondwaterstands-daling getalsmatig minder groot en de oplossing in termen van hydrologisch herstel derhalve dichterbij. Dit heeft ook tot gevolg dat het beleid uiteindelijk doelgerichter en efficiënter kan worden uitgevoerd. Het merendeel van de voorgestelde maatregelen heeft namelijk betrekking op vernatting (Tweede Kamer Bijlage 30800 XIV nr 134), terwijl de informatie op het gebied van numerieke verdroging de vernattingsopgave minder groot maakt. Ook in de Tweede Kamer wordt gesproken over hydrologisch herstel (Tweede Kamer 30 800 XIV nr 134) en niet zozeer over ecologisch herstel, terwijl de ernst van het verdrogingsprobleem momenteel mede wordt ingeschat op basis van ecologische aspecten.

Het voorkomen van plantensoorten wordt echter naast de vochttoestand ook voor een groot deel bepaald door kwaliteitsaspecten van water, bodem en bodemleven. Voor het hydrologisch herstel heeft kennis op het gebied van numerieke verdroging tot gevolg, dat de voorgestelde vernattingsmaatregelen in een groot aantal situaties minder intensief hoeven te zijn, waardoor ze beter aansluiten bij de situatie. Hierbij dient ook te worden opgemerkt dat indien het omringende landbouwgebied te droog is geschat ook de ruimte voor vernattingsmaatregelen vanuit landbouwkundig oogpunt veelal kleiner is. Daarnaast kunnen ook bepaalde buffergebieden minder groot zijn dan dat ze op basis van eerdere berekeningen/visies zijn bepaald. De meer realistische oplossingen voor het verdrogingsprobleem hebben ook tot gevolg dat er zowel aan de kant van de agrariërs als ook aan de kant van de natuurorganisaties gemakkelijker draagvlak voor te vinden zal zijn. Enerzijds heeft dit te maken met het feit dat er minder rigoureuze maatregelen noodzakelijk zijn en de bufferzones rond natuurgebieden veelal kleiner hoeven te zijn. Anderzijds heeft de kennis op het gebied van numerieke verdroging tot gevolg dat de resultaten overeenkomen met de ervaringen en kennis van de betrokkenen in het gebied.

### ***Landbouwschade in relatie tot grondwaterwinningen***

Numerieke verdroging heeft ook effect op schadeberekeningen op basis van bijvoorbeeld tijdreeksanalyse of modelberekeningen. Het gaat hierbij vooral om het effect op de natschade

die door de te lage gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) te laag wordt berekend. Ook dit is vooral het gevolg van anisotropie hoog in het bodemprofiel. Hierdoor wordt de doorwerking van de verandering van de grondwaterstand, bijvoorbeeld als gevolg van een freatische grondwateronttrekking, richting het ondiepe grondwater aanzienlijk gereduceerd. In het algemeen is het effect van anisotropie op de doorwerking van de verlaging van de grondwaterstand bij de GHG en gemiddelde voorjaars grondwaterstand (GVG) kleiner dan bij de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG), omdat de grondwateraanvulling tijdens GHG en GVG groter is en de weerstand hoog in het bodemprofiel meestal groter is dan bij de GLG (tijdsafhankelijk). Dit houdt dan ook in, dat de eventuele berekende wateroverlastvermindering als gevolg van een grondwaterwinning in werkelijkheid ook minder is dan wanneer er geen anisotropie aanwezig is. Hierdoor kan bijvoorbeeld bij waterwinningen de verminderde natschade worden overschat. Hier tegenover staat dat de droogteschade kan zijn overschat.

Deze overschatting wordt echter in de landbouw in het algemeen ten opzichte van natschade als minder problematisch ervaren. Daarnaast wordt er bij landbouwschade bij grondwaterwinningen vaak gebruik gemaakt van een correctie op de verdroging in de vorm van een achtergrondverdroging (veelal c.a. 10-30 cm). Het is echter de vraag of de achtergrondverdroging met het oog op numerieke verdroging in het verleden goed is ingeschat. Aangezien de voedingsweerstand en daarmee de grondwateraanvulling wordt beïnvloed door anisotropie hoog in het bodemprofiel kan ook het areaal waarover de grondwateronttrekking invloed heeft veranderen. Een geringere grondwateraanvulling heeft immers bij een gelijkblijvende onttrekking tot gevolg dat het onttrokken water uit een groter gebied afkomstig moet zijn, hetgeen overeenkomt met de grotere ruimtelijke interactie via het watervoerende pakket (zie bijvoorbeeld foto 9.1 en 9.2).



*Foto 9.1 Maïs met schade als gevolg van wateroverlast op een intensief gedraineerd perceel (variërende drainafstand tot zelfs op enkele meters) op een drainageproefveld te Scheerwolde (Van der Gaast, augustus 2007).*

### **Waterbeheer**

Kennis over numerieke verdroging en anisotropie hoog in het bodemprofiel is ook van belang voor het waterbeheer. Een verticale weerstand hoog in het bodemprofiel is immers mede bepalend voor de mate waarin de grondwaterstand in het beheergebied van een waterschap te beheersen is. Uit eerder agro-hydrologisch onderzoek blijkt dat de effectiviteit van peilverhoging in waterlopen op de grondwaterstand in belangrijke mate wordt bepaald door de verticale weerstand van het bodemprofiel (LBL, 1996). Vooral in nattere perioden worden de sturingsmogelijkheden van het grondwater door het oppervlaktewatersysteem beperkt door relatief slecht doorlatende lagen op geringe diepte en de hiermee samenhangende, vaak ten onrechte verwaarloosde, verticale component van de drainageweerstand (zie figuur 3.13).

Numerieke verdroging is hierdoor ook van belang voor de mate waarin grondwater gestuurd peilbeheer plaats kan vinden en daarmee ook voor de Waterlood systematiek (GGOR) en het grondwatergestuurd peilbeheer. Daarnaast heeft de mate waarin sturing van het grondwater mogelijk is, onder andere gevolgen voor het schatten van het effect van waterhuishoudkundige maatregelen die bijvoorbeeld in het kader van landinrichtingsprojecten zijn uitgevoerd. Het effect van deze ingrepen op de oorspronkelijk gekarteerde Gt's (meestal natte Gt's) is minder naarmate de verticale weerstand in het bodemprofiel groter is, waardoor de veronderstelde verbeteringen van de voormalige natte percelen in de vorm van drogere Gt's minder zullen zijn, dan dat men in eerste instantie heeft ingeschat.



*Foto 9.2 Greppel in een graslandperceel om wateroverlastproblemen te reduceren (Van der Gaast april 2007)*

### **Monitoring**

Kennis op het gebied van numerieke verdroging is van belang om aan te kunnen geven in hoeverre de gemeten stijghoogte overeenkomt met de freatische grondwaterstand. Dit geldt voor zowel metingen in peilbuizen als voor incidentele metingen in open boorgaten, de zogenaamde gerichte opnames. Anisotropie hoog in het bodemprofiel is immers bepalend

voor de representativiteit van de metingen. Vooral bij incidentele metingen is het tijdstip van meten en de 'tijdsafstand' tot de GHG of GLG van belang. Als gevolg van anisotropie hoog in het bodemprofiel kan er periodiek een natte grondwatersituatie optreden. Deze periodiek natte periode is in hoge mate bepalend voor een incidenteel gemeten grondwaterstand. Naarmate het moment van meten verder verwijderd is van GHG- of GLG-moment is de representativiteit van de meting geringer. Om dit probleem te ondervangen wordt gebruik gemaakt van regressieanalyse, de zogenaamde stambuisregressie. Hierbij wordt de relatie gelegd tussen metingen in peilbuizen op hetzelfde tijdstip als de incidentele metingen en de GHG of GLG.

Echter, er wordt hierbij veelal geen rekening gehouden met eventuele faseverschillen met betrekking tot de GHG en GLG en de overschrijdingsduur van de GHG en GLG. De GHG en GLG hebben een overschrijdingsduur van ongeveer 20 tot 40 dagen. Indien de freatische grondwaterstand voor bv 50 dagen per jaar wordt beïnvloed door een relatief slecht doorlatende leemlaag is deze laag in hoge mate bepalend voor de GHG. Indien er een gerichte opname wordt uitgevoerd in een relatief droge periode hoeft de leemlaag geen invloed te hebben op de gemeten grondwaterstand. Dit heeft tot gevolg dat de meting correct kan zijn maar de berekende GHG door stambuisregressie te laag uit zal vallen. Het gegeven voorbeeld kan uiteraard ook andersom voorkomen. Het komt er echter op neer dat voor zowel metingen in peilbuizen als metingen in open boorgaten geldt: Meten is weten, mits we weten wat we meten. De kennis over wat we meten is voor de freatische grondwaterstand vooral van belang om de representativiteit van de metingen in zowel ruimte als tijd te kunnen bepalen. Voor de kennis over wat we meten, is weer kennis over numerieke verdroging van belang. Met betrekking tot het meten van de freatische grondwaterstand kan worden gesteld dat de waarde en representativiteit van de metingen niet kan worden bepaald zonder informatie te hebben over de bodemgesteldheid, aangezien deze kennis van het systeem noodzakelijk is om meetgegevens te kunnen interpreteren.

### ***Waterkwaliteit***

Water is voor veel stoffen de drager, waardoor de stroming van water door de grond bepalend is voor de verplaatsing van stoffen. Als gevolg van anisotropie in de ondiepe ondergrond is de berekende ondiepe oppervlakkige afvoer in de modelberekeningen meestal onderschat, waardoor de diepe ondergrondse afvoer wordt overschat. Daarnaast is anisotropie in hoge mate bepalend voor de diepte van de stroombanen van water in de bodem en het hiermee samenhangende doorstroomde profiel. Dit heeft onder andere directe gevolgen voor verblijftijden van water en waterkwaliteitsberekeningen. Hierdoor is kennis op het gebied van anisotropie ook van belang voor bijvoorbeeld het bestrijdingsmiddelenbeleid en het mestbeleid.

## **9.3 Oplossingsrichting**

Vanuit de theorie kunnen we concluderen dat stijghoogteverschillen met uitzondering van het omslagpunt tussen het wegzijgingsgebied en het kwelgebied overal voorkomen. In de praktijk zal het omslagpunt een intermediaire zone zijn van beperkte omvang. Op basis van de theoretische kennis hoeven we ons dus niet af te vragen of en waar stijghoogteverschillen voorkomen. In plaats hiervan kunnen we ons wel afvragen of en waar de stijghoogteverschillen dermate klein zijn dat ze verwaarloosbaar kunnen worden geacht. Daarnaast speelt de vraag hoe groot de stijghoogteverschillen zijn in de gebieden waar het stijghoogteverschil niet verwaarloosbaar mag worden geacht.

Om op een juiste manier te kunnen beoordelen of grondwaterstandsmetingen op puntlocatie als de freatische grondwaterstand kunnen worden beschouwd heeft men met name informatie over de bodemgesteldheid nodig. Dit betekent, dat voor ieder freatisch meetpunt een boorbeschrijving beschikbaar dient te zijn om de kwaliteit en representativiteit in zowel ruimte als tijd van het meetpunt op een juiste manier in te kunnen schatten. Voor nieuw in te richten freatische meetpunten is het opstellen van een protocol met betrekking tot de meetopstelling in relatie tot de bodemgesteldheid aan te bevelen. Hiervoor dient wellicht naast een literatuurstudie voor specifieke bodemgroepen nog aanvullend onderzoek te worden gedaan.

Hierbij dient ook aandacht te worden besteed aan het effect van kortsluitstroming bij het gebruik van langere peilfilters die eventuele weerstands biedende lagen doorsnijden. In dit geval wordt een gemiddelde grondwaterstand over het doorboorde profiel bepaald en niet een potentiaal op een bepaalde diepte; dit is bijvoorbeeld in de COLN-studie geaccepteerd (Visser, 1958). Ook voor het bestaande meetnet is het voor het meten van de freatische grondwaterstand van belang dat de bodemgesteldheid voor deze locaties in relatie tot de filterstelling bekend is. Daarnaast zal aanvullend onderzoek noodzakelijk zijn om een eventuele vertaalslag te kunnen maken tussen de reeds beschikbare meetgegevens en de freatische grondwaterstand.

De anisotropie van het bodemprofiel kan in beeld worden gebracht op basis van informatie uit bodemkaarten. Hierbij dient te worden opgemerkt, dat op de bodemkaart niet alle informatie vermeld staat die noodzakelijk is om de mate van anisotropie in het bodemprofiel op een juiste manier kwalitatief te kunnen beoordelen. Hiervoor dient men echter ook de boorpuntinformatie te raadplegen. Daarnaast dient te worden opgemerkt dat boorpuntinformatie betrekking heeft op geroerde monsternamen, waardoor zwak storende leembandjes moeilijk worden waargenomen en deze alleen worden beschreven indien de lagen een dikte hebben van minimaal 5 cm. Aangezien het voorkomen van dit soort microgelaagdheid eerder regel is dan uitzondering (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988) heeft dit tot gevolg dat de aanwezigheid van anisotropie op basis van bodemkundige informatie gemakkelijk kan worden onderschat. Tot slot kan worden aangegeven dat de beschikbare bodemkundige informatie slechts betrekking heeft op een beperkte deel van de ondergrond en er voor het bepalen van de anisotropie een 'verdieping' van de bodemfysische informatie noodzakelijk is.

Voor een getalsmatige vertaalslag moet de bodemkundige informatie worden omgezet naar bodemfysische informatie. Deze fysische eigenschappen van de bodem hebben betrekking op de doorlatendheidskarakteristiek en de bodemvochtkarakteristiek van afzonderlijke bodemhorizonten. Hierbij is het vooral van belang dat de bodemfysische informatie niet wordt gemiddeld, maar dat deze voor de specifieke bodemlagen zo veel mogelijk afzonderlijk worden meegenomen. Op deze wijze kunnen bijvoorbeeld kaarten worden gemaakt van de verticale weerstand in de ondiepe ondergrond. Vervolgens kan deze informatie gebruikt worden bij het bepalen van drainageweerstanden en de ruimtelijke interactie tussen gebieden. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de verticale weerstand als gevolg van een variatie van de grondwaterstand in zowel de ruimte alsook in de tijd kan verschillen. De bodemfysische informatie wordt ook gebruikt in hydrologische modellen. Het aanpassen van deze bodemfysische informatie heeft tot gevolg dat de doorlatendheden en bergingsmogelijkheden van de bodem veelal afnemen, hetgeen directe gevolgen heeft op de berekende grondwaterstanden, afvoeren, verdamping, kwel/wegzijing enz... Daarnaast zijn de bovengenoemde aanpassingen van belang voor stoftransport. Om anisotropie in de ondiepe ondergrond correct te kunnen modelleren kan het naast het verbeteren van de invoergegevens ook noodzakelijk zijn dat modellen worden aangepast.

### **Verzadigde doorlatendheid**

Stijghoogteverschillen worden in hoge mate bepaald door de verzadigde doorlatendheid. Het is opmerkelijk dat in de internationale literatuur andere grenzen voor matig doorlatend en slecht doorlatend worden gehanteerd dan in Nederland. De verzadigde doorlatendheid wordt veelal gemeten in ongestoorde grondmonsters. Hierbij wordt tegenwoordig gebruik gemaakt van relatief grote ringmonsters met een geringe dikte. Hierdoor is de kans groter dat bijvoorbeeld wormen en wortelgangen over de volle lengte van het monster doorlopen, terwijl dit in werkelijkheid lang niet altijd het geval is. Voorts dient nog te worden vermeld, dat de wijze waarop de verzadigde verticale doorlatendheid van bodemhorizonten in het laboratorium wordt gemeten alleen geschikt is voor (redelijk) homogene bodemhorizonten, die weinig gelaagdheid vertonen en niet of nauwelijks zijn verdicht (Vroon 1988, Dekker *et al.*, 1990). Dit geldt vooral voor zandgronden, omdat door de gelaagdheid en/of verdichting in deze bodemhorizonten, tijdens de monsternamen makkelijk scheuren en/of breuken kunnen ontstaan, waardoor het effect van deze storende lagen op de verzadigde doorlatendheid niet of nauwelijks meer kan worden gemeten.

Daarnaast kan er in het ringmonster gemakkelijk randstroming optreden, omdat de ring de bemonsterde laag niet goed omstuit. Ook betreft het metingen waarbij het monster onder laboratoriumomstandigheden zorgvuldig wordt bevochtigd, waardoor de kans op luchtinsluiting wordt geminimaliseerd. Onder veldomstandigheden kan bijvoorbeeld luchtinsluiting wel een belangrijke rol spelen. Verder wordt er onder laboratoriumomstandigheden ook geen rekening gehouden met een eventuele onverzadigde laag onder de weerstands biedende laag, welke wel van invloed kan zijn op de doorlatendheid. De genoemde aspecten hebben nagenoeg allemaal tot gevolg dat de gemeten doorlatendheid in ringmonsters kan worden overschat. Deze eenzijdige beïnvloeding kan tot gevolg hebben dat de verzadigde doorlatendheid systematisch wordt overschat. Voor doorlatendheidsonderzoek wordt in de internationale literatuur gesteld dat in situ metingen nauwkeuriger zijn dan metingen aan monsters onder laboratorium omstandigheden (Soil Survey Staff, 1993) Dit is wellicht een verklaring voor het verschil in klassegrenzen, die in de Nederlandse en de internationale literatuur worden gehanteerd. Nader onderzoek op dit gebied is wenselijk. Hierbij zou tevens gekeken kunnen worden in hoeverre statistische technieken beschikbaar zijn die rekening kunnen houden met eenzijdige meetfouten.

Numerieke verdroging geeft een verklaring voor het verschil tussen de ervaringen van grondgebruikers en theoretisch (vaak modelmatig) verkregen grondwaterstands informatie. Hierdoor kan de kennis op het gebied van numerieke verdroging een brugfunctie vervullen tussen theorie en praktijk om het draagvlak voor meer realistische oplossingen voor bijvoorbeeld het oplossen van verdrogingsproblemen, als ook de belasting van het oppervlaktewater met nutriënten/bestrijdingsmiddelen te bewerkstelligen.

## 10 Conclusies en aanbevelingen

### 10.1 Conclusies

#### **Het ontbreken aan kennis over de bodemopbouw in relatie tot de filterstelling van peilbuizen kan leiden tot onjuiste, misleidende afgeleide informatie.**

Een groot aantal landbouwbuizen (80 %) heeft in vergelijking met het fluctuatietraject van de grondwaterstand een te diepe filterstelling. Indien peilbuizen of een gedeelte van de peilbuizen worden gebruikt voor toepassingen waarvoor de peilbuizen niet geschikt zijn, kan dit tot gevolg hebben dat de peilbuisinformatie onjuist wordt geïnterpreteerd en kan derhalve tot misleidende informatie leiden. Het kan hierbij gaan om onjuiste en misleidende informatie met betrekking tot grondwaterstandskarten en hiervan afgeleide gegevens.

#### **De mate van verdroging in termen van een grondwaterstands daling wordt veelal systematisch overschat.**

In de Natuurbalans 2008 worden getallen voor bestuurlijke verdroging (gemiddeld 45-60 cm) binnen de natuurgebieden vermeld die groter zijn dan de historische verdroging (ca. 30-45 cm) voor zowel de natuur als landbouwgebieden. Vooral in het zandgebied van Nederland komen natuurgebieden voor op locaties met bijzondere of afwijkende geologische, hydrologische of bodemkundige omstandigheden, waardoor natuurgebieden in het zandgebied veelal gekenmerkt worden door een grote variatie in bodemgesteldheid op korte afstand. Deze situaties gaan vaak gepaard met het voorkomen van anisotropie in het bodemprofiel. Indien met het oog op het voorgaande de verdroging in natuurgebieden wordt bepaald aan de hand van veelal te diep geplaatste peilbuizen dan kan de verdroging verkeerd worden ingeschat. Indien de verdroging wordt bepaald op basis van vegetatie kunnen andere factoren en ook de geleidelijke aanpassing (naijling) van de vegetatie van invloed zijn op de vastgestelde verdroging.

#### **Correct meten van de grondwaterstand kan het draagvlak voor maatregelen vergroten**

Door het toepassen van kennis over numerieke verdroging wordt de werkelijke freatische grondwaterstand weer op meer locaties gemeten. Hierdoor sluiten de metingen beter aan op de waarnemingen en ervaringen van agrariërs en terreinbeheerders. Daarnaast is het met deze kennis mogelijk om modellen en instrumenten zodanig aan te passen of te voorzien van invoergegevens dat rekenresultaten beter overeenstemmen met de waarnemingen en ervaringen van agrariërs en terreinbeheerders. Hiermee wordt voorkomen dat het effect van maatregelen op de freatische grondwaterstand verkeerd wordt geschat. Dit geldt eveneens voor de ruimtelijke interactie tussen gebieden via het grondwater door het niet meenemen van anisotropie vooral onder natte omstandigheden. Dit alles kan van invloed zijn op het draagvlak voor maatregelen.

#### **De grondwaterstroming wordt in Nederland veelal te diep geschat**

Uit de Bodemkaart 1 : 50.000 kan worden afgeleid dat in minimaal 50% van het landelijk gebied van Nederland in meer of mindere mate sprake van anisotropie. Verschil in verticale en horizontale doorlatendheid in de bodem wordt aangeduid met het begrip anisotropie. Deze anisotropie wordt veroorzaakt door zowel geologische ontstaanswijze (geogenese) als bodemvorming (pedogenese). Op basis van de Bodemkaart 1 : 50.000 is een schatting gemaakt van het totale areaal van Nederland waar en in welke mate anisotropie invloed kan hebben op de freatische grondwaterstand. Uit een vergelijking tussen het voorkomen van



anisotropie op basis van de Bodemkaart 1 : 50.000 en op basis van een detailkartering kan worden geconcludeerd dat het areaal met sterke anisotropie afgeleid uit de 1 : 50.000 kaart wordt onderschat. Ook de ruimtelijke ligging van gronden met anisotropie kan als gevolg van het schaalverschil afwijken. Gelaagdheid in de bodem met een hiermee samenhangende variatie in doorlatendheid heeft tot gevolg dat de diepte van grondwaterstroming wordt beperkt en hierdoor ook de interactie tussen het grondwater en het oppervlaktewater aanzienlijk wordt beperkt.

**Een Gt-karteringsmethode moet een directe koppeling hebben met bodemkundige informatie.**

Aangezien de bodemopbouw in hoge mate bepalend is voor de grondwaterbeweging is voor een Gt-karteringsmethode een directe koppeling met bodemkundige informatie noodzakelijk ten einde kwalitatief goede Gt-informatie te kunnen genereren.

