

Karteren van de grondwaterdynamiek in gebieden met een klei deklaag

**Karteren van de grondwaterdynamiek in gebieden met een klei
deklaag**

Parameters voor grondwaterafhankelijk peilbeheer

T. Hoogland

R. Visschers

J.W.J. van der Gaast

M. Knotters

Alterra-rapport 1127

Alterra, Wageningen, 2005

REFERAAT

Hoogland, T., R. Visschers, J.W.J. van der Gaast en M. Knotters, 2005. Karteren van de grondwaterdynamiek in gebieden met een klei deklaag; Parameters voor grondwaterafhankelijk peilbeheer. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1127. 42 blz. 11 fig.; 8 tab.; 17 ref.

Het doel van dit project is te onderzoeken hoe de relatie tussen grond- en oppervlaktewaterstand gebiedsdekkend kan worden beschreven in klei gebieden en hoe deze relatie gebruikt kan worden in een Gd-kartering. Een belangrijk aspect daarbij is de keuze van een meetnetopzet waarmee de relatie tussen grondwaterstand en oppervlaktewaterstand met een minimale meetinspanning zo goed mogelijk kan worden vastgesteld.

In drie percelen in het komgebied van het land van Maas en Waal zijn de grond- en oppervlaktewaterstand automatisch geregistreerd in raaien. De opbollingsprofielen in de drie raaien verschillen behoorlijk, ondanks hun korte onderlinge afstand in een vergelijkbaar landschap. De drainageweerstand, berekend uit het gemiddeld opbollingsprofiel over een stationaire periode, sluit het best aan bij de hydrologische definitie. De aldus berekende drainageweerstanden variëren met een factor twee, afhankelijk van de periode waarover berekening plaatsvindt. Ook de drainageweerstand, geschat uit gekalibreerde tijdreeksparameters, blijkt te variëren, afhankelijk van het kalibratiealgoritme en de tijdstap van het model en is daarom minder geschikt voor toepassing in een grootschalige Gd-kartering.

Drainageweerstanden, geschat uit opbollingen over een veertiendaagse periode waarvan niet zeker is of stationariteit kan worden verondersteld, zijn vergelijkbaar met schattingen uit opbollingen over een stationaire periode. Hieruit blijkt dat de drainageweerstand ook op basis van slechts twee meettijdstippen mogelijk is. Dit is aantrekkelijk voor toepassing in een grootschalige Gd-kartering.

Trefwoorden: Grondwaterstand, drainageweerstand, opbolling, meetnet, tijdreeksanalyse, grondwaterdynamiek, Gd, grondwatertrap, Gt, Waterlood, GGOR

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door €20,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-Document6. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2005 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info.alterra@wur.nl

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

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

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Achtergrond en probleemstelling	11
1.2 Doelstelling	12
1.3 Opbouw	12
2 Werkwijze	13
2.1 Schatten van de drainageweerstand	13
2.2 Gegevensverzameling	14
2.2.1 De onderzoekspcelen	14
2.2.2 Waterstandsmetingen	15
2.2.3 Bepaling van neerslag en verdamping	17
2.2.4 Metingen van het elektrisch geleidingsvermogen	17
2.3 Gegevens verwerking	17
2.3.1 Tijdreeksanalyse	17
2.3.2 Opbollingsprofielen	19
3 Resultaten	23
3.1 Tijdreeksanalyse	23
3.2 Opbollingsprofielen	28
3.2.1 De drainageweerstand over een stationaire periode	28
3.2.2 De drainageweerstand benaderd	32
3.3 Het elektrisch geleidingsvermogen	34
3.4 Vergelijking van berekende drainageweerstanden	35
4 Conclusies	37
Literatuur	39

Woord vooraf

Dit project is gefinancierd vanuit het DWK-programma 395, basis- en kerngegevens bovengrond, waaruit ontwikkeling, onderhoud en verbetering van de kartering van grondwaterstandsdynamiek (Gd) grotendeels gefinancierd worden.

In dit onderzoek is, bij de keuze van de onderzoekslocaties en het benaderen van grondeigenaren samengewerkt met Jan van de Braak en Hilde Ketelaar van Waterschap Rivierenland, waarvoor onze hartelijke dank.

Door problemen met de meetapparatuur is het project dat oorspronkelijk tot eind 2003 zou duren verlengd tot eind 2004. Hierdoor kon een meetreeks van grond- en oppervlaktewaterstanden voor zowel een natte als droge situatie worden verzameld.

