

De seizoensfluctuatie van de grondwaterstand in natuurgebieden vanaf 1985 in kaart gebracht

T. Hoogland
G.B.M. Heuvelink
M. Knotters

r a p p o r t e n

wot

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu



WAGENINGENUR

For quality of life

De seizoensfluctuatie van de grondwaterstand in natuurgebieden vanaf 1985 in kaart gebracht

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

De reeks 'WOt-rapporten' bevat onderzoeksresultaten van projecten die kennisorganisaties voor de unit Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu hebben uitgevoerd.

WOt-rapport **89** is het resultaat van een onderzoeksopdracht van het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (LNV). Dit onderzoeksrapport draagt bij aan de kennis die verwerkt wordt in meer beleidsgerichte publicaties zoals Natuurbalans, Milieubalans en thematische verkenningen.

De seizoensfluctuatie van de grondwaterstand in natuurgebieden vanaf 1985 in kaart gebracht

T. Hoogland

G.B.M. Heuvelink

M. Knotters

Rapport 89

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu

Wageningen, december 2008

Referaat

Hoogland, T., G.B.M. Heuvelink & M. Knotters, 2008. *De seizoensfluctuatie van de grondwaterstand in natuurgebieden vanaf 1985 in kaart gebracht*. Wageningen, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-rapport 89. 60 blz. 14 fig.; 7 tab.; 36 ref.; 3 bijl.

Grondwaterafhankelijke ecosystemen in Nederland worden bedreigd door de verlaging van de freatische grondwaterstand. Beschikbare informatie over de grondwaterstand is ontoereikend en achterhaald. Gedetailleerde informatie over grondwaterstanden is gewenst, vooral voor natuurreservaten met grondwaterafhankelijke vegetatietypes. Sinds 1980 zijn 35.000 schattingen van seizoensfluctuatie van grondwaterstanden in natuurgebieden verzameld. Met deze waarnemingen is met een geostatistische interpolatie in ruimte en tijd de seizoensfluctuatie van grondwaterstanden tussen 1980 en 2007 in kaart gebracht. Kaarten van de voorspelde gemiddelde grondwaterstand en de nauwkeurigheid van deze voorspellingen zijn gebruikt om gebieden te identificeren waar het grondwater te diep zit voor grondwaterafhankelijke ecosystemen. Veranderingen in de grondwaterstand in de afgelopen 25 jaar op de nationale en provinciale schaal zijn gekwantificeerd.

Trefwoorden: verdroging, grondwaterstand, natuur, grondwaterafhankelijk, ruimte-tijd geostatistiek, kaarten, nauwkeurigheid

Abstract

T. Hoogland, G.B.M. Heuvelink & M. Knotters, 2008. *Mapping seasonal water table fluctuations in Dutch conservation areas since 1985*. Wageningen, Statutory Research Tasks Unit for Nature and the Environment. WOt-rapport 89. 60 p. 14 Fig.; 7 Tab.; 36 Ref.; 3 Annexes

Groundwater-dependent ecosystems in the Netherland are threatened by the lowering of the phreatic groundwater level. Existing information on current water table depths is insufficient and outdated. Spatially explicit and detailed information on water table depths is required, in particular for nature reserves with groundwater-dependent vegetation types. Some 35,000 estimates of seasonal fluctuation characteristics of water table depths in nature reserves were recorded since 1980. These observations were used in a space-time geostatistical analysis to map the seasonal fluctuation of water table depths between 1980 and 2007. Maps of the predicted means Spring water table depths and maps indicating the accuracy of these predictions were used to identify areas where the water table is too deep to meet the ecosystem specific target values. Changes of water table depths on the national and provincial scale over the past 25 year are assessed.

Key words: Desiccation, water table depth, nature, groundwater-dependent, space-time geostatistics, mapping, accuracy

ISSN 1871-028X

©2008 **Alterra, Wageningen UR**

Postbus 47, 6700 AA Wageningen

Tel: (0317) 48 07 00; fax: (0317) 41 90 00; e-mail: 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**.

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

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

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

Woord vooraf

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) en de WOT Natuur & Milieu danken we voor het mogelijk maken van methodisch vernieuwend en risicodragend onderzoek. Vanuit de opdrachtgever, PBL, is dit onderzoek op een prettige en stimulerende manier begeleid door Arjen van Hinsberg, Guus Beugelink en Rien Pastoors, waarvoor hartelijk dank. Harm Houweling en Rien Reijnen van de WOT Natuur & Milieu willen we hartelijk danken voor de ondersteuning en het in ons gestelde vertrouwen.

De klankbordgroep bestaande uit: Geo Arnold (RIZA), Henk Beije (LNV), Thomas de Meij (Waterschap Velt en Vecht), Remco Gras (DLG), Eise Harkema (SBB), Heiko Prak (DLG), Han Runhaar (KIWA), Nicko Straathof (Natuurmonumenten), Wil van Duijvenbooden (LNV), Frans van Geer (TNO) en Frank van Pruisen (Prov. Utrecht) willen we hartelijk danken voor hun bijdrage tijdens de verschillende bijeenkomsten en hun suggesties voor de rapportage.

Hans Visser (PBL) danken we hartelijk voor zijn enthousiaste en gedegen review van het rapport.

*Tom Hoogland
Gerard Heuvelink
Martin Knotters*

Inhoud

| | |
|---|-----------|
| Woord vooraf | 5 |
| Samenvatting | 9 |
| Summary | 11 |
| 1 Inleiding | 13 |
| 1.1 Aanleiding | 13 |
| 1.2 Doelstelling | 13 |
| 1.3 Onderzoeksvragen | 14 |
| 1.4 Opbouw | 14 |
| 2 Gegevens en werkwijze | 15 |
| 2.1 Beschikbare meetgegevens van de grondwaterstand | 15 |
| 2.1.1 Schattingen in peilbuizen | 15 |
| 2.1.2 Schattingen uit gerichte opnamen | 17 |
| 2.1.3 Veldschattingen | 18 |
| 2.1.4 Samenhang tussen verschillende soorten GxG-schattingen | 20 |
| 2.2 Gebruikte gegevens | 21 |
| 2.3 Geostatistische interpolatie tot kaartbeelden | 23 |
| 2.3.1 Uitgangspunten | 23 |
| 2.3.2 Schatting van ruimtelijke en temporele trends | 24 |
| 2.3.3 Ruimtelijke en temporele afhankelijkheid | 28 |
| 3 Resultaten | 33 |
| 3.1 Kaarten van de GxG | 33 |
| 3.2 Betrouwbaarheid van de kaarten | 34 |
| 3.3 Geschiktheid van peilbuizen voor toekomstige actualisatie | 35 |
| 4 Toepassingsmogelijkheden | 37 |
| 4.1 Vaststellen van landelijke, regionale en lokale veranderingen | 37 |
| 4.2 De betrouwbaarheid met beschikbare gegevens | 38 |
| 4.3 De knelpunten voor grondwaterafhankelijke natuur in beeld | 40 |
| 4.4 Prioriteiten voor toekomstige meetinspanning | 42 |
| 5 Conclusies en aanbevelingen | 45 |
| 5.1 Conclusies | 45 |
| 5.2 Aanbevelingen | 46 |
| Literatuur | 49 |
| Bijlage 1 Definities | 51 |
| Bijlage 2 Omrekening van veldschatting naar gerichte opname | 53 |
| Bijlage 3 De gemiddelde GxG en betrouwbaarheid van dit gemiddelde in gebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen per provincie en periode | 55 |

Samenvatting

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

Doel van deze studie om de grondwatersituatie in de natuurgebieden met grondwaterafhankelijke natuur in kaart te brengen. Het gaat daarbij om kaarten van de situatie sinds 1985. Dit onderzoek startte met kartering van de parameters waarmee traditioneel het gemiddelde grondwaterstandsverloop wordt beschreven: de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG), de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG), samen GxG genoemd. Ook wordt de nauwkeurigheid van de vervaardigde GxG-kaarten, die afhankelijk is van beschikbare waarnemingen, gekwantificeerd. Omdat de bruikbaarheid van de GxG-kaart mede afhankelijk is van de nauwkeurigheid kan worden aangegeven waar aanvullende gegevens over de grondwatersituatie wenselijk zijn. Ook kan worden aangegeven welke uitspraken mogelijk zijn op basis van de huidige nauwkeurigheid.

In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van een combinatie van diverse gegevensbronnen. Hierbij worden bestaande (meet)gegevens van de GHG, GVG en GLG die digitaal beschikbaar zijn gecombineerd met hulpinformatie om in natuurgebieden de grondwatersituatie te karteren. Drie soorten waarnemingen worden gebruikt om de GHG, de GLG en de GVG te karteren: (i) schattingen uit gerichte opnamen, (ii) veldschattingen en (iii) schattingen uit peilbuizen.

De GxG-schattingen volgens de verschillende methoden blijken onderling sterk te correleren. De GHG- en GVG-schattingen op basis van gerichte opnames en peilbuizen blijken echter systematisch droger te zijn dan de veldschattingen. Omdat in dit onderzoek beide soorten GxG-schattingen gebruikt worden, is het noodzakelijk om een correctie uit te voeren om waarnemingen onderling vergelijkbaar te maken. Zonder correctie zou een verandering van de schattingsmethode kunnen worden geïnterpreteerd als een verandering in de GxG, terwijl daarvan in werkelijkheid geen sprake is. Uiteindelijk worden kaartbeelden van de GxG gemaakt volgens beide bepalingmethoden. Daarbij worden veldschattingen gecorrigeerd tot schattingen volgens gerichte opnamen, maar worden ook schattingen uit gerichte opnamen gecorrigeerd tot veldschattingen.

In totaal zijn 39.034 GxG-schattingen binnen de natuurgebieden gebruikt bij het maken van de GxG-kaarten. De meeste van deze opnames liggen op de zandgronden van Nederland en zijn vooral tussen 1981 en 2000 opgenomen. Om uit GxG-schattingen de GxG gebiedsdekkend te kunnen voorspellen (karteren) is een interpolatie vanuit meetlocaties naar niet-bezochte locaties noodzakelijk. De nauwkeurigheid van gebiedsdekkende GxG-voorspellingen kan worden vergroot als daarbij gebruik wordt gemaakt van gebiedsdekkende hulpinformatie. Met lineaire regressie zijn relaties gelegd tussen puntschattingen van de GxG en gebiedsdekkende informatie. Daarbij is ook gekeken in hoeverre een verandering in de tijd geschat kan worden. Deze ruimtelijke en temporele relaties zijn beschreven met lineaire regressiemodellen. Op basis van de berekende regressiemodellen kunnen gebiedsdekkende voorspellingen van de GxG worden gemaakt voor diverse tijdstippen.

De verschillen tussen de voorspellingen met het regressiemodel en de GxG op de opnamelocaties noemen we residuen. Het gaat hier om afwijkingen van het regressiemodel ten opzichte van de GxG-opnamen.

Meestal vertonen de residuen een ruimtelijke en/of temporele afhankelijkheid (correlatie). Het regressiemodel hoeft immers niet alle ruimtelijke en temporele structuur in de GxG verklaard te hebben uit de hulpinformatie. Voor de geostatistische interpolatie van GxG-kaarten en het schatten van de nauwkeurigheid van deze voorspellingen, is het van belang om rekening te houden met de ruimtelijke en temporele correlatie van de residuen. De gebiedsdekkende voorspelling (kaart) van de GxG is daarom in twee stappen vervaardigd. Eerst is, voor 25x25 m rastercellen, een gebiedsdekkende voorspelling van de GxG in een specifiek jaar gemaakt, gebruikmakend van regressie. Als tweede stap is daarbij een geïnterpoleerd residu opgeteld. Voor alle natuurgebieden zijn kaarten vervaardigd van GHG, GVG en GLG met zowel de gerichte opnameschattingen als de veldschattingen, omgerekend naar een van beide schattingsmethoden. In totaal zijn dus zes kaarten met voorspellingen van de gemiddelde grondwaterstand vervaardigd.

Voordeel van het gebruik van ruimtelijke statistiek is dat niet alleen inzicht verkregen wordt in de GxG of de verandering daarin, maar ook in de betrouwbaarheid van uitspraken hierover. De nauwkeurigheid van GxG-voorspellingen op de kaarten varieert sterk in ruimte en tijd. Voorspellingen nabij opnamelocaties met een opnametijdstip kort voor of na het jaar waarvoor een voorspelling is gemaakt, zijn relatief nauwkeurig met een voorspelfout, tot 8 cm. Voor het totale areaal natuurgebied (5.344 km²) bleek op minder dan 1% van het areaal een voorspelling met een voorspelfout kleiner dan 20 cm mogelijk. In nattere gebieden met grondwaterafhankelijke natuur is een schatting met een voorspelfout van minder dan 10 cm gewenst voor een toetsing aan de gewenste grondwaterstand.

Uitgaande van de voorspelde GVG per 25x25-metercel is een vergelijking tussen de gewenste GVG voor grondwaterafhankelijke natuur en de voorspelde GVG gemaakt. Het verschil is gebruikt om de mate van verdroging aan te geven. Voor de grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen in Nederland is bepaald op welk deel van het areaal de voorspelde GVG met 90% zekerheid droger is dan de gewenste GVG. De GVG in gebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen is volgens de veldschattingsmethode in zeker 55%, en volgens gerichte opnamen in zeker 70% van het areaal, te droog. Deze gebieden zouden daarom als verdroogd aangemerkt kunnen worden omdat vrijwel zeker het gewenste grondwaterafhankelijke natuurdoeltype niet gerealiseerd zal worden, vanwege een te droge GVG. De veranderingen zijn gering en er lijkt geen sprake van een systematische toe- of afname van het areaal sinds 1985. Het verwachte effect van herstelmaatregelen i.c. een vermindering van het areaal waar de voor natuur gewenste grondwaterstand niet wordt gehaald is niet aangetoond.

De GVG is volgens de veldschattingsmethode gemiddeld 45 cm, en volgens gerichte opnamen 62 cm lager dan de voor de grondwaterafhankelijke natuur gewenste GVG. De te diepe grondwaterstanden zijn voor de vijf onderzochte perioden van vijf jaar tussen 1983 en 2007 nagenoeg gelijk. Het verwachte effect van herstelmaatregelen i.c. een stijging van de grondwaterstand, is niet aangetoond.

Voor de natuurgebieden in Nederland bleek de nauwkeurigste schatting van de GxG in de periode 1988-1992 gemaakt te kunnen worden. In de laatste periode, 2003-2007, zijn de voorspellingen minder nauwkeurig als gevolg van het kleine aantal recente waarnemingen. Nauwkeurige toekomstige actualisaties van de huidige kaarten zijn alleen mogelijk als de meetinspanning wordt vergroot. Een groot aantal zorgvuldig gelokaliseerde grondwaterstands-waarnemingen zijn noodzakelijk als in de toekomst nauwkeuriger GxG-kaarten voor natuurgebieden gewenst zijn. Als de waargenomen afname van het aantal waarnemingen sinds 1995 doorzet zullen de kaarten van de actuele situatie of kaarten uit toekomstige actualisaties minder nauwkeurig zijn. Vooral in natuurgebieden waar grondwaterafhankelijke natuur voorkomt is daarom een voldoende uitgebreid meetnet voor de grondwatersituatie gewenst.

Summary

The water table depth in large areas of the Netherlands is often shallow, in between 0 and 2 meters below the ground surface. Because of its shallow depth, the water table is of significant importance to nature conservation. Conditions for plant growth and the potential for development of vegetation types are related to the water table depth. In 1989 the threat of 'Man-Induced-Drought of Nature and Landscape' was recognized by Dutch national policy makers (Braat *et al.*, 1989). Extensive drainage of agricultural land and extraction of groundwater caused a structural lowering of the phreatic groundwater level and a decreasing influence of upward seepage in the root zone of the soil, with negative consequences for most groundwater-dependent ecosystems. However, existing information on current water table depths and changes in water table depths causing desiccation is insufficient and outdated. For policy evaluation, spatially explicit and detailed information on water table depths is required, in particular for nature reserves with groundwater-dependent vegetation types.

The aim of this study is to map the seasonal fluctuation of water table depths in Dutch nature reserves based on observations of water table depths recorded between 1980 and 2007. The seasonal fluctuation of water table depth is traditionally mapped using the mean highest (MHW), mean lowest (MLW) and mean spring (MSW) water table depth and are collectively referred to as MxW. The accuracy of the produced MxW maps is quantified and depends on number of available observations in the vicinity. The value of the produced MxW maps depends on their accuracy. The quantified accuracy is used to indicate where additional observations on water table depth are required and to illustrate which decisions are possible based on the current accuracy.

This study utilizes a combination of various data sources consisting of observations of the MxW that are digitally available combined with exhaustive auxiliary information to support mapping. Three types of MxW observations are used for mapping: (i) estimates based on measurements of water table depth in a borehole (ii) estimates from soil profile descriptions collected during a soil survey (iii) estimates based on measurements of water table depth in a monitoring well.

The MxW estimates derived from different observation types show high correlations. However, the MHW and MSW estimates based on measurements of water table depth in boreholes and monitoring wells are systematically drier than estimates from soil profile descriptions. Because these three types of MxW estimates are used together an adjustment is required to make observations comparable. Without this adjustment a shift in the assessment method could be falsely interpreted as a non-existent change in the MxW. The profile estimates are adjusted to match estimates based on measurements of water table depth and vice versa. After these adjustments MxW maps are made according to both estimation methods.

A total of 39,034 MxW observations within the Dutch nature reserves are used for mapping. Most of these observations are recorded between 1981 and 2000 on the sandy soils. To map the estimated MxW an interpolation from observation locations to non-visited sites is required. The accuracy of these maps can be increased if exhaustive auxiliary information is also used in the mapping process. Using linear regression MSW estimates at observation location are linked to exhaustive auxiliary information and the observation year. Change in time may be estimated simultaneously with spatial patterns. These spatial and temporal relationships are

described with linear regression models. Based on the fitted regression models, exhaustive predictions of the MxW in nature reserves for different times are made

The differences between the predictions of MxW from the regression model and the observed MxW are called residues. Usually the residues show some spatial and temporal correlation. Because the regression model does not account for all spatial and temporal patterns in the MxW. In the following geostatistical interpolation of the residues the accuracy it is important to take into account the spatial and temporal correlation of the residues. The final maps with MxW predictions are made in two steps. First the prediction of MxW in a particular year and for each 25x25 m grid cell are made, using regression. The second step is to add an interpolated residue for each 25x25 m grid cell to the regression prediction from the first step. The total number of MxW maps adds up to twelve: three parameters, MHW, MSW and MLW, two observation types, from profile descriptions and from measured water table depth and for all combinations both the prediction and the accuracy are mapped.

The advantage of spatial statistics is not only insight in the predicted MxW or change therein, but also in the quantified accuracy of these predictions. The accuracy of MxW predictions on the maps varies greatly in space and time. Predictions near observation sites where observations are from shortly before or after the year of prediction are relatively accurate with a prediction error of about 8 cm. For the total area (5344 km²) of nature reserves less than 1% of the area has a prediction accuracy better than 20 cm. In areas with groundwater-dependent vegetation the required prediction accuracy should be better than 10 cm to assess the suitability of the location for the target vegetation type.

Based on the predicted MSW per 25x25-meter cell a comparison between the target MSW for a vegetation type and the predicted MSW is made. The area with groundwater-dependent vegetation types where, with a certainty of more than 0.9, the predicted MSW is drier than the target MSW is assessed for the Netherlands. According to the profile estimates some 55% of the area, and according to the borehole measurements some 70% of the area has a MSW drier than the target MSW. These areas are referred to as desiccated because almost certainly the target vegetation type will not be realized, due to the MSW. MxW changes are minor and no systematic increase or decrease of the desiccated area is apparent since 1985. The expected effect of remediation measures, an increase of the area where the water table depth is sufficiently shallow is not apparent.

The MSW estimated from profile descriptions is on average 45 cm drier than the target MSW. The MSW estimated by measured water table depth in a borehole or monitoring well is on average 62 cm drier than the target MSW. This exceedance of the target MSW remains nearly unchanged for five, five year periods between 1983 and 2007. The expected effect of remediation measures, a decrease of the water table depth is not apparent.