**In het verleden zijn meer formules voor de GVG afgeleid, waardoor een grote verscheidenheid in uitkomsten is ontstaan.**

In de loop der tijd zijn er meer regressieformules afgeleid om de GVG uit GHG- en GLG-informatie te bepalen. Veranderingen in de definitie van de GVG, in de berekeningsmethode van de GHG en GLG en de gebruikte buizen resulteren in relatief grote verschillen in uitkomsten. Daarnaast is als gevolg van veranderingen in de definitie van de GVG, waarbij de gehanteerde datum voor de bepaling van de GVG is vervroegd van 15 april naar 1 april en later naar 15 maart, de GVG natter geworden. In onderzoek waarbij de GVG wordt gebruikt dient men hiermee rekening te houden. In de toekomst dient de GVG te worden bepaald voor de datum 1 april.

**Voor vegetatie is niet alleen grondwater maar ook het vochtleverend vermogen van belang.**

Indien geredeneerd wordt vanuit de plant is in droge perioden vooral de vochtbeschikbaarheid voor de groei van de plant van belang. De vochtbeschikbaarheid voor de plant wordt beïnvloed door het klimaat (neerslag en verdamping), het beschikbare bodemvocht in de wortelzone, de dikte van de wortelzone en de capillaire nalevering vanuit het grondwater. Deze laatstgenoemde bodemkundige aspecten zijn in het verleden omschreven als het vochtleverend vermogen van de bodem waar de grondwaterstand slechts een onderdeel van is. In natte perioden is de grondwaterstand van groter belang aangezien deze beperkend kan werken voor de plantengroei. Daarnaast kan in natte perioden de grondwaterstand van invloed zijn op de agrarische bedrijfsvoering. Hierdoor kan ook worden gesteld dat het grondwaterregime van groter belang is in natte perioden dan in droge perioden. Hierdoor is de GGOR wel toereikend voor natte perioden, maar dient voor droge perioden ook gekeken te worden naar het vochtleverend vermogen van de bodem.

## 10.2 Aanbevelingen

**Om de freatische grondwaterstand te kunnen meten dient het filter correct te zijn geplaatst en afgewerkt.**

Voor het meten van de freatische grondwaterstand is het van belang dat de filterstelling wordt afgestemd op de bodemkundige situatie. Over het algemeen kan worden gesteld dat het filter (zowel de diepte als de lengte) overeen dient te komen met het fluctuatietraject van de freatische grondwaterstand. Indien één of meerdere weerstandsbiedende laagjes aanwezig zijn, zijn meerdere peilfilters noodzakelijk om de freatische grondwaterstand gedurende het gehele jaar correct te meten. In deze situatie dient er een filter zowel boven als onder de



weerstandbiedende laag te worden geplaatst, waarbij een peilfilter geplaatst onder of tussen weerstandbiedende lagen ter hoogte van deze lagen dient te worden afgedicht om kortsluitstroming te voorkomen. Naast deze algemene installatie voorwaarden is het van belang bij het plaatsen van peilbuizen rekening te houden met de lokale omstandigheden.

**Voor het interpreteren van metingen in bestaande peilbuizen is het noodzakelijk bodemkundige profielinformatie mee te nemen.**

Voor het interpreteren van tijdreeksgegevens uit grondwaterstandsbuizen is het noodzakelijk dat de bodemopbouw ter plaatse van de grondwaterstandsbuis bodemkundig is beschreven. Deze informatie is nodig om een inschatting te kunnen maken van de kwaliteit van het meetpunt met betrekking tot de filterstelling (zowel filterdiepte als filterlengte in relatie tot weerstandbiedende laagjes). Daarnaast is deze informatie noodzakelijk om ten behoeve van modellering een bodemfysische interpretatie mogelijk te maken. De bodemkundige situatie is ook van belang om de representativiteit van het meetpunt in te kunnen schatten.

**Voor natuurgebieden is actuele en ruimtelijk goed gedifferentieerde Gt-informatie, die aansluit bij de reële situatie, van belang.**

Om de geschiktheid van natuurgebieden vast te stellen voor bepaalde natuurdoelen is de beschikbaarheid van goede Gt-informatie van belang. Aangezien binnen natuurgebieden veelal een grote verscheidenheid aan hydrologische condities voorkomt, is het belangrijk om te beschikken over een karteringsmethode die deze verscheidenheid zowel per locatie als ook ruimtelijk correct kan weergeven. Hierdoor is het van belang gebruik te maken van een karteringsmethode die weinig of geen afvlakking tot gevolg heeft, zodat het patroon beter tot uiting komt en aansluit bij het vereiste schaalniveau. Indien aan deze eis niet kan worden voldaan is het moeilijk aan te sluiten bij de praktijk, wat ook het verkrijgen van draagvlak bemoeilijkt.

**Interpolatie op basis van verwantschap biedt goede mogelijkheden voor het vervaardigen van Gt-kaarten.**

Om deze methode toe te passen, is het van belang dat er voldoende kwalitatief goede puntinformatie beschikbaar is. Nader onderzoek naar het gebruik van hulpinformatie en de hiermee samenhangende optimale punt dichtheid is wenselijk. Kartering van de Gt aan de hand van veldschattingen in combinatie met deze interpolatiemethode voor relevante natuurgebieden, waarbij prioritering op basis van grondwaterafhankelijkheid plaatsvindt, is een mogelijkheid om kwalitatief goede Gt-kaarten voor natuurgebieden te vervaardigen.

**De actuele Gt op basis van karteerbare kenmerken is landsdekkend beschikbaar en blijkt op grond van de verificatie het Gt-patroon goed weer te geven.**

De gebruikte karteerbare kenmerkenmethode is eenvoudig van opzet, waardoor de gebruiker de toepasbaarheid relatief snel kan schatten. Validatie en verificatiestudies hebben aangetoond dat de methode de Gt-informatie op een schaal 1 : 50.000 redelijk goed weergeeft. Voor een betere aansluiting op de praktijk is de methode aan te passen, waarbij de kaart op basis van veldinformatie wordt bijgesteld.

**Het gebruik van tijdreeksanalyse geparametriseerd op basis van karteerbare kenmerken biedt de mogelijkheid om tijdreeksen van grondwaterstanden op pixelniveau te genereren.**

Het beschikbaar komen van kaarten met fysische kenmerken met een hoge resolutie maakt het mogelijk om tijdreeksen van grondwaterstanden te genereren. Het gebruik van dit soort fysische informatie maakt het tevens mogelijk om een parameterruimte te definiëren die bepalend is voor de fluctuatie van de freatische grondwaterstand. Hierdoor is deze informatie bruikbaar voor bijvoorbeeld meetnetoptimalisatie. Het is ook mogelijk om deze informatie te

gebruiken om op voorhand representatieve meetlocaties vast te stellen voor karteringen of monitoringsdoeleinden. Naast het in beeld krijgen van de grondwaterstandsfluctuatie is het van belang een goed beeld te krijgen van de ontwateringsbasis. De gebruiksschaal is afhankelijk van de schaal van de gebruikte fysische invoergegevens

**De GD-methode leidt tot een sterke afvlakking en verlies aan patrooninformatie waardoor deze methode minder geschikt om in te zetten bij de kartering van natuurgebieden.**

De GD-kaart geeft gemiddeld gezien de beste schatting van de Gt. De GD-methode heeft echter ook de meeste afvlakking tot gevolg, waardoor de kaart onvoldoende en deels verkeerde patrooninformatie te zien geeft. Op grond hiervan is deze kaart niet bruikbaar voor toepassingen die gericht zijn op natuur. Door het gecombineerd gebruik van verschillende informatiebronnen, waaronder mogelijk te diep geplaatste peilbuizen, is de gehanteerde methode onderhevig aan numerieke verdroging. Hierdoor kan de kaart onjuiste en misleidende informatie geven. Daarnaast dient te worden opgemerkt dat de methode geen directe koppeling met bodemkundige informatie heeft.

**Het is van belang te onderkennen, dat de gehanteerde verificatie of validatie methode in hoge mate bepalend is voor de uitkomsten.**

Bij de verificatie is gebleken dat de resultaten afhankelijk zijn van de gebruikte methode. Vooral het buiten beschouwing laten van de relatief droge gebieden heeft effect op zowel de berekende systematische als ook op de toevallige verschillen. De verschillen in resultaten zijn voornamelijk het gevolg van de beperkte diepte waarvoor karteringsmethoden geschikt zijn. Voor een volledige verificatie is het van belang om naast de gemiddelde verschillen ook de verschillen in Gt-klassen en verschillen in patrooninformatie te betrekken.

**Nader onderzoek naar een methode om patronen te valideren is wenselijk.**

Voor validatie wordt momenteel veelal gebruik gemaakt van gemiddelde verschillen. Deze informatie heeft echter geen betrekking op patrooninformatie. Het is wenselijk, dat er in de toekomst een objectieve maat beschikbaar komt, waarmee patrooninformatie lokaal kan worden gevalideerd.

## Literatuur

- Bakel, P.J.T.van, M.A. Bastiaanssen, C. Drost, J.W.J. van der Gaast, A. ter Harmsel, 2002. Instrumentarium Waterlood. Stowa, Utrecht.
- Bannink, M.H., L.W. Dekker, J.M.H. Hendrickx en H.C. van Ommen, 1989. Wegzijing van water uit hooggelegen vennen: een gevoeligheidsanalyse. *H<sub>2</sub>O* 22(15) pag 436 t/m 459.
- Berg, E.H. van den, 2003. The Impact of Primary Sedimentary Structures on Groundwater Flow; A multi-scale sedimentological and hydrogeological study in unconsolidated eolian dune deposits. Proefschrift, Amsterdam, Vrije universiteit.
- Beugelink, G.P. en F.A.M. Claessen (eds), 1995. Operationalisatie van 25%-doelstelling Verdroging; maatregelen, kosten en effecten. Achtergronddocument verdroging MV3/ENW. RIVM rapport 715001001; RIZA nota nr 95.029, mei 1995
- Beugelink, G.P., A. van Hinsberg, R. van Oostenbrugge, J. Clement en S. van Tol, 2006. Hotspotkaart verdrogingsbestrijding. Report 500402002/2006, Bilthoven, Milieu en Natuur Planbureau
- Bierkens, M.F.P. and W.A. Bron, 2000. 3. VIDENTE: a graphical user interface and decision support system for stochastic modelling of water table fluctuations at a single location; Includes documentation of the programs KALMAX, KALTFN, SSD and EMERALD and introductions to stochastic modelling. Wageningen, ALTErrA, Green World Research. Alterra-rapport 118.
- Bierkens M.F.P en H.Th.L.Massop, 2000. Optimalisatie meetlocaties grondwaterstanden Waterschap De Aa. Representatieve locaties voor grondwaterafhankelijk peilbeheer. Wageningen, Alterra rapport 010.
- Beintema, A.J., L.J.M. van den Berg, 1979. Relaties tussen waterpeil, grondgebruik en weidevogelstand. Deel II, onderzoek 1976.
- Bouma, J en L.W. Dekker, 1983. Nieuwe fysische meetmethoden bij waterbeweging in kleigronden. *Landbouwkundig Tijdschrift* nr. 95, 4: 26-29.
- Bouwmans, J.M.M, 1990. Achtergrond en toepassing van de TCGB-tabel. Utrecht, Technische Commissie Waterbeheer.
- Braat, L.C. A. van Amstel, E. Nieuwhof, 1987. Verdroging in Nederland, probleemverkenning. Publicatiereeks Milieubeheer, nr 13. Ministerie van Volkshuisvesting, Milieubeheer en Ruimtelijke Ordening, 's-Gravenhage.
- Braat, L.C. (eindredactie). (IVM, CML, DGV-TNO, RIN) 1989a. Verdroging van natuur en landschap in Nederland. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, februari 1989.
- Braat, L.C. (eindredactie). (IVM, CML, DGV-TNO, RIN) 1989b. Verdroging van natuur en landschap in Nederland; het technisch rapport. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, juli 1989.
- Buishand T.A., 1982. Maandsommen en jaarsommen van enkele langjarige neerslagreeksen in Nederland. K.N.M.I., De Bilt.
- Buishand, T.A. en C.A. Velds, 1980. Neerslag en verdamping. *Klimaat van Nederland 1*. KNMI, De Bilt.
- Burrough, P. A. en McDonnell, R. 1998 Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, Oxford.
- Cate, J.A.M. ten, A.F. van Holst, H. Kleijer en J. Stolp. 1995. Handleiding bodemgeografisch onderzoek; richtlijnen en voorschriften Deel B: Grondwater. Technisch document 19B, DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- Commissie Hydrologische Onderzoek TNO, 1986. Verklarende woordenlijst. Gespreksgroep Hydrologische Terminologie. 's Gravenhage, rapporten en nota's No. 16.

- Cultuurtechnische Vereniging, 2000. Cultuurtechnisch Vademecum. Handboek voor inrichting en beheer van land, water en milieu. Elsevier bedrijfsinformatie bv, Doetinchem.
- CIW, 2003, Werken met GGOR; Hulpmiddel voor maatwerk bij de afstemming van integraal waterbeheer en ruimtelijk beleid. Commissie Integraal Waterbeheer
- Dalton M.G., B.E. Huntsman and K. Bradbury, 2007. Acquisition and interpretation of water-level data. In: The essential handbook of ground-water sampling. D.M. Nielsen and G.L. Nielsen. CRC Press, New York.
- Dam, J.C. van, J. Huygen, J.G. Wesseling, R.A. Feddes, P. Kabat, P.E.V. van Walsum, P. Groenendijk, C.A. van Diepen, 1997. SWAP version 2.0, Theory. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. Technical Document 45, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, 1997. Report 71, Department Water Resources, Wageningen Agricultural University, 1997.
- Dekker, L.W., H.R.J. Vroon en A.H. Booij, 1990. Gebruik van profiellak bij het nemen van ongestoorde monsters voor bodemfysische bepalingen. H2O 23, nr. 25, p. 691-693.
- Delft, S.P.J. van, J. Holtland, J. Runhaar, P. Mekkinck en P.C. Jansen, 2002. Verdrogingskartering in natuurgebieden. Proefkartering Beekvliet. Alterra-rapport 556.2, ISSN 1566-7197. Alterra, Wageningen.
- Domhof, J., J.C.F.M. Haans en M. Knibbe, 1965. Het meten van grondwaterstanden in gronden met slecht doorlatende lagen. Boor en Spade XIV, Wageningen.
- Ernst, L.F., 1958. Onderzoek van grondwaterstromingen in het Lollebeekgebied. In: Ridder, N.A. de, P. Hondius en L.F. Ernst, 1958. Geologisch en hydrologisch onderzoek in Noord – Limburg. Mededeling / Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (4)
- Ernst, L.F., 1962. Grondwaterstroming in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen. Proefschrift, Wageningen.
- Felius, G.P., 1963. Bepaling van de geohydrologische constanten. CHO-TNO, Verslag technische bijeenkomsten 17, 's-Gravenhage.
- Fetter, C.W., 1980. Applied hydrogeology. Columbus, Charles E. Merrill Publishing Company.
- Finke, P.A., D.J. Brus, T. Hoogland, J. Oude Voshaar, F. de Vries en D. Walvoort, 1999a. Actuele grondwaterinformatie schaal 1:10 000 in de Waterschappen Wold en Wieden en Meppelerdiep. Gebruik van digitale maaiveldhoogten bij de kartering van GHG, GVG en GLG. SC-Rapport 633.
- Finke, P.A., T. Hoogland, M.F.P. Bierkens, D.J. Brus en F. de Vries. 1999b. Pilot naar grondwaterkaarten in het Weerijdsgebied.
- Finke, P., M. Bierkens, D. Brus, J. van der Gaast, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries. 2002. Klimaatsrepresentatieve grondwaterdynamiek in Waterschap Mark en Weerijds. Wageningen, Alterra, rapport 387.
- 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.
- Finke, P.A., D.J. Brus, M.F.P. Bierkens, T. Hoogland, M. Knotters en F. de Vries, 2005. Kartering van de grondwaterdynamiek met behulp van geo-informatie van hoge resolutie. Stromingen 11(1): 27-41.
- Freeze, R.A. en J.A. Cherry, 1979. Groundwater. Englewood Cliffs N.J., Prentice-Hall, Inc.
- Gaast, J.W.J. van der en H. Th. L. Massop, 2003a. Karakterisering van de freatische grondwaterstand in Nederland; Bepaling van de GxG en xG3 voor 1995 op puntlocaties. Alterra-rapport 819, ISSN 1566-7197. Alterra, Wageningen.
- Gaast, J.W.J. van der en H.Th. L. Massop, 2003b. Spreidingslengte voor het beheersgebied van Waterschap Veluwe; Een maat voor het bufferzonebeleid. Alterra-rapport 653, ISSN 1566-7197. Alterra, Wageningen.

- Gaast, J.W.J. van der en H. Th. L. Massop, 2005a. De verdroging in beeld met historische en actuele grondwatertrappen op basis van karteerbare kenmerken; in: H<sub>2</sub>O, nr14/15, pag43-46.
- Gaast, J.W.J. van der en H. Th. L. Massop, 2005b. Het grondwaterregime als basis voor de grondwatertrap; in: H<sub>2</sub>O, nr22, pag36-38.
- Gaast, J.W.J. van der en H.Th.L. Massop, 2005a. De verdroging in beeld met historische en actuele grondwatertrappen op basis van karteerbare kenmerken. H2O, nr 14/15., blz 43-46.
- Gaast, J.W.J. van der en H.Th.L. Massop, 2005b. Het grondwaterregime als basis voor de grondwatertrap. H2O, nr 22., blz 42-44.
- Gaast, J.W.J. van der en H.Th.L. Massop, 2005c. Hoe nauwkeurig is de grondwatertrap op buislocaties te bepalen? Stromingen, jaargang 11, no 4, blz 5-17.
- Gaast, J.W.J van der., H.Th. L. Massop en G.B.M Heuvelink, 2005. Monitoring verdroging. Methodische aspecten van meetnetoptimalisatie. Wageningen, Alterra-rapport 1102.
- Gaast, J.W.J. van der, H. Th. L. Massop, H. R. J. Vroon & I. G. Staritsky, 2006a. Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken. Alterra-rapport 1339, ISSN 1566-7197. Alterra, Wageningen.
- Gaast, J.W.J. van der, H.R.J. Vroon & M. Pleijter, 2006b. De grondwaterdynamiek in het Waterschap Regge en Dinkel. Alterra-rapport 1335, ISSN 1566-7197. Alterra, Wageningen.
- Gaast, J.W.J. van der, H. Vroon & H.Th.L. Massop, 2006c. Verdroging veelal systematisch overschat. H2O, nr 21., blz 39-43.
- Gaast, J.W.J. van der, H.R.J. Vroon en I. G. Staritsky, 2006d. Interpoleren op basis van verwantschap; in: H<sub>2</sub>O, nr 17, pag 57-61.
- Gaast, J.W.J. van der, H. Th. L. Massop en H.R.J. Vroon, 2007. Kwantificering verdroging. In: H<sub>2</sub>O, nr 3, pag. 25-28.
- Gaast, J.W.J. van der, H.R.J. Vroon en H. Th. L. Massop, 2008. Oorzaak en gevolg van numerieke verdroging; in: H<sub>2</sub>O, nr 5, pag 51-56.
- Gaast, J.W.J. van der en E. Kiestra. 2008. Bodemkundig-hydrologisch onderzoek in de westelijke randzone van het Fochteloërveen; Inrichtingsadvies ter compensatie van veranderende hydrologische omstandigheden in de westelijke randzone. Wageningen, Alterra-rapport 1722.
- Groenewoud C., 1962. Archief van grondwaterstanden TNO; algemene opzet en werkwijze van het Archief van grondwaterstanden TNO.
- Grootjans, A.O., 1979. Effecten van grondwaterstandsval op een beekdalreservaat in het stroomdallandschap van de Drentse Aa. WLO mededeling 6,3.
- Grujter, J.J. de, J.B.F. van der Horst, G.B.M. Heuvelink, M. Knotters en T. Hoogland, 2004. Grondwater opnieuw op de kaart. Methodiek voor de actualisering van grondwaterstands-informatie en perceelsclassificatie naar uitspoelingsgevoeligheid voor nitraat. Wageningen, Alterra-rapport 915, 70 blz.
- Gijsen, M.E.A. van, 1979. Ecologische aspecten van grondwaterwinning. RIN rapport 79/11, Leersum.
- Heesen, H. van en G. Westerveld 1966. Karakterisering van het grondwaterstandsverloop op de bodemkaart. Cultuurtechnisch tijdschrift, jaargang 5.
- Heesen, H. van, 1971. De weergave van het grondwaterstandsverloop op bodemkaarten. Boor en Spade 17, p. 127 – 149. Wageningen, Stichting voor Bodemkartering.
- Heesen, H.C. van en P. van der Sluijs., 1974. De vochtleverantie van een grond aan het gewas. Interne mededeling / Stichting voor Bodemkartering (nr. 29).
- Hooghoudt, S.B. 1940. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond; no. 7. Algemeene beschouwing van het probleem van de detailontwatering en de infiltratie door middel van parallel loopende drains, greppels, slooten en kanalen. In: Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen der rijkslandbouwproefstations. No. 46 's-Gravenhage.