Samenvatting

Het doel van dit project is te onderzoeken hoe de relatie grondwaterstand-oppevlaktewaterstand gebiedsdekkend kan worden beschreven in gebieden met een klei deklaag, en hoe deze relatie gebruikt kan worden in een Gd-kartering van deze gebieden. Een belangrijk aspect daarbij is de keuze van een meetnetopzet waarmee de relatie tussen grond- en oppervlaktewaterstand met een minimale meetinspanning zo goed mogelijk kan worden vastgesteld.

De drainageweerstand kan direct worden geschat uit de opbolling t.o.v. de drainagemiddelen in relatie tot het neerslagoverschot. De drainageweerstand wordt berekend als het quotiënt van opbolling en de afvoer in een stationaire situatie. De vereiste meetinspanning voor deze bepalingwijze is relatief groot; er moet namelijk eerst worden vastgesteld wat een stationaire periode is, over deze periode moet een meting van zowel het slootpeil als de grondwaterstand in het perceel plaatsvinden en de meetlocaties moeten worden gewaterpast.

Een andere mogelijkheid, die een geringere maar langduriger meetinspanning vereist, is de schatting van de drainageweerstand uit de coëfficiënten van een fysisch geïnterpreteerd tijdreeksmodel. Hiervoor dient over een periode van enkele jaren de grondwaterstand op een meetlocatie nabij het midden van het perceel bepaald te worden; het slootpeil hoeft niet gemeten te worden.

In drie percelen in het land van Maas en Waal, ca. 5 km ten zuiden van Wamel, gelegen in een komkleigebied met een beheerst peil, is tussen April 2003 en April 2004 de grond- en oppervlaktewaterstand gemeten. Het meetnet bestaat uit raaien van zes grondwaterstandsbuizen, loodrecht op de sloot met een afstand tot de sloot van respectievelijk 0, 1,5, 3, 6, 12, 25 en 50 meter. In elk van de drie percelen is een meetraai geplaatst waarin de grond- en oppervlaktewaterstanden met een frequentie van een half uur automatisch worden geregistreerd. Daarnaast zijn drie lange reeksen van grondwaterstanden, waargenomen in peilbuizen nabij de raaien, geanalyseerd.

De opbollingsprofielen in de drie raaien blijken behoorlijk te verschillen, ondanks hun korte onderlinge afstand in een vergelijkbare landschappelijke situatie. Deze verschillen kunnen worden vastgesteld omdat in deze studie complete raaien, van sloot tot perceelsmidden, beschikbaar waren om het opbollingsprofiel te schatten. Hierdoor is een inschatting te maken van de verschillende weerstandscomponenten van de drainageweerstand. Indien waterbeheerders maatregelen willen nemen om wateroverlast te verminderen of om de GGOR te realiseren is het wenselijk om niet alleen inzicht te hebben in de drainageweerstand maar ook in de bijdragen van de componenten waaruit deze weerstand is opgebouwd.

Omdat de drainageweerstand die berekend is uit het gemiddeld opbollingsprofiel over een stationaire periode het best aansluit bij de definitie van drainageweerstand wordt dit berekeningsresultaat hier als referentie gebruikt. De aldus berekende drainageweerstand varieert met een factor twee, afhankelijk van de periode waarover berekening plaatsvindt.

Ook de drainageweerstanden die uit gekalibreerde tijdreeksparameters zijn geschat blijken te variëren, afhankelijk van het gebruikte kalibratiealgoritme en de grootte van de tijdstap van het model. De drainageweerstand die geschat is uit tijdreeks-

parameters blijkt zowel een over- als onderschatting tot een factor twee t.o.v. van de referentie te kunnen opleveren. Waarschijnlijk is dit het gevolg van de waargenomen over- en onderschatting van de seizoensfluctuatie van de grondwaterstand. Een mogelijke verklaring voor het feit dat de gekalibreerde tijdreeksmodellen de totale fluctuatie niet goed schatten is dat de meetperiode (minder dan een jaar) te kort is voor een goede kalibratie. Gezien de variatie in berekende drainageweerstanden en benodigde meetperiode lijkt deze bepalingwijze minder geschikt voor toepassing in een grootschalige Gd-kartering.