For the areas with groundwater-dependant vegetation types in the Netherlands the most accurate estimate of the MxW can be made for the period 1988-1992. In the final period, 2003-2007, MxW predictions are less accurate due to the small number of recent observations. Accurate updates of the current maps are only possible if the measurement effort will be enhanced. A large number of carefully localized water level observations are necessary in the future if more accurate MxW maps for specific areas are required. If the observed decrease in the number of observations since 1995 continues, the maps of the current situation or future situations will be less accurate. An extensive groundwater monitoring network especially in areas where groundwater-dependent nature is planned is required to monitor if water level targets are met.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

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

Om verdroging in beeld te brengen is, naast informatie over hydrologische randvoorwaarden voor natuur, informatie nodig over grondwaterstand, kwel en kwaliteit van ingelaten water. In dit rapport wordt een methode beschreven waarmee, uitgaande van bestaande metingen, een landelijke kaart van de gemiddelde grondwaterstand gemaakt kan worden. Uitgangspunt daarbij is de definitie van verdroging uit de vierde Nota Waterhuishouding (Braat *et al.* 1989): “Een gebied wordt als verdroogd aangemerkt als aan dat gebied een natuurfunctie is toegekend en de grondwaterstand in het gebied onvoldoende hoog is dan wel de kwel onvoldoende sterk om bescherming van de karakteristieke grondwater-afhankelijke ecologische waarden, waarop functietoekenning is gebaseerd, in dat gebied te garanderen. Een gebied met een natuurfunctie wordt ook als verdroogd aangemerkt als ter compensatie van een te lage grondwaterstand water van onvoldoende kwaliteit moet worden aangevoerd.” Gezien recente doelendocumenten (Ministerie van LNV, 2006) is de focus gericht op natuurgebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen in de Ecologische Hoofdstructuur (EHS) en Natura 2000-gebieden.

1.2 Doelstelling

Doel van deze studie is de grondwatersituatie in natuurgebieden met grondwaterafhankelijke natuur(doelen) in kaart te brengen, de nauwkeurigheid van de kaart te kwantificeren en aanbevelingen te doen om de nauwkeurigheid eventueel te vergroten. Het gaat om kaarten van zowel de actuele situatie als van de situatie in het recente verleden. In dit onderzoek wordt de grondwatersituatie gekarakteriseerd met de parameters waarmee meestal het grondwaterstandsverloop wordt beschreven: de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG), de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG), samen GxG genoemd. Voor een definitie van de GxG verwijzen wij naar Van der Sluijs (1990; zie ook Bijlage 1). Tevens wordt de nauwkeurigheid van de vervaardigde GxG-kaarten gekwantificeerd. Omdat de nauwkeurigheid afhangt van de beschikbaarheid van bruikbare (meet)gegevens zal deze variëren in ruimte en tijd. Omdat de bruikbaarheid van de GxG-kaart mede afhankelijk is van de nauwkeurigheid kan worden aangegeven waar aanvullende gegevens over de grondwatersituatie nodig zijn om bruikbare kaarten te genereren.

1.3 Onderzoeksvragen

De volgende onderzoeksvragen zijn van belang:

- Welke (meet)gegevens van de grondwaterstand in natuurgebieden sinds 1950 zijn digitaal beschikbaar?
- Welke betrouwbaarheid hebben de verschillende soorten grondwatergegevens?
- Zijn gegevens vergelijkbaar, en zo niet, kunnen ze vergelijkbaar worden gemaakt om te worden gecombineerd?
- Kan de betrouwbaarheid van verschillende soorten grondwatergegevens worden gekwantificeerd en is de betrouwbaarheid toereikend voor het schatten van veranderingen?
- Kan een methodiek worden ontwikkeld om met grondwatergegevens van verschillende ouderdom en betrouwbaarheid gebiedsdekkend kaarten te maken van de grondwatersituatie sinds 1985?
- Welke betrouwbaarheid van uitspraken is haalbaar voor verschillende gebieden en perioden?
- Welke uitspraken over grondwaterstandsverandering in gebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen zijn mogelijk?

1.4 Opbouw

In hoofdstuk 2 bespreken we de gebruikte gegevens en gehanteerde werkwijze. We gaan in op de verschillende soorten waarnemingen van de grondwaterstand en de manier waarop deze waarnemingen vergelijkbaar zijn gemaakt. Daarnaast beschrijven we hoe de waarnemingen gebruikt worden om voor de natuurgebieden gebiedsdekkend de grondwatersituatie te karteren.

In hoofdstuk 3 worden de resultaten besproken. De gebiedsdekkende kaarten met GxG-voorspellingen en de betrouwbaarheid van deze voorspellingen, volgens twee bepalingmethoden worden gepresenteerd.

In hoofdstuk 4 worden een aantal toepassingsmogelijkheden van de ontwikkelde methodiek en de gevonden resultaten besproken. Het gaat daarbij om de betrouwbaarheid van uitspraken over een specifiek gebied en periode, en over het vaststellen van trends in de GxG. In dit hoofdstuk worden ook de bevindingen gemeld over de verschillen tussen de voorspelde GVG en de GVG die voor natuur gewenst is. Ook wordt besproken in hoeverre de gegevens gebruikt kunnen worden voor de optimalisatie van een grondwatermeetnet.

In hoofdstuk 5 presenteren we de conclusies over zowel de resultaten als de methoden. Ter afsluiting volgt een aantal aanbevelingen.

Bijlage 1 bevat een overzicht van veelgebruikte termen en definities. Bijlage 2 en 3 geven een nadere detaillering van berekeningen en analyses.

2 Gegevens en werkwijze

In dit onderzoek worden bestaande (meet)gegevens van de GHG, GVG en GLG die digitaal beschikbaar zijn gecombineerd met hulpinformatie om in natuurgebieden de grondwatersituatie te karteren. Wij richten ons hierbij op natuurgebieden zoals weergegeven in de landelijke natuurdoeltypenkaart (Lammers *et al.*, 2005), en beperken ons tot de natuurgebieden die al als zodanig beheerd worden en momenteel geen agrarische hoofdfunctie hebben.

Van Kekem *et al.* (2005) gebruikten ook metingen van de grondwatersituatie in agrarisch gebied om in de grondwatersituatie te karteren. Dat leverde voor natuurgebieden vaak een te droge schatting op. Daarom gebruikten wij alleen opnames van de GxG die ook ten tijde van de opname al in natuurgebied lagen.

Om de grondwatersituatie in natuurgebieden te beschrijven is allereerst inzicht nodig in de kwaliteit en bruikbaarheid van verschillende typen grondwatergegevens. De gegevens beschrijven we in paragraaf 2.1. Paragraaf 2.2 gaat in op de in dit project bijeengebrachte gegevens en vervolgt met een beschrijving van de uiteindelijk geselecteerde meetpunten. Vervolgens zijn methoden ontwikkeld om de verschillende soorten grondwatergegevens te combineren, en om kaartbeelden te genereren waarbij ook de betrouwbaarheid gekwantificeerd wordt. Deze werkwijze beschrijven we in paragraaf 2.3.

2.1 Beschikbare meetgegevens van de grondwaterstand

In deze studie worden voor het karteren van de grondwatersituatie drie soorten waarnemingen van de gemiddeld hoogste- (GHG), de gemiddeld laagste- (GLG) en de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG) gebruikt:

- schattingen in peilbuizen (par. 2.1.1).
- schattingen uit gerichte opnames (par. 2.1.2);
- veldschattingen en (par. 2.1.3);

We zullen veldschattingen en gerichte opnames in dit rapport betitelen als waarnemingen, ook al zijn we er ons van bewust dat het feitelijk slechts schattingen van de werkelijke GxG zijn. De gerichte opnames zijn in eerdere studies verricht en hiervoor zijn destijds ook peilbuisgegevens gebruikt. In de volgende subparagrafen worden de verschillende schattingsmethoden voor de GxG besproken. Paragraaf 2.1.4 geeft de relatie weer tussen verschillende gegevens.

2.1.1 Schattingen in peilbuizen

De eerste systematische metingen in peilbuizen dateren van omstreeks 1953. Gegevens over de jaren daarvoor zijn nauwelijks beschikbaar. Een groot deel van de peilbuizen is inmiddels opgeheven of is verplaatst. Ook zijn nieuwe meetpunten in de loop der jaren aan het net toegevoegd. De meetperioden variëren daardoor in lengte en hebben ook niet steeds betrekking op dezelfde periode. Het aantal aaneengesloten jaren met meetgegevens van de grondwaterstand in een peilbuis is gewoonlijk klein. Als gevolg van de beperkte duur van de meetperiode is de berekende GxG niet meer dan een benadering van de werkelijke, maar onbekende GxG. De betrouwbaarheid van deze berekende GxG is niet voor alle meetpunten gelijk. Tot 1995 werden grondwaterstanden merendeels handmatig gemeten gebruik makend

van een meetlint met klokje (figuur 1) tegenwoordig wordt vaak een datarecorder gekoppeld aan meetinstrument gebruikt.

In de beginperiode van het gebruik van grondwatertrappen stonden meetreeksen van hooguit acht jaar ter beschikking. Deze periode werd toen voor de berekening van de GxG als voldoende beschouwd, omdat een langere periode nog slechts een geringe verandering in de berekende waarde te zien gaf. De betrouwbaarheid hangt af van de lengte van de meetperiode en van de variatie in het gemiddelde van de drie hoogste standen in een hydrologisch jaar (HG3) of de drie laagste standen (LG3). Door verschillen in bergingsvermogen en verschillen in ontwaterings- en afwateringstoestand is deze variatie niet voor alle meetpunten gelijk.



Figuur 1 Opname van de grondwaterstand in een peilbuis gebruik makend van een meetlint met klokje

De grondwaterstandsreeksen komen uit de OLGA-databank van TNO-NITG (Van Bracht, 1988). Vanaf 1 januari 2001 heet deze databank DINO. Het DINO-systeem bevat ook grondwaterstanden die zijn verzameld in de terreinen van het Staatsbosbeheer, de Unie van Landschappen en Natuurmonumenten.

De GxG's in peilbuizen worden berekend voor een aaneengesloten periode van tenminste acht jaar waarin minimaal 18 waarnemingen per hydrologisch jaar beschikbaar zijn. Per hydrologisch jaar worden de HG3 en LG3 berekend door middeling van respectievelijk de drie hoogste en de drie laagste gemeten grondwaterstanden. De HG3 en LG3 waarden worden vervolgens voor een aangesloten periode van acht jaar gemiddeld om tot een schatting van GHG en GLG te komen. De GVG wordt in DINO niet berekend.

De DINO-peilbuizen die worden beheerd door de natuurorganisaties Staatsbosbeheer en Natuurmonumenten zijn geselecteerd om zodoende de selectie te beperken tot alleen de peilbuizen in natuurterreinen. Het gaat om peilbuizen met een filter ondieper dan 5 meter waar in de periode 1990-2005 om de 14 dagen grondwaterstanden zijn gemeten. Voor deze peilbuizen zijn met het DINO-systeem GxG-schattingen berekend op basis van de gemeten grondwaterstanden in de DINO database. DINO hanteert dezelfde definities van GxG, alleen wordt in de berekeningswijzen GxG berekend over de meest recente aaneengesloten periode van acht jaar. Uit onderzoek door Van der Gaast & Massop (2005) kwam naar voren dat GxG-

bepalingen in peilbuizen met diepe filters een te lage GxG-schatting kunnen opleveren, waarschijnlijk veroorzaakt door stagnatie van grondwater in het bodemprofiel. Daarom zijn in deze studie voor alle buizen uit de selectie eerst GxG-schattingen berekend en zijn in de verder analyses alleen de peilbuizen gebruikt met een GHG-schatting van minder dan 200 cm boven de top van het filter.

2.1.2 Schattingen uit gerichte opnamen

De tekst in deze paragraaf over gerichte opnamen is grotendeels overgenomen uit hoofdstuk 3 van De Gruijter *et al.* (2003) waarin de gebruikte methoden bij de Gd-kartering (Van Kekem *et al.*, 2004) zijn gerapporteerd.

Bij de Gd-kartering is op twee momenten de grondwaterstand gemeten in een groot aantal boorgaten. Omdat zowel de tijdstippen als de locaties van de waarnemingen vooraf worden bepaald, spreken we van 'gerichte opnamen'. Er wordt eenmaal in de winter gemeten, als de grondwaterstand zich rond het GHG-niveau bevindt, en eenmaal in de zomer, als de grondwaterstand zich rond het GLG-niveau bevindt. In regenperiodes wordt niet gemeten, omdat dan de diepte van het freatisch vlak te veel varieert. Tijdens het veldwerk worden boorgaten gemaakt tot ongeveer 10 cm onder het grondwatervniveau. Na een instelperiode (1-2 dagen) wordt de grondwaterstand in de boorgaten gemeten. Grondwaterstanden in boorgaten zijn net als in peilbuizen handmatig gemeten gebruik makend van een meetlint met klokje zoals getoond in Figuur 1.

Op de tijdstippen van de gerichte opnames worden ook grondwaterstanden gemeten in de peilbuizen waarvoor de klimaatrepresentatieve GxG is geschat. Voor de berekening van klimaatrepresentatieve GxG voor peilbuizen worden tijdreeksmodellen gebruikt die de samenhang tussen het neerslagoverschot en de grondwaterstand beschrijven. Dit is nodig omdat maar zelden gedurende dertig jaar grondwaterstanden worden gemeten op één locatie, zonder dat het hydrologische regime in die periode wijzigt door ingrepen in de waterhuishouding. De tijdreeksmodellen worden vervolgens gebruikt om op basis van reeksen van neerslagoverschotten die door het KNMI gedurende tenminste dertig jaar zijn verzameld grondwaterstandsreeksen te simuleren. Uit deze gesimuleerde grondwaterstandsreeksen van dertig jaar is de klimaatrepresentatieve GxG geschat (Knotters en Van Walsum, 1994).

De gebruikte peilbuizen (De Gruijter *et al.*, 2003; Van Kekem *et al.*, 2005) liggen idealiter in de directe omgeving van de meetpunten voor de gerichte opnames, en vertegenwoordigen samen alle grondwatertrappen. In de praktijk worden er op één meetdag in uitgestrekte gebieden metingen verricht, en liggen de peilbuizen die samen alle grondwatertrappen vertegenwoordigen ook over een groot gebied verspreid.

Het aantal peilbuizen waarin per meetdag wordt gemeten, varieert tussen de vijftien en de vijftientig. Dit is voldoende om voor elke meetdag een regressiemodel op te stellen dat de relatie beschrijft tussen de grondwaterstanden die op de punten van de gerichte opname zijn waargenomen en de GxG's die voor de peilbuislocaties zijn geschat. Het regressiemodel beschrijft het lineaire verband tussen de GxG en de grondwaterstand die is waargenomen met de betreffende gerichte opname.

Met het regressiemodel wordt de GxG voorspeld voor de locaties van de gerichte opnames, uit grondwaterstandsmetingen die tijdens de gerichte opname zijn verricht. Tevens worden de standaardfouten van deze voorspellingen berekend (De Gruijter *et al.*, 2003).

2.1.3 Veldschattingen

Onderstaande tekst over de gevolgde werkwijze bij veldschattingen is grotendeels overgenomen uit hoofdstuk 2 van de Handleiding bodemgeografisch onderzoek, Deel B: Grondwater, (Ten Cate *et al.*; 1995).

Als grondwatertrappen gelijktijdig met de opname van de bodemgesteldheid in het veld worden gekarteerd, spreken we van veldschattingen van de GHG en de GLG. Veldschattingen zijn gebaseerd op profiel- en veldkenmerken. Profielkenmerken hangen samen met de grondwaterstandsfluctuatie. Veldkenmerken geven de invloed aan van de grondwaterstandsfluctuatie op het terrein. De werkwijze voor veldschattingen van de GHG en GLG uit landschapelijke kenmerken en profielkenmerken beschreven op basis van een grondboring wordt geïllustreerd in Figuur 2.

Voor de fluctuatie van de grondwaterstand zijn in een bodemprofiel drie zones te onderscheiden:

- de zone boven de hoogste grondwaterstand, waarin door voldoende aëratie nauwelijks of geen reductieprocessen optreden. In gronden met grondwaterstanden tot in het maaiveld is deze afwezig;
- de zone waarin de grondwaterstand fluctueert. In deze zone met afwisselend oxidatie- en reductieprocessen ontstaan door herverdeling van bepaalde verbindingen (o.a. van ijzer) roest- en/of reductievlekken. In ijzerhoudende gronden zijn dit de klassieke gleykenmerken, in ijzerloze gronden de blekingsvlekken (kleurschifting). Het GHG-niveau bevindt zich in deze zone, veelal in het bovenste gedeelte;
- de zone beneden de diepste grondwaterstand, waarin door permanente verzadiging met water geen oxidatieprocessen optreden (Cr-horizont). De bovenzijde van deze zone correspondeert ruwweg met het GLG-niveau. Bij profielen met een grote capillaire opstijging kan de GLG zich zelfs dieper dan de bovenkant van de gereduceerde zone bevinden.

Voor het gebruik van gleyverschijnselen en blekingsvlekken om de GHG in het veld te schatten, is geen landelijk geldende morfometrische beschrijving te geven. Hun verschijningsvorm is te zeer afhankelijk van het moedermateriaal waarin ze zijn gevormd, en slechts een deel van deze verschijnselen heeft betrekking op het actuele grondwaterstandsverloop. De grondwaterstand is in grote delen van Nederland verlaagd door ingrepen in de ontwatering en afwatering. Profielkenmerken die bij het vroegere grondwaterregime behoren en dus fossiel zijn, laten zich vaak niet gemakkelijk van actuele kenmerken onderscheiden.

Binnen de zone met gleyverschijnselen en blekingsvlekken dient met name aandacht te worden besteed aan veranderingen van reductie- en blekingsvlekken met de diepte. De veranderingen kunnen betrekking hebben op het aantal vlekken, hun grootte, begrenzing (scherp of diffuus), kleur en kleurcontrast met de matrix. Een praktische methode om dergelijke verschillen te herkennen bestaat uit vergelijking van een brok grond uit het onderste gedeelte van de fluctuatietoneel met brokken grond uit steeds hoger gelegen gedeeltes. Uitvoering van deze vergelijking op punten waarop we ook over een berekende schatting van de GHG beschikken, maakt het mogelijk bepaalde 'gley- en blekingsbeelden' te vertalen in een GHG-niveau. Het 'gley- en blekingsbeeld' stelt de onderzoeker in staat binnen de fluctuatietoneel van de grondwaterstand een herkenbaar referentieniveau vast te stellen. Dit niveau kan, maar hoeft niet samen te vallen met het GHG-niveau.



Figuur 2 Veldschatting van de GxG uit landschappelijke kenmerken (boven) en profielkenmerken in een profielkuil (links onder) en uit een boring (rechts onder)

De veldschatting van de GLG geeft gewoonlijk minder problemen dan die van de GHG. Het voornaamste profielkenmerk is de begindiepte van de Cr-horizont. Ook voor het GLG-niveau geldt dat dit niet steeds met de bovengrens van de Cr-horizont samenvalt. De grootte van de noodzakelijke correctie kan worden gevonden door profielstudie bij stambuizen.

Andere profielkenmerken die medebepalend zijn voor de veldschatting van de GHG en GLG zijn:

- de aard en samenstelling van het moedermateriaal. Behalve de grondwaterstandsdiepte zijn de capillaire eigenschappen van de ondergrond mede bepalend voor het niveau tot waar oxidatie- en/of reductieprocessen kunnen optreden. De capillaire eigenschappen zijn afhankelijk van de korrelgrootteverdeling en van de dichtheid van het moedermateriaal. De dichtheid beïnvloedt mede het waterbergend vermogen en daarmee de fluctuatie van de grondwaterstand;
- het vochtgehalte en de grondwaterstand. Het vochtgehalte en het verloop hiervan met de diepte tijdens het bodemgeografisch onderzoek geven een aanwijzing over de

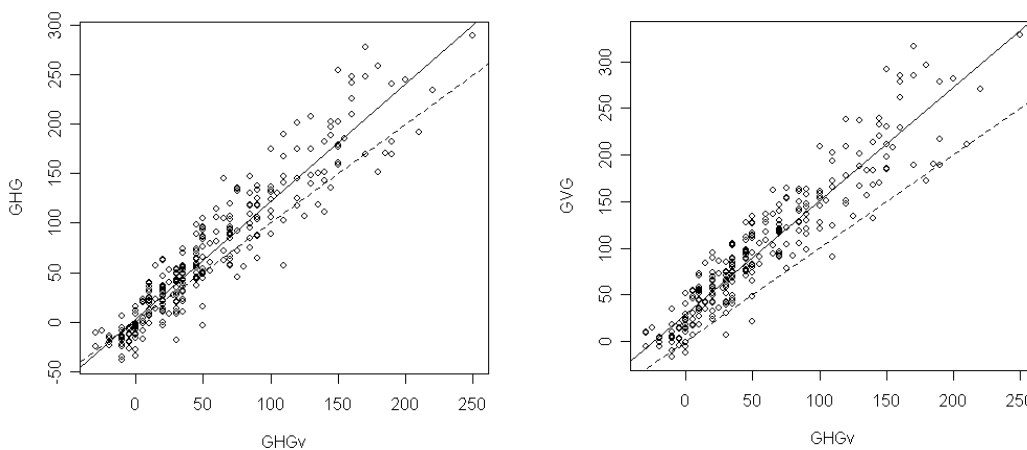
grondwatertrap. Hierbij wordt rekening gehouden met het seizoen, de weersgesteldheid, het gewas, de capillaire eigenschappen en de diepte waarop vrij water of knijpvocht voorkomt. Eveneens is in de veldschatting te betrekken de hoogte van de grondwaterstand in stambuizen ten opzichte van de GHG of GLG en ten opzichte van de grenzen waarbinnen 80% van de gemeten grondwaterstanden valt.