- Hooghoudt, S.B. 1952. Waarnemingen van grondwaterstanden voor de landbouw. CHO-TNO, Verslag technische bijeenkomsten 1-6, 's-Gravenhage.
- Hoorn, J.W. van, 1960. Grondwaterstroming in komgronden en de bepaling van enige hydrologische grootheden in verband met het ontwateringssysteem. Proefschrift, Wageningen.
- Houben, J.M.M.Th., 1979. Bodemgesteldheid en diepte van beworteling. Rapport 1459, Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.
- Hubbert, M.K., 1940. The theory of ground-water motion *Journal of Geology* v. 48 no. 8 pag. 785-944
- Huizinga, 1950. Waarnemingen van grondwaterstanden ten behoeve van de grondmechanica. Laboratorium voor Grondmechanica, Delft
- Werkgroep Verdrogingskaart 2004. Verdrogingskaart 2004 van Nederland: Landelijke inventarisatie van verdroogde gebieden en projecten verdrogingsbestrijding. Den Haag, Interprovinciaal Overleg.
- Jansen, P.C. 1986. De beworteling van (half-) natuurlijke vegetaties. Wageningen ICW-nota no. 1698.
- Kekem, A.J. van, T. Hoogland en J.B.F. van der Horst. 2005. Uitspoelingsgevoelige gronden op de kaart; werkwijze en resultaten. Wageningen, Alterra, Alterra-1080
- Kleijer, H., 2000. De bodemgesteldheid van de gebieden Berkeldal, Graafschap, Wildenborch, Warnsveld-Vierakker en Hummelo-Keppel; resultaten van een bodemgeografisch onderzoek. Wageningen, Alterra-rapport 090.
- Kloosterhuis, J.L., D.A. Eilander en P. Harbers, 1965. De bodemgesteldheid van de ruilverkaveling Bevermeer. Bennekom, Stiboka-rapport no. 639.
- Knibbe, M. en B. Marsman, 1961. Grondwatertrappenindeling in Overijsselse zandgronden. Voorlopige wetenschappelijke mededelingen (no 16). Wageningen, Stichting voor bodemkartering.
- Knibbe, M., 1969. Gleygronden in het dekzandgebied van Salland. Proefschrift, Centrum voor Landbouwpublicaties en Landbouwdocumentatie, Wageningen.
- Knotters, M. en M.F.P. en Bierkens, 1999. Tijdreeksmodellen van de grondwaterstand. Een kijkje in de black box. *Stromingen* 5, 3: 35-50.
- Knotters, M. en P.C. Jansen, 2005. Honderd jaar verdroging in kaart; in: *Stromingen* 11-4.
- Kroon T, P. Finke, I. Peereboom en A. van Beusen, 2001. Redesign Stone. De nieuwe schematisatie voor Stone; de ruimtelijke indeling en toekenning van de hydrologische en bodemchemische parameters. Lelystad, RIZA-rapport 2001.017
- Lankester, J en C. Maas, 1996. Een onderzoek naar karakterisering van vegetatiekundige standplaatsen op basis van impulsresponsies. *Stromingen* 2(3):5-17.
- LBL (1996). Water op Peil. Perspectieven van waterconserving in het zandgebied van Noord-Brabant; een agro-hydrologische analyse. LBL Noord-Brabant.
- Locher, W.P. en H. de Bakker, 1987. Bodemkunde van Nederland. Voorpublicatie Deel 1 Algemene Bodemkunde. Stiboka en Ministerie van Landbouw en Visserij. Malmberg, Den Bosch.
- Massop H.T.L., T. Kroon, P.J.T van Bakel, W.J. de Lange, M.J.H. Pastoors en J. Huygen, 2000. Hydrologie voor Stone; Schematisatie en parametrisatie. Wageningen, ALTERRA, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling en Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Miliehygiëne. Alterra-rapport 038. Reeks Milieuplanbureau 9.
- Mazure, J.P., 1936. Geohydrologische gesteldheid van de Wieringermeer. Algemene landsdrukkerij, pp 67-131, 's-Gravenhage.
- Molenaar, J.G. de, 1980. Bemesting, waterhuishouding en intensivering in de landbouw en het natuurlijk milieu. RIN-rapport 80/6, Leersum.

- Nes B.A., van, 1960. Overzicht betreffende de doorlatendheid van de bodem. In: Verslagen en Mededelingen No. 5. 's Gravenhage, Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO.
- Nederlandse Hydrologische Vereniging, 2002. Hydrologische woordenlijst. Utrecht, NHV-special 5.
- Nielsen, D.M. and R. Schalla, 2006. Design and installation of ground-water monitoring Wells. In: D.M. Nielsen, Practical Handbook of Environmental Site Characterization and Ground-Water Monitoring. CRC Press, New Mexico.
- PBL, 2008. Natuurbalans 2008. Planbureau voor de Leefomgeving, Bilthoven/Den Haag.
- Projectgroep Waterlood, 1998. Grondwater als leidraad voor het oppervlaktewater. DLG publicatie 98/2. Dienst Landelijk Gebied en Unie van Waterschappen. Utrecht, Den Haag
- Richards, L.A., editor, 1954. Diagnosis and improvement of Saline and Alkaline soils. Agriculture Handbook no. 60, Washington.
- Rijtema, P.E., 1971. Een berekeningsmethode voor de benadering van de landbouwschade ten gevolge van grondwateronttrekking. ICW-nota 587, Wageningen.
- Rolf, H. (1989). Verlaging van de grondwaterstanden in Nederland. Onderzoek van DGV-TNO in opdracht van het Ministerie van Verkeer & Waterstaat.
- Runhaar, J., 1999. Impact of hydrological changes on nature conservation areas in The Netherlands. Thesis Leiden University, The Netherlands.
- Runhaar, J., P.C. Jansen, en J.H. Oude Voshaar, 1999. Standaard meetprotocol verdroging : vegetatiemonitoring. NOV-rapport (15.3)
- Runhaar, J., G. van Wirdum en C.M.A. Hendriks, 2000. Naar een meetnet verdroging. Alterra-rapport (ISSN 1566-7197 ; 108), Wageningen.
- Runhaar, J., H. Kuijpers, H.L. Boogaard, E.P.A.G. Schouwenberg en P.C. Jansen, 2003. Natuurgericht Landevaluatiesysteem (NATLES) versie 2.1. Alterra-rapport 550.
- Runhaar J., N. Oostrom en R. Stuurman, 2005. Verdroging in cijfers; Noodzaak en strategieën voor verdrogingsmonitoring. TNO-rapport, NITG o5-099-B0710, Utrecht.
- Saines, M., 1981. Errors in interpretation of ground-water level data. Ground-Water Monitoring Review, 1(1) pag. 56-61.
- Snepvangers J en W. Berendrecht, 2007. MIPWA, Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer. Utrecht, TNO-rapport 2007-U-R0972/A.
- Sluijs, P. van der, 1982. De grondwatertrap als karakteristiek van het grondwaterstands-verloop. H2O 15: 42-46.
- Sluijs, P. van der, 1990. Hoofdstuk 11: Grondwatertrappen. In: Locher, W.P. en H. de Bakker (red.) Bodemkunde van Nederland deel 1: Algemene bodemkunde. Malmberg, Den Bosch.
- Sluijs, P. van der en Th. van Egmond, 1976. Facetten van grondwatertrappen in zandgronden. Rapport nr. 1329, Stiboka, Wageningen.
- Sluijs, P. van der en H. van Heesen, 1989. Veranderingen in de berekening van de GHG en de GLG. Landinrichting 1989/29: 18-21.
- SNWBL, Studiecommissie Waterbeheer Natuur, Bos en Landschap, 1990. Handboek Grondwaterbeheer voor Natuur, Bos en Landschap.
- Soesbergen, G. van, C. van Wallenburg, K.R. van Lynden en H.A.J. van Lanen, 1986. De interpretatie van bodemkundige gegevens. Wageningen, STIBOKA, rapport 1967.
- Soil Survey Staff, 1993. Soil Survey Manual. Washington, United States Department of Agriculture
- Stol, Ph., 1958. De waterhuishouding van de landbouwgronden, p. 7 – 274. In: Stol, Ph. en B. Vrijhof. De landbouwwaterhuishouding in de provincie Zuid-Holland. Rapport 9, Commissie onderzoek landbouwwaterhuishouding Nederland – T.N.O.
- Stol, Ph., 1960. Grondwaterstanden onder verschillende klimatologische omstandigheden. Overdruk uit het Landbouwkundig tijdschrift 72<sup>ste</sup> jaargang no. 18.

- Stuurman R., P de Louw, J. Buma, A. Lourens, J. Runhaar, G. Maas, C Geujen, Y. Graafsma en B. Nijhof, 2003. Resultaten beleidsmeetnet verdroging Noord-Brabant; Methode en voorlopige resultaten eerste fase inrichting. Provincie Noord-Brabant P03-0496.
- Vereniging voor Landinrichting, 2000. Cultuurtechnisch Vademecum, Elsevier, Doetinchem.
- Vermeulen P., W. van der Linden, A. Veldhuizen, H. Massop, H. Vermulst en W. Swierstra, 2007. IBRAHYM, Grondwater Modelinstrumentarium Limburg. Utrecht, TNO-rapport 2007-U-R0193/B.
- Visser, W.C., 1958. De landbouwwaterhuishouding van Nederland. Commissie Onderzoek Landbouwwaterhuishouding Nederland-T.N.O. Rapport No. 1
- Vreedenburgh, C.G.J., 1935. Over de stationaire waterbeweging door grond met homogeen-anisotropische doorlaatbaarheid. De Ingenieur in Nederlands Indië 2(6): 140-143.
- Vries, J.J., de, 1974. Groundwater flow systems and stream nets in the Netherlands. Proefschrift. Rodopi, Amsterdam.
- Vroon, H.R.J. en F. Brouwer, 2008. Bodemkundig-hydrologisch onderzoek in het waterwingebied "Vierlingsbeek". Wageningen, Alterra-rapport 1758.
- Vroon, H.R.J., L.W. Dekker en J.M.H. Hendricks, 1988. A method for measuring hydraulic properties of brittle soil horizons. Soil Sci. Soc. Am. J. 52, nr. 1, p. 292-294.
- Wallenburg, C. van, 1973. Hydromorphic soil characteristics in alluvial soils in connection with soil drainage. In: Pseudogley and gley-genesis and use of hydromorphic soils. E. Schlichting and U. Schwertmann (Eds.). Trans. Comm. V and VI Int. Soc. Soil Sci., Verlag Chemie, Weinheim. 393-403.
- Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. Cultuurtechnisch Vademecum. Cultuurtechnische vereniging, Utrecht.
- Wesseling, J.G., 1991. CAPSEV: steady state moisture flow theory. Program description, user manual. Wageningen, Staring Centre. Report 37.
- Winters G. en J.J. van den Berg, 2006. GXG-karteringsmethoden : een verkenning naar de methoden, toepassingen en mogelijke ontwikkelingen. STOWA (2006 26), Utrecht.
- Wösten, J.H.M., 1987. Beschrijving van de waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken uit de Staringreeks met analytische functies. Rapport 2019, Stiboka, Wageningen.
- Wösten, J.H.M., M.H. Bannink en J. Beuving, 1987. Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks. ICW-rapport 18, Stiboka-rapport 1932, ICW/STIBOKA, Wageningen.
- Wösten, J.H.M., F. de Vries, J. Denneboom en A.F. van Holst, 1988. Generalisatie en bodemfysische vertaling van de bodemkaart van Nederland, 1: 250 000, ten behoeve van de PAWN-studie. Rapport 2055, Stiboka. Wageningen.
- V&W, Ministerie van, 1985. De waterhuishouding van Nederland, Rijkswaterstaat, 's-Gravenhage, 1985, SDU, ISBN 90 12 051 10 X.
- V&W, Ministerie van, 1998. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. 4<sup>e</sup> Nota Waterhuishouding.



# Bijlage 1 Projectplan

## Samenvatting

Het is onduidelijk of de ecologische aspecten (speciaal de hydrologische situatie cq de grondwatersituatie) binnen de VHR en EHS voldoen aan de gestelde eisen. Het doel van dit project is het bepalen van de actuele grondwatersituatie binnen de VHR en EHS gebieden, met behulp van beschikbare data en methoden. Omdat het vervaardigen van een landsdekkende kaart voor de VHR en EHS gebieden binnen dit project niet haalbaar is en bovendien er onduidelijkheid is over beschikbaarheid, dichtheid en frequentie van de grondwaterinformatie, is het project opgesplitst in drie fasen. De eerste fase betreft de inwinning en presentatie en beoordeling van de beschikbare grondwaterstandsgegevens. In de tweede fase wordt een kaart vervaardigd van de grondwaterafhankelijkheid van de natuur binnen de VHR en EHS gebieden. Deze kaart is van belang om een prioritering mogelijk te maken mbt het daadwerkelijk vervaardigen van een kaart van de actuele grondwatersituatie. Het vervaardigen van een kaart met de actuele grondwatersituatie wordt gezien de omvang van het project slechts uitgevoerd voor een pilotgebied, mits met de beschikbare grondwaterstandsgegevens een vlakdekkende kaart kan worden vervaardigd.

## 1 Projectdefinitie

### 1.1 Probleemsituatie en achtergrond

In artikel 6 van de Kaderrichtlijn Water (KRW) wordt aangegeven dat er een register moet worden aangelegd van beschermde gebieden. De KRW beschrijft welke gebieden in ieder geval in het register opgenomen dienen te worden. Dit zijn o.a. alle gebieden, waarvoor het oppervlakte- en grondwater bijzondere bescherming behoeven voor het behoud van habitats en rechtstreeks van water afhankelijke soorten. Als er voor deze gebieden al een richtlijn geldt dan is de richtlijn met het strengste regime leidend bij de implementatie van de KRW. Bijvoorbeeld op grond van de Vogel- en Habitatrichtlijn gelden voor de beschermde gebieden en soorten specifieke chemische en ecologische eisen voor oppervlakte- en grondwater, die bindend zijn voor de KRW. Op basis van de VHR en de EHS zijn gebieden aangegeven die onder deze richtlijn/definitie vallen. Of de ecologische aspecten (speciaal de hydrologische situatie) binnen de VHR en EHS voldoen aan de gestelde eisen wordt in het kader van dit deelproject onderzocht. Project 7.1 is primair gericht op het bepalen van de actuele grondwatersituatie binnen de VHR en EHS. Op deze manier geeft het project invulling van een belangrijke bouwsteen zodat in de toekomst aangegeven kan worden waar wordt voldaan aan de ecologische eisen en waar niet.

### 1.2 Projectdoelstelling

De uiteindelijke doelstelling is het maken van een kaart met de actuele grondwatersituatie binnen de VHR en EHS gebieden. Om dit mogelijk te maken zal binnen dit project concreet ingegaan worden op de mogelijkheden en prioritering voor het vervaardigen van dergelijke informatie in de vorm van een pilot.

### 1.3 Kennisvraag en onderzoeksvragen <sup>3)</sup>

Om kartering van de grondwatersituatie binnen de VHR en EHS gebieden mogelijk te maken is meer inzicht in de kwaliteit en bruikbaarheid van de beschikbare grondwaterstandsgegevens noodzakelijk. Daarnaast is het wenselijk te beschikken over een kaart van de

grondwaterafhankelijkheid, waardoor prioritering mbt verdere uitwerking in deelgebieden mogelijk wordt.

#### **1.4 Projectresultaat**

Het resultaat van het project wordt vastgelegd in een rapport. In het rapport wordt de werkwijze en het resultaat van de projectfasen vastgelegd. Naast het rapport komen kaartbeelden en een database mbt peilbuisinformatie beschikbaar. Deze kaartbeelden geven inzicht in de bruikbaarheid van de beschikbare grondwaterstandsgegevens teneinde de actuele grondwatersituatie te kunnen karteren. Daarnaast zijn deze kaarten bruikbaar bij het opstellen van prioriteiten mbt een grondwaterkartering.

#### **1.5 Raakvlakken en afbakening**

Binnen het project wordt een start gemaakt met een kartering van de grondwatersituatie binnen VHR en EHS gebieden. Hierbij wordt in eerste instantie gekeken naar de beschikbaarheid, bruikbaarheid en wenselijkheid van meetgegevens. Gezien de projectomvang zal het daadwerkelijk in kaart brengen van de actuele grondwatersituatie binnen dit project niet kunnen worden uitgevoerd. Alleen voor de geselecteerde pilotgebieden wordt de actuele grondwatersituatie zonder aanvullend veldwerk in kaart gebracht. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de peilbuisinformatie die beschikbaar is in DINO. Indien de beschikbare peilbuisinformatie ontoereikend is voor het vervaardigen van een vlakdekkende kaart wordt dit onderdeel niet uitgevoerd. Indien deze laatste situatie zich voordoet zal in het kader van dit project vooral worden ingegaan op de gewenste gegevensverzameling teneinde wel vlakdekkende kaarten te kunnen vervaardigen.

#### **1.6 Effect / Toepassingsmogelijkheden voor WOT Natuur & Milieu**

Het project geeft inzicht in de mogelijkheden voor een kartering van de actuele grondwatersituatie in VHR en EHS gebieden en geeft derhalve inzicht in mogelijkheden voor een landsdekkende kartering. Indien nodig kan op basis van de resultaten van dit project een prioritering worden opgesteld voor het verkrijgen van de actuele gegevens/ verdere aanvulling van de kaart van de actuele grondwatersituatie.

#### **Literatuur**

- Bolt van der F., R. van den Bosch, T. Brock, P. Hellegers, C. Kwakernaak, D. Leenders, O. Schoumans en P. Verdonschot, 2003. Aquarein. Gevolgen van de Europese Kaderrichtlijn Water voor landbouw, natuur, recreatie en visserij. Wageningen, Alterra-rapport 835.
- Gaast J.W.J. van der, H.Th.L. Massop, J.van Os, L.C.P.M. Stuyt, P.J.t. van Bakel en C. Kwakernaak, 2002. Waterkansen in het SGR2. Potenties voor realisatie van de wateropgaven. Wageningen, Alterra-rapport 558.
- Gaast J.W.J., P.J.T. van Bakel en H.Th.L. Massop, 2003. Waterkansen in het SGR2. Evaluatie van de wateropgaven in relatie tot de netto-EHS. Wageningen, Alterra-rapport 558.1.
- Gaast J.W.J. en H.Th.L. Massop, 2003. Spreidingslengte voor het beheersgebied van Waterschap Veluwe. Een maat voor het bufferzonebeleid. Wageningen, Alterra-rapport 653.
- Gaast J.W.J van der., H.Th. L. Massop en G.B.M Heuvelink, 2005. Monitoring verdroging. Methodische aspecten van meetnetoptimalisatie. Wageningen, Alterra-rapport 1102.

## 2 Activiteitenplan

### 2.1 Werkwijze

Het onderzoek wordt opgedeeld in drie fasen. In de eerste fase wordt een kaart gegenereerd met de VHR en EHS gebieden. Vervolgens wordt binnen deze gebieden gekeken naar de beschikbaarheid van peilbuizen en grondwaterinformatie. De tweede fase bestaat uit het vervaardigen van een kaart waarin voor de VHR en EHS gebieden de grondwaterafhankelijkheid van vegetatie wordt bepaald. Deze kaart kan gebruikt worden om een prioritering aan te brengen bij een grondwaterstandskartering. In de derde fase van het project wordt voor een nader te bepalen pilotgebied ingegaan op de beschikbare peilbuisinformatie. Voor het pilotgebied wordt een screening van de beschikbare peilbuizen uitgevoerd.

### 2.2 Fasering

Het project wordt onderverdeeld in de volgende fasen

- Fase
1. Genereren basiskaart VHR en EHS gebieden en ligging peilbuizen en gegevens
  2. Prioritering van gebieden op basis van grondwaterafhankelijkheid.
  3. Screening van buisgegevens voor een nader te bepalen testgebied

#### Fase 1

In fase 1 wordt een basiskaart opgezet. Het gebied wordt bepaald aan de hand van de ligging van de VHR en EHS gebieden. Deze kaart is beschikbaar. Vervolgens wordt voor deze gebieden een kaart gemaakt met de ligging van peilbuizen die opgenomen zijn in DINO (OLGA en OLSA-SUN). In eerste instantie gaat het hierbij om informatie over de locatie, opnamefrequentie, lengte opnameperiode, filterdiepten en materiaal waarin de buizen zijn geplaatst. Eventueel ontbrekende peilbuislocaties van bijvoorbeeld de provinciale landschappen worden voorsnog niet geïnventariseerd. Hiervoor is het nuttig om eerst inzicht te hebben in de ligging van grondwaterafhankelijke natuur.

#### Fase 2

In fase 2 wordt een kaart gemaakt met profieltypen, waarmee aangegeven wordt in hoeverre er sprake is van hangwater, grondwater danwel contact profielen. Deze kaart is in een eerdere studie door Van der Gaast e.a. 2005 opgesteld. Het betreft een landsdekkende kaart die afhankelijk is van o.a. Gt informatie. Voor gebieden (bv stedelijk gebied en uiterwaarden) waar deze informatie ontbreekt kan de grondwaterafhankelijkheid niet worden bepaald. Alvorens deze kaart binnen dit project te gebruiken voor het prioriteren van de gebiedskeuze bij de uitvoering van de actualisatie van Gt-gegevens, wordt er binnen dit project een verbeteringslag uitgevoerd. Mede op basis van deze kaart kan een keuze worden gemaakt voor proefgebieden.

#### Fase 3

In fase 3 wordt voor een nader te bepalen gebied, mede gebaseerd op de profieltypen kaart, een screening van de beschikbare buisgegevens uitgevoerd. Het gaat hierbij bij voorkeur om een natuurgebied waar ook een recente detailkartering of verdrogingskartering (van Delft, 2002) beschikbaar is. Hierdoor is het mogelijk om te onderzoeken in hoeverre er sprake is van een discrepantie tussen peilbuisinformatie en informatie die gemeten zou worden indien boorgaten zouden zijn geplaatst. Daarnaast wordt de selectie van buizen uitgevoerd op basis van vuistregels (o.a. Alterra, KIWA) die de representativiteit van grondwaterstandsgegevens aangeven.



## Bijlage 2 Begrippenkader

### De in dit rapport gebruikte afkortingen en begrippen worden hier kort toegelicht.

*Detailkartering* is een kartering van de bodem en de grondwatertrap op een gedetailleerde schaal (meestal schaal 1 : 5 000, 10 000 of 25 000). De waarnemingsdichtheid varieert hierbij van ca. 2 beschreven boringen per ha (schaal 1 : 5 000) tot ca. 1 beschreven boring per 4 à 5 ha (schaal 1 : 25 000). Detailkarteringen geven gedetailleerdere informatie over de bodemgesteldheid dan de bodem- en Gt-kaart schaal 1 : 50 000. Ook wordt er dieper geboord (variërend van 1,50 tot maximaal 3,20 m-mv.). De schattingen van de GxG's worden meestal onderbouwd door 2 gerichte opnames van de freatische grondwaterstand in een groot aantal boorgaten en representatieve stambuizen ten tijde van het GHG en GLG moment. Indien gewenst wordt het meetnet van stambuizen verdicht met tijdelijke buizen. Hierdoor is het mogelijk gerichte opnames te relateren aan nabijgelegen buizen in dezelfde geohydrologische eenheid.

*Gewenst Grond- en Oppervlaktewater Regime (GGOR)* is de methode waarbij bepaald wordt welk grond- en oppervlaktewaterpeil het meest optimaal is voor de functies die aan een gebied zijn toegekend.

*Grondwaterstand* De hoogte van een punt waar het grondwater een drukhoogte gelijk nul heeft (de absolute waterdruk is dan gelijk aan de druk van de atmosfeer) t.o.v. een referentieniveau. Hiermee is de grondwaterstand de stijghoogte van het freatische grondwater ten opzichte van het maaiveld, gemeten in een boorgat of een peilbuis met een ondiep filter (in het algemeen minder dan 2,5 meter beneden maaiveld).