Schattingen van de drainageweerstand uit opbolling over een veertiendaagse periode waarvan niet zeker is of stationariteit kan worden verondersteld, zijn vergelijkbaar met schattingen uit opbollingen over een 'stationaire' periode. Dit geeft aan dat de drainageweerstand ook zonder hoogfrequente reeks, waaruit een stationaire periode wordt gekozen, kan worden bepaald: slechts twee meettijdstippen zijn al voldoende. Deze bepalingwijze biedt van de drie onderzochte dan ook de beste mogelijkheden om te worden toegepast in een grootschalige Gd-kartering.

De drainageweerstand kan bij een Gd-kartering van een gebied met een klei deklaag het meest efficiënt worden geschat uit het opbollingsprofiel over een veertiendaagse periode. De maaiveldshoogte van de meetlocaties ten opzichte van elkaar dient echter wel te worden ingemeten, omdat anders geen opbolling kan worden geschat. Gebruik van een waterpas is tijdrovend, en daardoor minder geschikt voor een grootschalige Gd-kartering. Misschien is het ook mogelijk om via precieze locatiebepaling met GPS en een gedetailleerd hoogtemodel (AHN van 5×5 meter) de hoogteliggingen van de beide meetlocaties te schatten. Voor het ontwerpen van een effectieve werkwijze wordt aanbevolen om een praktijkproef uit te voeren waarin de verschillende werkwijzen voor bepaling van het onderlinge hoogteverschil op nauwkeurigheid en efficiëntie worden onderzocht.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en probleemstelling

De grondwaterdynamiek (fluctuatie van de grondwaterstand) wordt sinds het begin van de jaren vijftig systematisch geïnventariseerd in Nederland. Lange tijd werd de grondwaterdynamiek beschreven met een classificatie van de hoogste en laagste grondwaterstanden die jaarlijks op kunnen treden: de grondwatertrappen- of Gt-kaarten (Van Heesen, 1970). Aanvankelijk dienden de kaarten voornamelijk agrarische doeleinden, waarvoor de genoemde classificatie van hoogste en laagste grondwaterstanden goed voldeed. In de loop van de tijd ontstond er behoefte aan meer parameters, zowel vanuit de landbouw als vanuit nieuwe toepassingen op het gebied van vegetatiekunde, ecologie, ecohydrologie en milieukunde. Dat leidde tot een meer complete en kwantitatieve beschrijving van de grondwaterdynamiek, die mogelijk werd gemaakt door nieuwe methoden en het gebruik van computers. Voorbeelden van nieuwe parameters zijn regimecurves en duurlijnen van de grondwaterstand. Maar ook werd er ‘nieuwe’ informatie weergegeven, zoals kwel- en infiltratieklassen (Finke *et al.*, 1999). De ‘kaart’ evolueerde tot een geografisch informatiesysteem waarmee gebiedsdekkend de grondwaterdynamiek met een groot scala van parameters kon worden weergegeven. De grondwatertrappen (Gt’s) werden vervangen door grondwaterdynamiek (Gd). Projecten om de Gd te actualiseren vonden tot nu toe voornamelijk in het Pleistocene deel van Nederland plaats.

Grondwaterbeheerders gebruiken de Gd-informatie voor grondwaterafhankelijk peilbeheer, volgens de systematiek die ontwikkeld is voor Waternood (Stowa, 2003). Hierbij wordt gestreefd naar het realiseren van een gewenst grond- en oppervlaktewaterregime (GGOR). Een probleem voor waterbeheerders in Holocene gebieden is dat zij bij het realiseren van de GGOR rekening moeten houden met de risiconormering door de Commissie Waterbeheer 21^e eeuw (WB21) (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000; Unie van Waterschappen, 2002). Het realiseren van de GGOR’s leidt tot veranderingen in de dynamiek van watersystemen waardoor risico’s van wateroverlast veranderen. De risiconormering is gericht op inundaties en extreem hoge grondwaterstanden als gevolg van extreme neerslag-*events*, waarbij de afwateringsmiddelen de neerslag niet kunnen afvoeren.

Om GGOR’s te kunnen afstemmen op de risiconormering voor wateroverlast (WB21), is behoefte aan informatie over de relatie tussen grond- en oppervlaktewaterstand (Knotters *et al.*, 2002). Met name is van belang vanaf welke drooglegging zich inundatieproblemen voordoen als gevolg van extreme neerslag-*events*. Als bekend is in welke mate inundatierisico’s zijn te verkleinen door aanpassing van het peilbeheer, dan kan een betere afweging worden gemaakt tussen maatregelen om de GGOR te realiseren, handhaven van oppervlaktewaterberging door diepe drooglegging of vergroting van de maalcapaciteit.