Naast profielkenmerken wordt bij de veldschatting van de GHG en GLG ook op veldkenmerken gelet. Veldkenmerken zijn onder andere te ontleen aan de fysieke geografie van het gebied (landschap, reliëf, dichtheid van het afwaterings- en ontwateringsstelsel, slotwaterstand, begreppeling, buisdrainage- en bodemgebruik) alsmede aan de vegetatie (vocht- en droogte-indicatoren). De veldkenmerken worden tevens gebruikt om de begrenzing van een gebied met eenzelfde grondwatertrap vast te stellen.

2.1.4 Samenhang tussen verschillende soorten GxG-schattingen

Finke *et al.* (1996) vergeleken veldschattingen van de GxG met schattingen op basis van gerichte opnamen, voor dezelfde locaties. De vergelijking betrof merendeels agrarisch gebied in de kaartbladen 16 Oost en 17 West in Drenthe. Dit onderzoek toonde aan dat beide schattingen onderling goed correleren, maar dat wel systematische verschillen tussen beide methoden optraden in de geschatte GxG. De verklaarde variantie van deze regressie was relatief laag, waardoor bij de omrekening van veldschatting naar gerichte opname aanzienlijke voorspelfouten voor de GHG en GLG optraden.

Van Delft *et al.* (2002) vergeleken bij de kartering van de natuurgebieden Beekvliet in de Achterhoek en de Strijper-Aa in Noord-Brabant, voor 287 locaties veldschattingen van de GxG met schattingen die op basis van gerichte opnames zijn gemaakt (Figuur 3).



Figuur 3 Veldschattingen van GHG (links) en GVG (rechts) in cm onder maaiveld uitgezet tegen gerichte opname schattingen. Doorgetrokken lijn is de regressielijn, de onderbroken lijn de 1:1 lijn.

Uit deze vergelijking van GxG-schattingen volgens verschillende methoden blijkt dat schattingen onderling sterk correleren. De GHG-schattingen op basis van gerichte opnames blijken echter systematisch groter ('droger') te zijn dan de veldschattingen. Als de veldschatting van de GHG 100 cm is, dan is de schatting op basis van de gerichte opname circa 120 cm. Voor de GLG bleek het verschil tussen de beide schattingsmethoden gering.

Omdat in dit onderzoek beide soorten GxG-schattingen gebruikt worden, en omdat van de periode vóór 1991 alleen veldschattingen beschikbaar zijn, is het noodzakelijk een correctie voor de schattingsmethode uit te voeren. Anders zou een verandering van de GxG in de tijd veroorzaakt door een verandering van schattingsmethode abusievelijk kunnen worden geïnterpreteerd als een daadwerkelijke verandering van de GxG.

Omdat niet objectief kan worden vastgesteld of een veldschatting van de GxG beter of slechter is dan een schatting op basis van gerichte opnamen worden beide schattingsmethoden gebruikt om de gemiddelde grondwaterstanden te karteren. Daarbij worden veldschattingen gecorrigeerd tot schattingen volgens gerichte opnamen, maar worden ook schattingen uit gerichte opnamen gecorrigeerd tot veldschattingen. Omdat het doel is kaarten te maken volgens beide schattingsmethoden, is een omrekening van de ene naar de andere methode met behulp van lineaire regressie gemaakt. Uiteindelijk worden kaartbeelden van de GxG gemaakt volgens beide bepalingmethoden. De regressievergelijkingen die we hanteren bij deze omrekening staan in Bijlage 2. Als niet een omrekening maar het schatten van de werkelijke maar onbekende GxG het doel was geweest, had het gebruik van orthogonale regressie wellicht voor de hand gelegen.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat bovenstaande correcties landelijk worden toegepast terwijl ze zijn afgeleid voor twee specifieke natuurterreinen: de natuurterreinen Beekvliet en Strijper-Aa in respectievelijk het oostelijk en zuidelijk zandgebied. Gebruik van de correcties voor ander gebieden is acceptabel omdat deze twee gebieden een diversiteit kennen aan soorten zandgronden, waaronder bodemtypes met beekafzettingen en leemlagen in het profiel. Veengronden en kleigronden komen in beide gebieden echter niet voor. Toch zijn de relaties zoals weergegeven in Figuur 1 en Bijlage 2 ook gebruikt voor deze bodemtypes, omdat nauwelijks andere gegevens voor veen- en kleigebieden voorhanden zijn. Finke *et al.* (1996) vergeleken ook voor veenbodems en bodems met keileem veldschattingen van de GxG vergeleken met waarnemingen op basis van gerichte opnamen. De vergelijking betrof merendeels agrarisch gebied in de kaartbladen 16 Oost en 17 West in Drenthe. Deze vergelijking leverde vergelijkbare maar minder betrouwbare resultaten vanwege een grote spreiding.

2.2 Gebruikte gegevens

In deze studie wordt gebruik gemaakt van GxG-schattingen op opnamelocaties die voor eerder onderzoek of voor bodem- en Gt-karteringen zijn verricht. Alleen GxG-schattingen die digitaal beschikbaar zijn worden hier gebruikt. Gegevens uit onderzoek en karteringen van vóór 1985 zijn zelden digitaal opgeslagen en daarom nauwelijks gebruikt.

Voor ruilverkavelingen en bodemgeschiktheidsbeoordeling zijn door Alterra en haar voorlopers, Staring Centrum en Stiboka, diverse karteringen uitgevoerd. Deze karteringen vonden merendeels in het agrarisch gebied plaats. De laatste tijd wordt er steeds vaker in natuurgebieden gekarteerd. GxG-schattingen voor detailkarteringen zijn op 14 augustus 2007 opgevraagd uit het BOPAK-systeem (Stolp *et al.*, 1995) van Alterra. Het gaat om 267.689 GxG-opnamen waarvan het merendeel in agrarisch gebied ligt. Daarnaast zijn 3.311 GxG-schattingen gebruikt die niet in het BOPAK zijn opgenomen maar wel voor detailkarteringen zijn verzameld. Voor alle profielbeschrijvingen uit de detailkarteringen is de locatie, het opnamejaar en het landgebruik ten tijde van de opname geregistreerd.

Profielbeschrijvingen en meetgegevens uit diverse onderzoeksprojecten bij Alterra en haar voorgangers zijn opgeslagen in het BIS, Bodemkundig Informatie Systeem (Van der Pouw and Finke, 1999). Voor alle gegevens is de exacte locatie en het opnamejaar in BIS geregistreerd

en meestal ook het landgebruik op de opnamelocatie ten tijde van de opname. Voor kartering van de bosreservaten zijn GxG-opnames in ongeveer 60 bosreservaten uitgevoerd. Deze gegevens zijn ook in het BIS opgeslagen.

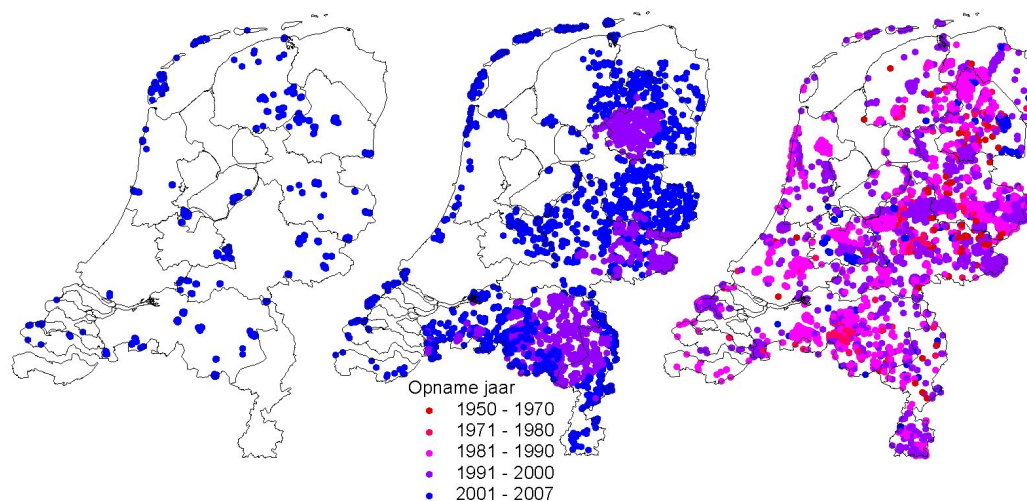
Op 3 mei 2007 zijn in totaal 17.837 GxG-schattingen voor opnamelocaties in bos en natuurterreinen uit het BIS opgevraagd. Daarnaast zijn 3.905 GxG-schattingen voor opnamelocaties in grasland uit BIS opgevraagd, omdat grasland ook natuurlijk grasland in natuurterreinen omvat. Verder zijn in totaal 19.263 GxG-schattingen gedaan voor de Gd-kartering (Van Kekem *et al.*, 2005) gebruikt. Het merendeel daarvan ligt in agrarisch gebied. Bij de Gd-kartering is geen opname van het landgebruik gemaakt. Wel is het opnametijdstip geregistreerd. Ten slotte zijn uit de karteringen van de natuurgebieden Beekvliet en Strijper-Aa (Van Delft *et al.*, 2002, 2003) in totaal 287 GxG-schattingen overgenomen.

Uit DINO zijn GxG-schattingen opgevraagd voor 770 peilbuizen die Staatsbosbeheer en Natuurmonumenten beheren. Deze peilbuizen liggen allemaal in natuurterreinen. Er zijn meer DINO-peilbuizen die in natuurterreinen liggen, maar het bleek praktisch niet haalbaar de gegevens hiervan uit DINO op te vragen (zie paragraaf 2.1.1.)

Alle bovengenoemde opnamelocaties met een GxG-schatting zijn samengevoegd in één bestand. De locaties van GxG-schattingen zijn vervolgens met de kaart van natuurgebieden volgens Reijnen *et al.* (in voorbereiding) gecombineerd en alleen locaties binnen het natuurgebied zijn geselecteerd voor de verdere analyses. In totaal liggen 39.804 waarnemingen binnen de natuurgebieden. Tabel 1 geeft een overzicht van de aantallen waarnemingen per bronbestand vóór en na selectie op ligging in natuurgebied, en van de ouderdom van de opnames. De ruimtelijke configuratie en ouderdom van alle gebruikte opnamelocaties is weergegeven in Figuur 4. De meeste opnames blijken te liggen op de zandgronden van Nederland en vooral tussen 1981 en 2000 opgenomen te zijn. De schattingen van GxG peilbuizen en uit gerichte opnames zijn vooral van de laatste decennia terwijl veldschattingen ook al eerder gemaakt werden.

Tabel 1 Overzicht per bronbestand van het aantal opgevraagde opname locaties, het aantal locaties in de natuurgebieden en de opname periode.

| Bronbestand | Aantal opgevraagd | Landgebruik | Aantal in natuurgebied | Opnameperiode |
|--------------------|--------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------------|
| Bopak | 267.689 | Alle | 16.351 | 1978-2003 |
| Detailkartering | 3.311 | Alle | 1.008 | 2001-2007 |
| BIS | 21.742 | Gras, Bos, natuur | 17.750 | 1953-2004 |
| Gd-kartering | 19.263 | Onbekend | 3.638 | 1991-2004 |
| Natuurkartering | 287 | Natuur | 287 | 2001 |
| DINO | 770 | Natuur | 770 | 2001 - 2007 |
| Totaal | 313.362 | | 39.804 | 1953 - 2007 |



Figuur 4 Ligging en ouderdom van gebruikte GxG-waarnemingen, links peilbuizen in het midden gerichte opnames en rechts veldschattingen.

2.3 Geostatistische interpolatie tot kaartbeelden

2.3.1 Uitgangspunten

In de internationale literatuur worden diverse benaderingen gevolgd om gebiedsdekkende voorspellingen van de grondwaterstand te genereren. Deze benaderingen laat zich splitsen in drie hoofdgroepen:

1. Een hoofdzakelijk geostatistische aanpak waarbij de grondwatersituatie om (meet)locaties reeds gekarakteriseerd is in de gewenste parameter(s) (Finke *et al.*, 2004; Kyriakidis and Journel., 1999).
2. Een aanpak waarin tijdreeksmodellen van de grondwaterstand met geregionaliseerde tijdreeks parameters worden toegepast en gewenste karakteristieken van de grondwatersituatie achteraf kunnen worden bepaald (Knotters and Bierkens., 2001).
3. Een aanpak waarin gebruik wordt gemaakt van een neurale netwerk (Coulibaly *et al.*, 2001) voor voorspellingen van de grondwatersituatie.

Omdat in deze studie gebruik wordt gemaakt van gegevens over de grondwatersituatie die in het verleden zijn verzameld en merendeels reeds in de gewenste parameters zijn opgenomen; namelijk de gemiddelde hoogste- en laagste- grondwaterstanden (GHG en GLG) is hier gebruik gemaakt van de eerst genoemde aanpak. Het gaat hier echter om een geostatistische interpolatie van de grondwatersituatie in zowel ruimte als tijd opdat ook eventuele veranderingen geschat kunnen worden. Vanwege het grootte aantal gebruikte waarnemingslocaties is geen gebruik gemaakt van universal kriging (Goovaerts, 1997) waarbij de schatting van het trendmodel en de interpolatie simultaan wordt uitgevoerd maar is met behulp van lineaire regressie eerst een trendmodel geschat en zijn de residuen van dit regressiemodel geïnterpoleerd met ordinary kriging.

Finke *et al.* (2004) toonden aan dat de betrouwbaarheid van gebiedsdekkende GxG-voorspellingen kan worden vergroot door daarbij gebiedsdekkende hulpinformatie te gebruiken. De mate waarin gebiedsdekkende hulpinformatie bijdraagt aan een nauwkeuriger voorspelling is afhankelijk van de correlatie tussen de GxG-schattingen op de opnamelocaties en de hulpinformatie.

Wij maken in dit onderzoek alleen gebruik van gebiedsdekkend beschikbare digitale hulpinformatie. Een aantal soorten gebiedsdekkende hulpinformatie is overgenomen uit het onderzoek van Finke *et al.* (2004) en een deel betreft nieuwe informatie. Grofweg kunnen twee typen hulpinformatie in kaartvorm worden onderscheiden: discrete hulpinformatie (klassenkaarten), en continue hulpinformatie (kwantitatieve continue kaarten). In dit onderzoek is ook hulpinformatie in een soort tussenvorm gebruikt, namelijk een klassenkaart die binnen kaartvlakken fijner is onderverdeeld om een meer continu kaartbeeld te verkrijgen: de neergeschaalde GxG-kaart (Hoogland en Runhaar, 2006). De volgende gebiedsdekkende bestanden (kaarten) zijn in dit onderzoek beproefd op hun bruikbaarheid als hulpinformatie bij het doen van gebiedsdekkende voorspellingen van de GxG:

- Absolute maaiveldshoogte uit het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN, Finke *et al.*, 2004).
- Relatieve maaiveldshoogte t.o.v. de directe omgeving (Finke *et al.*, 2004).
- Slootdichtheid in de directe omgeving (Finke *et al.*, 2004).
- Sloot- en greppeldichtheid in de directe omgeving (Finke *et al.*, 2004).
- Neergeschaalde GxG-kaarten afgeleid uit de 1:50.000 bodemkaart en het AHN (Hoogland en Runhaar, 2006).
- GxG-kaarten uit het MIPWA-model voor Noord-Nederland (Snepvangers en Berendrecht, 2007).
- Gt-kaart van de 1:50.000 bodemkaart (De Vries *et al.*, 2003).
- Bodemfysische (PAWN-)eenhedenkaart (Wösten *et al.*, 1988).
- Hydrotypenkaart (Massop *et al.*, 1997).

Als test is voor de provincies Groningen, Friesland, Drenthe en Overijssel gebruik gemaakt van gebiedsdekkende modelvoorspellingen van de GHG en GLG volgens MIPWA (Snepvangers en Berendrecht, 2007). Omdat modelvoorspellingen van de GxG nog niet landsdekkend beschikbaar zijn, is de bruikbaarheid van dit type informatie alleen voor Noord-Nederland beproefd. Voordeel van het gebruik van modelresultaten is dat direct wordt aangesloten bij het instrumentarium dat wordt gebruikt voor waterbeheer, en dat daarmee scenario's en maatregelen doorgerekend kunnen worden.

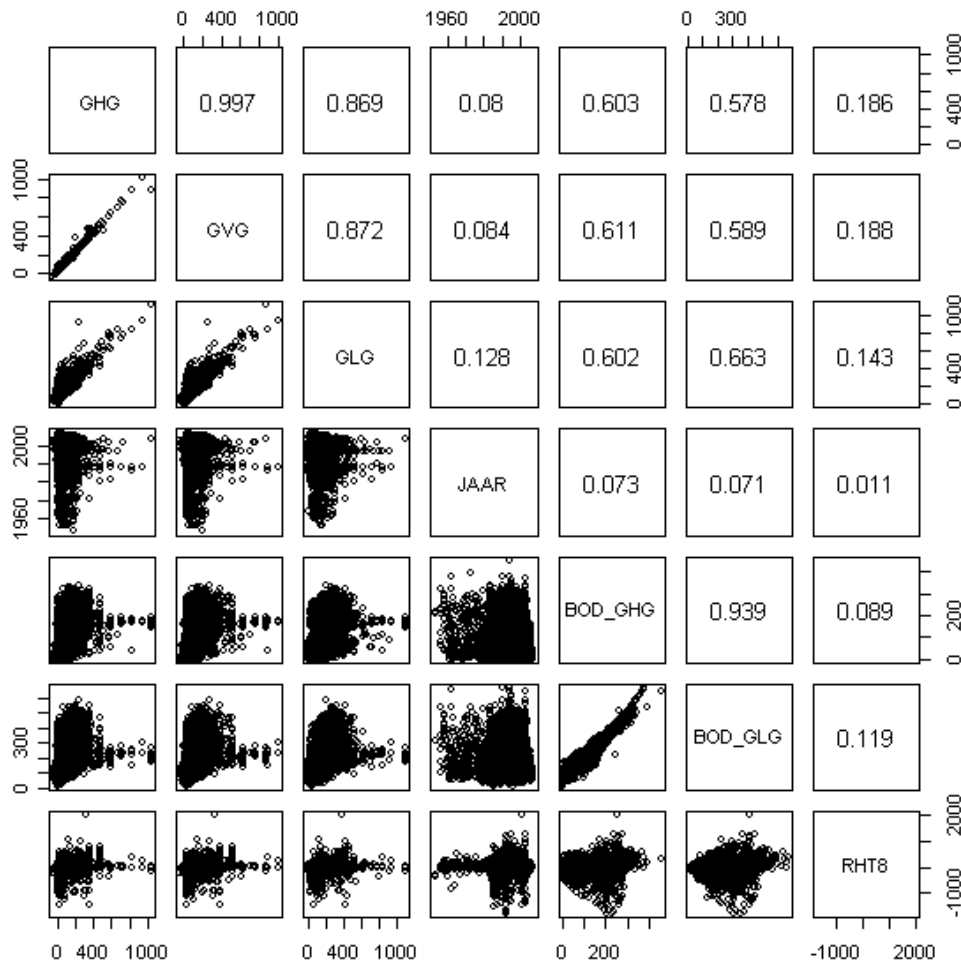
2.3.2 Schatting van ruimtelijke en temporele trends

Met lineaire regressie zijn relaties gelegd tussen puntschattingen van de GxG en vlakdekkende informatie, waarbij ook is gekeken in hoeverre een verandering in de tijd geschat kan worden. Regressie en de hieronder te bespreken interpolatie in ruimte en tijd maakt het niet alleen mogelijk ruimtelijke kaartbeelden te maken maar brengt ook temporele veranderingen in beeld.

Om rekenkundige problemen (multicollineariteit) te voorkomen is het bij regressieanalyse van belang dat de verklarende variabelen onderling niet sterk zijn gecorreleerd. Figuur 5 geeft aan dat tussen de meeste verklarende variabelen inderdaad nauwelijks correlatie bestaat. Elke scatterplot geeft de onderlinge samenhang weer van de variabelen die op de diagonalen zijn genoemd. Een sterke correlatie levert een duidelijk patroon, weinig correlatie een puntenwolk. Opgemerkt wordt dat de correlatiecoëfficiënten gespiegeld zijn in de diagonaal waarin de aanduiding van de variabelen is aangegeven.

Er bleek een sterke correlatie tussen de neergeschaalde GHG en GLG te bestaan. Deze twee verklarende variabelen zijn daarom niet geschikt om gezamenlijk in één regressiemodel te worden opgenomen. Voor de GHG- en GLG-voorspellingen van MIPWA geldt hetzelfde, en daarom bevat ook hier een regressiemodel alleen GHG of GLG, maar nooit beide. De overige variabelen vertonen onderling geen duidelijke correlatie en mogen daarom samen in een regressiemodel voorkomen. Figuur 5 geeft alleen correlaties tussen variabelen weer die in de

landsdekkende regressiemodellen zijn opgenomen; de overige gebiedsdekkende informatie is wel beschouwd bij de modelselectie maar niet gebruikt omdat ze minder nauwkeurige voorspellingen opleverden.