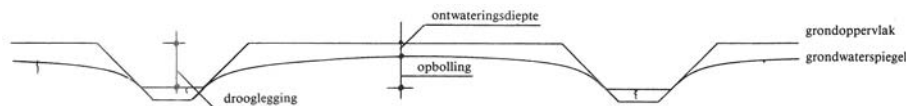
*Grondwaterstandsbuis* is een peilbuis met een betrekkelijk kort filter waarvan de onderkant zich op korte afstand onder de grondwaterspiegel bevindt zodat de gemeten stijghoogte weinig van de grondwaterstand afwijkt.

*Grondwaterspiegel* Het vlak door de punten waar het grondwater een drukhoogte gelijk nul heeft.

*Grondwaterregimecurve* is de gemiddelde tijd-stijghoogtelijn die men kan beschouwen als de curve die het verloop weergeeft van de grondwaterstand in een jaar met gemiddelde weersomstandigheden, oftewel een gemiddeld hydrologisch jaar.

*Daggemiddelde regimecurve* is een curve die aangeeft wat de verwachte waarde is voor een bepaalde datum in enig toekomstig jaar onder de huidige klimaatscondities. De curve wordt verkregen door het middelen van dagstanden van een bepaalde hydrologische variabele over verschillende jaren.

*Drooglegging* is het hoogteverschil tussen de waterspiegel in een waterloop en het grondoppervlak (figuur B1.1);



Figuur B1.1 Situatieschets voor de begrippen drooglegging, ontwateringsdiepte en opbolling

*Duurlijn* is een curve die aangeeft welke totale tijdsduur binnen het jaar een bepaalde niveau van een bepaalde variabele wordt overschreden.

*HG3* en *LG3* zijn de gemiddelde van de drie hoogste respectievelijk de drie laagste grondwaterstanden die in een hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart) worden gemeten, uitgaande van een halfmaandelijke meetfrequentie.

*VG3* is de gemiddelde grondwaterstand voor de meetdata 14 maart, 28 maart en 14 april in een bepaald kalenderjaar.

*GHG* (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand) is gedefinieerd als de top van de grondwaterregimecurve, welke doorgaans wordt berekend op basis van het gemiddelde van de *HG3*, voor een hydrologisch jaar, over een aaneengesloten periode van tenminste acht hydrologische jaren waarin geen waterhuishoudkundige ingrepen hebben plaatsgevonden.

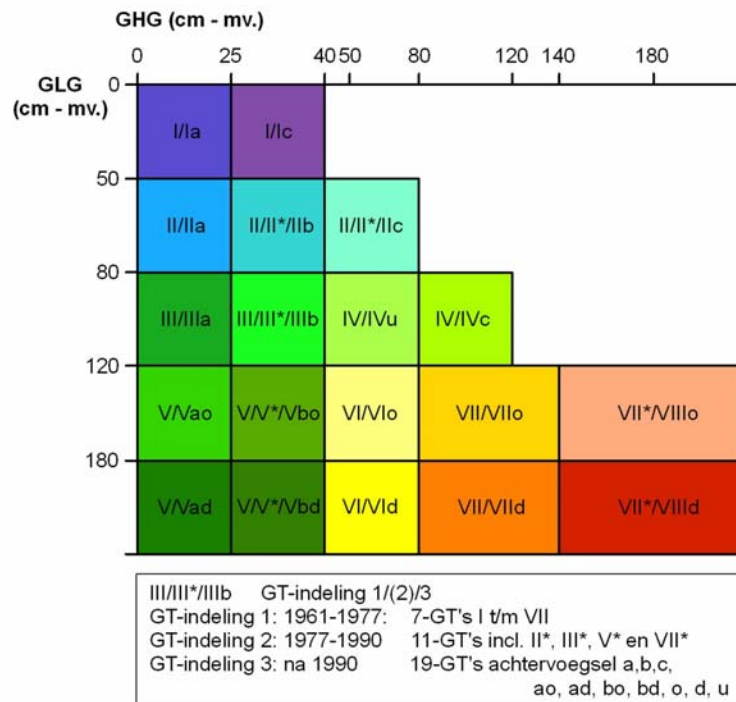
*GLG* (Gemiddeld Laagste Grondwaterstand) is gedefinieerd als het dal van de grondwaterregimecurve, die doorgaans wordt berekend op basis van het gemiddelde van de *LG3*, voor een hydrologisch

jaar, over een aaneengesloten periode van tenminste acht hydrologische jaren waarin geen waterhuishoudkundige ingrepen hebben plaatsgevonden.

*GVG* (Gemiddelde Voorjaars Grondwaterstand) is gedefinieerd als de grondwaterstand op 1 april, die doorgaans wordt berekend op basis van het gemiddelde van de *VG3* over een aaneengesloten periode van tenminste acht hydrologische jaren waarin geen waterhuishoudkundige ingrepen hebben plaatsgevonden.

*GxG* staat voor de begrippen GHG, GVG en GLG tezamen.

*Gt* (Grondwatertrap) is een typische combinatie van GHG- en GLG-klassen die op onderstaande wijze is onderverdeeld (figuur B1.2).



(2) De niet veranderde benaming is niet weergegeven

Figuur B1.2 Gt-indeling op basis van de GHG (cm) en GLG (cm)

*Kwel* is het uittreden van grondwater onder invloed van grotere stijghoogten buiten het beschouwde gebied; het uittreden van water, dat binnen het gebied aan het oppervlak is toegevoerd valt dus buiten deze term. Het uittreden kan ondermeer geschieden direct aan het oppervlak, in sloten, drains, of via capillaire opstijging (Commissie voor Hydrologisch Onderzoek, 1986).

*Ontwateringsdiepte* is de afstand tussen het grondoppervlak en de hoogste grondwaterstand tussen de ontwateringsmiddelen (zie figuur B1.2).

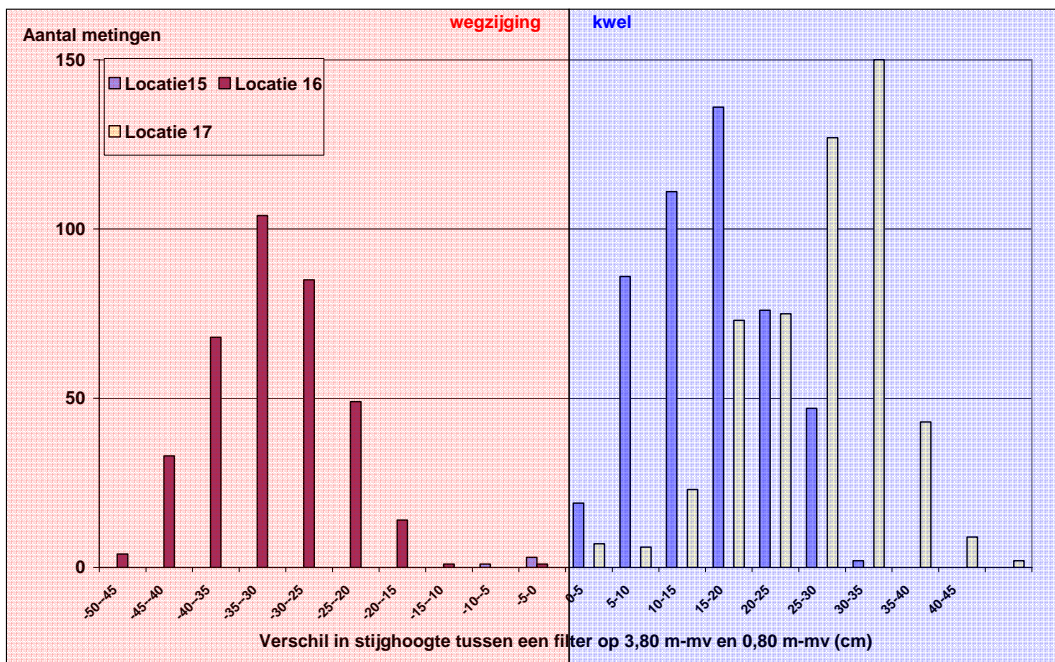
*Stijghoogte* is de som van drukhoogte en plaatshoogte welke in de verzadigde zone kan worden gemeten met een piëzometer waarvan de hoogte t.o.v. een referentievlak bekend is. Het resultaat heeft betrekking op de plaats waar het filter is gesteld.

*Numerieke verdroging* is een onjuiste inschatting (meestal te droog) van de freatische grondwaterstand als gevolg van verkeerde meet- en/of rekentechnieken die direct of indirect als gevolg van numerieke methoden zijn geïntroduceerd.

*Wegzijing* is de neerwaartse stroming van grondwater (Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, 1986).

## Bijlage 3 Voorbeelden van gemeten stijghoogteverschillen uit het verleden

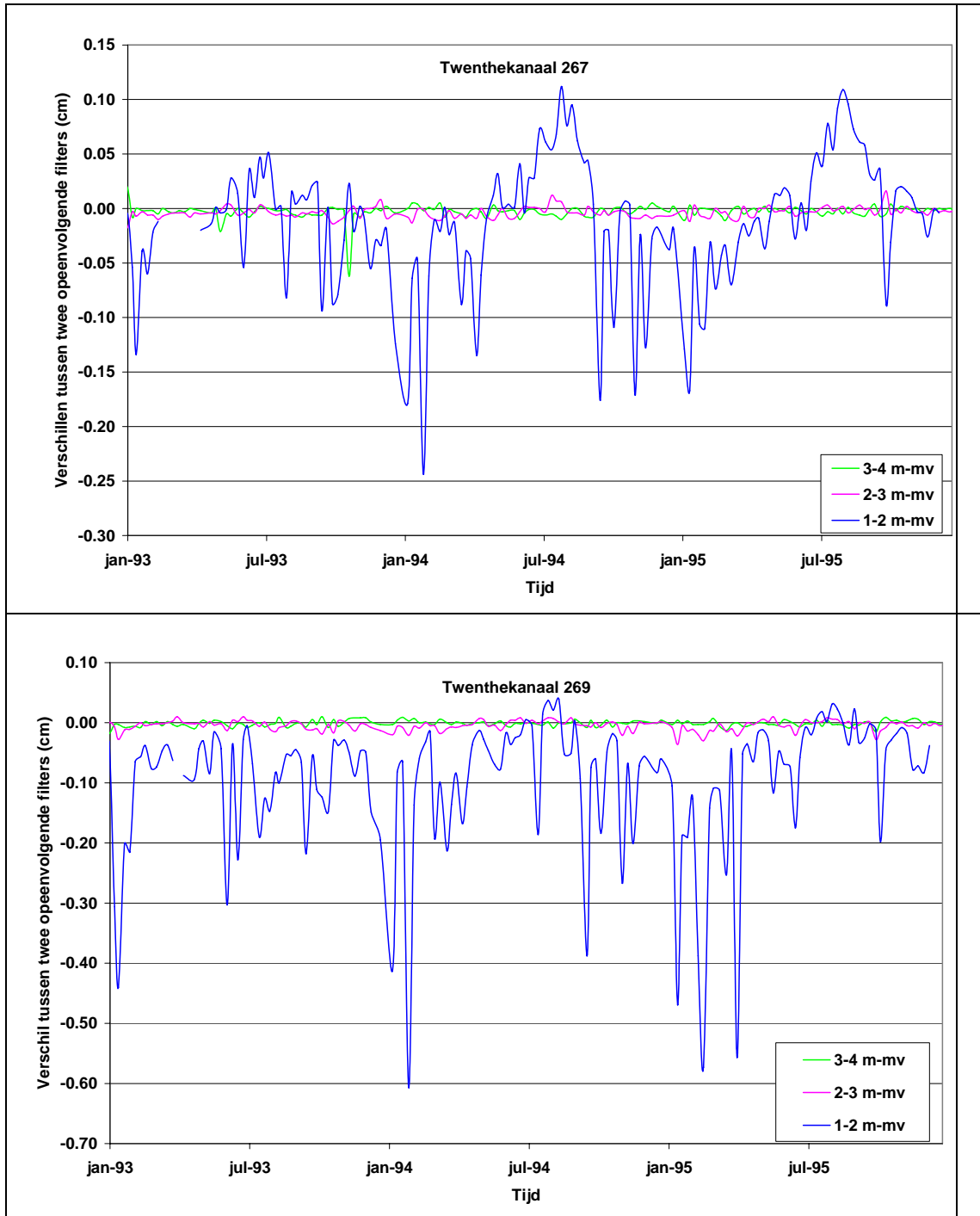
Nabij het Twenthekanaal is in het kader van onderzoek naar de ruimtelijke beïnvloeding van het kanaal sinds 1983 op een groot aantal locaties grondwaterstanden gemeten (Wit *et al.*, 1991). Op een aantal locaties zijn in het dekzandpakket filters op verschillende diepten geplaatst. In figuur B3.1 zijn de gemeten stijghoogteverschillen in de vorm van een frequentieverdeling voor enkele locaties weergegeven. De metingen zijn uitgevoerd in de periode 1983 – 1997. Het stijghoogteverschil heeft betrekking op metingen in piëzometers met een filterlengte van 20 cm en een filterdiepte van 0,8 en 3,8 meter (voor locatie 15 2,8 meter). In de figuur is duidelijk te zien dat er in een groot aantal situaties grote stijghoogteverschillen aanwezig zijn. De stijghoogteverschillen zijn voor twee locaties overwegend positief, hetgeen duidt op kwel en voor één locatie negatief (wegzijing). Ook deze meer recente metingen geven aan dat er in een dekzandpakket stijghoogteverschillen relatief hoog in het bodemprofiel voor kunnen komen als gevolg van een verticale flux.



Figuur B3.1 Frequentieverdeling van potentiaalverschillen tussen 0,8 m en 2,8 of 3,8 m -mv buizen in dekzand, nabij het Twenthekanaal.

In figuur B3.2 is het potentiaalverschil tussen twee opeenvolgende peilfilters met een onderlinge verticale afstand van één meter weergegeven. Uit de figuur komt naar voren dat het stijghoogteverschil vooral optreedt in de bovenste twee filters (tussen 1 en 2 m). Dit geeft aan dat de weerstand relatief hoog in het bodemprofiel zit en voor deze situatie vooral bodemkundig bepaald is. Gedurende de pedogenese vinden er o.a. door de waterbeweging allerlei processen plaats, waardoor hoog in het profiel verschillen in doorlatendheid kunnen ontstaan. Mede hierdoor kunnen de gemeten verschillen in de potentiaal worden verklaard. Naast het niveau waarop de meeste weerstand aanwezig is, geeft figuur B3.2 ook de fluctuatie weer. Deze fluctuatie van het potentiaalverschil in de tijd lijkt te zijn gekoppeld aan

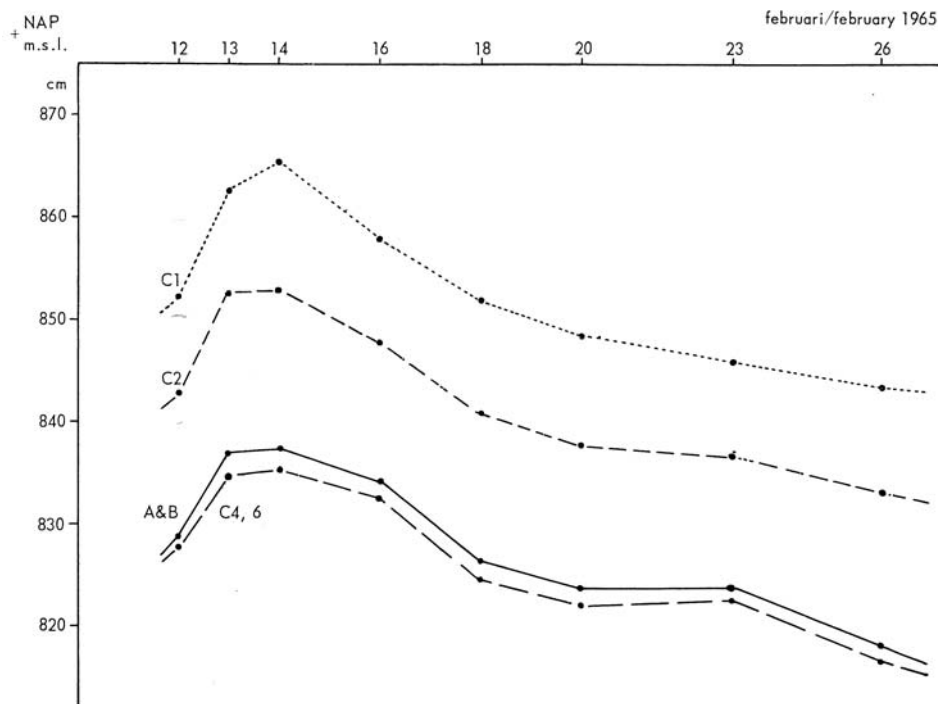
de seizoenen. In de winterperiode is het gemeten stijghoogteverschil relatief hoog. Deze seizoensfluctuatie kan verklaard worden uit de flux door het grondwatervlak, welke zoals eerder aangegeven gedurende natte periode relatief hoog is (GHF). In droge perioden is het zelfs mogelijk dat het stijghoogteverschil onder invloed van kwel vanuit het Twenthekanaal tegengesteld is.



Figuur B3.2 Potentiaalverschil tussen twee opeenvolgende peilfilters met een onderlinge verticale afstand van één meter nabij het Twenthekanaal.

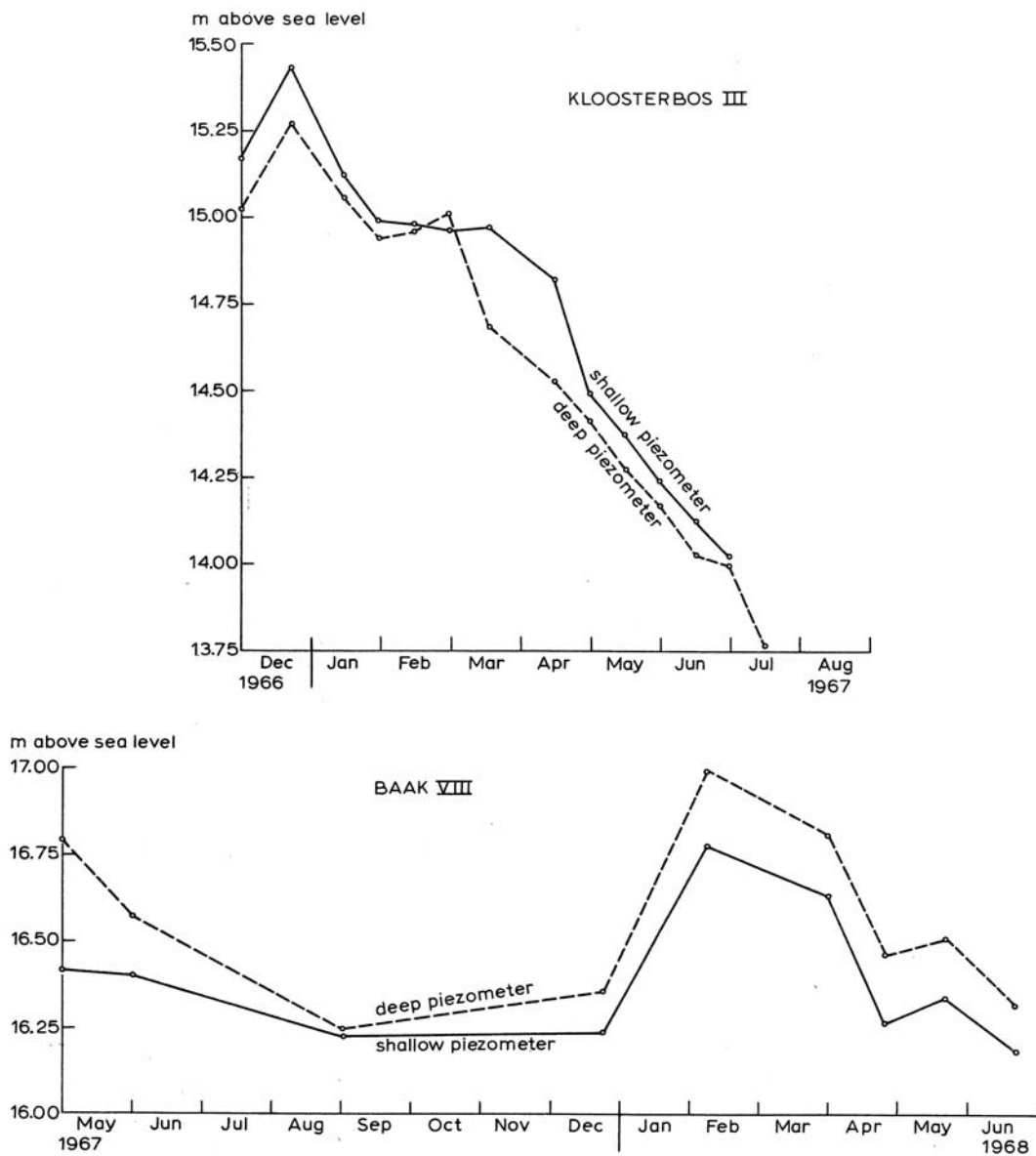


Voor een onderzoek naar gleygronden in het dekzandgebied van Salland is onderzoek gedaan naar het voorkomen van verticale grondwaterstroming (Knibbe, 1969). Hierbij is gebruik gemaakt van een aantal meetopstellingen met paarsgewijs geplaatste peilfilters op verschillende diepte (figuur B3.3). Op basis van deze metingen is gebleken dat stijghoogteverschillen voornamelijk voorkomen in de humuspodzolen in de dekzandrug en in veel mindere mate een rol spelen in de gleygronden in de beekdalen (Knibbe, 1969).



Figuur B3.3 Tijdstijghoogteverloop in enkele potentiaalbuizen in het proefgebied Vloedgraven. C1 humuspodzol, filter op 1 m diepte; C2 humuspodzol, filter op 2 m diepte; C4, 6 humuspodzol, filters op 4 en 6 m diepte; A & B gleygronden, filters op 1, 2, 4 en 6 m diepte.

In een geologische studie voor Oost Gelderland zijn de verschillen in stijghoogte tussen diep en ondiep grondwater bekeken (Ernst *et al.*, 1970). Binnen het onderzoek waren 58 locaties beschikbaar met een diep filter in het watervoerende pakket en een filter in de zone waarin de freatische grondwaterstand fluctueert. In figuur B3.4 zijn voorbeelden van het grondwaterstandsverloop voor een wegzijgings en een kwelgebied weergegeven.



*Figuur B3.4 Tijd stijghoogtelijnen van dubbele piëzometers in een wegzijgingsgebied (Kloosterbos III) en een kwelgebied (Baak VIII) waaruit het stijghoogteverschil tussen het ondiepe en diepe grondwater zichtbaar is.*

## Bijlage 4 Grondwaterbeschikbaarheid

De grondwaterstandsituatie bepaalt voor een belangrijk deel de waterbeschikbaarheid voor de natuur. De vegetatie beschikt aan het begin van het groeiseizoen over een vochtvoorraad in de wortelzone. Wanneer deze voorraad in de loop van het groeiseizoen als gevolg van het verdampingsoverschot niet meer toereikend is om de vegetatie van voldoende vocht te voorzien kan deze gedurende het groeiseizoen al dan niet door capillaire nalevering vanuit het grondwater worden aangevuld. Deze aanvulling kan een gedeelte of het gehele groeiseizoen betreffen. Voorts is het ook mogelijk dat de vegetatie, als gevolg van diepe grondwaterstanden en/of zeer slechte capillaire eigenschappen van de ondergrond, geen gebruik kan maken van capillaire nalevering. Allereerst wordt ingegaan op het vochtleverend vermogen en het vochttekort in een 10%-droog jaar. Vervolgens wordt de vochtvoorraad in de wortelzone in kaart gebracht en daarna de bijdrage vanuit het grondwater, de zogenaamde capillaire nalevering. Door gebruik te maken van deze aspecten is het mogelijk om Nederland in te delen in profieltypen die de grondwaterafhankelijkheid aangeven. De vastgestelde grondwaterafhankelijkheid geeft informatie over de mogelijke beïnvloeding en gevoeligheid van de natuur voor veranderingen in de grondwaterstand en kan daarom worden gebruikt voor prioritering ingeval van kartering en monitoring (zie ook Van der Gaast *et al.*, 2005). Aangezien de grondwaterafhankelijkheid fysische informatie betreft worden landsdekkende kaarten gegenereerd

### ***Vochtleverend vermogen van de bodem***

Het vochtleverend vermogen van de grond wordt door Van Soesbergen *et al.* (1986) gedefinieerd als de hoeveelheid vocht die in een groeiseizoen van 150 dagen (1 april tot 1 september) en in een droog jaar (zgn. 10% droog jaar) aan de plantenwortel kan worden geleverd. Een droog jaar is een jaar, waarvan we aannemen dat de potentiële verdamping tijdens het groeiseizoen de neerslag met 200 mm overtreft (zie tabel B4.1). Deze situatie doet zich statistisch eens in de 10 jaar voor. De hiervoor benodigde gegevens zijn ontleend aan het KNMI-station De Bilt en gelden voor een fictief gewas (bij benadering gras). In de volgende paragraaf wordt het neerslagtekort in het groeiseizoen nader gekwantificeerd.

*Tabel B4.1 Gemiddeld neerslagtekort (mm) vanaf 1 april in een groeiseizoen van 150 dagen in een 10% droog jaar (Buisband, 1982).*

<b>Periode</b>	<b>Neerslagtekort (mm)</b>
1 april — 1 mei	20
1 april — 1 juni	65
1 april — 1 juli	115
1 april — 1 augustus	165
1 april — 1 september	200

Het neerslagtekort bepaalt de vraag. Het vochtleverend vermogen van de grond is bepalend voor het aanbod en is afhankelijk van:

- de aard en opbouw van het bodemprofiel, belangrijk zijn vooral de dikte en het vochthoudend vermogen van de wortelzone en het capillair geleidingsvermogen van de ondergrond (kritieke z-afstand);
- het grondwaterstandsverloop; hiervan zijn vooral de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) in een 10% droog jaar (LG3) van belang.

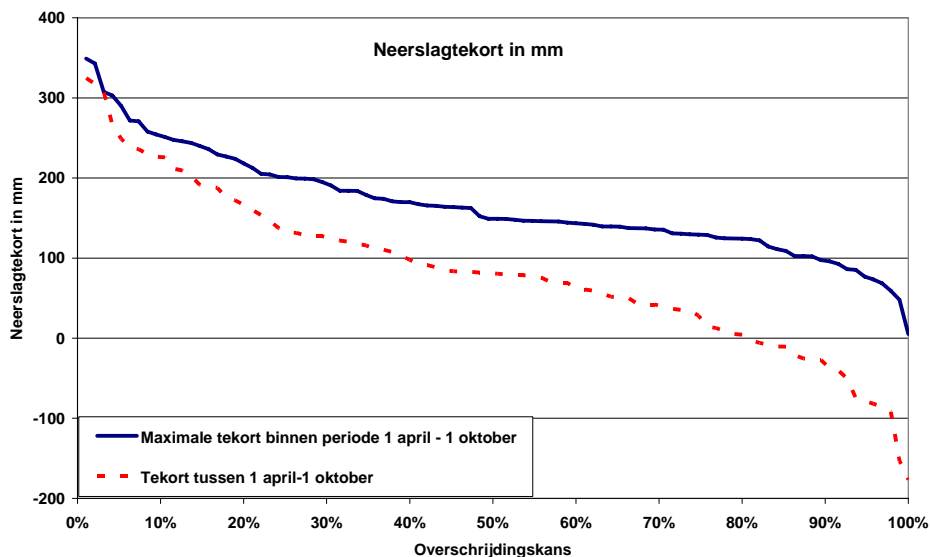
Een veel gebruikte term om de capillaire eigenschappen van bodemprofielen te karakteriseren is de zogenaamde kritieke z-afstand ( $z_k$ ); ook wel kritieke stijgafstand genoemd. Hieronder wordt verstaan de maximale afstand waarover nog een voor het gewas voldoende capillaire aanvoer naar de wortelzone kan worden gerealiseerd. Overschrijding van de kritieke z-afstand leidt tot (blijvende) verdrogingsverschijnselen van het gewas. Bij vochtleverantieberekeningen wordt de kritieke z-afstand meestal gelijk gesteld aan de afstand waarover bij een drukhoogte van -16 000 cm (pF 4.2, verwelkingspunt) een capillaire flux van 2 mm/d kan worden gerealiseerd. Uit diverse berekeningen blijkt dat indien de afstand tussen het niveau van de GLG en de onderzijde van de effectieve wortelzone geringer is dan de kritieke z-afstand, het langjarig gemiddelde vochttekort van grasland beperkt blijft tot max. 2 % (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988).

### **Neerslagtekort groeiseizoen**

Om het neerslagtekort over het groeiseizoen te bepalen zijn in het verleden verschillende methoden gehanteerd, nl:

- Veelal wordt het neerslagtekort in het groeiseizoen bepaald op basis van het cumulatieve neerslagtekort over de periode 1 april en 1 oktober (Cultuurtechnische Vereniging, 2000). Deze periode wijkt af van de definitie van Van Soesbergen (1986), hij gebruikt de periode 1 april – 1 september.
- Binnen deze periode kan echter een kortere periode voorkomen waarvoor het neerslagtekort groter is. Door Huinink (Cultuurtechnische Vereniging, 2000) is het maximale tekort binnen het groeiseizoen als maat genomen voor het vochttekort.

Om het vochttekort te karakteriseren is voor beide methoden het neerslagtekort in een 10%-droog jaar op basis van een lange meteoreeks (95 jaar) geanalyseerd. In figuur B4.1 is de overschrijdingskans voor het vochttekort volgens beide benaderingen grafisch weergegeven. Uit deze grafiek zijn vervolgens voor De Bilt waarden voor het neerslagtekort afgeleid. Deze waarden zijn weergegeven in tabel B4.2.



*Figuur B4.1 Overschrijdingskans van de neerslagtekort voor de periode 1 april – 1 oktober volgens twee methoden*

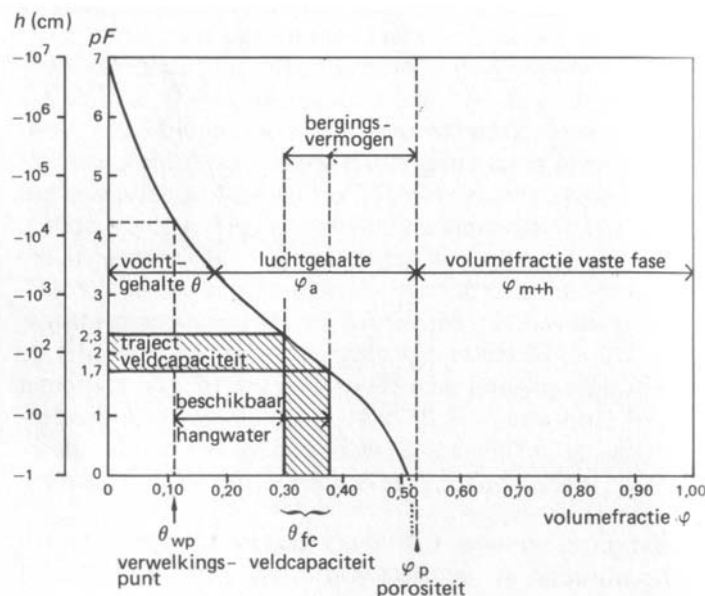
Tabel B4.2 Overschrijdingskans van het neerslagtekort tussen begin en eind van de periode 1 april – 1 oktober alsmede het maximale tekort over deze periode

Overschrijdingskans	Neerslagtekort (mm)		
	Maximaal	1 april - 1 oktober	Verschil
10%	252	226	26
30%	192	126	66
50%	149	81	68
70%	135	41	94
90%	97	-32	129

Voor een 10-% droogjaar bedraagt het maximale vochttekort op basis van de meteogegevens voor De Bilt 252 mm. Huinink (Cultuurtechnische Vereniging, 2000) vindt voor Twenthe op basis van de meetreeks 1965-1995, voor een gemiddeld jaar een neerslagtekort van 120 mm en voor een 10 %-droog jaar een tekort van 240 mm. Voor De Bilt liggen deze waarden resp. 29 en 12 mm hoger, mogelijk is een deel van het verschil te verklaren uit het gebruik van dagcijfers voor De Bilt en decadicijfers voor Twenthe. Het maximale vochttekort is altijd groter dan het verschil over het groeiseizoen. Naarmate de overschrijdingskans afneemt wordt het verschil kleiner, hetgeen ook tot uiting komt in figuur B4.1.

### Beschikbare vochtvoorraad wortelzone

De volumefractie beschikbaar water in de effectieve wortelzone is uit de vocht karakteristiek (pF-curve) (figuur B4.2) van deze wortelzone af te leiden. We nemen aan dat de hoeveelheid beschikbaar vocht in de effectieve wortelzone gelijk is aan het verschil tussen de volumefractie aan het begin van het groeiseizoen en die bij het verwelkingspunt (drukhoogte  $h = -16\ 000\text{ cm}$  (pF4.2)). Aan het begin van het groeiseizoen correspondeert de volumefractie water met de drukhoogte, die, afgezien van het teken, gelijk genomen wordt aan de afstand van de grondwaterspiegel tot het midden van de effectieve wortelzone. De aldus bepaalde drukhoogte kan te klein zijn (denk aan min teken), dus te droog, voor de situatie met wat diepere grondwaterstanden. Voor die gevallen moet een correctie worden aangebracht die samenhangt met de aard van het bodemmateriaal en de capillaire eigenschappen van de ondergrond.



Figuur B4.2 Schematische weergave van een bodemvocht karakteristiek (pF-curve) en een aantal kenmerkende termen en waarden (naar: Locher en de Bakker, 1987)

Om de beschikbare vochtvoorraad in de effectieve wortelzone te bepalen, zijn de volgende factoren van belang:

- effectieve bewortelingsdiepte op basis van bodem (21 eenheden) en landgebruik;
- de drukhoogte in de effectieve wortelzone aan het begin van het groeiseizoen (GVG, afhankelijk van de aard en samenstelling van de effectieve wortelzone en de ondergrond zoals doorlaatfactor en opdrachtheid).

Alvorens nader in te gaan op de bewortelingsdiepte wordt eerst aandacht besteed aan de dikte van de wortelzone voor verschillende typen natuurlijke vegetatie.

### ***Dikte van de wortelzone voor natuurlijke vegetaties***

De effectieve wortelzone is de grondlaag waarin de levende wortels aanwezig zijn, meestal wordt dit beschouwd als de laag waarin het overgrote deel (ca. 90 %) van de werkzame (haar-) wortels zich bevindt (Rijtema, 1971). De diepte van deze zone is in eerste instantie genetisch bepaald. Daarnaast hangt de diepte van beworteling ook af van andere factoren zoals lucht, water, voedingsstoffen, indringingsweerstand van de bodem en warmte (Jansen, 1986).

Bij grasachtige plantensoorten blijkt er een zekere samenhang van de worteldiepte met de groeiplaats. Aangezien er van de plantensoorten in (half-) natuurlijke vegetaties nog niet zo veel bekend is over de dikte van de wortelzone zal aan de hand van vegetatiegroepen globaal de worteldiepte per groep worden vermeld. Voor kruidachtige vegetaties vormen de diktes van de wortelzone van een aantal soorten grassen, russen en cypresgrassen het uitgangspunt. Van de grasachtige plantensoorten kan voor de diepte van de wortelzone globaal een vierdeling worden aangehouden. Veel soorten die in natte schrale graslanden worden aangetroffen, zoals Kamgras, Reukgras, Trekrus, gewone Veldbies en Blauwe zegge, hebben een wortelzone die niet dieper is dan 20 cm. Daarnaast komt onder dezelfde groeiplaatsomstandigheden ook een vegetatiegroep voor die een wortelzone heeft van ca. 30 cm. Enkele kernsoorten uit deze groep zijn Rood Zwenkgras, Bevertjes, Gewoon struisgras, Eenaarig wollegras en Gewone Zegge. Veel soorten die vaak in cultuurgraslanden worden aangetroffen vormen de derde groep. Deze plantensoorten hebben in het algemeen een wortelzone met een dikte van ca. 50 cm. Enkele soorten uit deze groep zijn Italiaans raaigras, Kweek, Echte witbol en Ruige zegge. De laatste groep zijn de soorten die diep kunnen wortelen. De wortelzone van deze groep heeft een dikte van ca. 80 cm. Enkele soorten uit deze groep zijn Zachte dravik, Ruwe Smele en Liesgras.

Naast grasachtige vegetaties komen er in Nederland ook heidevelden voor met half- natuurlijke vegetatietypen. Onder natte groeiplaatsomstandigheden, waarin vooral de dopheide domineert bedraagt de wortelzone ca. 25 cm, terwijl onder drogere groeiplaatsomstandigheden vooral de stuikheide domineert. Deze heeft een wortelzone van ca. 40 cm.

Van stuiken is onvoldoende informatie aanwezig over de dikte van de wortelzone, terwijl de bomen globaal worden ingedeeld in ondiep, middeldiep en diep wortelende soorten. De ondiep wortelende soorten hebben een wortelzone met een dikte van minder dan 60 cm. Enkele soorten uit deze groep zijn de Spar en Lijsterbes. De middeldiep wortelende boomsoorten, zoals de Lariks, Ruwe Berk en de Grauwe Els hebben een wortelzone tussen de 60 en 120 cm. De laatste groep, zoals de Zomereik, Ratelpopulier en de Grove den hebben een wortelzone met een dikte die meer is dan 120 cm.

Voor het vaststellen van het vochtleverend vermogen van een grond is de dikte van de wortelzone een belangrijke parameter. Zoals vermeld in de vorige alinea's blijkt, dat er veel verschillen zijn in dikten van de wortelzones tussen de diverse vegetatiegroepen. Daarnaast hangt de dikte van de wortelzone ook af van factoren die de beworteling negatief beïnvloeden. De belangrijkste factoren zijn indringingsweerstand, aëratie en zuurgraad (Houben 1979; Van

Soesbergen *et al.*, 1986). Al deze factoren houden verband met de bodemgesteldheid. Om de grote variatie in bodemtypen te beperken en omdat de bodemfysische kenmerken van de bodem van groot belang zijn voor het vochtleverend vermogen is voor deze studie aangesloten bij de bodemfysische classificatie van de Bodemkaart 1 : 250.000 in 21 bodemeenheden voor de PAWN-studie (Wosten *et al.*, 1988). Er is tevens een relatie gelegd tussen de eenheden van de bodemkaart 1 : 50 000 en deze 21 bodemeenheden, zodat uiteindelijk gebruik is gemaakt van de bodemkaart 1 : 50 000. Voorts is vanuit bodemkundig oogpunt nagegaan wat de bewortelingsmogelijkheden zijn voor half natuurlijke vegetaties voor deze 21 geschematiseerde profieltypen (bodemeenheden, zie tabel 4.3). Het is binnen deze bodemeenheden niet mogelijk om gedetailleerde uitspraken te doen over de bewortelingsmogelijkheden voor half-natuurlijke vegetaties, omdat in elk onderscheiden Bodemeenheid een aanzienlijke variatie in bodemtypen voorkomt. De schematisatie van bodemtypen in bodemeenheden is namelijk geschied uit het oogpunt van bodemfysische verwantschap. Dit heeft echter tot gevolg, dat de diktes van de wortelzones voor de diverse gewassen binnen een bodemeenheid aanzienlijk kunnen variëren.

Op zandgronden en brikgronden is de indringingsweerstand de voornaamste beperkende factor voor beworteling. De kritische grens voor beworteling ligt bij een indringingsweerstand van 2,5 á 3,0 MPa. Indien een stelsel van voldoende grote verticale poriën aanwezig is, verschuift de kritische grens naar hogere waarden; voor veel zandgronden ligt deze tussen 3 en 5 MPa. Hierbij wordt uitgegaan van een gemeten indringingsweerstand met een penetrometer met een conus van 1 cm<sup>2</sup> (oppervlakte van het grondvlak) en een tophoek van 60°. Een wortel kan weliswaar geen hogere druk uitoefenen dan ongeveer 1 MPa, maar de conus van de penetrometer is veel groter en ondervindt dus een hogere weerstand dan de wortel (Locher en De Bakker, 1987). Dit duidt tevens op een beperking van de penetrometermethode. De wortel kan gemakkelijk in poriën dringen waar de conus van de penetrometer niet in past. Als er een stelsel van verticale poriën aanwezig is die voldoende groot zijn voor wortelgroei, kan een met de penetrometer gevonden hoge weerstand misleidend zijn (Locher en de Bakker, 1987).

In de praktijk blijkt dat de minerale ondergrond van bovengenoemde gronden meestal een dichte pakking heeft (tabel B4.3, Bodemeenheid 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 19, 20 en 21). Berucht zijn zelfs de plaatgronden in Zeeland (Bodemeenheid 19 en 20). Als gevolg van de aanwezigheid van een zandhorizont net beneden de bouwvoor verdrogen de plantensoorten op deze gronden, mede als gevolg van hun hoge ligging, snel. De begindiepte van deze ondergrond is dan tevens de grens voor de beworteling van de meeste plantensoorten. Bij podzolgronden (tabel B4.3 Bodemeenheid 8, 9, 10, 11 en 14) is de humusinspoelingslaag veelal nog wel bewortelbaar (vooral kruidachtige gewassen en in mindere mate voor grassen) terwijl deze laag bij de haarpodzolgronden meestal verkit is en daardoor in het algemeen niet bewortelbaar is voor kruid- en grasachtige plantensoorten. Binnen de zandgronden hebben de enkeerdgronden (Bodemeenheid 12) de gunstigste bewortelingsmogelijkheden. Deze gronden zijn ontstaan, als gevolg van potstalbemesting op de akkers. Het cultuurdek is minstens 50 cm dik, homogeen en heeft in het algemeen geen beperkende eigenschappen ten aanzien van de bewortelingsmogelijkheden. Verder geldt bij een toenemend leemgehalte van het bodemprofiel, dat de weerstand van de minerale ondergrond juist iets afneemt. Hierdoor zullen de wortelzones voor alle vegetatietypen in sterk lemige zandgronden (Bodemeenheid 13) iets dikker zijn dan in de zwak lemige zandgronden. Ook de stuifzandgronden (Bodemeenheid 7) hebben in het algemeen, als gevolg van een relatieve losse pakking van het zand, goede bewortelingsmogelijkheden.

Bij zure gronden, dit zijn gronden met een pH(KCl)-waarden beneden 3,5 á 4, is vrijwel geen beworteling meer mogelijk. Met name in de veenkoloniale gronden (veenmosveen) vormt de

lage pH een belemmering voor de beworteling (Bodemeenheid 2 en 18). Hetzelfde geldt voor gliedelagen en sommige lagen met katteklei (Bodem-eenheid 6).

De aëratie speelt voornamelijk een rol bij veengronden, moerige gronden en sommige zavel-, leem- en kleigronden. Er zijn veel plantensoorten die (korte) perioden, waarin anaërobie optreedt zonder schadelijke gevolgen kunnen doorstaan. Dit geldt met name wanneer deze perioden in de winter of in het voorjaar voorkomen. Bij lange perioden waarin zuurstofloosheid in de wortelzone optreedt, sterven uiteindelijk veel plantenwortels af. Voorts zijn er ook plantensoorten, die als gevolg van een aangepast vatenstelsel echter wel in deze natte situaties kunnen groeien (bv. Els). Bij luchtgehalten, van minder dan 10 á 15% wordt de beworteling sterk beperkt. Bij deze grenswaarden is uitgegaan van veldcapaciteit ( $pF = 2$ ). Een slechte aëratie kan zowel worden veroorzaakt door een hoge grondwaterstand als door een slechte bodemstructuur en sterke opdrachtigheid. In het algemeen wordt verondersteld dat de dikte van de wortelzone als gevolg van de aanwezigheid van grondwater een gemiddelde is van de GVG en GLG. Aangezien de GVG afhankelijk is van de GHG en GLG (formule  $GVG = 5,4 + 0,83 GHG + 0,19 GLG$  van Van der Sluijs (1982) (4.4a)) kan de dikte van de wortelzone bepaald worden uit de GHG en GLG:

$$\text{Dikte wortelzone} = 2,7 + 0,415 GHG + 0,595 GLG \text{ (Jansen, 1986).}$$

De laag net boven het grondwater is voor de meeste soorten te anaëroob om in te kunnen wortelen (luchtgehalte  $< 10\%$ ) en dient dus in mindering te worden gebracht op de worteldiepte die met behulp van de bovenstaande formule kan worden bepaald. De dikte van deze laag is sterk afhankelijk van de grondsoort en is vooral bij zavel- klei- en leem- en sterk opdrachtige gronden van belang. Dit betekent dat voor de zavelgronden Bodemeenheid 15, en 16) een correctie op de berekende worteldiepte dient plaats te vinden van ca. 20 cm en voor zware kleigronden (Bodem-eenheid 17) zelfs meer dan 50 cm.