Uit de inventarisatie van Knotters *et al.* (2002) blijkt dat er voor gebieden met een beheerst peil meer informatie nodig is over de relatie tussen de grondwaterstand en de oppervlaktewaterstand, wil in deze gebieden de Waternoodsystematiek in praktijk kunnen worden gebracht. In relatief weinig gebieden in het Holocene deel van

Nederland is tot nu toe de Gd geactualiseerd. Bij een Gd-kartering in Holocene Nederland met beheerste peilen is er behoefte aan extra informatie om inzicht te krijgen in de realisatiemogelijkheden van GGOR, afhankelijk van het te voeren peilbeheer. Het gaat vooral om informatie over drainageweerstanden en de opbollingsprofielen tussen afwateringsmiddelen als gevolg van neerslag.

1.2 Doelstelling

Het doel van het project is te onderzoeken hoe de relatie grondwaterstand-oppevlaktewaterstand gebiedsdekkend kan worden beschreven in gebieden met een klei deklaag, en hoe deze relatie gebruikt kan worden in een Gd-kartering van deze gebieden. Een belangrijk aspect daarbij is de keuze van een meetnetopzet waarmee de relatie tussen grondwaterstand en oppervlaktewaterstand met een minimale meetinspanning zo goed mogelijk kan worden vastgesteld. Hiervoor worden drie bepalingwijzen voor deze relatie op hun bruikbaarheid voor toepassing in een Gd-kartering onderzocht. Het gaat daarbij om de schatting van de drainageweerstand:

1. uit een fysische interpretatie van een tijdreeksmodel
2. uit het opbollingsprofiel over een stationaire periode en
3. uit het opbollingsprofiel over een willekeurige 14 daagde winterperiode.

Het project is geformuleerd in overleg met het waterschap Rivierenland en in dit waterschap is het onderzoek ook uitgevoerd. Het project draagt echter bij aan de oplossing van een problematiek die verder reikt dan de grenzen van het Waterschap Rivierenland, namelijk de mogelijkheid om bij de Gd-kartering belangrijke informatie te verzamelen voor toepassing van de Waternoodsystematiek en risiconormering volgens WB21 in gebieden met een klei deklaag.

1.3 Opbouw

In hoofdstuk 2 wordt de werkwijze besproken waarbij een onderverdeling is gemaakt in de werkwijze op hoofdlijnen (§ 2.1.), de gegevensverzameling (§ 2.2.) en de gegevensverwerking (§ 2.3.). Hoofdstuk 3 behandelt de resultaten onderverdeeld in de bepaling van de drainageweerstand uit tijdreeksanalyse (§ 3.1.), de bepaling van de drainageweerstand uit opbollingsprofielen (§ 3.2.), het elektrisch geleidingsvermogen (§ 3.3.) en een vergelijking van de verschillende berekeningsresultaten (§ 3.4.). In hoofdstuk 5 wordt afgesloten met de conclusies.

2 Werkwijze

2.1 Schatten van de drainageweerstand

De meest directe manier om de drainageweerstand te schatten is uit de opbolling t.o.v. de drainagemiddelen in relatie tot de afvoer. De drainageweerstand wordt berekend als het quotiënt van opbolling en de specifieke afvoer bij stationaire stroming (CHO TNO, 1986). De vereiste meetinspanning voor deze bepalingwijze is relatief groot; er moet namelijk eerst worden vastgesteld of gedurende een periode stationariteit kan worden verondersteld, en over deze periode moet zowel meting van het slootpeil als de grondwaterstand in het perceel plaatsvinden. Bovendien moeten de meetlocaties ten opzichte van elkaar worden ingemeten om de hoogteligging te kunnen bepalen.