Figuur 5 Matrix van scatterplots en correlaties van de variabelen uit de gebruikte regressiemodellen. GHG, GVG en GLG zijn de afhankelijke variabelen, BOD_GHG en BOD_GLG staan voor respectievelijk de neergeschaalde GHG en GLG afgeleid uit de bodemkaart, RHT8 staat voor de relatieve maaiveldhoogte en JAAR voor het tijdstip van de opname.

Criteria voor de selectie van een specifiek regressiemodel voor voorspellingen zijn de voorspelfout en de significantie van alle regressiecoëfficiënten. Op basis van deze criteria zijn regressiemodellen met maximaal drie predictoren met een minimale voorspelfout geselecteerd. Er is telkens naar modellen met dezelfde predictoren voor zowel GHG, GVG en GLG gezocht om te zorgen voor onderlinge consistentie in GHG-, GVG- en GLG-voorspellingen. Dit resulteerde in een regressiemodel met de volgende vorm:

$$GxG = \beta_0 + \beta_1 * BOD_GxG + \beta_2 * \text{Relatieve hoogte} + \beta_3 * \text{Jaar} + \varepsilon \quad (1)$$

Vergelijking 1 voorspelt de GxG (GHG, GVG of GLG) met: de neergeschaalde GxG uit de 1:50.000 bodemkaart, de relatieve hoogte van de betreffende locatie (heuveltje of laagte) en het jaar waarvoor wordt voorspeld. Hierin zijn β_i de regressiecoëfficiënten en staat ε voor het

residu ofwel het deel van de de GxG dat niet met het model kan worden verklaard. BOD_GXG staat voor de neergeschaalde GHG of GLG (Hoogland en Runhaar, 2006) afgeleid uit de 1:50.000 bodem en Gt-kaart (De Vries *et al.*, 2003). Relatieve hoogte staat voor de relatieve hoogte van een bepaalde locatie ten opzichte van de gemiddelde hoogte in het omliggende gebied binnen een straal van 200 meter. Hieruit is af te leiden of het om lokale lokale laagtes of juist hogere plekken gaat. Jaar staat voor het opnamejaar van een GxG-schatting, de regressiecoëfficiënt hierbij (β_3) geeft aan welke verandering per jaar is opgetreden.

Omdat ter illustratie ook gebiedsdekkende gegevens die alleen in Noord-Nederland beschikbaar zijn worden toegepast, zijn zowel voor de natuurgebieden in Noord-Nederland als landsdekkend regressierelaties gefit. Voor Noord-Nederland is de dataset ingeperkt tot alleen de opamelocaties waarvoor ook MIPWA-modelresultaten beschikbaar zijn. Voor Noord-Nederland is naast het landelijke model met de neergeschaalde GxG uit de bodemkaart ook een model gefit met de GxG volgens MIPWA als predictor.

De coëfficiënten van het regressiemodel voor gerichte-opnameschattingen (GxG_{opn}), voor veldschattingen ($GxGv$), voor Noord-Nederland ($nnGxG$) en voor Noord-Nederland met als predictoren uit het MIPWA-model ($nnGxGm$) staan in Tabel 2. De regressiecoëfficiënten van de genoemde regressiemodellen zijn allen significant. Bij modellen voor Noord-Nederland waarbij MIPWA-resultaten ($nnGxGm$) worden gebruikt staat onder β_1 de coëfficiënt die hoort bij de GxG volgens het MIPWA-model. Voor GHG en GVG voorspellingen zijn de neergeschaalde- of MIPWA-GHG als predictor gebruikt. Voor GLG is de neergeschaalde- of MIPWA-GLG als predictor gebruikt.

Tabel 2 Coëfficiënten van de regressiemodellen met ruimtelijke en temporele trends. De betekenis van de genoemde coëfficiënten staat in de hoofdtekst

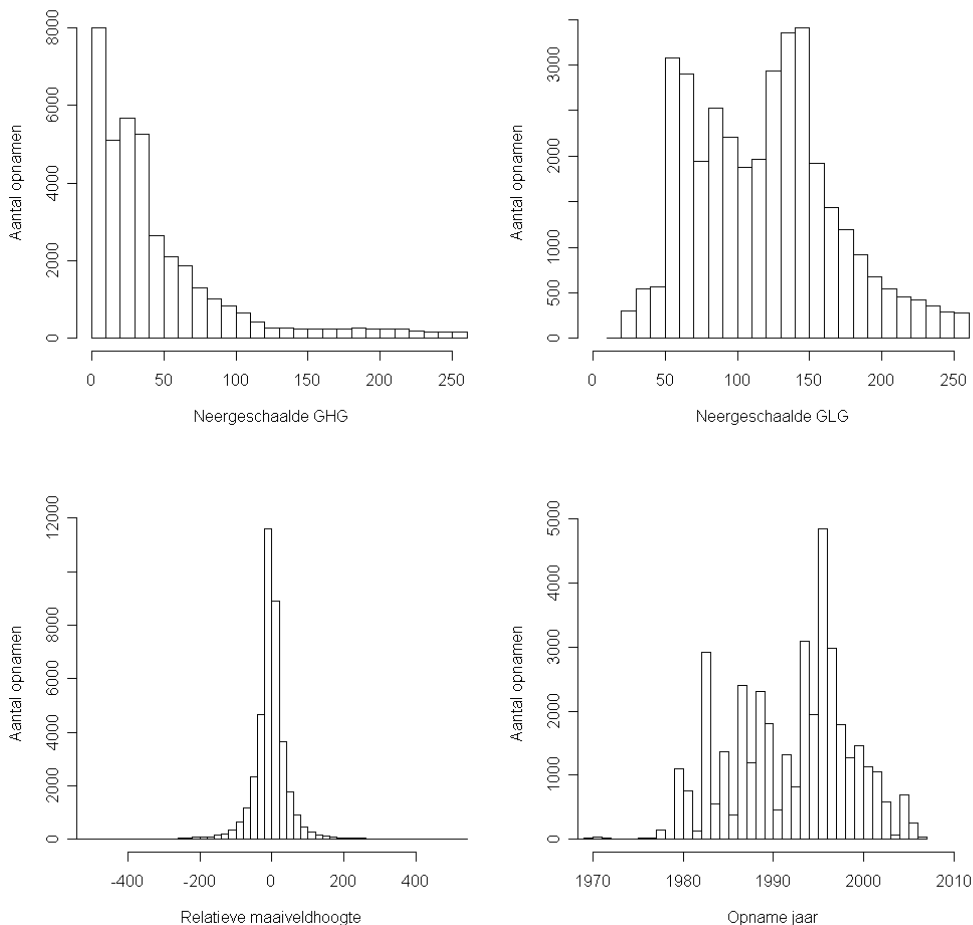
| Parameter | β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | Stdev(ϵ) | R ² |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|----------------|
| GHG _{opn} | -433,1 | 0,754 | 0,145 | 0,229 | 46,69 | 0,391 |
| GVG _{opn} | -464,5 | 0,765 | 0,147 | 0,258 | 46,37 | 0,402 |
| GLG _{opn} | -778,0 | 0,745 | 0,121 | 0,411 | 51,66 | 0,454 |
| GHGv | -328,8 | 0,613 | 0,120 | 0,174 | 37,61 | 0,396 |
| GVGv | -311,8 | 0,704 | 0,127 | 0,174 | 38,57 | 0,414 |
| GLGv | -650,0 | 0,691 | 0,114 | 0,348 | 47,2 | 0,461 |
| nnGHG | -665,6 | 0,759 | 0,250 | 0,345 | 37,88 | 0,449 |
| nnGVG | -853,9 | 0,781 | 0,249 | 0,453 | 38,5 | 0,456 |
| nnGLG | 37,0 | 0,881 | 0,178 | -0,007 | 40,85 | 0,579 |
| nnGHGm | -933,2 | 0,227 | 0,221 | 0,484 | 42,69 | 0,299 |
| nnGVGm | -1127,0 | 0,234 | 0,219 | 0,596 | 43,49 | 0,305 |
| nnGLGm | -1088,0 | 0,419 | 0,081 | 0,577 | 45,18 | 0,485 |

In het regressiemodel is naast een ruimtelijke patroon dus ook een verandering in de tijd (β_3) opgenomen. Voor GHG-schattingen uit gerichte opnamen bedraagt die verandering 0,229 cm/jaar voor GVG, 0,258 cm/jaar en voor GLG 0,411 cm/jaar. De veldschattingen van GxG ($GxGv$) laten kleinere veranderingen zien.

Voor Noord-Nederland blijken de voorspelfouten van de regressie kleiner dan voor heel Nederland. Als in Noord-Nederland de MIPWA-GxG als predictor wordt gebruikt in plaats van de neergeschaalde GxG uit de bodemkaart, wordt de voorspelfout ongeveer 5 cm groter. Dit geeft aan dat de waarnemingen van de grondwaterstand iets beter verklaard kunnen worden met de neergeschaalde bodemkaart dan met het MIPWA-model. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat een fysisch-deterministisch grondwaterstromingsmodel vooral gericht is op de berekening van stijghoogtes. Waarnemingen van de GxG bieden echter vooral informatie over

de vochtvoorziening voor de vegetatie en geven soms ook schijnspiegels weer indien stagnerende lagen aanwezig zijn. Voorspellingen waarbij de MIPWA-GxG in plaats van de neergeschaalde GxG als predictor worden gebruikt zullen dus iets minder nauwkeurig zijn. Modelresultaten van een gedetailleerd ruimtelijk model, zoals MIPWA, blijken bruikbaar voor het genereren van GxG kaarten volgens de hier ontwikkelde methodiek.

Figuur 6 geeft de frequentieverdelingen voor de hulpinformatie die wordt gebruikt in regressiemodellen (Tabel 2). Voor de neergeschaalde GHG valt op dat relatief veel waarden aan het maaiveld voorkomen. Dit komt omdat GHG's boven maaiveld door 0 zijn vervangen, omdat uitspraken over de GHG boven maaiveld niet betrouwbaar geacht werden. Uit de frequentieverdelingen is af te leiden voor welke omstandigheden voorspellingen gedaan kunnen worden zonder dat sprake is van extrapolatie (=voorspellen buiten het bereik waarvoor informatie beschikbaar is). Bijna alle waarnemingen zijn uit de periode 1979-2007 (Figuur 6). Daarom is alleen binnen deze periode een betrouwbare voorspelling met het regressiemodel mogelijk. Voorspellingen voor de natuurgebieden in Nederland, gebruikmakend van de regressiemodellen, zijn verantwoord omdat ze worden gedaan binnen het bereik waarvoor de regressiemodellen zijn afgeleid.



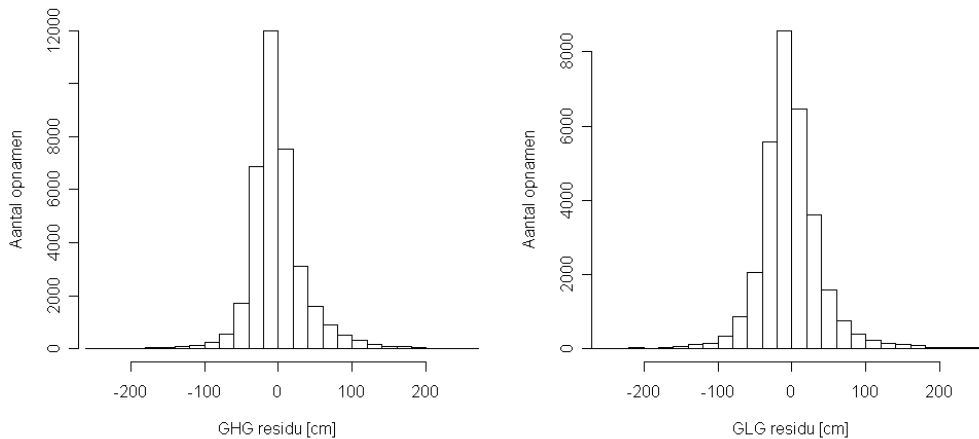
Figuur 6. Frequentieverdelingen van gebruikte gebiedsdekkende hulpinformatie op de opnamelocaties.

2.3.3 Ruimtelijke en temporele afhankelijkheid

Op basis van de berekende regressiemodellen kunnen gebiedsdekkende voorspellingen van de GxG worden gemaakt. De afwijkingen van deze voorspellingen met het regressiemodel ten opzichte van de GxG op de opnamelocaties voor het opnamejaar noemen we residuen. Het gaat hier om afwijkingen in ruimte en tijd van het regressiemodel ten opzichte van de GxG-opnamen. Het residu (ε) is het verschil tussen de GxG-schatting voor een opnamelocatie (GxG), en de waarde die voor die locatie is geschat met het geselecteerde regressiemodel (GxG_{reg}):

$$\varepsilon = GxG - GxG_{reg} \quad (2)$$

De residuen (ε) zijn gemiddeld nul en bij lineaire regressie is een vereiste dat de residuen normaal verdeeld zijn. Ook voor de daarop volgende geostatistische interpolatie van de residuen wordt stationariteit verondersteld om dit te verifiëren zijn de frequentie verdelingen van de GHG en GLG residuen weergegeven in Figuur 7.



Figuur 7 Frequentie verdeling van de GHG en GLG residuen van het multipale lineaire regressiemodel

Waarschijnlijk vertonen de residuen een ruimtelijke en temporele afhankelijkheid, omdat het regressiemodel immers niet alle ruimtelijke en temporele structuur in de GxG hoeft te hebben verklaard uit de hulpinformatie. Voor de voorspelling van de GxG-kaarten en het schatten van de betrouwbaarheid van deze voorspellingen, is het van belang om rekening te houden met de ruimtelijke en temporele afhankelijkheid van de residuen. De ruimtelijke en temporele afhankelijkheid beschrijven we met een semivariogram (Davis, 2002), zie tekstbox 1.

In dit onderzoek ontwikkelden we speciale programmatuur in R (R Development Core Team; 2006) voor de berekeningen van het experimenteel semivariogram en het fitten van een semivariogrammodel. Hiermee zijn de experimentele semivarianties gediscretiseerd in intervallen van één km in de ruimte en intervallen van één jaar in de tijd. Op deze twee dimensionale matrix met experimentele semivarianties is gebruikmakend van een optimalisatiealgoritme (Byrd *et al.*, 1995) in R een semivariogrammodel gefit. Na visuele inspectie van de gefitte modellen zijn de parameters van het model handmatig beperkt bijgesteld. Tabel 3 geeft de parameters van de toegepaste variogrammodellen volgens formule 5 (zie tekstbox 1) voor GHG, GVG en GLG.

Tekstbox 1 Modelleren van de ruimtelijke afhankelijkheid

De ruimtelijke afhankelijkheid (autocorrelatie) kan worden gemodelleerd met een semivariogram (Davis, 2002, blz. 254-264). Een semivariogram geeft de afhankelijkheid weer tussen een waarneming op locatie x en een waarneming op locatie $x + h$, waarbij h een vector is die afstand aangeeft in dit geval gaat het om een afstand in zowel ruimte als tijd.

Het semivariogram geeft de varianties $\text{Var} [\varepsilon(x) - \varepsilon(x+h)]$ als functie van de afstandsvector h . De semivariantie (γ) wordt berekend als:

$$\gamma = \frac{1}{2} \sum (\varepsilon(x) - \varepsilon(x+h))^2 / N \quad (3)$$

In dit geval gaat het om een afstand h in twee dimensies ruimte (m) en tijd (jaren). Een veelgebruikt ruimte-tijd variogrammodel is het Bilonick-model (Bilonick, 1988) met de volgende vorm:

$$\gamma(h_r, h_t) = \gamma_1(h_r) + \gamma_2(h_t) + \gamma_3(h_r + \alpha * h_t) \quad (4)$$

Het variogrammodel ($\gamma(h_r, h_t)$) is opgebouwd uit een ruimtelijk deel (γ_1) een temporeel deel (γ_2) en een gecombineerd ruimte-tijd deel (γ_3). Bij het fitten van het bovengenoemde model bleek dat een vereenvoudigd model met alleen het gecombineerd ruimte-tijdvariogram (γ_3) tot nagenoeg even goede fits en beter verklaarbare parameterwaarden leiden. Daarom is een exponentieel gecombineerd ruimte-tijd variogrammodel met de volgende vorm gebruikt:

$$\gamma(h_r, h_t) = \gamma_n + \gamma_s * (1 - \exp(-(h_r + \alpha * h_t)/a)) \quad (5)$$

Omdat de residuen voor GxG schattingen onderling gecorreleerd bleken zijn ook kruisvariogrammen gebruikt bij de geostatistische interpolatie. De kruisvariogrammen zijn als volgt berekend:

$$\gamma(r_a, r_b) = \phi_{a,b} * \text{Wortel}(\gamma(r_a) * \gamma(r_b)) \quad (6)$$

Waarbij de correlatie (ϕ) tussen de residuen van GHG en GVG, 0,95 bedraagt en tussen GHG en GLG, 0,7.

Het effect van meetfouten op het variogrammodel wordt in tekstbox 2 besproken.

Tekstbox 2 Meetfouten en korte-afstandsvariatie

De nugget-variantie (γ_n) in het semivariogrammodel geeft de korte-afstandsvariatie weer; deze bedraagt 650 cm^2 of, uitgedrukt als standaardafwijking $25,5 \text{ cm}$. De gemiddelde bepalingfout van gerichte opname schattingen en veldschattingen van de GxG ligt in dezelfde grootteorde (Bijlage 2). Aannemelijk is dat de korte-afstands variatie grotendeels verklaard kan worden door de bepalingfouten die worden gemaakt bij GxG-schattingen op waarnemingslocaties.

Omdat predicties van gemiddelde GxG's voor gridcellen van $25 \times 25 \text{ m}$ worden vervaardigd valt de korte-afstandsvariatie binnen een cel weg. De nauwkeurigheid van voorspellingen van de gemiddelde waarde per cel wordt daardoor zoveel groter als de nugget-variantie van het gehanteerde variogrammodel. Hiermee wordt in de kaarten met voorspellingen al gecorrigeerd voor de GxG-bepalingfouten en wordt de GxG zonder een meetfout gekarteerd.

Tabel 3. Parameters van gebruikte semivariogrammodellen

| Parameter | $\gamma_n[\text{cm}^2]$ | $\gamma_s[\text{cm}^2]$ | $\alpha[\text{km/jaar}]$ | $a [\text{km}]$ |
|-----------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|
| GHG | 650 | 1250 | 5 | 17,5 |
| GVG | 650 | 1250 | 5 | 17,5 |
| GLG | 650 | 1500 | 5 | 17,5 |
| GHGv | 650 | 1250 | 5 | 17,5 |
| GVGv | 650 | 1250 | 5 | 17,5 |
| GLGv | 650 | 1500 | 5 | 17,5 |

Door het gebruik van een relatief eenvoudig variogrammodel (formule 5) voor een fit in zowel ruimte als tijd zijn de fits weergegeven in de individuele doorsneden van ruimte en tijd niet altijd even goed maar over het totaal -alle doorsneden samen- bezien is het toch de best mogelijke fit.

Een correcte schatting van het toegepaste semivariogrammodel is belangrijk voor het doen van voorspellingen, het kwantificeren van voorspelfouten en voor het optimaliseren van het meetnet in ruimte en tijd. In de dataset vervaardigd voor dit onderzoek is een sterke clustering van de waarnemingen in ruimte en tijd aanwezig waardoor het schatten van een semivariogrammodel wordt bemoeilijkt.