Uit de voorgaande beschouwing blijkt, dat de dikte van de wortelzone bij natuurlijke vegetaties sterk afhankelijk is van het type natuurlijke vegetatie en het bodemtype. In deze studie was het niet mogelijk om dusdanig gedifferentieerd te werk te gaan. Er is gekozen voor een pragmatische aanpak bij de bepaling van de bewortelingsdiepte.

### ***Bewortelingsdiepte***

Wanneer we de groei van het gewas beschouwen in relatie tot de bewortelingsmogelijkheden van het bodemprofiel, dan spreken we van bewortelingsdiepte. Onder bewortelingsdiepte wordt hier verstaan de diepte waar een één- of tweejaars, volgroeide vegetatie nog juist voldoende wortels in een 10% droog jaar kan laten doordringen om het aanwezige vocht aan de grond te onttrekken. Elders wordt dit ook wel effectieve bewortelingsdiepte genoemd.

Onder een juist voldoende aantal wortels verstaan we ca. 4 wortels per  $dm^2$ , in een aan de wand van een kuil gemeten vlakje van 10 cm breedte bij 10 cm hoogte. Dit aantal is betrekkelijk arbitrair. Het berust op veldervaring en wordt onder het nodige voorbehoud gegeven.

Voor deze studie is de bewortelingsdiepte gekoppeld aan de vereenvoudiging van de Bodemkaart 1 : 250 000 in 21 zogenaamde Bodemeenheden. Voor drie vegetatietypen, nl.; grasachtige vegetaties, struweel en bos zijn bewortelingsdiepten weergegeven in tabel B4.3.



Tabel B4.3 Bewortelingsdiepte voor 4 vegetatietypen voor 21 bodemfysische eenheden

Bodemtype (PAWN-eenheid)	Bewortelbare diepte (cm)			
	Gras	Akkerbouw	Struweel	Bos
1 Veengronden met veraarde bovengrond	30	40	40	80
2 Veengronden met veraarde bovengrond op zand	25	40	40	80
3 Veengronden met kleidek	30	40	40	80
4 Veengronden met kleidek op zand	30	40	40	80
5 Veengronden met zanddek op zand	25	35	35	70
6 Veengronden met moerige gronden op ongerijpte klei	20	30	30	40
7 Stuifzand-gronden	30	50	60	110
8 Podzolgrond in leemarm, fijn zand	25	30	35	70
9 Podzolgrond in zwak lemig, fijn zand	25	30	35	70
10 Podzolgrond in zwak lemig, fijn zand op grof zand	25	30	35	70
11 Podzolgrond in sterk lemig, fijn zand op keileem of leem	30	35	35	70
12 Enkeerdgrond in zwak lemig, fijn zand	40	55	70	90
13 Beekeerd-grond in sterk lemig, fijn zand	30	45	40	80
14 Podzolgrond in grof zand	25	30	35	70
15 Homogene zavelgronden	35	60	70	110
16 Homogene, lichte kleigronden	35	60	60	110
17 Kleigrond, met zware tussenlaag of ondergrond	30	40	40	80
18 Kleigronden op veen	25	35	35	60
19 Klei op zandgronden	35	50	40	70
20 Klei op grof zand	35	45	45	80
21 Leemgronden	35	70	70	110

### Drukhoogte

Bij hydrostatisch drukverloop is de drukhoogte in de effectieve wortelzone gelijk te nemen met de afstand van de grondwaterspiegel tot het midden van de effectieve wortelzone. Als begin van het groeiseizoen wordt 1 april aangehouden, de grondwaterstand op die datum kan worden gekarakteriseerd met de GVG. De aldus bepaalde drukhoogte uit de GVG kan te klein zijn (denk aan min teken dus te droog) voor de situatie met wat diepere grondwaterstanden. Naarmate de grondwaterstand dieper is wordt de drukhoogte op GVG moment in toenemende mate niet meer door de grondwaterstand, maar door het neerslagoverschot bepaald. In deze situatie dient een correctie te worden uitgevoerd, die samenhangt met de aard en samenstelling van de ondergrond.

Voor de correctie van de drukhoogte kan men de volgende globale normen toepassen (Van Soesbergen *et al.*, 1986):

- voor hangwaterprofielen  $h = -100$  cm ( $pF=2,0$ ), indien het profiel goed doorlatend is dan  $h = -200$  cm ( $pF=2,3$ );
- voor opdrachtige profielen (kritieke z-afstand groter dan 80 cm)  $h = -50$  cm ( $pF=1,7$ );
- voor weinig opdrachtige profielen (kritieke z-afstand minder dan 80 cm)  $h = -100$  cm.

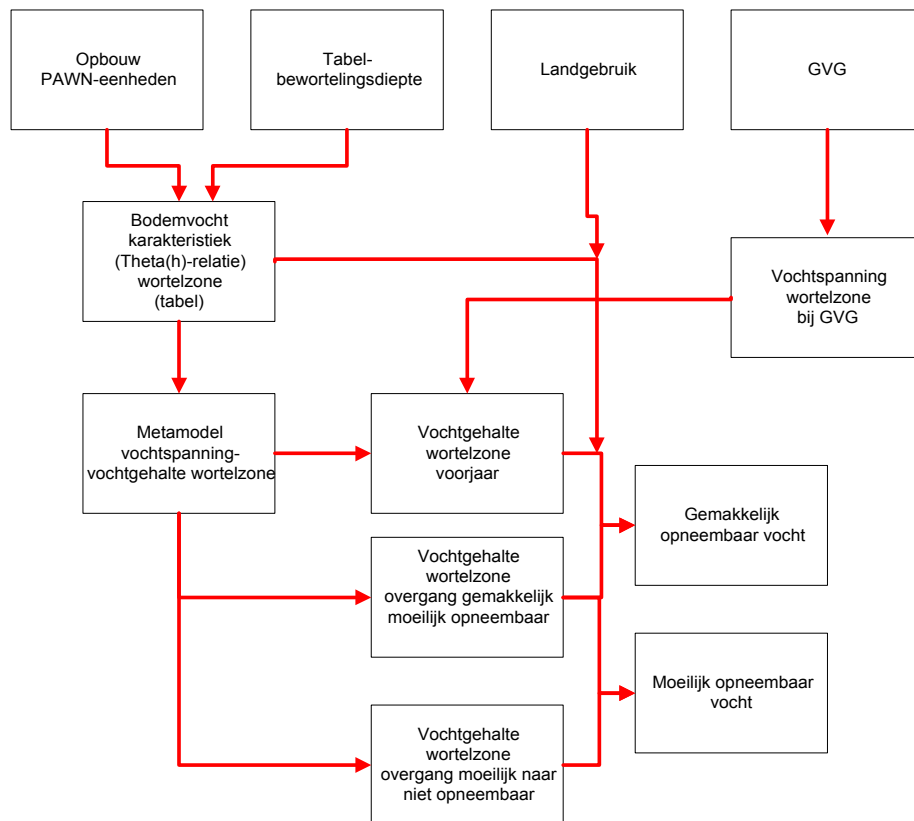
De uit de dikte van de effectieve wortelzone en door de grondwaterspiegel bepaalde drukhoogte aan het begin van het groeiseizoen kan dus niet kleiner zijn dan de hierboven aangegeven normen.

De wortelzone kan in de loop van het groeiseizoen uitdrogen tot een drukhoogte van  $-16\ 000$  cm ( $pF=4,2$ ).

### Bepaling beschikbare vochtgehalte

De werkwijze om de beschikbare vochtvoorraad in de effectieve wortelzone te berekenen staat schematisch weergegeven in figuur B4.3.

De bewortelingsdiepte (tabel B4.3) is opgebouwd uit 1 of meer bodemfysische bouwstenen. Voor deze bouwstenen zijn de theta(h) relaties bekend (Wösten *et al.*, 1987). Voor elke combinatie bewortelingsdiepte – bodem-eenheid is een nieuwe theta(h)-relatie in tabelvorm bepaald op basis van de dikte van de afzonderlijke bouwstenen en de theta(h)-relaties van deze bouwstenen. Voor elke combinatie bewortelingsdiepte – bodem-eenheid is deze theta(h)-relatie vervolgens omgezet in een metamodel. In figuur B4.4 zijn voor vijf bodemeenheden relaties gegeven tussen de vochtspanning in de bewortelingsdiepte en het beschikbaar vocht in de wortelzone. De afgeleide metamodellen kunnen vervolgens worden gebruikt om bij verschillende vochtspanningen het vochtgehalte in de effectieve wortelzone te berekenen.



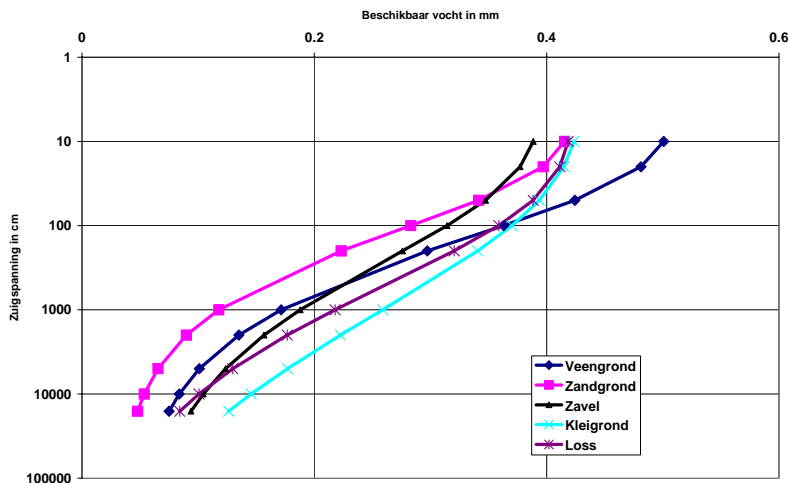
*Figuur B4.3 Schematische weergave van de bepaling van de hoeveelheid beschikbaar vocht in de wortelzone*

Vervolgens is het gemiddelde vochtgehalte in de effectieve wortelzone voor drie droogtesituaties bepaald, nl:

- begin groeiseizoen (1 april);
- bij een vochtspanning waarbij de opname van water door de plant moeilijker wordt (pF 2.7-3.0);
- bij een vochtspanning waarbij geen water meer door de plant kan worden opgenomen (pF 4.2).

De vochtspanning in de voorjaars situatie is afgeleid uit de GVG. De vochtspanning waarbij water door de plant moeilijk kan worden opgenomen, ligt bij grasachtige vegetatie bij een vochtspanning van 500 en bij bos bij een vochtspanning van 1000 cm. De beschikbare hoeveelheid vocht voor de plant kunnen we opsplitsen in:

- gemakkelijk opneembaar, dit is de hoeveelheid beschikbaar vocht tussen de voorjaars situatie en pF 2.7;
- moeilijk opneembaar, dit is de hoeveelheid beschikbaar vocht tussen pF 2.7 en pF 4.2.



Figuur B4.4 Relatie beschikbaar vocht in de wortelzone bij grasachtige vegetatie en vochtspanning voor 5 bodemeenheden

Om de vochtvoorraad in de effectieve wortelzone ruimtelijk in beeld te brengen zijn een aantal kaarten gemaakt. De GVG-kaart is omgezet naar een kaart voor vochtspanning in de effectieve wortelzone. Hiervoor is gebruik gemaakt van de dikte van de effectieve wortelzone en verder zijn de eerder besproken correcties toegepast. Vervolgens is voor de 3 situaties het vochtgehalte in de wortelzone landsdekkend berekend voor de voorjaars situatie, pF 2.7 en pF 4.2.

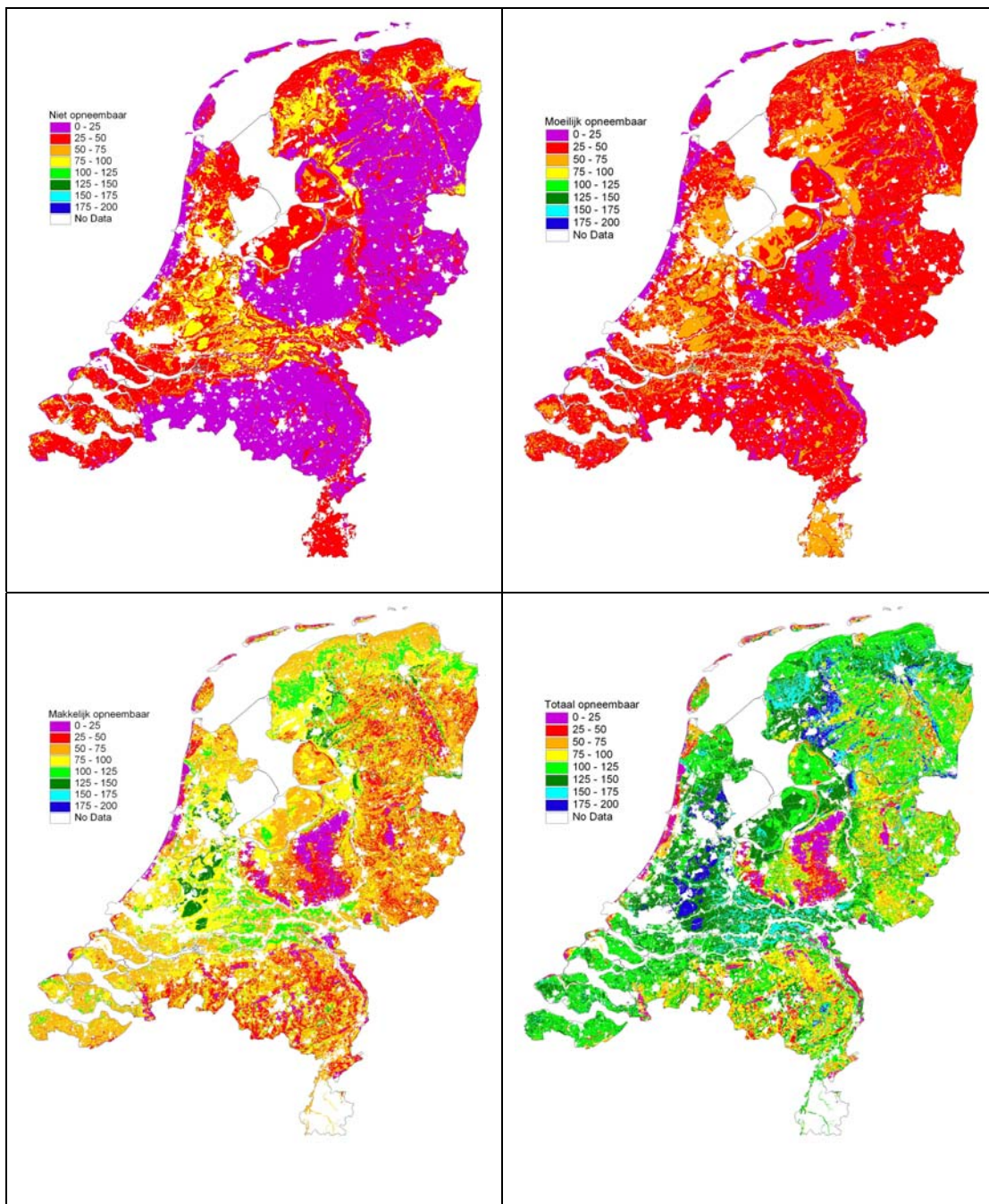
De vochtinhoud bij pF 4.2 is niet meer opneembaar voor de plant. De totale vochtinhoud van de wortelzone voor deze 3 situaties kan vervolgens worden berekend door het vochtgehalte te vermenigvuldigen met de dikte van de effectieve wortelzone. Uit deze drie kaarten kan vervolgens de hoeveelheid moeilijk en gemakkelijk opneembaar vocht worden bepaald:

Gemakkelijk opneembaar vocht = vochtinhoud wortelzone bij GVG – vochtinhoud wortelzone bij pF 2.7

Moeilijk opneembaar vocht = vochtinhoud wortelzone bij pF2.7 – vochtinhoud wortelzone bij pF 4.2

In figuur B4.5 staat de beschikbaarheid van vocht in de wortelzone weergegeven voor grasachtige natuur. De beschikbare voorraad moeilijk opneembaar vocht is het laagst op de stuwwallen, in de duinen en langs de Maas, nl. kleiner dan 25 mm. In de overige zandgronden en kleigronden is de hoeveelheid moeilijk opneembaar vocht 25-50 mm. In Zuid-Limburg en in de veengebieden is meer dan 50 mm moeilijk opneembaar vocht beschikbaar.

De kaart met gemakkelijk opneembaar vocht geeft een veel gevarieerder beeld. Ook hier vinden we de geringste hoeveelheden gemakkelijk opneembaar vocht op de stuwwallen en in de duinen. Voor de overige zandgebieden is overwegend 25-75 mm vocht beschikbaar, locaal zelfs meer dan 75 mm. Voor de kleigronden is veelal 50-75 mm beschikbaar. De komgronden in het rivierengebied hebben een nog grotere voorraad gemakkelijk opneembaar vocht dan de zeekleigebieden, nl 100-125 mm. De veengebieden hebben de grootste hoeveelheid gemakkelijk opneembaar vocht nl 125-150 mm.

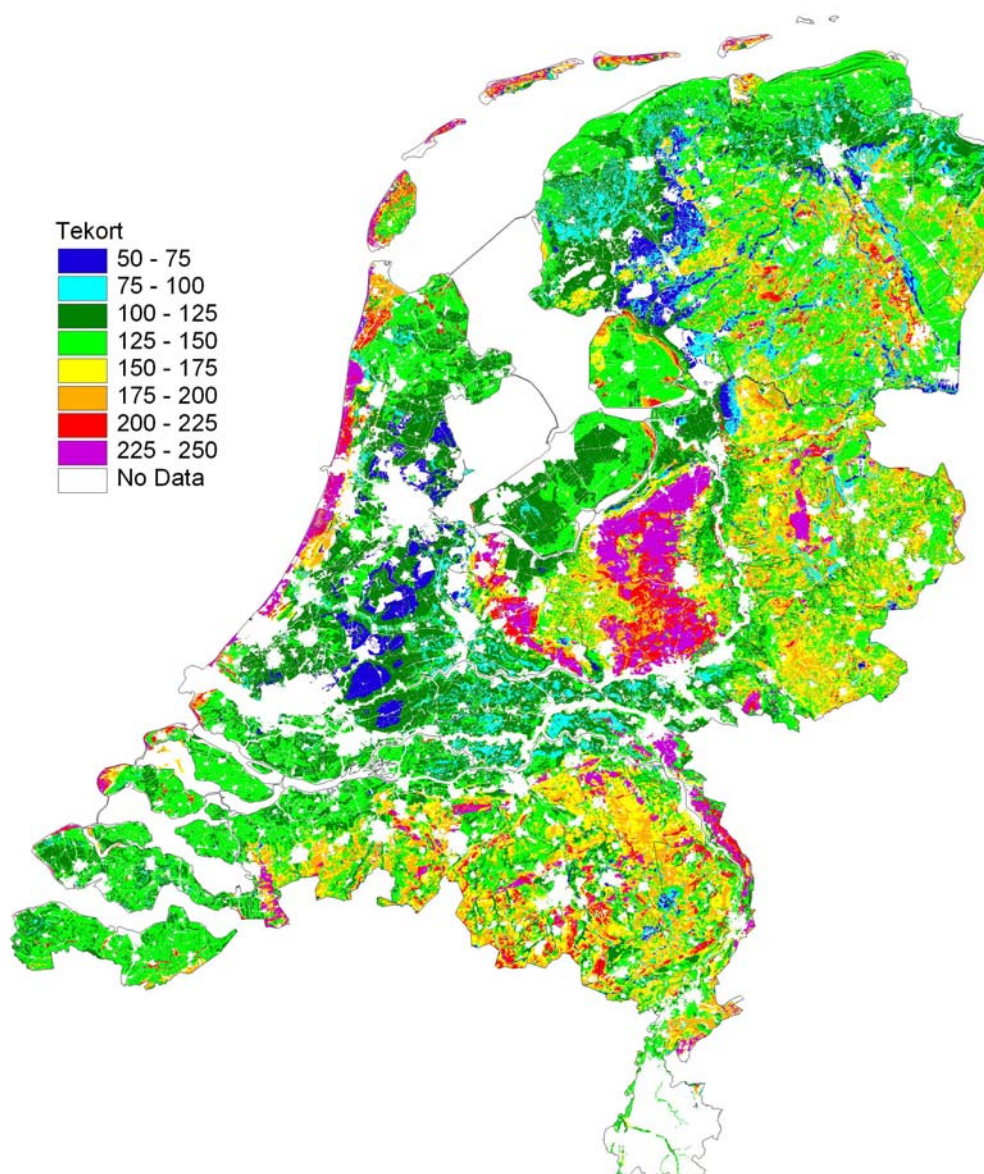


*Figuur B4.5 Niet opneembaar (linksboven), moeilijk opneembaar (rechtsboven), gemakkelijk opneembaar (linksonder) en totaal opneembaar (rechtsonder) vocht in mm in de effectieve wortelzone voor korte grasachtige natuur*

De kaart met de totale hoeveelheid opneembaar vocht geeft afgezien van de absolute hoeveelheid een overeenkomstig beeld met de kaart met gemakkelijk opneembaar vocht. Omdat voor Zuid-Limburg geen Gt is gegeven kan de hoeveelheid gemakkelijk opneembaar niet worden berekend. Dit betreft lössgronden die bekend staan om hun grote vochtleverende vermogen.

In tabel B4.2 is vastgesteld dat in een 10% droog jaar het totale neerslagtekort 252 mm bedraagt. Vergelijken we dit met de beschikbare vochtvoorraad in de wortelzone, dan kunnen we een idee krijgen over de grootte van het vochttekort dat door capillaire nalevering zou moeten worden aangevuld (figuur B4.6).

Figuur B4.6 geeft feitelijk de benodigde capillaire nalevering en/of beregeningsbehoefte weer. De grootste tekorten vinden we in de duinen en op de stuwwallen (Veluwe, Montferland, etc.) en het gebied ten oosten van de Maas en pleksgewijs in Noord-Brabant. Gebieden met een vochttekort van 150-200 mm vinden we vooral in Noord-Brabant, een deel van de Achterhoek en het Veenkoloniale gebied. Verder hebben de zandgronden veelal een tekort van 125-175 mm, kleigronden 100-150 mm en laagveengebieden in West-Nederland hebben een tekort van 50-75 mm.



*Figuur B4.6 Vochttekort in een 10%-droog jaar na aftrek van de vochtbeschikbaarheid in de effectieve wortelzone uitgaande van korte grasachtige natuur (mm)*



### **Capillaire nalevering**

Naast de beschikbare vochtvoorraad in de wortelzone kan er vanuit de ondergrond via capillaire nalevering water beschikbaar komen voor de plant. De grootte van de capillaire nalevering vanuit de ondergrond wordt bepaald door drie factoren, nl.:

- de vochtspanning in de effectieve wortelzone;
- de kritieke afstand (deze is afhankelijk van de aard en samenstelling van de ondergrond);
- de diepte van de grondwaterstand.

Het veelal gebruikte criterium om de capillaire eigenschappen van bodemprofielen te karakteriseren is de kritieke afstand ( $z_k$ ) bij een flux van 2mm/dag. Voor de bepaling van de kritieke afstand wordt verwezen naar een eerdere studie met de titel 'Monitoring verdroging' (Van der Gaast *et al.*, 2005).

Uit diverse berekeningen blijkt, dat indien de afstand tussen het niveau van de GLG en de onderzijde van de wortelzone geringer is dan de kritieke afstand, het langjarig gemiddelde vochttekort van grasland globaal beperkt blijft tot max. ca 2%. Dit criterium is indertijd afgeleid voor landgewassen (zie ook Bouwmans, 1990). Voor natuurlijke of halfnatuurlijke vegetaties kan het criterium mogelijk iets anders zijn, omdat een aantal soorten droogtetoleranter zijn of juist een hogere vochtbehoefte hebben ten opzichte van grasland. Hierdoor is het de vraag of deze 2% wel opgaat, omdat deze voor natuur niet is berekend, danwel is vastgesteld. Om ondanks deze kanttekeningen toch een benadering te kunnen geven met betrekking tot capillaire nalevering is bij gebrek aan een alternatief aangesloten bij het landbouwkundige criterium. Ook de Studiecommissie Waterbeheer Natuur, Bos en Landschap (Van Beusekom, 1990) gebruikt de kritieke afstand voor de indeling in profieltypen.

In een jaar met een 10% droogtekans, waarvan we voor de schatting van het vochtleverend vermogen uitgaan, zal de grondwaterstand aan het einde van het groeiseizoen beneden het GLG-niveau liggen. Voor veel gronden is de verlaging 20 à 40 cm (Van Soesbergen *et al.*, 1986); 20 cm kan als norm worden genomen voor in polders gelegen gronden, en 40 cm voor overige (Van Soesbergen *et al.*, 1986). De GLG wordt berekend door middeling van de LG3 over een reeks van ten minste 8 jaren. De LG3 in een 10 % droog jaar is genomen als representatieve laagste grondwaterstand in een jaar met een 10% droogtekans. Deze situatie is droger dan de GLG. Van Soesbergen geeft als vuistregel: LG3 in 10% droog jaar = GLG +20. Om te onderzoeken of deze vuistregel overeenkomt met de resultaten van modelberekeningen met het model SWAP zijn de rekenresultaten van 5 schematisatie-eenheden nader onderzocht (Van der Gaast *et al.*, 2006a). Dit betreft de volgende eenheden met de karakterisering van het gebied waarin ze liggen:

2600215	- gelegen in het rivierkleigebied,
2602001	- gelegen in het veengebied,
2800711	- gelegen in het keileemgebied in Drenthe,
2900309	- gelegen in het zandgebied,
3701312	- gelegen in beekdal.

Op verschillende manieren is gekeken hoe de LG3 in een 10% droog-jaar is te karakteriseren op basis van modelberekeningen, nl.:

- LG3-10% droog jaar op basis van het jaar 1989, dit is een 10% droog jaar op basis gehele groeiseizoen;
- LG3-gemiddelde van meerdere jaren die kunnen worden gekarakteriseerd als een bij benadering 10% droogjaar op basis van het gehele groeiseizoen;
- LG3-10% droog jaar op basis van het jaar 1990, dit is een 10% droog jaar op basis van het maximale vochttekort;
- LG3-gemiddelde van meerdere jaren die kunnen worden gekarakteriseerd als een bij benadering 10% droogjaar op basis van het maximale vochttekort.

In tabel B4.4 zijn voor schematisatieeenheid 2900309, gelegen in het zandgebied, de berekende waarden voor de LG3 voor een 10% droog jaar volgens de vier methoden weergegeven. De volgens deze methode berekende LG3-10% droogjaar varieert maximaal 10 cm. Voor de verdere analyse is de berekende LG3-10% droogjaar, bepaald volgens de 4 genoemde methoden, gemiddeld. Vergelijking van dit gemiddelde met de GLG geeft aan dat de LG3-10% gemiddeld 7 cm dieper wordt berekend dan de GLG (Muv van GT IV). Dit is dus duidelijk minder dan de 20 cm volgens eerder genoemde vuistregel.

Tabel B4.4 Enkele karakteristieken voor de GLG en de LG3 voor een 10% droog jaar voor schematisatieeenheid 2900309 in cm tov mv

Schematisatieeenheid: GT			IIa	IIIb	IV	VI	VII
<b>2900309</b>							
	GLG		-67,4	-103,7	-107,8	-159,0	-195,6
LG3-	Groeiseizoen	1989	-80,1	-117,7	-115,5	-171,3	-200,7
10%	Groeiseizoen	Gemiddelde	-73,4	-112,6	-112,8	-172,7	-206,3
	Maximum	1990	-70,9	-110,6	-111,0	-166,6	-200,0
	Maximum	Gemiddelde	-74,1	-113,3	-113,2	-172,5	-206,0

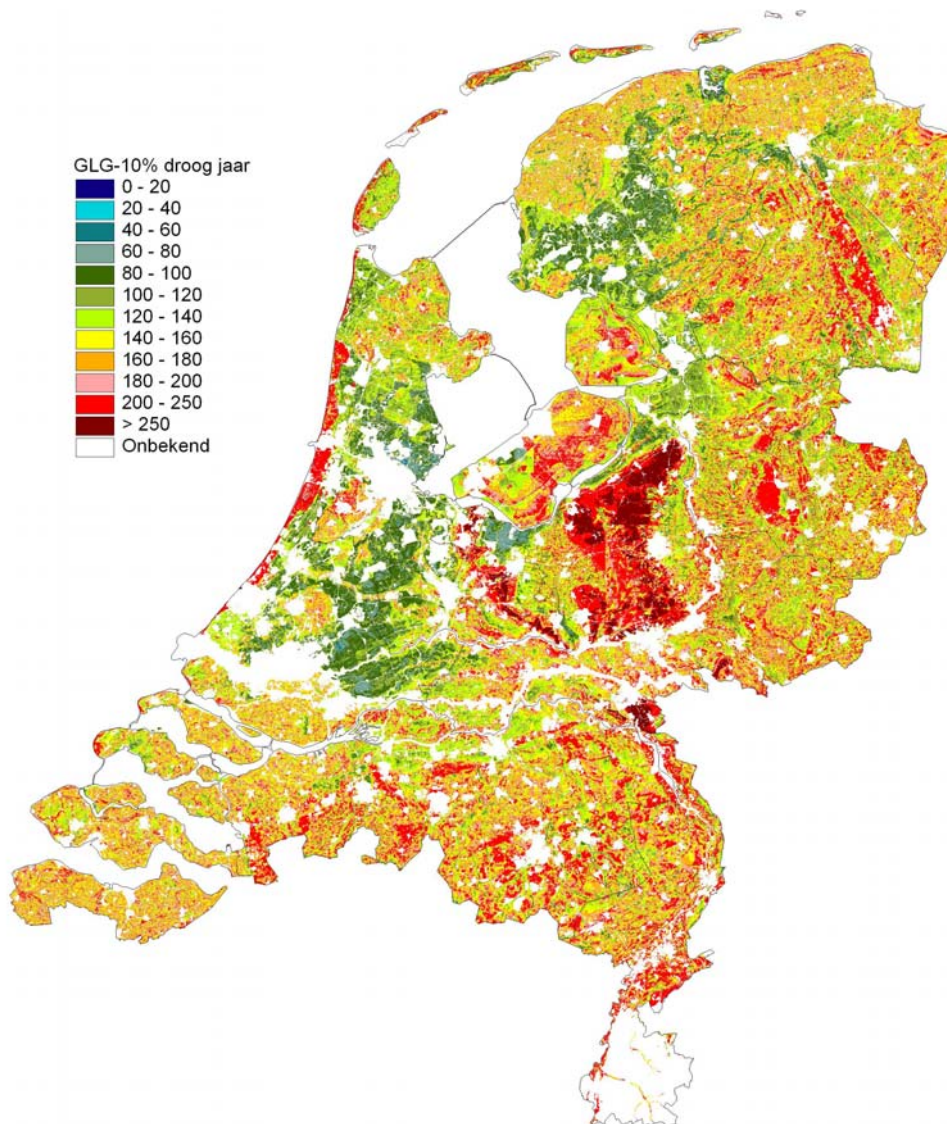
Voor een ruimtelijke invulling van de LG3 voor een 10% droog jaar is gebruik gemaakt van de resultaten van het project 'Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken' (Van der Gaast *et al.*, 2006a). Er zijn meerdere mogelijkheden om op basis van rekenresultaten met het model SWAP de LG3 voor een 10% droog jaar vast te stellen voor de verschillende schematisatie-eenheden, nl:

- Uit de overschrijdingsduur van de LG3;
- Uit de grondwaterstandsduurlijn;
- Door het verhogen van de GLG met een vaste waarde.

In tabel B4.5 is wederom voor eenheid 2900309 een voorbeeld gegeven van de bepaling van de GLG voor een 10% droogjaar.

Tabel B4.5 Bepaling LG3 voor een 10% droog jaar uit overschrijdingsduurlijn van de LG3 en de overschrijdingsduur van de grondwaterstand (grwst) in cm tov mv

Schematisatieeenheid: GT			IIa	IIIb	IV	VI	VII
<b>2900309</b>							
	GLG		-67,4	-103,7	-107,8	-159,0	-195,6
LG3	Gemiddelde 4 methoden		-74,6	-113,6	-113,1	-170,8	-203,2
	GLG-LG3		7,2	9,9	5,3	11,8	7,6
	10%	Nat	-54,8	-87,1	-98,5	-136,0	-177,7
LG3- duurlijn	20%		-57,3	-90,1	-99,4	-144,1	-180,7
	30%		-59,8	-94,4	-102,2	-149,6	-185,3
	40%		-64,2	-98,6	-105,9	-154,8	-193,7
	50%		-66,4	-105,3	-108,4	-156,4	-198,5
	60%		-70,7	-107,8	-110,4	-164,8	-199,2
	70%		-74,5	-110,4	-112,4	-170,3	-201,7
	80%		-76,5	-116,7	-115,3	-172,2	-206,6
	90%	Droog	-79,9	-118,5	-115,7	-178,0	-213,0
	Percentage LG3		71%	75%	73%	72%	73%
	Overschrijdingsduur grwst		96,1	95,2	95,2	94,7	93,4
	GLG-LG3-10%overschrijding		12,5	14,8	7,9	19,0	17,4



*Figuur B4.7 GLG voor een 10% droog jaar*

Uit tabel B4.5 blijkt dat de LG3-10% droogjaar overeenkomt met een overschrijdingsduur van de LG3 met ca 30%, dus een LG3 voor een 10% droogjaar is natter dan een LG3-10% uit de LG3 duurlijn. De LG3-10% geeft een verschil met de GLG van 7,9 - 19,0 cm, Vooral de relatief veel voorkomende getallen voor Gt VI en VII liggen dicht bij de 20 - 40 cm van Van Soesbergen *et al.* (1986) en lijken daarmee meer plausibel. De grondwaterstandsduurlijn geeft de overschrijdingskans in dagen of procenten van een bepaald niveau. Volgens tabel B4.5 varieert de overschrijdingsduur per Gt.

Uit deze analyse van de LG3 blijkt dat, rekening houdend met de vuistregel van Van Soesbergen, de 10% overschrijdingsduur van de LG3 de beste benadering geeft. Hiermee wordt tevens rekening gehouden met verschillen tussen Gt's, die bij de toepassing van een vast getal niet meegenomen kunnen worden. Hier tegenover staat dat in modelberekeningen vaak gebruik wordt gemaakt van invoergegevens die betrekking hebben op gemiddelden, waardoor de grondwaterstandsfluctuatie kan worden onderschat. Hierbij kan bijvoorbeeld gedacht worden aan de gegevens uit de Staringreeks die bepaald zijn op basis van



gemiddelde karakteristieken van meerdere bodemonsters. Dit kan tevens de verklaring zijn voor het relatief geringe berekende verschil tussen de GLG en de LG3 voor een 10% droog jaar. Om de LG3 voor een 10% droog jaar ruimtelijk te kunnen differentiëren is de 10% overschrijdingsduur van de LG3 gebruikt om de LG3-kaart voor een 10% droog jaar vast te stellen (figuur B4.7).

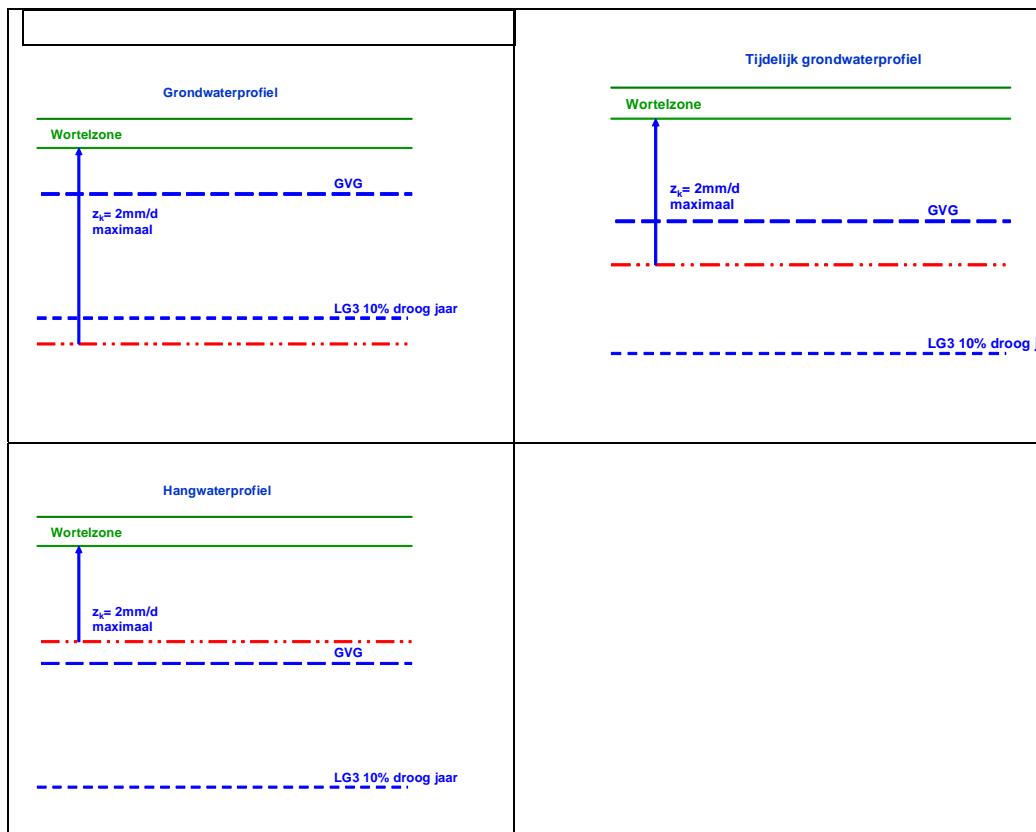
### Profieltype

De kritieke z-afstand ( $z_k$ ) bij een flux van 2mm/dag bepaald of er in de voorjaars situatie (rond GVG-moment) voldoende capillaire nalevering is aan de onderzijde van de wortelzone. Met de beschikbare gegevens GVG, LG3 voor een 10% droog jaar, de dikte van de wortelzone en de kritieke z-afstand ( $z_k$ ) kan worden vastgesteld of er voldoende capillaire nalevering aan de wortelzone plaats kan vinden gedurende het gehele of een gedeelte van het groeiseizoen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de indeling in profieltypen (Van der Gaast *et al.*, 2005).

Er worden drie profieltypen onderscheiden (figuur B4.8), nl.

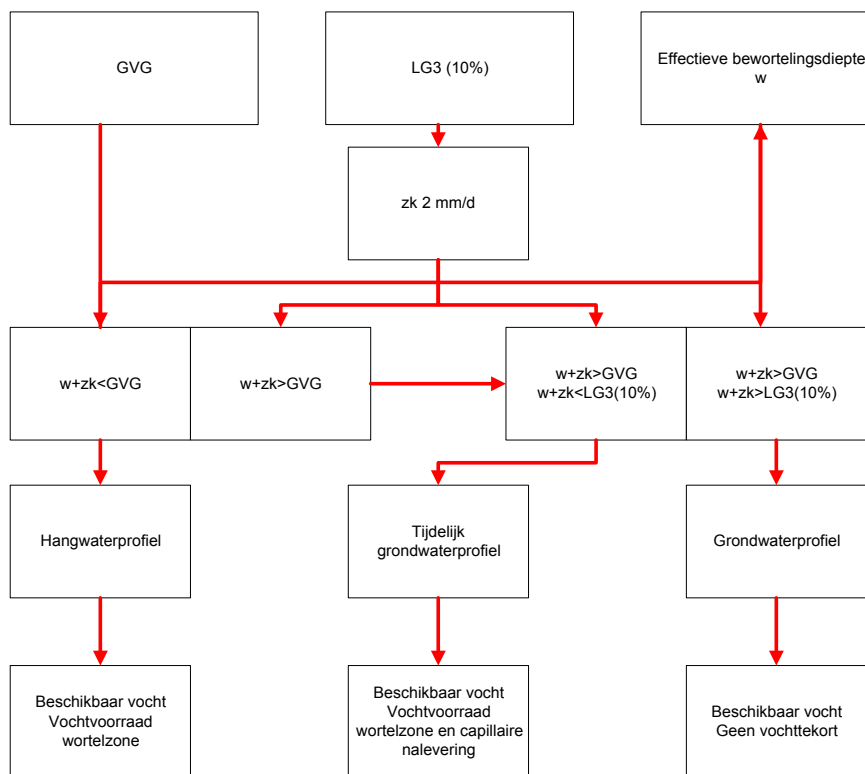
- Grondwaterprofiel, een capillaire flux van 2 mm/d tot in de wortelzone is in een 10%-droogjaar altijd te realiseren,
- Tijdelijk grondwaterprofiel, een capillaire flux van 2 mm/d tot in de wortelzone is slechts gedurende een deel van een 10%-droogjaar te realiseren,
- Hangwaterprofiel, een capillaire flux van 2 mm/d tot in de wortelzone is gezien de diepe ligging en/of slechte capillaire eigenschappen van de ondergrond gedurende geen enkel moment te realiseren.

In figuur B4.8 zijn de profieltypen schematisch weergegeven.



Figuur B4.8 Schematische weergave van de verschillende profieltypen op basis van de kritieke z-afstand, de GVG en GLG voor een 10% droog jaar.

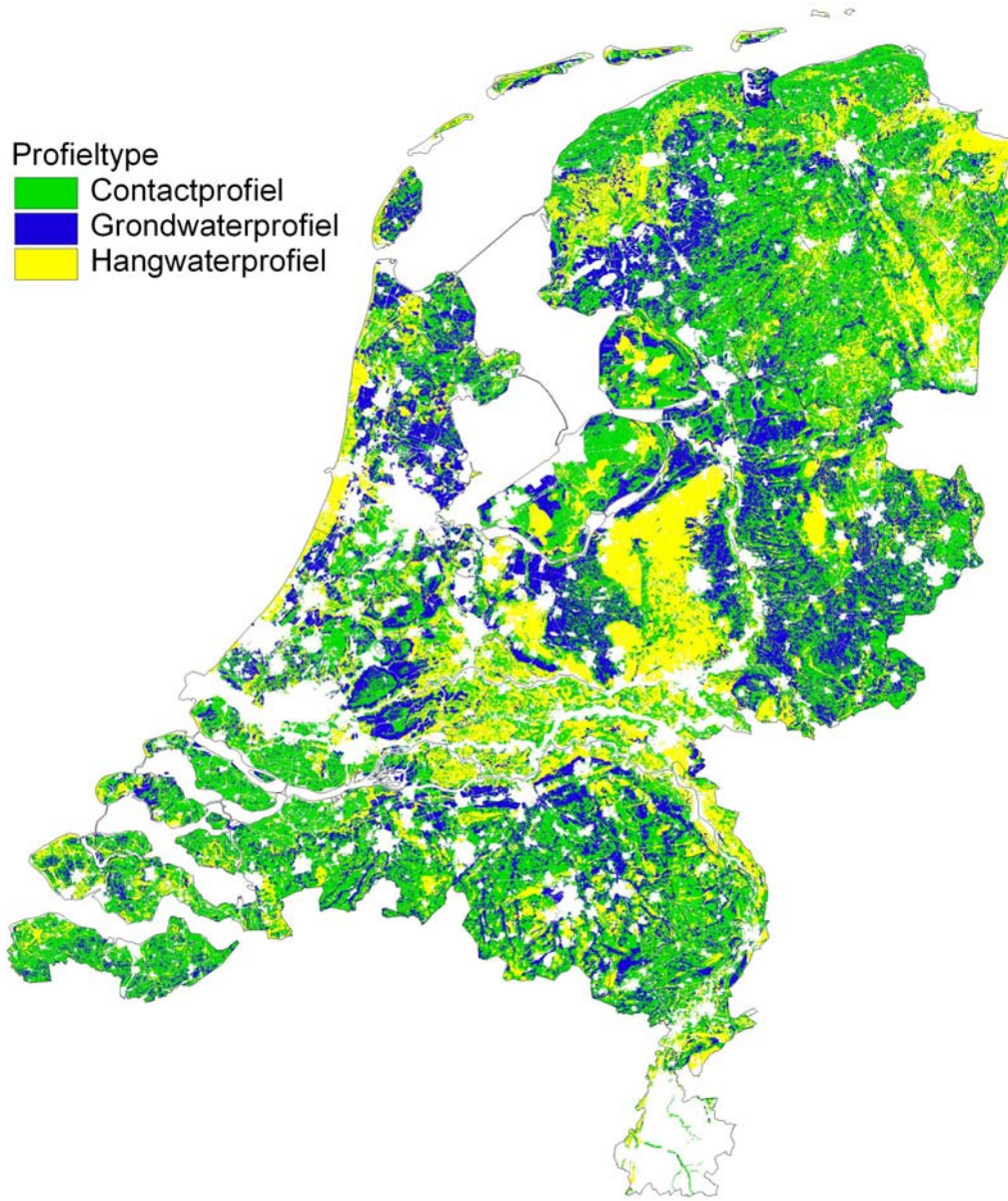
In figuur B4.9 is de werkwijze mbt tot de toekenning van het profieltype schematisch weergegeven. Door vergelijking van het niveau van de GVG en LG3 voor een 10% droogjaar met de som van de dikte wortelzone en de kritieke zafstand ( $z_k$ ) kan voor elke locatie het profieltype worden bepaald. Deze is in kaartvorm weergegeven in figuur B4.10.



Figuur B4.9 Gevolgde werkwijze voor het vaststellen van het profieltype

Hangwaterprofielen treffen we vooral aan in de Duinen, Stuwwallen en de stuifzandcomplexen zoals in Noord-Brabant. Ook op de kleigebieden van de Dollard, Friesland en in de Betuwe komen soms hangwaterprofielen voor. Deze laatste gronden betreffen gronden behorende tot de bodemfysische eenheden 17, kleigrond met zware tussenlaag of ondergrond, en 18, kleigronden op veen. Deze eenheden hebben als gevolg van zeer slechte capillaire eigenschappen een geringe kritieke zafstand ( $z_k$ ). De grondwaterprofielen treffen we vooral aan in kwelgebieden zoals de randzone Veluwe, Gelderse Vallei, in laagveengebieden en in de beekdalen in de zandgebieden. De overige gebieden kunnen in het algemeen worden beschouwd als gebieden waar het tijdelijke grondwaterprofiel het overheersende profieltype is.

Voor het tijdelijk grondwaterprofiel is een nadere gradatie te maken voor de beschikbare capillaire nalevering, op basis van de duur dat de LG3 in een 10% droog jaar wordt onderschreden, alsmede tot hoever de capillaire nalevering daarbij terugloopt, bijvoorbeeld tot 1,8 mm/d of tot 0,2 mm/d. Dit laatste zou nader onderzocht moeten worden.



*Figuur B4.10 Toegekende profieltype op basis van het bodemgebruik grasachtige natuur.*



## Verschenen documenten in de reeks Rapporten van de Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu sinds 2005

WOT-rapporten 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](mailto:info.wnm@wur.nl)

WOT-rapporten zijn ook te downloaden via de WOT-website [www.wotnatuurenmilieu.wur.nl](http://www.wotnatuurenmilieu.wur.nl)

- 1 *Wamelink, G.W.W., J.G.M. van der Graft-van Rossum & R. Jochem (2005). Gevoeligheid van LARCH op vegetatieverandering gesimuleerd door SUMO*
- 2 *Broek, J.A. van den (2005). Sturing van stikstof- en fosforverliezen in de Nederlandse landbouw: een nieuw mestbeleid voor 2030*
- 3 *Schrijver, R.A.M., R.A. Groeneveld, T.J. de Koeijer & P.B.M. Berentsen (2005). Potenties bij melkveebedrijven voor deelname aan de Subsidieregeling Agrarisch Natuurbeheer*
- 4 *Henkens, R.J.H.G., S. de Vries, R. Jochem, R. Pouwels & M.J.S.M. Reijnen, (2005). Effect van recreatie op broedvogels op landelijk niveau; Ontwikkeling van het recreatiemodel FORVISITS 2.0 en koppeling met LARCH 4.1*
- 5 *Ehlert, P.A.I. (2005). Toepassing van de basisvrachtbenadering op fosfaat van compost; Advies*
- 6 *Veeneklaas, F.R., J.L.M. Donders & I.E. Salverda (2006). Verrommeling in Nederland*
- 7 *Kistenkas, F.H. & W. Kuindersma (2005). Soorten en gebieden; Het groene milieurecht in 2005*
- 8 *Wamelink, G.W.W. & J.J. de Jong (2005). Kansen voor natuur in het veenweidegebied; Een modeltoepassing van SMART2-SUMO2, MOVE3 en BIODIV*
- 9 *Runhaar, J., J. Clement, P.C. Jansen, S.M. Hennekens, E.J. Weeda, W. Wamelink, E.P.A.G. Schouwenberg (2005). Hotspots floristische biodiversiteit*
- 10 *Cate, B. ten, H. Houweling, J. Tersteeg & I. Versteegen (Samenstelling) (2005). Krijgt het landschap de ruimte? – Over ontwikkelen en identiteit*
- 11 *Selnes. T.A., F.G. Boonstra & M.J. Bogaardt (2005). Congruentie van natuurbeleid tussen bestuurslagen*
- 12 *Leneman, H., J. Vader, E. J. Bos en M.A.H.J. van Bavel (2006). Groene initiatieven in de aanbidding. Kansen en knelpunten van publieke en private financiering*
- 13 *Kros, J. P. Groenendijk, J.P. Mol-Dijkstra, H.P. Oosterom, G.W.W. Wamelink (2005). Vergelijking van SMART2SUMO en STONE in relatie tot de modellering van de effecten van landgebruikverandering op de nutriëntenbeschikbaarheid*
- 14 *Brouwer, F.M, H. Leneman & R.G. Groeneveld (2007). The international policy dimension of sustainability in Dutch agriculture*
- 15 *Vreke, J., R.I. van Dam & F.H. Kistenkas (2005). Provinciaal instrumentarium voor groenrealisatie*
- 16 *Dobben, H.F. van, G.W.W. Wamelink & R.M.A. Wegman (2005). Schatting van de beschikbaarheid van nutriënten uit de productie en soortensamenstelling van de vegetatie. Een verkennende studie*
- 17 *Groeneveld, R.A. & D.A.E. Dirks (2006). Bedrijfseconomische effecten van agrarisch natuurbeheer op melkveebedrijven; Perceptie van deelnemers aan de Subsidieregeling Agrarisch Natuurbeheer*
- 18 *Hubeek, F.B., F.A. Geerling-Eiff, S.M.A. van der Kroon, J. Vader & A.E.J. Wals (2006). Van adoptiekip tot duurzame stadswijk; Natuur- en milieueducatie in de praktijk*
- 19 *Kuindersma, W., F.G. Boonstra, S. de Boer, A.L. Gerritsen, M. Pleijte & T.A. Selnes (2006). Evalueren in interactie. De mogelijkheden van lerende evaluaties voor het Milieu- en Natuurplanbureau*
- 20 *Koeijer, T.J. de, K.H.M. van Bommel, M.L.P. van Esbroek, R.A. Groeneveld, A. van Hinsberg, M.J.S.M. Reijnen & M.N. van Wijk (2006). Methodiekontwikkeling kosteneffectiviteit van het natuurbeleid. De realisatie van het natuurdoel 'Natte Heide'*
- 21 *Bommel, S. van, N.A. Aarts & E. Turnhout (2006). Over betrokkenheid van burgers en hun perspectieven op natuur*
- 22 *Vries, S. de & Boer, T.A. de, (2006). Toegankelijkheid agrarisch gebied voor recreatie: bepaling en belang. Veldinventarisatie en onderzoek onder in- en omwonenden in acht gebieden*
- 23 *Pouwels, R., H. Sierdsema & W.K.R.E. van Wingerden (2006). Aanpassing LARCH; maatwerk in soortmodellen*

- 24 *Buijs, A.E., F. Langers & S. de Vries (2006).* Een andere kijk op groen; beleving van natuur en landschap in Nederland door allochtonen en jongeren
- 25 *Neven, M.G.G., E. Turnhout, M.J. Bogaardt, F.H. Kistenkas & M.W. van der Zouwen (2006).* Richtingen voor Richtlijnen; implementatie Europese Milieurichtlijnen, en interacties tussen Nederland en de Europese Commissie
- 26 *Hoogland, T. & J. Runhaar (2006).* Neerschaling van de freatische grondwaterstand uit modelresultaten en de Gt-kaart
- 27 *Voskuilen, M.J. & T.J. de Koeijer (2006).* Profiel deelnemers agrarisch natuurbeheer
- 28 *Langeveld, J.W.A. & P. Henstra (2006).* Waar een wil is, is een weg; succesvolle initiatieven in de transitie naar duurzame landbouw
- 29 *Kolk, J.W.H. van der, H. Korevaar, W.J.H. Meulenkamp, M. Boekhoff, A.A. van der Maas, R.J.W. Oude Loohuis & P.J. Rijk (2007).* Verkenningen duurzame landbouw. Doorwerking van wereldbeelden in vier Nederlandse regio's
- 30 *Vreke, J., M. Pleijte, R.C. van Apeldoorn, A. Corporaal, R.I. van Dam & M. van Wijk (2006).* Meerwaarde door gebiedsgerichte samenwerking in natuurbeheer?
- 31 *Groeneveld, R.A., R.A.M. Schrijver & D.P. Rudrum (2006).* Natuurbeheer op veebedrijven: uitbreiding van het bedrijfsmodel FIONA voor de Subsidieregeling Natuurbeheer
- 32 *Nieuwenhuizen, W., M. Pleijte, R.P. Kranendonk & W.J. de Regt (2008).* Ruimte voor bouwen in het buitengebied; de uitvoering van de oude Wet op de Ruimtelijke Ordening (WRO) in de praktijk
- 33 *Boonstra, F.G., W.W. Buunk & M. Pleijte (2006).* Governance of nature. De invloed van institutionele veranderingen in natuurbeleid op de betekenisverlening aan natuur in het Drents-Friese Wold en de Cotswolds
- 34 *Koomen, A.J.M., G.J. Maas & T.J. Wejschede (2007).* Veranderingen in lijnvormige cultuurhistorische landschapselementen; Resultaten van een steekproef over de periode 1900-2003
- 35 *Vader, J. & H. Leneman (redactie) (2006).* Draggers landelijk gebied; Achtergronddocument bij Natuurbalans 2006
- 36 *Bont, C.J.A.M. de, C. van Bruchem, J.F.M. Helming, H. Leneman & R.A.M. Schrijver (2007).* Schaalvergroting en verbreding in de Nederlandse landbouw in relatie tot natuur en landschap
- 37 *Gerritsen, A.L., A.J.M. Koomen & J. Kruit (2007).* Landschap ontwikkelen met kwaliteit; een methode voor het evalueren van de rijksbijdrage aan een beleidsstrategie
- 38 *Luijt, J. (2007).* Strategisch gedrag grondeigenaren; Van belang voor de realisatie van natuurdoelen.
- 39 *Smits, M.J.W. & F.A.N. van Alebeek, (2007).* Biodiversiteit en kleine landschapselementen in de biologische landbouw; Een literatuurstudie.
- 40 *Goossen, C.M. & J. Vreke. (2007).* De recreatieve en economische betekenis van het Zuiderpark in Den Haag en het Nationaal Park De Hoge Veluwe
- 41 *Cotteleer, G., Luijt, J., Kuhlman, J.W. & C. Gardebroek, (2007).* Oorzaken van verschillen in grondprijzen. Een hedonische prijsanalyse van de agrarische grondmarkt
- 42 *Ens B.J., N.M.J.A. Dankers, M.F. Leopold, H.J. Lindeboom, C.J. Smit, S. van Breukelen & J.W. van der Schans (2007).* International comparison of fisheries management with respect to nature conservation
- 43 *Janssen, J.A.M. & A.H.P. Stumpel (red.) (2007).* Internationaal belang van de nationale natuur; Ecosystemen, Vaatplanten, Mossen, Zoogdieren, Reptielen, Amfibieën en Vissen
- 44 *Borgstein, M.H., H. Leneman, L. Bos-Gorter, E.A. Brassler, A.M.E. Groot & M.F. van de Kerkhof (2007).* Dialogen over verduurzaming van de Nederlandse landbouw. Ambities en aanbevelingen vanuit de sector
- 45 *Groot, A.M.E., M.H. Borgstein, H. Leneman, M.F. van de Kerkhof, L. Bos-Gorter & E.A. Brassler (2007).* Dialogen over verduurzaming van de Nederlandse landbouw. Gestructureerde sectorialogen als onderdeel van een monitoringsmethodiek
- 46 *Rijn, J.F.A.T. van & W.A. Rienks (2007).* Blijven boeren in de achtertuin van de stedeling; Essays over de duurzaamheid van het platteland onder stedelijke druk: Zuidoost-Engeland versus de provincie Parma
- 47 *Bakker, H.C.M. de, C.S.A. van Koppen & J. Vader (2007).* Het groene hart van burgers; Het maatschappelijk draagvlak voor natuur en natuurbeleid
- 48 *Reinhard, A.J., N.B.P. Polman, R. Michels & H. Smit (2007).* Baten van de Kaderrichtlijn Water in het Friese Merengebied; Een interactieve MKBA vingeroefening

- 49 *Ozinga, W.A., M. Bakkenes & J.H.J. Schaminée (2007)*. Sensitivity of Dutch vascular plants to climate change and habitat fragmentation; A preliminary assessment based on plant traits in relation to past trends and future projections
- 50 *Woltjer, G.B. (met bijdragen van R.A. Jongeneel & H.L.F. de Groot) (2007)*. Betekenis van macro-economische ontwikkelingen voor natuur en landschap. Een eerste oriëntatie van het veld
- 51 *Corporaal, A., A.H.F. Stortelder, J.H.J. Schaminée en H.P.J. Huiskes (2007)*. Klimaatverandering, een nieuwe crisis voor onze landschappen ?
- 52 *Oerlemans, N., J.A. Guldemond & A. Visser (2007)*. Meerwaarde agrarische natuurverenigingen voor de ecologische effectiviteit van Programma Beheer; Ecologische effectiviteit regelingen natuurbeheer: Achtergrondrapport 3
- 53 *Leneman, H., J.J. van Dijk, W.P. Daamen & J. Geelen (2007)*. Marktonderzoek onder grondeigenaren over natuuraanleg; methoden, resultaten en implicaties voor beleid. Achtergronddocument bij 'Evaluatie omslag natuurbeleid'
- 54 *Velthof, G.L. & B. Fraters (2007)*. Nitraatuitspoeling in duinzand en lössgronden.
- 55 *Broek, J.A. van den, G. van Hofwegen, W. Beekman & M. Woittiez (2007)*. Options for increasing nutrient use efficiency in Dutch dairy and arable farming towards 2030; an exploration of cost-effective measures at farm and regional levels
- 56 *Melman, Th.C.P., C. Grashof-Bokdam, H.P.J. Huiskes, W. Bijkerk, J.E. Plantinga, Th. Jager, R. Haveman & A. Corporaal (2007)*. Veldonderzoek effectiviteit natuurgericht beheer van graslanden. Ecologische effectiviteit regelingen natuurbeheer: Achtergrondrapport 2
- 57 *Bakel, P.J.T. van, H.Th.L. Massop, J.G. Kroes, J. Hoogewoud, R. Pastoors, & T. Kroon (2008)*. Actualisatie hydrologie voor STONE 2.3. Aanpassing randvoorwaarden en parameters, koppeling tussen NAGROM en SWAP, en plausibiliteitstoets
- 58 *Brus, D.J. & G.B.M. Heuvelink (2007)*. Towards a Soil Information System with quantified accuracy. Three approaches for stochastic simulation of soil maps
- 59 *Verburg, R.W. H. Leneman, B. de Knecht & J. Vader (2007)*. Beleid voor particulier natuurbeheer bij provincies. Achtergronddocument bij 'Evaluatie omslag natuurbeleid'
- 60 *Groenestein, C.M., C. van Bruggen, P. Hoeksma, A.W. Jongbloed & G.L. Velthof (2008)*. Nadere beschouwing van stalbalansen en gasvormige stikstofverliezen uit de intensieve veehouderij
- 61 *Dirkx, G.H.P., F.J.P. van den Bosch & A.L. Gerritsen (2007)*. De weerbarstige werkelijkheid van ruimtelijke ordening. Casuïstiek Natuurbalans 2007
- 62 *Kamphorst, D.A. & T. Selnes (2007)*. Investeringsbudget Landelijk Gebied in natuurbeleid. Achtergrond-document bij Natuurbalans 2007
- 63 *Aarts, H.F.M., G.J. Hilhorst, L. Sebek, M.C.J. Smits, J. Oenema (2007)*. De ammoniakemissie van de Nederlandse melkveehouderij bij een management gelijk aan dat van de deelnemers aan 'Koeien & Kansen'
- 64 *Vries, S. de, T.A. de Boer, C.M. Goossen & N.Y. van der Wulp (2008)*. De beleving van grote wateren; de invloed van een aantal 'man-made' elementen onderzocht
- 65 *Overbeek, M.M.M., B.N. Somers & J. Vader (2008)*. Landschap en burgerparticipatie.
- 66 *Hoogeveen, M.W., H.H. Luesink, J.N. Bosma (2008)*. Synthese monitoring mestmarkt 2006.
- 67 *Slangen, L.H.G., N. B.P. Polman & R. A. Jongeneel (2008)*. Natuur en landschap van rijk naar provincie; delegatie door Investeringsbudget Landelijk Gebied (ILG).
- 68 *Klijn, J.A., m.m.v. M.A. Slingerland & R. Rabbinge (2008)*. Onder de groene zoden: verdwijnt de landbouw uit Nederland en Europa? Feiten, cijfers, argumenten, verwachtingen, zoekrichtingen voor oplossingen.
- 69 *Kamphorst, D.A., M. Pleijte, F.H. Kistenkas & P.H. Kersten (2008)*. Nieuwe Wet ruimtelijke ordening: nieuwe bestuurscultuur? Voorgenomen provinciale inzet van de nieuwe Wet ruimtelijke ordening (Wro) voor het landelijk gebied.
- 70 *Velthof, G.L., C. van Bruggen, C.M. Groenestein, B.J. de Haan, M.W. Hoogeveen. J.F.M. Huijsmans (2009)*. Methodiek voor berekening van ammoniakemissie uit de landbouw in Nederland
- 71 *Bakker, H.C.M., J.C. Dagevos & G. Spaargaren (2008)*. Duurzaam consumeren; Maatschappelijke context en mogelijkheden voor beleid
- 72 *Hoogeveen, M.W., H.H. Luesink, J.N. Bosma (2008)*. Synthese monitoring mestmarkt 2007.

- 73** *Koeijer, T.J. de, K.H.M. van Bommel, J. Clement, R.A. Groeneveld, J.J. de Jong, K. Oltmer, M.J.S.M. Reijnen & M.N. van Wijk (2008).* Kosteneffectiviteit terrestrische Ecologische Hoofdstructuur; Een eerste verkenning van mogelijke toepassingen.
- 74** *Boer, S. de, W. Kuindersma, M.W. van der Zouwen, J.P.M. van Tatenhove (2008).* De Ecologische Hoofdstructuur als gebiedsopgave. Bestuurlijk vermogen, dynamiek en diversiteit in het natuurbeleid
- 75** *Wulp, N.Y. van der (2008).* Belevingswaardenmonitor Nota Ruimte 2006; Nulmeting Landschap naar Gebieden
- 76** *Korevaar, H., W.J.H. Meulenkamp, H.J. Agricola, R.H.E.M. Geerts, B.F. Schaap en J.W.H. van der Kolk (2008).* Kwaliteit van het landelijk gebied in drie Nationale Landschappen
- 77** *Breeman, G.E. en A. Timmermans (2008).* Politiek van de aandacht voor milieubeleid; Een onderzoek naar maatschappelijke dynamiek, politieke agendavorming en prioriteiten in het Nederlandse Milieubeleid
- 78** *Bommel, S. van, E. Turnhout, M.N.C. Aarts & F.G. Boonstra (2008).* Policy makers are from Saturn, ... Citizens are from Uranus...; Involving citizens in environmental governance in the Drentsche Aa area
- 79** *Aarts, B.G.W., L. van den Bremer, E.A.J. van Winden en T.K.G. Zoetebier (2008).* Trendinformatie en referentiewaarden voor Nederlandse kustvogels
- 80** *Schrijver, R.A.M., D.P. Rudrum & T.J. de Koeijer (2008).* Economische inpasbaarheid van natuurbeheer bij graasdierbedrijven
- 81** *Densen, L.T., M.J. van Overzee (2008).* Vijftig jaar visserij en beheer op de Noordzee
- 82** *Meesters, H.W.G., R. ter Hofstede, C.M. Deerenberg, J.A.M. Craeijsmeersch, I.G. de Mesel, S.M.J.M. Brasseur, P.J.H. Reijnders en R. Witbaard (2008).* Indicator system for biodiversity in Dutch marine waters; II Ecoprofiles of indicator species for Wadden Sea, North Sea and Delta area
- 83** *Verburg, R.W., H. Leneman, K.H.M. van Bommel en J. van Dijk (2008).* Helpt boeren de Nationale Landschappen? Een empirische analyse van de landbouw en haar effecten op kernkwaliteiten
- 84** *Slangen, L.H.G., R.A. Jongeneel, N.B.P. Polman, J.A. Guldemond, E.M. Hees en E.A.P. van Well (2008).* Economische en ecologische effectiviteit van gebiedscontracten
- 85** *Schröder, J.J., J.C. van Middelkoop, W. van Dijk en G.L. Velthof (2008).* Quick scan Stikstofwerking van dierlijke mest. Actualisering van kennis en de mogelijke gevolgen van aangepaste forfaits
- 86** *Hoogeveen, M.W. en H.H. Luesink (2008).* Synthese monitoring mestmarkt 2008
- 87** *Langers, F., J. Vreke (2008).* De recreatieve betekenis van de Ecologische Hoofdstructuur. Bijdrage van de EHS aan recreatief gebruik, beleving en identiteit
- 88** *Padt, F.J.G., F.G. Boonstra en M.A. Reudink (2008).* De betekenis van duurzaamheid in gebiedsgericht beleid
- 89** *Hoogland, T., G.B.M. Heuvelink, M. Knotters (2008).* De seizoensfluctuatie van de grondwaterstand in natuurgebieden vanaf 1985 in kaart gebracht
- 90** *Bouwma, I.M., D.A. Kamphorst, R. Beunen & R.C. van Apeldoorn (2008).* Natura 2000 Benchmark; A comparative analysis of the discussion on Natura 2000 management issues
- 91** *Vries, S. de, J. Maas & H. Kramer (2009).* Effecten van nabije natuur op gezondheid en welzijn; mogelijke mechanismen achter de relatie tussen groen in de woonomgeving en gezondheid.
- 92** *Meesters, H.W.G., A.G. Brinkman, W.E. van Duin, H.J. Lindeboom, S. van Breukelen (2009).* Graadmeterstelsel Biodiversiteit zoute wateren. I. Beleidskaders en indicatoren.
- 93** *Pleijte, M., J. Vreke, F.J.P. van den Bosch, A.L. Gerritsen, R.P. Kranendonk & P.H. Kersten (2009).* Verdrogingsbestrijding in het tijdperk van het Investeringsbudget Landelijk Gebied. Tussen government en governance
- 94** *Gaast, J.W.J. van der, H.Th. Massop & H.R.J. Vroon (2009).* Actuele grondwaterstandsituatie in natuurgebieden. Een pilotstudie





**Wot**  
Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu