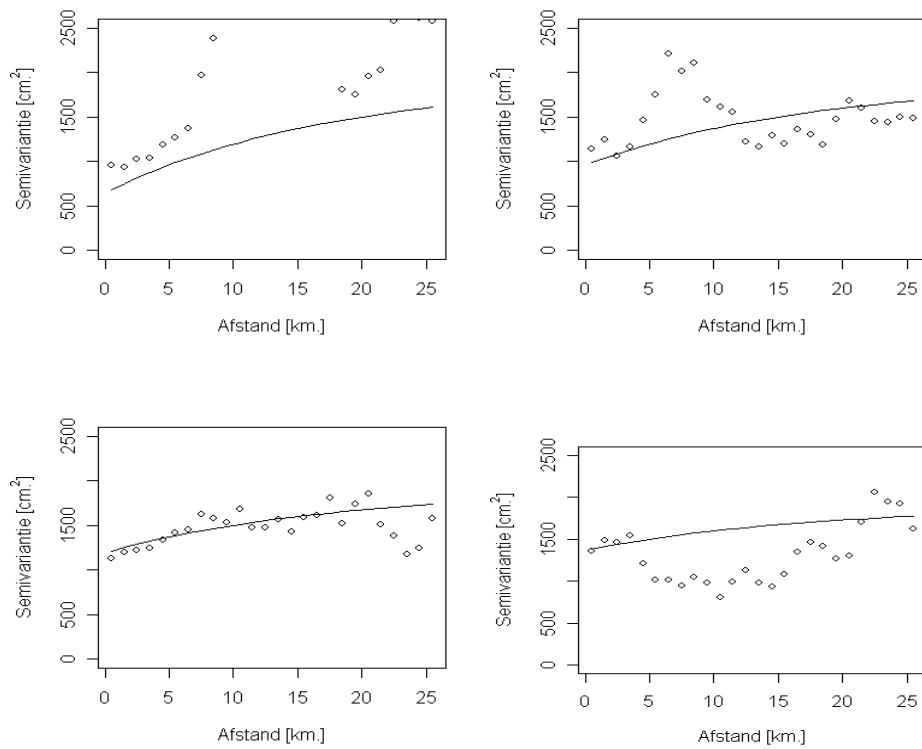
De gefitte semivariogrammodellen gebruikten we bij de geostatistische interpolatie van GxG-residuen naar 25x25 m-cellen. Voor een specifieke periode werd het gemiddelde GxG-residu geschat met behulp van ordinary block-kriging (Goovaerts, 1997). Afhankelijk van de ruimtelijke en temporele configuratie van de residuen verschilt het geïnterpoleerde block- (cell) gemiddelde residu. GxG-opnamen die in ruimte nabij de te voorspellen locatie, en in de tijd nabij het te voorspellen jaar liggen, zullen een grotere invloed hebben op de voorspelling. Waarnemingen dichterbij dan 17,5 km en minder dan 3,5 jaar eerder of later beïnvloeden het geïnterpoleerde residu voor een specifieke locatie en tijdstip (figuur 8 en 9; en Tekstbox 3). Met behulp van het geïnterpoleerde residu worden lokale afwijkingen van het regressiemodel in beeld gebracht.

Zoals aangegeven in paragraaf 2.3 is de GxG is in twee stappen gebiedsdekkend voorspeld met:

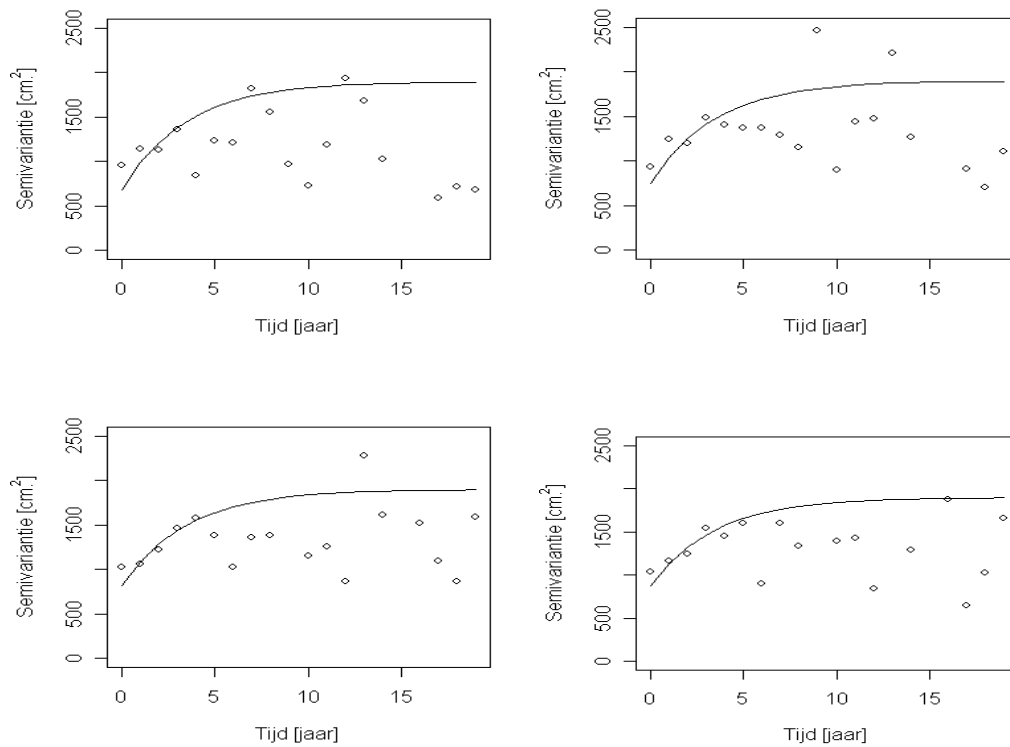
$$Z(x) = m(x) + \varepsilon(x) \quad (7)$$

Waarbij $m(x)$ de deterministische component is (regressievoorspelling) en $\varepsilon(x)$ de stochastische component (geïnterpoleerd residu) voor de locatie en het jaar (x).

1. Voor 25x25 m-rastercellen is een gebiedsdekkende voorspelling van de GxG in een specifiek jaar gemaakt met de gefitte regressiemodellen (Tabel 2). Het gehanteerde regressiemodel levert voor iedere cel waarvoor alle benodigde hulpinformatie beschikbaar is een voorspelling voor een bepaald jaar. Cellen met gelijke hulpinformatie krijgen een gelijke regressievoorspelling van de GxG die alleen per jaar verschilt.
2. Daarbij is een geïnterpoleerd ruimte-tijdresidu opgeteld. Het gaat hier om afwijkingen in ruimte en tijd van het regressiemodel ten opzichte van de GxG-opnamen. Op basis van alle afzonderlijke residuen op de waarnemingslocaties en de gefitte semivariogrammodellen (Tabel 3) is gebiedsdekkend het geïnterpoleerde residu bepaald.



Figuur 8. Ruimtelijke doorsneden van het ruimte-tijd semivariogrammodel voor tijdsintervallen van respectievelijk 0, 1, 2 en 3 jaar.



Figuur 9. Temporele doorsneden van het ruimte-tijd semivariogrammodel voor afstanden van respectievelijk 0.5, 1.5, 2.5 en 3.5 km.

Tekstbox 3 Interpretatie van het variogram

De korte-afstandsvariatie wordt bij voorspellingen van een gemiddelde waarde per cel uitgemiddeld omdat binnen een cel zowel toevallige (meet)afwijkingen naar boven en naar beneden voorkomen. Op basis van de gefitte semivariogrammodellen kan een schatting worden gemaakt van de betrouwbaarheid van berekende gemiddelden in relatie tot de gebiedsgrootte waarvoor gemiddelde waarden worden bepaald. Als uitspraken voor kleine arealen worden gedaan, wordt de nuggetvariantie in het variogrammodel uitgemiddeld waardoor de betrouwbaarheid ten opzichte van uitspraken op puntniveau wordt vergroot.

Een ruwe schatting van de betrouwbaarheid van voorspellingen kan worden gemaakt op basis van de gehanteerde variogrammodellen. De voorspelfouten voor afzonderlijke locaties (punten) kunnen worden geschat met de sill (maximale variantie) van het gehanteerde variogrammodel. Bij de hier gehanteerde semivariogrammodellen bedraagt de sill voor GHG en GVG, 1900 cm² en voor GLG 2150 cm², wat neerkomt op voorspelfouten van respectievelijk 44 cm en 46 cm. De voorspelfouten voor kleine arealen, zoals de hier gehanteerde 25x25 m cellen, kunnen worden geschat door de sill-variantie verminderd met de nugget-variantie; Voor GHG en GVG bedraagt die 1250 cm², voor GLG 1500 cm²; wat neerkomt op voorspelfouten van respectievelijk 35 cm en 39 cm. Voor ruimtelijke eenheden van ongeveer 6x6 km zullen voorspellingen van GHG en GVG een nauwkeurigheid hebben van ongeveer 28 cm en voorspellingen van GLG een nauwkeurigheid van ongeveer 33 cm. De betrouwbaarheid van gemiddelde GxG-voorspellingen op provinciaal of landelijk niveau zal enkele centimeters bedragen. Omdat veranderingen in de GHG en GVG over de periode 1990-2005 4 tot 5 cm bedragen zijn veranderingen op dit schaalniveau met redelijke zekerheid vast te stellen.

De betrouwbaarheid van GxG-voorspellingen voor rastercellen van 25x25 m wordt bepaald door de nabijheid van waarnemingslocaties en de ouderdom van deze waarneming ten opzichte van het moment waarvoor de voorspelling wordt verricht. De betrouwbaarheid van de voorspellingen voor een individuele gridcel wordt groter als waarnemingen dichterbij dan 17,5 km en minder dan 3,5 jaar eerder of later voorhanden zijn. Voor rastercellen van 25x25 m. wordt in de vervaardigde kaarten met GxG-voorspellingen nabij recente waarnemingen een voorspelnaauwkeurigheid tot 8 cm bereikt.

3 Resultaten

3.1 Kaarten van de GxG

Gebiedsdekkende voorspellingen van GxG zijn gemaakt voor gerichte opnameschattingen en voor veldschattingen. Voor beide bepalingmethoden is volgens dezelfde werkwijze een gebiedsdekkende GxG-voorspelling gemaakt. Zoals in paragraaf 2.1.4 vermeld, bestaan er forse verschillen tussen de beide bepalingmethoden waardoor ook de kaartpatronen substantieel verschillen. Bij vergelijking met kaarten uit andere bronnen is het van belang de best vergelijkbare kaart te kiezen omdat anders verschillen in bepalingwijze de oorzaak van vermeende verschillen zijn.

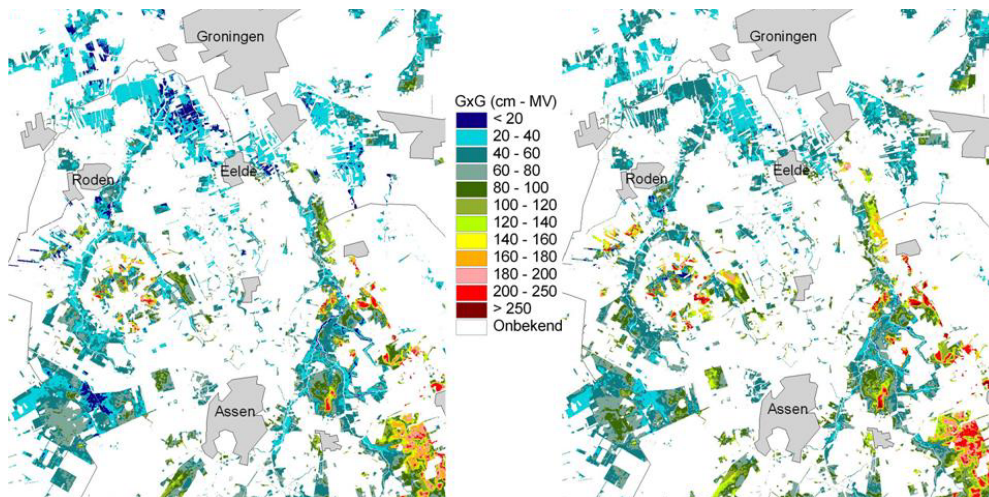
Voor de jaren 1990 en 2005 is hier ter illustratie een voorspelling gemaakt, maar ook voorspellingen voor alle tussenliggende jaren zijn mogelijk. Gemiddeld wordt voor de natuurgebieden in Nederland een verlaging van de grondwaterstand vastgesteld. GxG-opnamen kunnen echter wijzen op een lokale verhoging van de grondwaterstand die de globale algemene trend volgens de regressievoorspelling plaatselijk teniet doen.

Voor alle natuurgebieden (zowel droog als nat) zijn landsdekkende kaarten vervaardigd van GHG, GVG en GLG, zowel volgens een gerichte opnameschatting als volgens een veldschatting. In totaal zijn dus zes kaarten met voorspellingen vervaardigd. De GxG's voor 2005, gemiddeld over alle natuurgebieden, staan in Tabel 4. De Veluwe levert door haar grote areaal natuurgebied een belangrijke bijdrage in het gemiddelde, terwijl dit gebied voor grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen nauwelijks relevant is. Interessanter is om voor nattere gebieden of gebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen de gemiddelde GxG-waarden en veranderingen te kwantificeren (zie paragraaf 4.3).

Tabel 4 Voorspelde gebiedsgemiddelde GxG in 2005 (in cm beneden maaiveld), afhankelijk van de gehanteerde bepalingmethode

| Bepalingmethode | GHG | GVG | GLG |
|------------------------|------------|------------|------------|
| Veldschatting | 96 | 118 | 208 |
| Gerichte opname | 112 | 138 | 213 |

Ter illustratie is een kaart van de GVG-voorspellingen voor 2005 volgens gerichte opnamen en volgens veldschattingen voor een gebiedsuitnede in Noord-Drenthe weergegeven (Figuur 10). Het GVG-kaartje volgens de veldschattingsmethode (links) is duidelijk natter dan de kaart volgens de gerichte opnamemethode (rechts). Dit kan worden verklaard uit de verschillen tussen de beide schattingsmethoden die in hoofdstuk 2 zijn gepresenteerd.



Figuur 10 Voorspelde GVG in natuurgebieden volgens de veldschattingsmethode (links) en volgens gerichte opnamen (rechts) voor 2005

3.2 Betrouwbaarheid van de kaarten

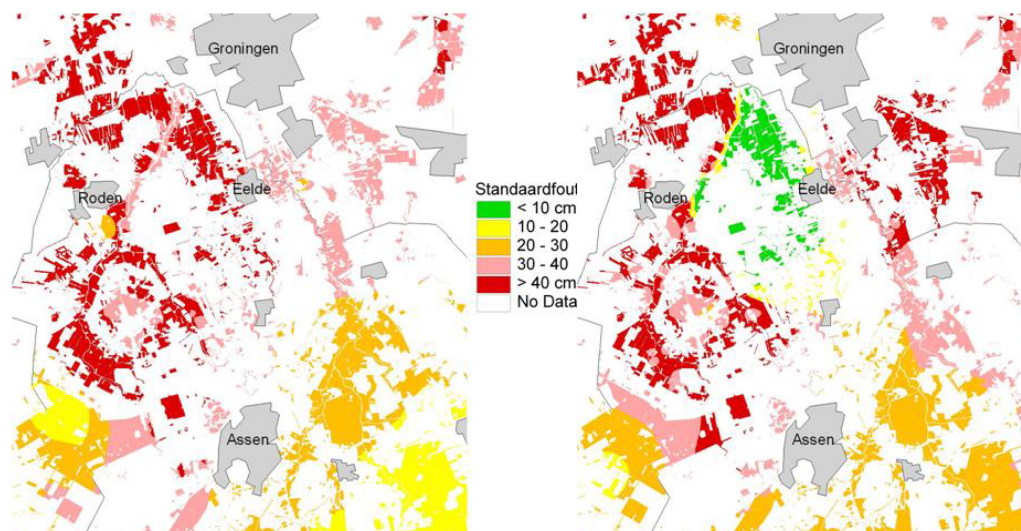
De betrouwbaarheid van kaarten kan door middel van de krigingvariantie direct in beeld gebracht worden (Goovaerts, 1997). De krigingvariantie geeft de betrouwbaarheid weer, gegeven dat het variogrammodel juist is. Bovendien is in de krigingvariantie niet de systematische fout verdisconteerd die ontstaat door *preferential sampling*. Dit veroorzaakt wellicht systematische over- of onderschattingen van de GxG's, en dat beïnvloedt de kwaliteit van de conclusies. Daarom is de krigingvariantie beter geschikt als maat voor de relatieve betrouwbaarheid dan voor de absolute betrouwbaarheid van de kaart: het geeft aan waar de voorspellingen meer of minder nauwkeurig zijn. Een andere aanpak zou kunnen zijn om een set van aselechte onafhankelijke metingen te gebruiken voor validatie. Met validatie kan de absolute betrouwbaarheid van de kaart worden geschat.

De betrouwbaarheid wordt in dit project gekwantificeerd met een voorspelfout (standaardafwijking) die is berekend uit de krigingvariantie. Aannemende dat de kriging voorspelfout normaal verdeeld is, bedraagt de kans dat de werkelijke GxG zich tussen de voorspelde waarde plus of min 1,64 maal de voorspelfout bevindt 90%. De kans dat de werkelijke waarde zich tussen de voorspelde waarde plus of min de voorspelfout bevindt is 68%. De voorspelde waarden en de voorspelfouten voor de in dit project vervaardigde kaarten hebben betrekking op het gemiddelde voor een cel van 25x25 m. Voorspellingen geven dus een gemiddelde GxG binnen een gridcel waarin nog variatie van GxG waarden aanwezig is.

Figuur 11 geeft een voorbeeld van de kaart met voorspelfouten voor GVG in 1990 en 2005 voor een gebiedsuitnede in Noord-Drenthe.

De betrouwbaarheid van voorspellingen voor een individuele gridcel wordt bepaald door de nabijheid van waarnemingslocaties en de ouderdom van deze waarneming ten opzichte van het moment waarvoor de voorspelling wordt verricht. De betrouwbaarheid van de voorspellingen voor een individuele gridcel wordt groter als waarnemingen dichterbij dan 17,5 minder dan 5 jaar eerder of later voorhanden zijn (zie paragraaf 2.3.3). In Figuur 11 is ten zuidwesten van Groningen, voor 1990, een voorspelfout van meer dan 40 cm zichtbaar en voor 2005 een voorspelfout van minder dan 10 cm. De verklaring hiervoor is het gebruik van

waarnemingen uit de bodemkartering rond Peize in 2005. Waarnemingen ten noorden van Roden zijn afkomstig uit de bodemkartering Roden-Norg en stammen uit 1983. Deze laatste oude waarnemingen vergroten de betrouwbaarheid van voorspellingen voor 1990 al niet meer.



Figuur 11 Voorspelfout van GVG in natuurgebieden voor 1990 (links) en 2005 (rechts)

De minimale voorspelfouten in Nederland bedragen ongeveer 8 cm, de maximale 55 cm. Een maximale voorspelfout wordt gevonden in locaties waar geen recente metingen (geen metingen recenter dan 5 jaar) zijn verricht in de directe nabijheid (<20 km). In paragraaf 4.4 wordt besproken op welke wijze de voorspelfout voor een bepaalde locatie en tijdstip verkleind zou kunnen worden.

3.3 Geschiktheid van peilbuizen voor toekomstige actualisatie

De kaarten met GxG-voorspellingen zijn in eerste instantie gemaakt zonder gegevens van de DINO-peilbuizen te gebruiken. Daarna zijn de locaties van DINO-peilbuizen die in beheer zijn bij Staatsbosbeheer en Natuurmonumenten vergeleken met de GxG-schattingen waarmee de eerste kaarten zijn vervaardigd. Deze vergelijking is uitgevoerd om de geschiktheid van DINO-peilbuizen voor toekomstige actualisatie van de kaarten te kunnen beoordelen. Een vereiste hiervoor is dat GxG-schattingen in peilbuizen vergelijkbaar zijn met de voorspellingen op kaart, zodat verondersteld mag worden dat toekomstige veranderingen in de peilbuizen zich laten vertalen in veranderingen in de kaarten. Uit de vergelijking bleek echter dat in peilbuizen in natuurgebieden systematisch nattere GHG- en GLG-waarden werden geschat dan op de kaarten was aangegeven.

Om te achterhalen of de peilbuizen van natuurorganisaties bij voorkeur in de natste terreindelen zijn geplaatst, zijn de GxG-schattingen in de peilbuizen vergeleken met de dichtstbijzijnde GxG-schatting die is gebruikt voor het maken van de GxG-kaarten (zie tabel 5).

Als peilbuis en GxG-schatting dicht bij elkaar liggen is de kans groter dat beide in dezelfde (natte) situatie liggen en zou het verschil tussen beide dus kleiner worden. De GxG in peilbuizen blijkt systematisch natter dan de dichtstbijzijnde GxG-schatting op basis van een

gerichte opname. Naarmate de afstand tot de dichtstbijzijnde peilbuis toeneemt wordt het verschil groter, waardoor het aannemelijk is dat de peilbuizen van de natuurorganisatie inderdaad in de natste terreindelen zijn gepositioneerd (*preferential sampling*). Deze conclusie wordt bevestigd door de leden van de klankbordgroep werkzaam bij Natuurmonumenten en Staatsbosbeheer. Voor een toekomstige actualisatie van de vervaardigde GxG-kaarten zijn deze peilbuizen minder geschikt omdat ze de natste situaties vertegenwoordigen. De nattere situaties blijken echter nog nauwelijks in de GxG-schatting voor het vervaardigen van GxG-kaarten aanwezig te zijn, en daarom is besloten deze peilbuizen, die worden beheerd door de natuurorganisaties, toe te voegen aan de dataset waarmee de uiteindelijke GxG-kaarten zijn gemaakt. Hiermee wordt voorkomen dat de lokale natte plekken waar een peilbuis van de natuurorganisaties staat over het hoofd worden gezien. Uiteraard levert dit alleen zekerheid op voor de plekken waar een peilbuis of opname is gesitueerd.

Tabel 5. Verschillen tussen GxG-schattingen in peilbuizen van natuurorganisaties en de GxG-opnamen en gebruikt voor de eerste versie van de kaarten.

| Verschil | Opname Peilbuis | | | | | |
|-------------------|-----------------|------|----------------|------|-----------------|------|
| | Afstand < 100m | | Afstand < 500m | | Afstand < 2000m | |
| GxG | GHG | GLG | GHG | GLG | GHG | GLG |
| Gem. | 5,4 | 13,6 | 11,5 | 20,8 | 16,6 | 27,3 |
| Std (Gem) | 6,5 | 6,4 | 4,1 | 4,2 | 3,4 | 3,6 |
| Aantal peilbuizen | 66 | 81 | 233 | 246 | 403 | 403 |

4 Toepassingsmogelijkheden

De vervaardigde GxG-kaarten en de GxG-opnamen die hiervoor zijn gebruikt, zouden gebruikt kunnen worden om modelresultaten of andere kaarten van de grondwatersituatie te verifiëren of valideren. In dit onderzoek is voor Noord-Nederland een vergelijking tussen de waarnemingen en MIPWA-modelresultaten uitgevoerd om de bruikbaarheid van de modelresultaten als vlakdekkende hulpinformatie voor het maken van kaarten te beoordelen; validatie of verificatie was geen onderdeel van dit onderzoek. De bijeengebrachte GxG-opnamen en vervaardigde GxG-kaarten zijn wel bruikbaar voor eventuele toekomstige validatie- of verificatiestudies.

4.1 Vaststellen van landelijke, regionale en lokale veranderingen

Landelijke trends, gebruikt voor het karteren van de GxG, zijn opgenomen in regressiemodellen (paragraaf 2.3). Gemiddelde landelijke veranderingen in de GxG voor de complete periode met meetgegevens, uitgedrukt in cm/jaar, staan in Tabel 2. De grootteorde van de gemiddelde veranderingen in de natuurgebieden voor GHG en GVG bedraagt ongeveer 0,2 cm/jaar en voor GLG bijna 0,4 cm/jaar. Dit betekent dat, gemiddeld over alle waarnemingen bezien, in de natuurgebieden de GHG en GLG respectievelijk 0,2 en 0,4 per jaar dalen. Het grootste deel van de waarnemingen is uit de periode 1980-2007 (Figuur 6). De schatting van de gemiddelde veranderingen in de GxG heeft dan ook betrekking op deze totale periode. Binnen deze periode kunnen echter ook kortstondig en lokaal andere ontwikkelingen optreden die de veronderstelde gelijkmatige verandering vergroten of juist vertragen. Alleen binnen deze periode is een betrouwbare schatting van de gemiddelde veranderingen mogelijk. Er is bij de berekende gemiddelde verandering niet gekeken of deze veranderingen verschillen tussen natte (lage Gt's) en droge locaties, perioden, gebieden en/of regio's. De methode laat het in principe toe om dergelijke verschillende doorsneden in ruimte en/of tijd te onderzoeken. Zo zou gekeken kunnen worden naar veranderingen op alleen de locaties met grondwaterafhankelijke natuur, alleen de top-100-gebieden waar verdroging wordt bestreden of specifiek in een bepaalde periode.

De schatting van de verandering in de regressievergelijking (Tabel 2) is bepaald op basis van alle waarnemingen. Een oververtegenwoordiging van waarnemingen in bepaalde situaties of gebieden levert daardoor een grotere bijdrage aan de voorspelde verandering. Omdat de opnamelocaties afkomstig zijn uit diverse lokale bodemkarteringen en onderzoeken is een duidelijke clustering van waarnemingen in zowel de ruimte als de tijd in de gebruikte dataset aanwezig. Door het gebruik van geostatistiek (rekening houdend met ruimtelijke correlatie en de ligging van de opnamelocaties) wordt hiervoor gecorrigeerd. Bij het schatten van de regressiecoëfficiënten is om rekentechnische redenen onafhankelijkheid verondersteld. Als de ruimtelijke correlatie wordt meegenomen wordt de gemiddelde verlaging niet direct bepaald door het aantal metingen in specifieke omstandigheden of voor specifieke tijdstippen. Opvallend is dat dit tot aanzienlijke verschillen leidt in geschatte veranderingen. Uitgaande van de kaarten die zijn beschreven in paragraaf 3.1 blijkt dat de gemiddelde verandering tussen 1990 en 2005 voor GHG 5,4 cm, voor GVG 4,0 cm en voor GLG 17,6 cm bedraagt in alle Nederlandse natuurgebieden. Dit is een forse daling, die groter is dan de trend die op basis van het regressiemodel is geschat (Tabel 2). Vooral de daling van de GLG is groter dan met het regressiemodel wordt berekend. Gemiddeld over Nederland is voor alle natuurgebieden een behoorlijke daling van de grondwaterstand vastgesteld tussen 1990 en 2005, met name in de GLG.

In grote natuurgebieden op de hogere zandgronden (met name de Veluwe en Sallandse Heuvelrug) blijkt dat recente GLG-schattingen droger zijn dan verwacht op basis van het gehanteerde regressiemodel. In de landelijke regressie spelen deze droge meetlocaties een beperkte rol, omdat het relatief weinig meetlocaties betreft. Uitgaande van de kaarten vertegenwoordigen deze droge meetlocaties grote arealen natuurgebied en zorgen zodoende voor een grote gemiddelde daling van de grondwaterstand. Voor de natuurgebieden waar grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen voorkomen is het van belang de gewenste grondwaterstand met de voorspelde te vergelijken. Voor deze gebieden zijn in paragraaf 4.3 aparte analyses uitgevoerd.

4.2 De betrouwbaarheid met beschikbare gegevens

Voordeel van het gebruik van geostatistiek is dat niet alleen voorspellingen verkregen worden van de GxG of de verandering daarin, maar ook van de betrouwbaarheid van deze voorspellingen. Zoals in paragraaf 3.1 beschreven zijn berekeningen voor 25x25 m-cellen uitgevoerd. De betrouwbaarheid van deze gemiddelde GxG per cel wordt gekwantificeerd met de voorspelfouten zoals beschreven in paragraaf 3.2. De voorspelfout is afhankelijk van de oppervlakte waarover een voorspelling wordt gemaakt. De voorspelfout is relatief groot voor de kleine 25x25 m cellen, circa 45 cm. Dit betekent dat lokale uitspraken niet betrouwbaar zijn, tenzij in de directe omgeving waarnemingen beschikbaar zijn. De betrouwbaarheid van GxG-voorspellingen in de kaarten met 25x25 m rastercellen varieert sterk in ruimte en tijd.

Voorspellingen nabij opnamelocaties met een opnametijdstip kort voor of na het jaar waarvoor een voorspelling is gemaakt bereiken een voorspelfout tot 8 cm. Het areaal in deze kaarten waar voor 2005 een nauwkeurige schatting van de GVG mogelijk bleek is echter beperkt. In grote arealen natuur bleken rond 2005 alleen relatief onnauwkeurige schattingen haalbaar (Tabel 6). Voor het totale areaal natuurgebied (5.344 km²) bleek op minder dan 1% van het areaal een voorspelling nauwkeuriger dan 20 cm mogelijk. In een periode 2003-2007 blijken (Figuur 6) landelijk gezien ongeveer 1800 waarnemingen beschikbaar te zijn. Waren dit er meer geweest dan was de betrouwbaarheid van de uitspraken uiteraard groter geweest. De betrouwbaarheid varieert ook sterk per gebied. In gebieden met een groot aaneengesloten areaal, zoals de Veluwe en de Sallandse Heuvelrug, zijn weinig waarnemingen beschikbaar. Omdat het hier droge gebieden betreft, waar de GVG veelal dieper ligt dan 2 meter zijn GxG-schattingen met een betrouwbaarheid van 30-40 cm nog betrouwbaar te noemen. In nattere gebieden met grondwaterafhankelijke natuur is een schatting met een voorspelfout van meer dan 10 cm niet nauwkeurig genoeg voor toetsing aan de gewenste grondwaterstand.

Tabel 6 Nauwkeurigheden van GVG voorspellingen voor 2005 in alle natuurgebieden

| Betrouwbaarheid | Areaal (km ²) | Areaal (%) |
|-----------------|---------------------------|------------|
| < 10 cm | 14 | 0,25 |
| 10 – 20 | 32 | 0,60 |
| 20 – 30 | 1622 | 30,34 |
| 30 – 40 | 2724 | 50,97 |
| > 40 cm | 952 | 17,82 |

Een dergelijke betrouwbaarheid is wenselijk omdat ecologisch gezien verschillen van 10 cm al relevant zijn. Voor uitspraken over de gemiddelde grondwaterstand in grotere arealen natuurgebied zal de voorspelfout afnemen. Voor ruimtelijke eenheden van ongeveer 6x6 km zullen voorspellingen van de gemiddelde GHG en GVG een betrouwbaarheid hebben van ongeveer 28 cm en voorspellingen van GLG een betrouwbaarheid van ongeveer 33 cm. De

betrouwbaarheid van gemiddelde GxG-voorspellingen op provinciaal of landelijk niveau zal enkele centimeters bedragen. Omdat veranderingen in de GHG en GVG over de periode 1990-2005 vier tot vijf cm bedragen zijn veranderingen op dit schaalniveau met redelijke zekerheid vast te stellen. De betrouwbaarheid van de voorspellingen is vooral van belang in natuurgebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen. Daarom zijn voor deze gebieden aparte analyses uitgevoerd.

Om een indruk te verkrijgen van de regionale verschillen in GxG over de periode 1985-2005 is per provincie en per periode de gemiddelde GxG en de betrouwbaarheid van dit gemiddelde geschat. Om een correcte schatting van de betrouwbaarheid te verkrijgen voor grotere onregelmatig gevormde en versnipperde gebieden is voor de bepaling van de betrouwbaarheid gebruikt gemaakt van conditionele simulatie (Goovaerts, 1997) van de GxG. Hiervoor zijn 50 gesimuleerde kaarten van de GxG mogelijke patronen van de werkelijke GxG gegenereerd voor gebieden met grondwaterafhankelijke natuur, rekening houdend met alle beschikbare GxG-schattingen. Elk van deze kaarten stelt een mogelijke werkelijkheid voor (Brus en Heuvelink; 2007). Op basis van deze kaarten is voor de gebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen per provincie en per periode een schatting van de gemiddelde GxG en de betrouwbaarheid van dit gemiddelde gemaakt. Bijlage 3 geeft de volledige resultaten van deze analyse. Tabel 7 geeft een verkort overzicht voor twee perioden.

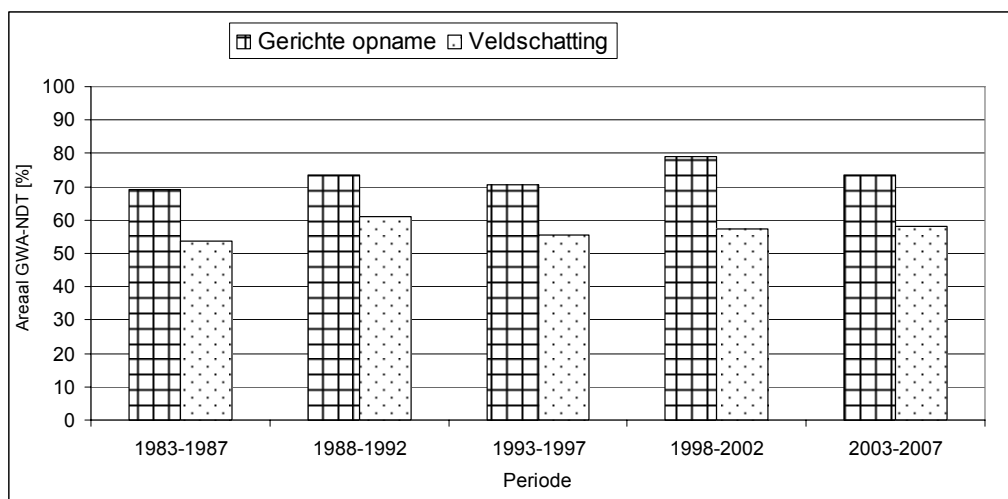
Tabel 7 De gemiddelde GxG in cm, onder maaiveld en de betrouwbaarheid van dit gemiddelde in gebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen per provincie en per periode (verkort overzicht voor twee perioden)

| Periode | Provincie | Areaal [Ha] | GHG [cm] | GVG [cm] | GLG [cm] | sdGHG [cm] | sdGVG [cm] | sdGLG [cm] |
|----------------|------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1988-1992 | Drenthe | 16.080 | 72,1 | 100,5 | 156,9 | 5,1 | 5,1 | 5,7 |
| | Flevoland | 3.245 | 65,4 | 93,6 | 119,6 | 14,7 | 14,6 | 14,7 |
| | Friesland | 22.590 | 41,9 | 69,2 | 97,6 | 7,2 | 7,3 | 7,1 |
| | Gelderland | 13.735 | 76,1 | 104,4 | 168,9 | 5,3 | 5,2 | 5,2 |
| | Groningen | 5.966 | 45,1 | 73,1 | 111,6 | 9,7 | 9,5 | 10,6 |
| | Limburg | 9.014 | 61,0 | 89,0 | 157,1 | 6,4 | 6,4 | 7,9 |
| | Noord-Brabant | 15.252 | 51,8 | 79,9 | 131,9 | 3,6 | 3,5 | 3,2 |
| | Noord-Holland | 5.539 | 47,7 | 75,4 | 101,5 | 7,9 | 8,1 | 8,4 |
| | Overijssel | 9.658 | 47,7 | 75,4 | 115,2 | 7,6 | 7,6 | 10,0 |
| | Utrecht | 4.194 | 46,0 | 73,6 | 115,7 | 10,2 | 9,9 | 9,6 |
| | Zeeland | 3.130 | 49,4 | 77,8 | 119,3 | 10,8 | 10,6 | 13,2 |
| | Zuid-Holland | 5.478 | 30,0 | 57,2 | 88,1 | 7,7 | 7,8 | 9,8 |
| | Nederland | 125.083 | 53,3 | 81,2 | 124,8 | 1,9 | 1,9 | 2,6 |
| | 2003-2007 | Drenthe | 16.080 | 44,0 | 73,0 | 136,8 | 5,4 | 5,5 |
| Flevoland | | 3.245 | 53,6 | 81,3 | 124,4 | 17,3 | 17,0 | 22,9 |
| Friesland | | 22.590 | 31,8 | 60,4 | 101,0 | 6,3 | 6,3 | 7,3 |
| Gelderland | | 13.735 | 95,0 | 117,5 | 196,5 | 5,2 | 5,3 | 6,0 |
| Groningen | | 5.966 | 32,8 | 61,8 | 112,9 | 8,2 | 8,4 | 10,5 |
| Limburg | | 9.014 | 80,5 | 108,4 | 169,4 | 9,7 | 9,4 | 11,2 |
| Noord-Brabant | | 15.252 | 40,0 | 68,8 | 120,5 | 6,4 | 6,4 | 6,0 |
| Noord-Holland | | 5.539 | 37,9 | 64,3 | 100,7 | 7,1 | 7,2 | 7,7 |
| Overijssel | | 9.658 | 44,0 | 72,7 | 115,7 | 9,3 | 9,3 | 10,6 |
| Utrecht | | 4.194 | 51,1 | 75,1 | 128,8 | 9,2 | 8,8 | 7,7 |
| Zeeland | | 3.130 | 41,1 | 69,2 | 125,7 | 9,2 | 9,0 | 10,2 |
| Zuid-Holland | | 5.478 | 43,2 | 71,4 | 102,7 | 9,0 | 9,1 | 10,4 |
| Nederland | | 125.083 | 50,7 | 78,0 | 129,0 | 2,4 | 2,4 | 3,1 |

Tabel 7 laat zien dat per periode en per provincie een aanzienlijke variatie aanwezig is in zowel de geschatte gemiddelde GxG als in de betrouwbaarheid van dit gemiddelde. Deze verschillen in betrouwbaarheid in ruimte en tijd worden bepaald door de verdeling van de gebruikte waarnemingen van de GxG in ruimte en tijd. De nauwkeurigste schatting van de gemiddelde GxG in gebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen bleek mogelijk voor de provincie Noord-Brabant in de periode 1998-2002. Andere perioden leverden voor deze provincie minder nauwkeurige schattingen op. Waarschijnlijk is het grote aantal waarnemingen van de GxG voor de Gd-kartering (Finke *et al.* 2004) in Noord-Brabant tussen 1999 en 2001 de reden voor deze nauwkeurige schattingen. Voor Nederland als geheel bleek de nauwkeurigste schatting van de GxG in de periode 1988-1992 gemaakt te kunnen worden. In de laatste periode, 2003-2007, zijn de voorspellingen minder nauwkeurig als gevolg van het kleine aantal recente waarnemingen (zie Tabel 7). Nauwkeurige toekomstige actualisaties van de huidige kaarten zijn alleen mogelijk als de meetinspanning wordt vergroot ten opzichte van de recente periode.

4.3 De knelpunten voor grondwaterafhankelijke natuur in beeld

Om de bedreiging van natuur door verdroging te kunnen schatten, is het gewenst dat de grondwatersituatie zo nauwkeurig mogelijk wordt geschat voor plaatsen waar daadwerkelijk grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen voorkomen of zijn gepland. Slechts in een beperkt deel van het areaal van de natuurgebieden in Nederland zijn grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen aanwezig of gepland. Uitgaande van de voorspelde GxG per 25x25 m cel is een vergelijking tussen de gewenste GxG voor een grondwaterafhankelijk natuurdoeltype en de voorspelde GxG ter plaatse gemaakt. Het verschil zou gebruikt kunnen worden om de mate van verdroging aan te geven. De onzekerheid over GxG voor 25x25-metercellen is groot. Bij uitspraken over de mate van verdroging kan rekening met de betrouwbaarheid worden gehouden door per rastercel de kans dat de voorspelde GVG de gewenste GVG overschrijdt. De gevolgde werkwijze is in Tekstbox 4 en Figuur 13 grafisch weergegeven voor een voorspelde GVG van 80 cm met een standaardfout (=sd) van 30 of 45 cm.



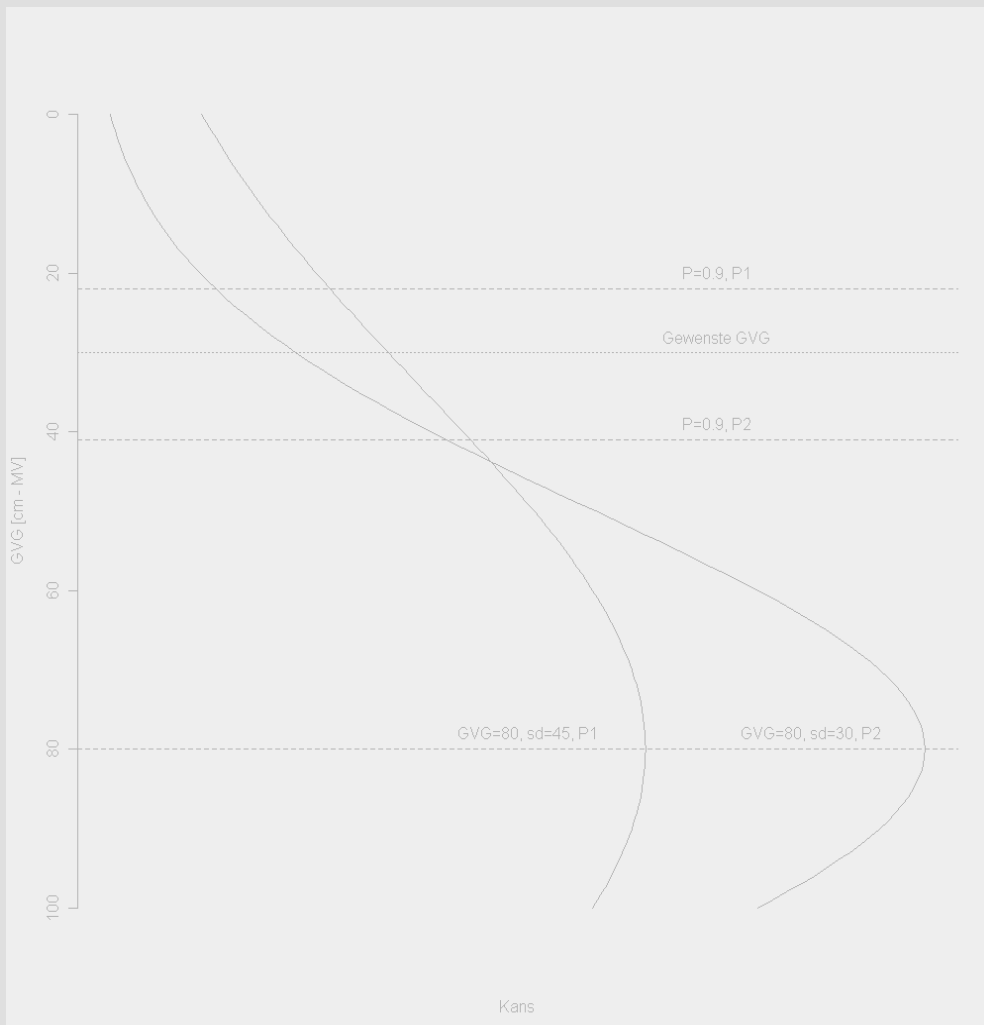
Figuur 12. Percentage van het areaal met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen waarvan met 90% zekerheid gezegd kan worden dat de voorspelde GVG droger is dan gewenst.

Voor de grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen in Nederland is bepaald we op welk deel van het areaal de voorspelde GVG met 90% zekerheid droger is dan de gewenste GVG. Dit is per periode gedaan (zie Figuur 12). Daarbij is gebruik gemaakt van de voorspelde GVG volgens de veldschattingmethode en volgens de gerichte opnamemethoden. Omdat deze laatste

schattingmethode drogere schattingen oplevert, wordt hier een groter areaal berekend waarvan met 90% zekerheid gezegd kan worden dat de voorspelde GVG dieper is dan de gewenste. De resultaten in figuur 10 laten zien dat volgens de veldschattingmethode op 45% en volgens gerichte opnamen op 75% van het areaal met 90% zekerheid kan worden gesteld dat de voorspelde GVG droger is dan gewenst. Deze gebieden zouden daarom als verdroogd aangemerkt kunnen worden, omdat naar verwachting het gewenste grondwaterafhankelijke natuurdoeltype niet gerealiseerd zal worden. De verschillen over de vijf aangegeven perioden zijn gering en er lijkt geen sprake van een systematische toe- of afname van het areaal sinds 1985. Het verwachte effect van herstelmaatregelen i.c. een vermindering van het areaal waar de voor grondwaterafhankelijke natuur gewenste grondwaterstand niet wordt gehaald is niet aangetoond.

Tekstbox 4 De voorspelde GVG en nauwkeurigheid t.o.v. de gewenste GVG

Voor de voorspelde GVG van 80 cm., met een nauwkeurigheid van 30 cm (P2) kan met een zekerheid van 90% (P=0.9) gesteld worden dat de gewenste GVG van minder dan 30 cm niet wordt gehaald; het 90 percentiel ligt op 42 cm. Voor de voorspelde GVG van 80 cm, met een nauwkeurigheid van 45 cm (P1) kan dat niet met een zekerheid van 90% (P=0.9) worden gesteld; het 90 percentiel ligt op 22 cm en het zou dus nat genoeg kunnen zijn (Figuur 13).

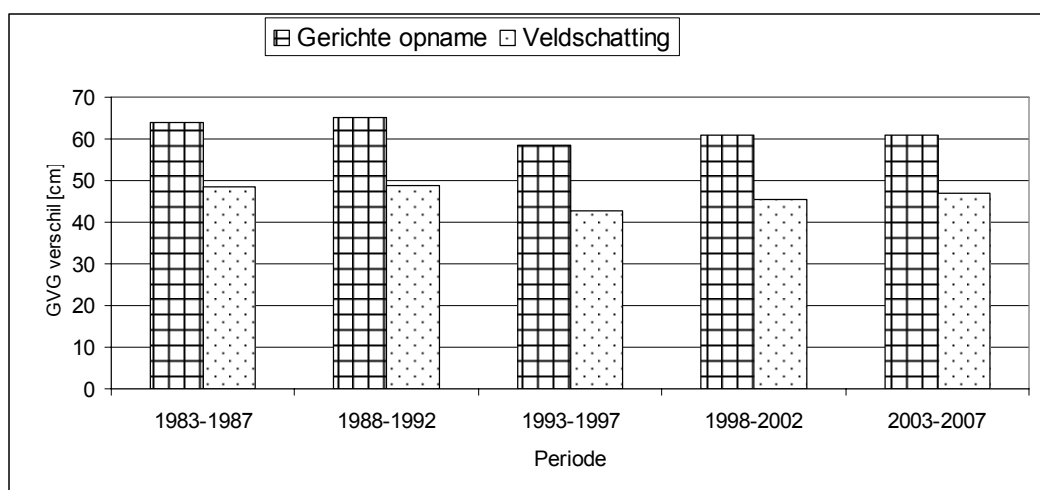


Figuur 13. De gewenste GVG ten opzichte van de voorspelde GVG en het 90 percentiel van de voorspelde GVG voor een voorspelde GVG van 80 met een nauwkeurigheid van 30 of 45 cm.

Het detailniveau van 25x25 m zoals voor de natuurdoeltypen kaart wordt gehanteerd, is erg groot voor beleidsevaluatie op Nationaal en zelfs regionaal niveau. Een systematiek waarin niet per 25x25 m cel wordt gekeken of aan abiotische randvoorwaarden voor natuur wordt voldaan maar op bijvoorbeeld 10% van de oppervlakte van een specifiek natuurgebied is beter bruikbaar voor beleidsevaluatie. Het areaal waar abiotische randvoorwaarden volstaan zou met een dergelijke benadering ook veel hoger komen te liggen.

De verandering van arealen over de verschillende perioden wordt echter niet alleen veroorzaakt door drogere of nattere voorspellingen maar ook door de betrouwbaarheid van deze voorspellingen, zoals ook Figuur 13 illustreert. Van eenzelfde GVG-voorspelling met kleinere voorspelfout is immers met een grotere zekerheid vast te stellen of die droger is dan de gewenste GVG.

De GVG is gemiddeld 45 of 62 cm lager dan de voor de grondwaterafhankelijke natuur gewenste GVG, afhankelijk van de gebruikte bepalingmethode (zie Figuur 14). Het verwachte effect van herstelmaatregelen i.c. een stijging van de grondwaterstand in gebieden met grondwaterafhankelijke natuur, is niet aangetoond.



Figuur 14. Verschil tussen de voor grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen gewenste GVG en voorspelde GVG per periode

4.4 Prioriteiten voor toekomstige meetinspanning

De in deze studie vervaardigde kaarten kunnen ook gebruikt worden om toekomstige meetinspanningen te optimaliseren. De kaarten laten immers forse verschillen in betrouwbaarheid van de voorspellingen zien. Indien het vaststellen van lokale veranderingen belangrijk is en hiervan een nauwkeurige schatting verlangd wordt, is een hernieuwde opname op - of vlak naast - dezelfde locatie het efficiëntst. Indien in een bepaald gebied geen eerdere waarnemingen beschikbaar zijn, zal een schatting van een verandering altijd minder nauwkeurig zijn, simpelweg omdat de situatie in het verleden niet meer nauwkeurig kan worden vastgesteld.

Als het niet om veranderingen gaat, maar om zo nauwkeurig mogelijke schattingen van de actuele situatie is het verzamelen van aanvullende waarnemingen in het gebied waarvoor een nauwkeurige schatting verlangd wordt het efficiëntst. Kaarten van de voorspelfout (figuur 11) gegeven aan waar weinig recente metingen zijn verricht en waar de GxG-voorspellingen

daardoor minder nauwkeurig zijn. Dit zijn de locaties waar aanvullende waarnemingen het meest effectief zijn om de betrouwbaarheid te vergroten.

De GxG-opnamen, zoals in dit onderzoek zijn gebruikt, zijn merendeels afkomstig uit bodemkarteringen waardoor lokaal een gelijkmatige ruimtelijke dekking is gerealiseerd. Als lokaal aanvullende waarnemingen worden verricht is het van belang dat de waarnemingen de verdeling van de GxG's weergeven. Een enkele waarneming in bijvoorbeeld een lokale laagte waar een specifiek nat natuurdoeltype voorkomt is dan minder geschikt.

De betrouwbaarheid van de geschatte gemiddelde grondwaterstanden in natuurgebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen per provincie in de periode 2003-2007 kan worden gebruikt om het meetnet te optimaliseren. Juist voor grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen is immers een nauwkeurige schatting gewenst. Bijlage 3 geeft aan in welke provincies een nauwkeurige schatting voor de periode 2003-2007 al wordt gerealiseerd en in welke provincies nog niet. De provincie Overijssel heeft een vrij groot areaal grondwaterafhankelijke natuur, maar relatief onnauwkeurige schattingen van de GxG. De provincie Flevoland heeft de meest onnauwkeurige schattingen, maar hier is het areaal grondwaterafhankelijke natuur ook zeer klein. Dat betekent overigens wel dat in Flevoland met relatief weinig aanvullende metingen van de grondwaterstand een grote toename van de betrouwbaarheid gerealiseerd kan worden.

Het vergroten van de betrouwbaarheid van GxG-schattingen voor eerdere periodes is alleen mogelijk als aanvullende oudere waarnemingen worden toegevoegd aan de gebruikte dataset. Voor Nederland als geheel bleek de nauwkeurigste schatting van de GxG in de periode 1988-1992 gemaakt te kunnen worden. In de laatste periode, 2003-2007, zijn de voorspellingen minder nauwkeurig als gevolg van het kleine aantal recente waarnemingen (zie Bijlage 3).

Nauwkeurige toekomstige actualisaties van de huidige kaarten zijn alleen mogelijk als de meetinspanning gericht wordt vergroot ten opzichte van de recente periode. Een groot aantal zorgvuldig gelokaliseerde grondwaterstandswaarnemingen zijn noodzakelijk als in de toekomst nauwkeurigere GxG-kaarten voor natuurgebieden dan de huidige gewenst zijn. Als de waargenomen afname van het aantal waarnemingen sinds 1995 doorzet zullen de kaarten van de actuele situatie of kaarten uit toekomstige actualisaties minder nauwkeurig zijn dan de kaarten die dit onderzoek opleverde. Vooral in natuurgebieden waar grondwaterafhankelijke natuur voorkomt is daarom een uitgebreid meetnet voor de grondwatersituatie gewenst.

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Uit dit onderzoek volgen een aantal conclusies over de veranderingen die er sinds 1985 in de GxG's in natuurgebieden optraden:

- Om de bedreiging van natuur door verdroging te kunnen schatten, is een zo nauwkeurig mogelijke inschatting van de grondwatersituatie gewenst op plaatsen waar daadwerkelijk grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen voorkomen of zijn gepland. De GVG in gebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen is volgens de veldschattingsmethode in zeker 55%, en volgens gerichte opnamen in zeker 70% van het areaal, te droog. Voor de natuurgebieden met grondwaterafhankelijke natuurdoeltypen zijn sinds 1985 geen systematische veranderingen aangetoond. Het verwachte effect van herstelmaatregelen i.c. een vermindering van het areaal met een te droge grondwaterstand in gebieden met grondwaterafhankelijke natuur, is niet aangetoond.
- De GVG is volgens de veldschattingsmethode gemiddeld 45, of volgens gerichte opnamen, 62 cm lager dan de voor de grondwaterafhankelijke natuur gewenste GVG. De te droge arealen zijn voor de vijf onderzochte perioden tussen 1983 en 2007 nagenoeg gelijk. Het verwachte effect van herstelmaatregelen i.c. een stijging van de grondwaterstand in gebieden met grondwaterafhankelijke natuur is niet aangetoond.

Over de methode waarmee de GxG in natuurgebieden in kaart is gebracht kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Gebleken is dat gerichte opnamen leiden tot een ongeveer 20% drogere schatting van de GHG en GVG dan veldschattingen; bij de interpretatie dient hiermee rekening te worden gehouden. GxG-kaarten volgens de veldschattingsmethode geven daardoor een ongeveer 20% nattere situatie aan dan dezelfde kaart volgens gerichte opnamen. In dit onderzoek zijn - als vergelijkingsmateriaal - kaarten volgens de beide bepalingmethoden vervaardigd. Waarnemingen volgens beide bepalingmethoden zijn hier gebruikt bij het maken van de kaarten nadat een correctie voor de bepalingmethode heeft plaatsgevonden. Bij bodem- en Gt-kaarten tot ongeveer 1996 zijn meestal veldschattingen gebruikt, voor de recente Gd-kaarten zijn gerichte opnamen gebruikt. Gezien de verschillen tussen beide bepalingmethoden zijn veranderingen alleen vast te stellen met dezelfde soort of vergelijkbaar gemaakte GxG-schattingen.
- De gekwantificeerde betrouwbaarheid van de kaarten kan gebruikt worden om toekomstige meetinspanningen te optimaliseren. De kaarten laten immers grote verschillen in betrouwbaarheid zien. Nauwkeurige toekomstige actualisaties van de huidige kaarten zijn alleen mogelijk als de meetinspanning gericht wordt vergroot ten opzichte van de recente periode. Een groot aantal zorgvuldig gelokaliseerde grondwaterstands-waarnemingen zijn noodzakelijk als in de toekomst nauwkeuriger GxG-kaarten voor natuurgebieden gewenst zijn.
- Er is gebruik gemaakt van GxG-opnamen volgens drie bepalingmethoden: veldschattingen, gerichte opnamen en peilbuisopnamen. Veldschattingen en gerichte opnamen van de GxG hebben beide een standaardfout van ongeveer 25 cm. GxG-schattingen in peilbuizen lijken nauwkeuriger, maar de vraag is of de stijghoogte die in peilbuizen met diepe filters is waargenomen gelijk is aan de freatische grondwaterstand.

- Gerichte opnamen blijken een systematisch drogere schatting van GHG en GVG op te leveren dan veldschattingen op dezelfde locatie. Voor de GLG is het verschil miniem. Op basis van 270 meetlocaties is met behulp van lineaire regressie een correctie voor de bepalingmethode afgeleid, waarmee veldschattingen en gerichte opnamen vergelijkbaar zijn gemaakt voordat een vergelijking tussen beide is uitgevoerd.
- De betrouwbaarheid van GxG-schattingen verschilt per locatie en per bepalingmethode, en is in deze studie gekwantificeerd. Met de betrouwbaarheid van de GxG-schattingen op waarnemingslocaties is bij het interpoleren tot gebiedsdekkende GxG-kaarten rekening gehouden en van de GxG-kaarten is ook de betrouwbaarheid gekwantificeerd. De betrouwbaarheid van voorspellingen bepaalt of veranderingen met voldoende zekerheid (significant) kunnen worden vastgesteld. Veranderingen in de GxG op lokaal of regionaal niveau kunnen over de periode 1985-2005 zelden met zekerheid worden vastgesteld, omdat de betrouwbaarheid hiervoor te gering is. Op landelijk of provinciaal niveau zijn soms significante veranderingen tussen de perioden van vijf jaar zichtbaar. Ondanks de geringe veranderingen kan door de grotere betrouwbaarheid soms toch met zekerheid een verandering worden vastgesteld op landelijk of provinciaal niveau.
- Met behulp van geostatistische interpolatie in ruimte en tijd is het mogelijk gebleken kaarten van de GxG te vervaardigen voor verschillende tijdstippen of perioden sinds 1985. Hierbij is gebruik gemaakt van digitaal beschikbare GxG-schattingen van verschillende ouderdom. Met de locatie, ouderdom en betrouwbaarheid van de GxG-schattingen is rekening gehouden bij het in kaart brengen van de GxG voor verschillende perioden sinds 1985.
- De betrouwbaarheid van een schatting op een locatie wordt bepaald door het aantal recente metingen in de nabijheid van die locatie. Zijn er minder recente en nabijgelegen metingen beschikbaar, dan is lokaal de betrouwbaarheid gering. Kaarten van betrouwbaarheid kunnen aangeven waar aanvullende waarnemingen tot nauwkeuriger voorspellingen zouden leiden. Het hier beschikbare aantal waarnemingen laat niet toe om voor een fijn schaalniveau (per 25x25 meter per jaar) betrouwbare voorspellingen te doen. Voor grotere schalen in ruimte en tijd, zoals per provincie en voor perioden van vijf jaar, zijn nauwkeuriger voorspellingen mogelijk.

5.2 Aanbevelingen

De geschatte uniforme landelijke trend geeft een minder grote verlaging van de GLG te zien dan de vergelijking tussen GLG-kaarten uit 2005 en 1990. Oorzaak is het feit dat de GLG in grote droge gebieden (zoals de Veluwe en de Sallandse Heuvelrug) behoorlijk is gedaald. Omdat in deze gebieden relatief weinig metingen zijn verricht, komt deze afname niet tot uitdrukking in de geschatte uniforme landelijke trend. Echter wel in de kaarten, omdat het grote arealen betreft. Voor een ecologisch relevante berekening van grondwaterstand en veranderingen hierin zou gefocust moeten worden op die natuurgebieden waar ook grondwaterafhankelijke natuur voorkomt.

De betrouwbaarheid van een actuele GxG-kaart kan worden vergroot als in natuurgebieden waarin geen recente waarnemingen beschikbaar zijn een aantal aanvullende waarnemingen wordt verricht. Ook voor toekomstige actualisatie van de huidige GxG-kaarten is het van belang over voldoende actuele metingen te beschikken. Als de waargenomen afname van het aantal waarnemingen sinds 1995 doorzet, zullen de kaarten van de actuele situatie of kaarten uit toekomstige actualisaties minder nauwkeurig zijn dan de hier gemaakte kaarten. Vooral in natuurgebieden waar grondwaterafhankelijke natuur voorkomt, is daarom een uitgebreid meetnet voor de grondwatersituatie gewenst.

De huidige methode is gericht op een berekening van GxG per jaar per cel van 25x25 meter. Uitgaande van de huidige hoeveelheid gegevens worden op dit fijne schaalniveau echter schattingen gedaan met grote onzekerheden. Om een betrouwbare schatting van zowel de GxG als de verandering hierin te verkrijgen, kunnen veranderingen beter op een grover schaalniveau bepaald worden. Er dient gezocht te worden naar een schaalniveau dat betrouwbare uitspraken toelaat en tevens nuttig is voor beleidsmakers. Gedacht kan worden aan uitspraken per natuurgebied of regio. Gebieden zouden dan op een ecohydrologisch zinvolle wijze gedefinieerd dienen te worden, bijvoorbeeld locaties met grondwaterafhankelijke natuur(doelen) in hydrologische eenheden.

GxG-schattingen voor peilbuizen lijken nauwkeuriger dan die voor gerichte opnamepunten of veldschattingen, maar de vraag is of de in peilbuizen met diepe filters waargenomen grondwaterstand als de freatische grondwaterstand mag worden beschouwd. Een onderzoek naar de geschiktheid van peilbuizen om de freatische grondwaterstand te bepalen in relatie tot de filterdiepte en de profielopbouw ter plaatse is wenselijk. Daarnaast kan ook de ontsluiting van grondwaterstandgegevens in peilbuizen verder worden verbeterd zodat met DINO gemakkelijker peilbuizen in natuurterreinen kunnen worden opgevraagd.

De hier gehanteerde geostatistische interpolatie in ruimte en tijd is voor dit soort toepassingen relatief nieuw. Er zijn een aantal publicaties verschenen op dit terrein maar er is nog weinig software beschikbaar. Waarschijnlijk is methodisch nog verbetering mogelijk. Daarnaast blijkt dat in de dataset, bijeengebracht voor dit onderzoek, de waarnemingen niet gelijkmatig verspreid zijn in tijd en ruimte. Er is mogelijk sprake van *preferential sampling*. Dit veroorzaakt wellicht systematische over- of onderschattingen van de GxG's, en dat beïnvloedt de kwaliteit van de conclusies. Met een validatie en aanvullend onderzoek kan op dit onderdeel waarschijnlijk verbeteringen worden gerealiseerd die van invloed zijn op de voorspellingen en de betrouwbaarheid van deze voorspellingen.

In deze studie is gebruik gemaakt van lineaire regressiemodellen voor gebiedsdekkende voorspellingen. Wellicht is verbetering mogelijk als complexere regressieboom-modellen (Visser *et al.*, 2008) worden toegepast. De schatting van de coëfficiënten van het trendmodel gebruikt voor voorspellingen in ruimte en tijd zou wellicht verbeterd kunnen worden als universal kriging (Brus and Heuvelink, 2007; Goovaerts, 1997) zou worden toegepast maar dat bleek met het aantal waarnemingslocaties en de standaard software en niet mogelijk.

Literatuur

- Bilonick, R.A. (1988). Monthly hydrogen ion deposition maps for the northeastern U.S. from July 1982 to September 1984. *Atmospheric Environment* 22: 1909–1924.
- Braat, L. van, Amstel, A., Gerritsen, A., van Gool, C., Gremmen, N., Groen, C., Rolf, H., Runhaar, J., and Wiertz, J. (1989). *Verdroging van natuur en landschap in Nederland. Beschrijving en analyse*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 's-Gravenhage.
- Bracht, M. van (1988). OLGA: On Line Grondwater Archief. Rapport PN88-11. DGV-TNO.
- Brus, D.J. and G.B.M. Heuvelink (2007). Towards a Soil Information System with quantified accuracy. Three approaches for stochastic simulation of soil maps. WOt report nr 58. WOT Natuur & Milieu, Wageningen.
- Byrd, R.H., Lu, P., Nocedal, J. and Zhu, C. (1995). A limited memory algorithm for bound constrained optimization. *SIAM J. Scientific Computing* 16: 1190–1208.
- 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.
- Chatfield, C. (1995). Model uncertainty, data mining and statistical inference. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*, 158:419–466.
- Coulibaly, P., F. Ancti, R. Aravena and B. Bobee (2001). Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations. *Water Resources Research* 37(4): 885-896.
- Davis, J. (2002). *Statistics and data analysis in geology*. Wiley, New York. Third edition.
- Delft, S.P.J. van, J. Holtland, J.R. Runhaar, P. Mekking & P.C. Jansen (2003). *Verdrogingskartering in natuurgebieden; Proefkartering Beekvliet*. Alterra-Rapport 566 .2. Alterra, Wageningen.
- Delft, S.P.J. van, J.R. Runhaar, T. Hoogland & P.C. Jansen (2002). *Verdrogingskartering in natuurgebieden; Proefkartering Strijper Aa*. Alterra-Rapport 566.1. Alterra, Wageningen.
- Delhomme, J. (1978). Kriging in the hydrosociences. *Advances in water resources* 1:251–266.
- Finke, P.A., D.J. Groot Obbink, H. Rosing en F. de Vries (1996). *Actualisatie Gt-kaarten 1:50 000 Drents deel kaartbladen 16 Oost (Steenwijk) en 17 West (Emmen)*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 439.
- 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.
- Gaast, J. van der en H. Massop (2005). *De verdroging in beeld met historische en actuele grondwatertrappen op basis van karteerbare kenmerken*. H₂O 14/15.
- Goovaerts, P. (1997) *Geostatistics for natural resources evaluation*. Applied geostatistics series. Oxford University Press, Oxford.
- Hinsberg, A. van, J. Wiertz en R. van Ek (2000). *Concept projectplan Nationaal model voor de vegetatie (NVEG)*. Rapport 408662002. RIVM, Bilthoven.
- Hoogland, T. en J. Runhaar (2006). *Neerschaling van de freatische grondwaterstand uit modelresultaten en de Gt-kaart*. WOt-rapport 26. WOT Natuur en Milieu, Wageningen.
- Kekem, A.J. van, T. Hoogland en J.B.F. van der Horst (2005). *Uitspoelingsgevoelige gronden op de kaart; Werkwijze en resultaten*. Alterra-rapport 1080. Alterra, Wageningen.
- Knotters, M. and P. van Walsum (1994). *Uitschakeling van weersinvloeden bij de karakterisering van het grondwaterstandsverloop*. Technical Report 350. DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- Knotters, M and M. F.P. Bierkens (2001). Predicting water table depths in space and time using a regionalised time series model. *Geoderma* 103(2001): 51–77
- Kyriakidis, P.C. and A.G. Journel (1999). Geostatistical space–time models: a review. *Mathematical Geology* 31: 651–684.

- Lammers, G.W., A. van Hinsberg, W. Loonen, M.J.S.M. Reijnen & M.E. Sanders. 2005. Optimalisatie Ecologische Hoofdstructuur; Ruimte, milieu en watercondities voor duurzaam behoud van biodiversiteit. Rapport 408768003. MNP, Bilthoven.
- Massop, H.Th.L., L.C.P.M. Stuyt, P.J.T. van Bakel, J.M.M. Bouwmans en H. Prak (1997). Invloed van de oppervlaktewaterstand op de grondwaterstand. Rapport 527.1 DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- MNP (2007). Egmond P van, Vonk M. (eds). (2007). Natuurbalans 2007. Rapportnr. 500402005. Milieu- en Natuurplanbureau, Bilthoven
- LNV (2006). Natura 2000 doelendocument. Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Den Haag.
- Pebesma, E. en C. Wesseling (1998). Gstat, a program for geostatistical modelling, prediction and simulation. Computers and Geosciences 24(1): 17-31; <http://www.gstat.org>.
- Pouw, B.J.A. van der and Finke, P. (1999). Development and perspective of soil survey in the Netherlands. In: Bullock, P., Jones, R., and Montanarella, L. (editors) (1999). Soil resources of Europe. European Soil Bureau research report 6. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- R Development Core Team (2006). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna. Austria. ISBN 3-900051-07-0. URL <http://www.R-project.org>.
- Riele, W.J.M. te en D.J. Brus (1991). Methoden van gerichte grondwaterstandsmetingen voor het schatten van de GHG. Rapport 158. DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- Riele, W. te and Brus, D. (1992). Het gebruik van fysisch-geografische voorinformatie bij de ruimtelijke voorspelling van grondwaterstanden en grondwaterkarakteristieken (ghg en glg). Technical Report 209. DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- 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.
- Snepvangers, J. & W. Berendrecht (2007). MIPWA: Methodiekontwikkeling voor Interactieve Planvorming ten behoeve van Waterbeheer. TNO rapport 2007-U-R0972/A. TNO, Utrecht.
- Stolp, J., Th.G.C. van der Heijden, IJ. van Randen, F. Brouwer en E. Kiestra (1995). Gebruikersdocumentatie BOPAK versie 2.1. Technisch Document 3. DLO-Staring Centrum, Wageningen.
- Visser, H., P.J.T.M. van Puijenbroek & P.H.M. Janssen (2008). Stuurfactoren voor de ecologische kwaliteit van regionaal oppervlaktewater; Een statistische analyse met regressiebomen voor de Ex-ante evaluatie KRW. PBL-rapport 500140002/2008. Planbureau voor de Leefomgeving (PBL), Bilthoven.
- Vries, F. de, W.J.M. de Groot, T. Hoogland en J. Denneboom (2003). De bodemkaart van Nederland digitaal; Toelichting bij inhoud, actualiteit en methodiek en korte beschrijving van additionele informatie. Alterra-Rapport 811. Alterra, Wageningen.
- Wösten, J., de Vries, F., Denneboom, J. and van Holst, A. (1988). Generalisatie en bodemfysische vertaling van de Bodemkaart van Nederland, 1 : 250 000, ten behoeve van de pawn-studie. Technical Report 2055. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen.

Bijlage 1 Definities

De onderstaande definities zijn gebaseerd op Van der Sluijs (1990).

Grondwaterstand

De stijghoogte van het freatische grondwater ten opzichte van het maaiveld, gemeten in een boorgat of een peilbuis met een ondiep filter.

HG3 en LG3

Het gemiddelde van de drie hoogste resp. laagste grondwaterstanden die in een hydrologisch jaar (1 april t/m 31 maart) worden gemeten, uitgaande van een halfmaandelijke meetfrequentie.

VG3

De gemiddelde grondwaterstand op de meetdata 14 maart, 28 maart en 14 april in een bepaald kalenderjaar.

Gemiddeld Hoogste (Laagste) Grondwaterstand, GHG (GLG)

De statistische verwachtingswaarde van de HG3's (LG3's) over een periode waarin het grondwaterregime niet door ingrepen is gewijzigd. GHG- en GLG-schattingen geven de hoogste en laagste grondwaterstanden en daarmee de fluctuatie van de grondwaterstand door de seizoenen weer.

De GHG en GLG worden geschat voor een periode van tenminste 8 jaar en is als tijdreeksanalyse toegepast voor 30 jaar (klimaatperiode), zodat ze de fluctuatie onder het heersende klimaat beschrijven en niet te sterk beïnvloed worden door meteorologische schommelingen tijdens een korte waarnemingsperiode.

Gemiddelde Voorjaarsgrondwaterstand, GVG

De statistische verwachtingswaarde van de VG3 over een periode waarin het grondwaterregime niet door ingrepen is gewijzigd. Deze verwachtingswaarde wordt geschat voor een periode van tenminste 8 jaar en is als tijdreeksanalyse toegepast voor 30 jaar (klimaatperiode).

GxG

Staat in dit rapport voor het drietal GHG, GVG en GLG.

GHG- en GLG-schattingen geven de hoogste en laagste grondwaterstanden en daarmee de fluctuatie van de grondwaterstand door de seizoenen weer. Om te voorkomen dat incidentele weersomstandigheid en relatief droge of natte perioden of jaren een grote invloed op de GHG en GLG hebben, wordt een middeling over ten minste acht aaneengesloten jaren gehanteerd (ten Cate *et al.* 1995). De GxG wordt hier gebruikt als een momentopname voor het laatste jaar waarin HG3 en LG3 zijn bepaald. Het gemiddelde van de HG3- en LG3-waarden, de GHG en GLG zijn daarom representatief tot het laatste hydrologisch jaar van de meetperiode.

Bijlage 2 Omrekening van veldschatting naar gerichte opname

Als we veronderstellen dat GHG (W_H), de werkelijke maar onbekende GHG, met gerichte GHG opnamen ($W_{H,b}$) zonder systematisch fout geschat kan worden. We willen daarom GHG profielschattingen ($W_{H,p}$) corrigeren naar gerichte opnameschattingen waarbij we de gekwantificeerde bepalingfout (δ) van de gerichte opnamen gebruiken in een lineaire correctieregressie, dan geldt:

$$W_H = W_{H,b} + \delta$$

$$W_H = \beta_0 + \beta_1 W_{H,p} + \varepsilon$$

$$W_{H,b} = \beta_0 + \beta_1 W_{H,p} + \varepsilon - \delta$$

waarbij W_H de werkelijke maar onbekende GHG is, $W_{H,b}$ is de GHG schatting uit gerichte opnamen, δ is de gekwantificeerde bepalingfout van de gerichte opnamen.

Invullen in de lineaire correctie regressie, waarmee veldschattingen van GHG worden omgerekend naar gerichte opnameschattingen levert:

$$W_{H,b} = \beta_0 + \beta_1 W_{H,p} + \sigma$$

$$Var(\sigma) = Var(\varepsilon) + Var(\delta) - 2CoVar(\varepsilon, \delta)$$

De onverklaarde variantie van de correctie regressie, $Var(\sigma)$. kunnen we schrijven in termen van δ en ε . Als we veronderstellen dat de bepalingfouten van de gerichte opname (δ) en de bepalingfouten van de veldschatting (ε) onafhankelijk zijn dan vervalt de covariantieterm en resteert:

$$Var(\sigma) = Var(\varepsilon) + Var(\delta)$$

Omdat de bepalingfout van de gerichte opnamen, $VAR(\delta)$, is gekwantificeerd en de onverklaarde variantie van de correctieregressie, $Var(\sigma)$, is geschat, kunnen we ook de bepalingfout van de veldschattingen $VAR(\varepsilon)$ schatten.

Omdat de restspreiding rond de regressielijn relatief klein is, kan een nauwkeurige correctie worden uitgevoerd. Tabel B.1 geeft de gegevens van de toegepaste regressievergelijkingen. Omdat bij een bodemkartering geen veldschatting van de GVG wordt gemaakt wordt deze afgeleid uit de veldschattingen van GHG en GLG ter plaatse met de volgende formule (Ten Cate *et al.* 1995):

$$GVG_v = 5.4 + 1.02 * GHG_v + 0.19 * (GLG_v - GHG_v)$$

Tabel B.1 Specificatie van de regressiemodellen gebruikt voor correctie voor bepalingmethode

| Afhankelijke Variabele | Predictor variabele | Intercept (β_0) | Helling (β_1) | MSRES [cm^2] | %VV | VAR(δ) [cm^2] |
|------------------------|---|-------------------------|-----------------------|------------------|-------|----------------------------|
| GHG _{opn} | GHG _{veld} | 2,72±2,05 | 1,19±0,03 | 588,06 | 87,87 | 134,97 |
| GVG _{opn} | GHG _{veld} | 29,31±2,15 | 1,22±0,03 | 645,16 | 87,36 | 155,57 |
| GLG _{opn} | GLG _{veld} | -2,38±4,22 | 1,04±0,02 | 922,94 | 86,37 | 206,20 |
| GHG _{veld} | GHG _{opn} | 4,76±1,59 | 0,74± 0,02 | 364,05 | 87,83 | 134,97 |
| GVG _{veld} | GHG _{veld} . GLG _{veld} | - | - | - | - | - |
| GLG _{veld} | GLG _{opn} | 23,20±3,51 | 0,83±0,02 | 736,58 | 86,37 | 206,20 |

Bijlage 3 De gemiddelde GxG en betrouwbaarheid van dit gemiddelde in gebieden met grondwater-afhankelijke natuurdoeltypen per provincie en periode

| Periode | Provincie | Areaal [Ha] | GHG | GVG | GLG | sdGHG | sdGVG | sdGLG |
|---------------|---------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1983-1987 | Drenthe | 16080 | 59.6 | 87.6 | 148.1 | 8.5 | 8.4 | 9.5 |
| | Flevoland | 3245 | 58.0 | 86.0 | 119.4 | 16.2 | 16.1 | 19.3 |
| | Friesland | 22590 | 35.5 | 63.1 | 98.7 | 6.5 | 6.5 | 9.1 |
| | Gelderland | 13735 | 72.5 | 100.7 | 152.3 | 5.3 | 5.3 | 6.1 |
| | Groningen | 5966 | 33.5 | 61.4 | 105.2 | 11.0 | 11.0 | 10.4 |
| | Limburg | 9014 | 71.9 | 100.0 | 157.2 | 9.6 | 9.0 | 12.5 |
| | Noord-Brabant | 15252 | 49.1 | 77.1 | 127.7 | 6.3 | 6.4 | 6.6 |
| | Noord-Holland | 5539 | 43.8 | 71.4 | 90.0 | 11.2 | 10.8 | 12.2 |
| | Overijssel | 9658 | 45.0 | 72.8 | 112.9 | 9.4 | 9.3 | 8.3 |
| | Utrecht | 4194 | 38.2 | 65.7 | 92.3 | 6.9 | 7.1 | 7.8 |
| | Zeeland | 3130 | 44.0 | 71.8 | 115.2 | 6.9 | 7.0 | 10.2 |
| | Zuid-Holland | 5478 | 33.4 | 60.9 | 88.9 | 8.3 | 8.3 | 9.0 |
| | Nederland | 125083 | 49.5 | 77.3 | 118.7 | 3.2 | 3.1 | 3.5 |
| | 1988-1992 | Drenthe | 16080 | 72.1 | 100.5 | 156.9 | 5.1 | 5.1 |
| Flevoland | | 3245 | 65.4 | 93.6 | 119.6 | 14.7 | 14.6 | 14.7 |
| Friesland | | 22590 | 41.9 | 69.2 | 97.6 | 7.2 | 7.3 | 7.1 |
| Gelderland | | 13735 | 76.1 | 104.4 | 168.9 | 5.3 | 5.2 | 5.2 |
| Groningen | | 5966 | 45.1 | 73.1 | 111.6 | 9.7 | 9.5 | 10.6 |
| Limburg | | 9014 | 61.0 | 89.0 | 157.1 | 6.4 | 6.4 | 7.9 |
| Noord-Brabant | | 15252 | 51.8 | 79.9 | 131.9 | 3.6 | 3.5 | 3.2 |
| Noord-Holland | | 5539 | 47.7 | 75.4 | 101.5 | 7.9 | 8.1 | 8.4 |
| Overijssel | | 9658 | 47.7 | 75.4 | 115.2 | 7.6 | 7.6 | 10.0 |
| Utrecht | | 4194 | 46.0 | 73.6 | 115.7 | 10.2 | 9.9 | 9.6 |
| Zeeland | | 3130 | 49.4 | 77.8 | 119.3 | 10.8 | 10.6 | 13.2 |
| Zuid-Holland | | 5478 | 30.0 | 57.2 | 88.1 | 7.7 | 7.8 | 9.8 |
| Nederland | | 125083 | 53.3 | 81.2 | 124.8 | 1.9 | 1.9 | 2.6 |
| 1993-1997 | | Drenthe | 16080 | 55.7 | 84.6 | 138.7 | 7.1 | 6.9 |
| | Flevoland | 3245 | 68.1 | 96.2 | 108.8 | 11.5 | 11.9 | 13.7 |
| | Friesland | 22590 | 34.5 | 62.3 | 93.1 | 6.3 | 6.2 | 8.0 |
| | Gelderland | 13735 | 67.9 | 96.4 | 155.2 | 4.4 | 4.6 | 5.2 |
| | Groningen | 5966 | 37.4 | 65.5 | 106.2 | 8.4 | 8.2 | 9.1 |
| | Limburg | 9014 | 68.7 | 96.6 | 161.3 | 7.7 | 7.8 | 10.2 |
| | Noord-Brabant | 15252 | 39.2 | 67.0 | 113.8 | 5.4 | 5.3 | 5.9 |
| | Noord-Holland | 5539 | 48.5 | 76.5 | 103.4 | 9.6 | 9.4 | 8.4 |
| | Overijssel | 9658 | 34.0 | 61.7 | 93.9 | 7.6 | 7.6 | 9.0 |
| | Utrecht | 4194 | 41.3 | 69.3 | 95.4 | 10.0 | 10.0 | 10.4 |
| | Zeeland | 3130 | 45.3 | 73.2 | 112.6 | 10.0 | 9.9 | 11.3 |
| | Zuid-Holland | 5478 | 32.9 | 60.7 | 87.4 | 8.7 | 8.7 | 10.0 |
| | Nederland | 125083 | 46.8 | 74.9 | 114.4 | 2.1 | 2.1 | 2.5 |

| Periode | Provincie | Areaal [Ha] | GHG | GVG | GLG | sdGHG | sdGVG | sdGLG |
|----------------|------------------|------------------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| 1998-2002 | Drenthe | 16080 | 55.1 | 85.8 | 135.5 | 6.4 | 6.3 | 6.3 |
| | Flevoland | 3245 | 68.9 | 97.1 | 121.0 | 16.8 | 16.9 | 16.5 |
| | Friesland | 22590 | 33.3 | 61.8 | 103.5 | 6.2 | 6.2 | 7.7 |
| | Gelderland | 13735 | 78.4 | 106.7 | 164.9 | 4.5 | 4.5 | 4.8 |
| | Groningen | 5966 | 33.9 | 62.9 | 113.0 | 8.1 | 7.8 | 9.1 |
| | Limburg | 9014 | 83.6 | 109.6 | 180.4 | 3.0 | 2.8 | 3.5 |
| | Noord-Brabant | 15252 | 35.1 | 63.9 | 125.4 | 2.2 | 2.2 | 2.5 |
| | Noord-Holland | 5539 | 41.1 | 67.7 | 99.8 | 7.7 | 7.8 | 10.4 |
| | Overijssel | 9658 | 38.7 | 67.8 | 115.1 | 7.2 | 7.4 | 8.8 |
| | Utrecht | 4194 | 43.3 | 71.4 | 96.2 | 8.1 | 7.9 | 8.2 |
| | Zeeland | 3130 | 42.3 | 71.1 | 121.5 | 6.9 | 7.2 | 7.4 |
| | Zuid-Holland | 5478 | 38.8 | 66.5 | 94.9 | 8.4 | 8.3 | 9.6 |
| | Nederland | 125083 | 49.1 | 77.6 | 123.3 | 2.3 | 2.4 | 2.6 |
| 2003-2007 | Drenthe | 16080 | 44.0 | 73.0 | 136.8 | 5.4 | 5.5 | 7.0 |
| | Flevoland | 3245 | 53.6 | 81.3 | 124.4 | 17.3 | 17.0 | 22.9 |
| | Friesland | 22590 | 31.8 | 60.4 | 101.0 | 6.3 | 6.3 | 7.3 |
| | Gelderland | 13735 | 95.0 | 117.5 | 196.5 | 5.2 | 5.3 | 6.0 |
| | Groningen | 5966 | 32.8 | 61.8 | 112.9 | 8.2 | 8.4 | 10.5 |
| | Limburg | 9014 | 80.5 | 108.4 | 169.4 | 9.7 | 9.4 | 11.2 |
| | Noord-Brabant | 15252 | 40.0 | 68.8 | 120.5 | 6.4 | 6.4 | 6.0 |
| | Noord-Holland | 5539 | 37.9 | 64.3 | 100.7 | 7.1 | 7.2 | 7.7 |
| | Overijssel | 9658 | 44.0 | 72.7 | 115.7 | 9.3 | 9.3 | 10.6 |
| | Utrecht | 4194 | 51.1 | 75.1 | 128.8 | 9.2 | 8.8 | 7.7 |
| | Zeeland | 3130 | 41.1 | 69.2 | 125.7 | 9.2 | 9.0 | 10.2 |
| | Zuid-Holland | 5478 | 43.2 | 71.4 | 102.7 | 9.0 | 9.1 | 10.4 |
| | Nederland | 125083 | 50.7 | 78.0 | 129.0 | 2.4 | 2.4 | 3.1 |

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

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

- 1 *Wamelink, G.W.W., J.G.M. van der Gref-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 (2007).* Ruimte voor bouwen in het buitengebied; de uitvoering van de Wet op de Ruimtelijke Ordening 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. Weijtschede (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 *Cotteler, 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 Kragt & 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.

- 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. Craeijmeersch, 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. Guldmond, 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

Wot

Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu