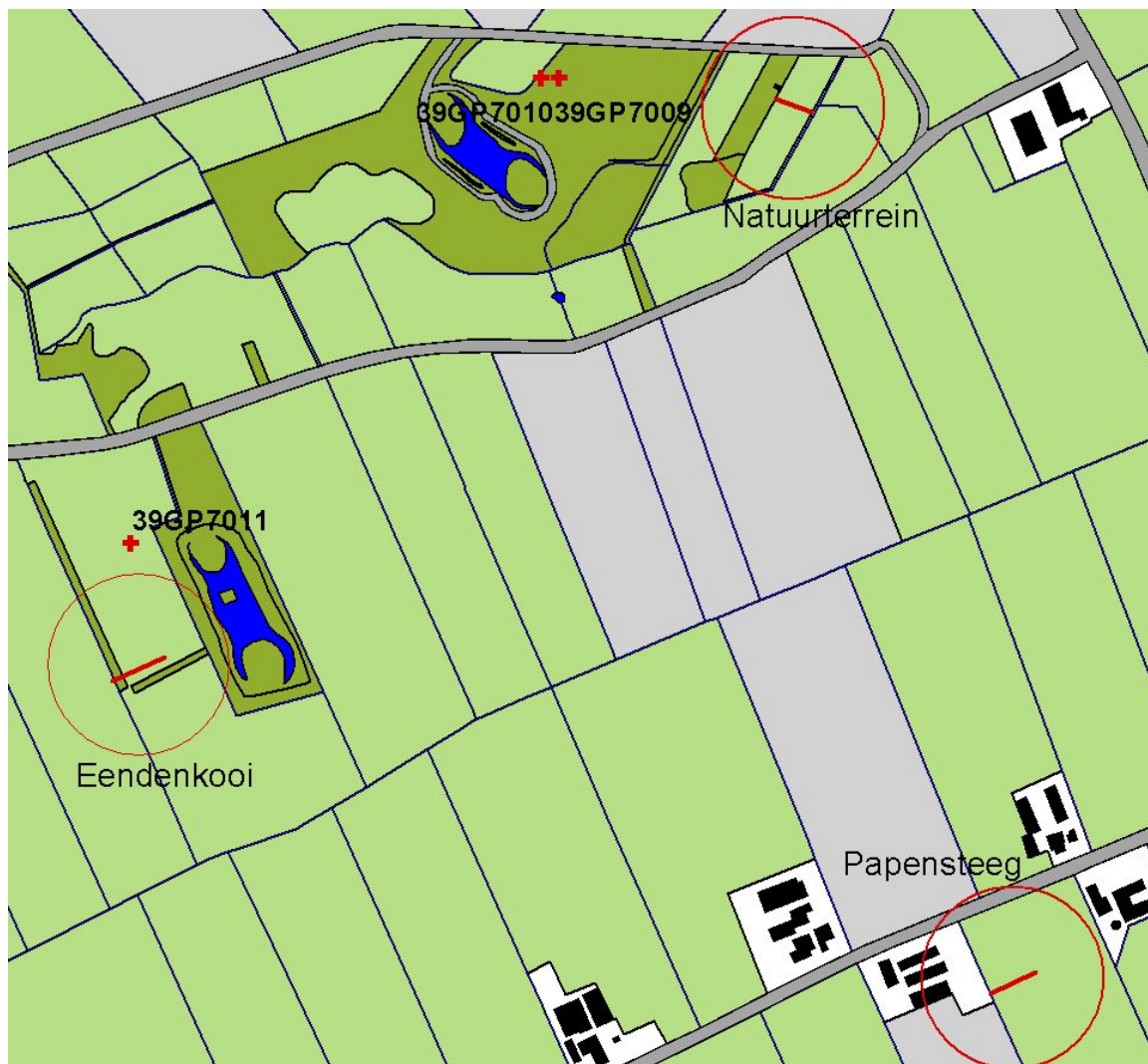
Daarnaast wordt onderzocht of ook zonder gebruik te maken van een hoogfrequente meetreeks van grondwaterstanden een schatting van de drainageweerstand uit opbolling plausibele waarden oplevert.

Een andere mogelijkheid, die een langduriger meetinspanning vereist maar op minder locaties, is de schatting van de drainageweerstand uit de coëfficiënten van een fysisch geïnterpreteerd tijdreeksmodel (Knotters en Bierkens, 2000). Hiervoor dient over een periode van enkele jaren de grondwaterstand op een meetlocatie nabij het midden van het perceel bepaald te worden, het slootpeil hoeft niet gemeten te worden.

Om de geschiktheid van de bovengenoemde bepalingwijzen van de drainageweerstand te onderzoeken is dit project gestart. In vier percelen in het land van Maas en Waal ca. 5 km ten zuiden van Wamel, allen gelegen in een komklei gebied met een beheerst peil, zijn tussen April 2003 en April 2004 metingen van de grond- en oppervlaktewaterstand uitgevoerd. Het meetnet dat hierbij is gehanteerd bestaat uit meetraaien van 6 grondwaterstandsbuizen loodrecht op de sloot met een afstand tot de sloot van respectievelijk 0, 1,5, 3, 6, 12, 25 en 50 meter. In elk van de vier percelen is een meetraai geplaatst waarin de grond- en oppervlaktewaterstanden met een frequentie van eens per halfuur automatisch worden geregistreerd. Gedurende de meetperiode is de meetopstelling in één perceel door de grondeigenaar verwijderd. Deze onvolledige meetreeks is in dit onderzoek buiten beschouwing gelaten.

De lange tijdreeksen van grondwaterstanden in drie peilbuizen in de nabije omgeving van de raaien zijn geanalyseerd. De ligging van de drie raaien en de nabij gelegen peilbuizen is weergegeven in figuur 1.

Ook is, gebruikmakend van dezelfde dataloggers waarmee de waterstand wordt geregistreerd, een regenmeter ontworpen en geplaatst om te kunnen beschikken over hoogfrequente en gelijktijdige waarnemingen van zowel neerslag als grondwaterstand. Daarnaast is in de meetraai van grondwaterstandsbuizen tweemaal het elektrisch geleidingsvermogen bepaald om een indicatie te krijgen over het al dan niet optreden van kwel.



Figuur 1. Ligging van de meetraaien en locaties van peilbuizen nabij Wamel.

2.2 Gegevensverzameling

2.3 De onderzoekspercelen

De drie percelen waarin grondwaterstandsmetingen hebben plaatsgevonden zijn geselecteerd op basis van het veronderstelde homogene kleiprofiel dat kenmerkend is voor komgronden en worden hieronder kort beschreven.

Het grondgebruik in het perceel aangeduid als 'natuurterrein' is grasland. De peilbeheersing maakt deel uit van het natuurterrein. Het hele jaar wordt hier een hoog slootpeil gehandhaafd. In het perceel zijn nog de rondingen van oude akkers met greppels te zien; deze greppels functioneren niet meer. Het hoogteverschil tussen akker en greppel is klein. De bodem bestaat tot tenminste 2 m diepte uit zware komklei. Het filter van de grondwaterstandbuizen ligt tussen 110 – 210 cm

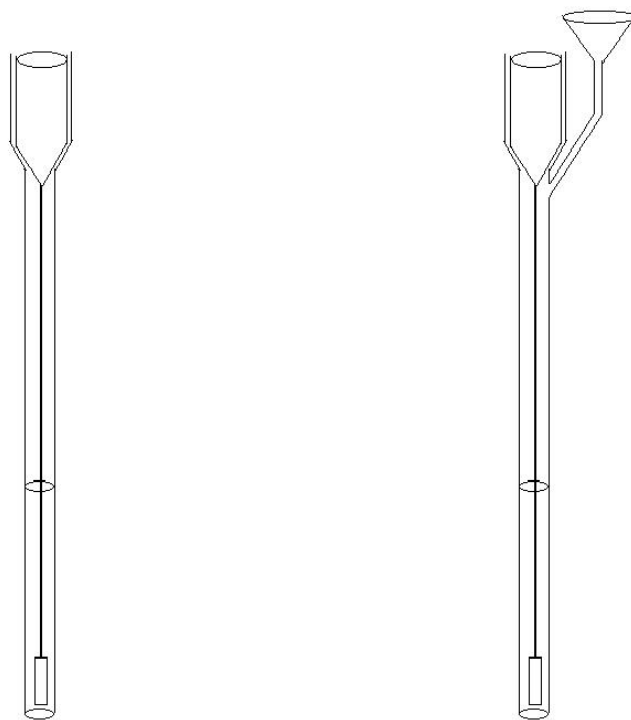
beneden het maaiveld. De uit profielkenmerken geschatte GHG t.o.v. maaiveld bedraagt 10 cm en de GLG 80 cm voor de meetlocaties van de gehele raai.

Het grondgebruik in het perceel aangeduid als 'Eendenkooi' is grasland. Er wordt hier een zomer- en winterpeil gehanteerd. In de zomer wordt water ingelaten. In de winter is de slootwaterstand laag en gedurende een droge periode in de winter is de sloot zelfs niet watervoerend. De bodem bestaat tot 2 m diepte uit zware komklei. Het filter van de grondwaterstandsbuizen ligt tussen 50 – 150 cm beneden het maaiveld. De uit profielkenmerken geschatte GHG t.o.v. maaiveld bedraagt 10 cm en de GLG 110 cm voor de gehele raai met uitzondering van het hoger gelegen maaiveld op 3 m van de sloot waar de geschatte GHG en GLG respectievelijk 30 en 130 cm bedragen. In dit perceel is, naast de raai met grondwaterstandsbuizen, ook de zelf ontworpen regenmeter geïnstalleerd.

1. Het grondgebruik in het perceel aangeduid als 'Papensteeg' is grasland. Er wordt hier een zomer- en winterpeil gehandhaafd. In de zomer wordt water ingelaten. In de winter is de slootwaterstand laag; gedurende een droge periode in de winter is de sloot zelfs niet watervoerend. De bodem bestaat uit een bovengrond van lichte klei met daaronder komklei, die op ca 130 cm diepte overgaat in een zandondergrond. Het perceel ligt bol. In het perceel ligt volgens de eigenaar een ca 20 jaar oude drainagesysteem. De werking van de drainage lijkt, zowel volgens onze waarneming als die van de grondgebruiker, gering. Het filter van de grondwaterstandsbuizen in de meetraai ligt tussen 80 – 180 cm beneden het maaiveld. De uit profielkenmerken geschatte GHG t.o.v. maaiveld bedraagt 40 cm en de GLG 100 cm voor de gehele raai.

2.3.1 Waterstandsmetingen

Voor het plaatsen de meetraai met grondwaterstandsbuizen in de onderzoekspercelen is met een Edelmanboor een boorgat van ongeveer 5 cm doorsnede tot tenminste 50 cm onder het geschatte GLG niveau gemaakt. Hierin zijn PVC-buizen met een doorsnee van 32 mm geplaatst met geperforeerde PVC-buis in de onderste meter als filter. Aan de bovenzijde van de buis is via een verloopmof een buis met een diameter van 5 cm gezet waarin de datalogger wordt opgehangen. De raai 'Papensteeg' is geheel onder maaiveld afgewerkt in verband met het grondgebruik. De andere twee raaien zijn zó geplaatst dat de buizen met een diameter van 5 cm waarin de dataloggers zich bevinden boven het maaiveld uitsteken. Figuur 2 geeft een grondwaterstandsbuis met meetapparatuur schematisch weer.



Figuur 2. Schematische weergave van een grondwaterstandsbuis en regenmeter met meetapparatuur.

Het registreren van de waterstand vindt plaats door meting van de capaciteit van het water langs een kabel die aan de onderzijde is geaard middels een metalen gewicht in direct contact met het water in de grondwaterstandsbuis. De apparatuur is vooraf geijkt zodat een gemeten capaciteit direct wordt omgerekend in de hoogte van de waterstand langs de meetkabel. De waterstanden kunnen met verschillende frequenties worden gemeten, en worden opgeslagen in een datalogger die met behulp van een PC en een verbindingkabel kan worden uitgelezen. De dataloggers waarmee de waterstand is gemeten functioneerde in het begin van de meetperiode niet naar behoren. Hierdoor zijn diverse forse hiaten in de meetreeksen van de drie raaien ontstaan. Vanaf juli 2003 functioneerde, door vervanging van een verbindingkabel, de meetopstelling en komen vrijwel complete meetreeksen met waterstanden beschikbaar. De meetreeksen die in dit onderzoek zijn gebruikt beslaan daarom noodgedwongen slechts 9 maanden. Met name voor de tijdreeksanalyse is dit ondanks het voorkomen van zowel relatief diepe als ondiepe grondwaterstanden eigenlijk een te korte meetperiode.

De eerste buis van elke meetraai staat in de sloot, de andere staan in een rechte lijn loodrecht op de sloot in het perceel op afstanden van 1,5, 3, 6, 12, 25 en 50 m uit de sloot. De kortste afstand van een grondwaterstandsbuis naar een andere sloot is altijd groter dan 75 m. Per raai is met een waterpas de maaiveldhoogte bij de grondwaterstandsbuizen en de hoogte van de grondwaterstandsbuis onderling ingemeten zodat de hoogte van de buizen binnen één raai t.o.v. elkaar vergeleken kunnen worden.

2.3.2 Bepaling van neerslag en verdamping

Met een zelf ontwikkelde en gebouwde opstelling is de neerslag gemeten. Hierbij wordt neerslag opgevangen met een trechtervormig opvangelement van een standaard regenmeter en het neerslagwater wordt naar een afgesloten PVC-buis die als opvangreservoir fungeert geleid. De waterstand in het opvangreservoir wordt met dezelfde meetapparatuur en -frequentie opgeslagen als de gemeten standen in de grondwaterstandsbuizen van een meetraai. Figuur 2 geeft de regenmeter met de meetapparatuur schematisch weer. De regenmeter is geplaatst in het perceel 'Eendenkooi'. De neerslaggegevens zoals verzameld met de zelf gebouwde regenmeter zijn gebruikt voor tijdreeksanalyse van gemeten waterstanden in de raaien omdat hiervoor een hoogfrequente en gelijktijdige meting van neerslag en grondwaterstand nodig is.

Bij de tijdreeksanalyse van langere reeksen die in de drie peilbuizen zijn waargenomen is gebruik gemaakt van neerslag- en verdampingscijfers van het KNMI over dertig jaar, gemeten in respectievelijk Herwijnen en de Bilt.

2.3.3 Metingen van het elektrisch geleidingsvermogen

Het elektrisch geleidingsvermogen (EGV) uitgedrukt in mS/m is gemeten om een idee te krijgen van de herkomst van het water. Op 16 juli en 22 augustus 2004 is op alle meetpunten van de drie meetraaien het EGV van grond- en slootwater bepaald. De metingen zijn uitgevoerd met een geijkte EGV-veldmeter. De buizen zijn voor de meting tweemaal met een kogelkleppomp leeggepompt en vervolgens is het EGV gemeten in de grondwaterstandsbuis die inmiddels weer is volgestroomd.

2.4 Gegevens verwerking

2.4.1 Tijdreeksanalyse

Voor de tijdreeksmodellering zoals uitgevoerd in dit onderzoek is hetzelfde lineaire transfer-ruis model gehanteerd als bij de Gd-methode (Gruijter et al, 2004). Er is voor dit model gekozen omdat de tijdreeksparameters fysisch geïnterpreteerd kunnen worden (Knotters en Bierkens, 2000) zodat een schatting van de drainageweerstand mogelijk is. Het volgende model is gebruikt:

$$h(t) = h^*(t) + n(t) \quad t = 1, \dots, T \quad (2.1a)$$

$$h^*(t) = \delta \cdot h^*(t-1) + \omega \cdot P^*(t) \quad t = 1, \dots, T \quad (2.1b)$$

$$n(t) - c = \phi(n(t-1) - c) + a(t) \quad t = 1, \dots, T \quad (2.1c)$$

waarbij t [dagen] de tijd, h [cm] de grondwaterstand ten opzichte van een zeker referentieniveau, h^* [cm] de deterministische component van de grondwaterstand, P^* [cm] het neerslagoverschot, N [cm] een autoregressieve ruiscomponent, a [cm] een normaal verdeeld witte ruisproces met gemiddelde nul [cm] en variantie σ_a^2 [cm²]. c [cm] is de gemiddelde grondwaterstand. De coëfficiënten δ [-] en ω [-] zijn

gewichten die aan respectievelijk de vorige grondwaterstand en het huidige neerslagoverschot worden toegekend. De coëfficiënt ϕ [-] is de autoregressieve parameter van het ruismodel.

Om het model in vergelijking 2.1 te kunnen toepassen zijn als invoer nodig de begintoestanden h_i^* en n_i en een tijdreeks van P_i^* ($i=1, \dots, T$). Verder moeten de vijf parameters c , δ , ω , ϕ en σ_a^2 bekend zijn. Deze parameters worden geschat uit gemeten tijdreeksen van de grondwaterstand en het neerslagoverschot.

Het model in vergelijking 2.1 is gekalibreerd op de korte, hoogfrequente, meetreeksen van grondwaterstanden en op lange meetreeksen van drie peilbuizen met een ongeveer 15-daagse meetfrequentie. Voor de hoogfrequente equidistante meetreeksen zoals in dit project gemeten is het mogelijk het transfer-ruismodel ofwel in een spreadsheet of met een statistisch softwarepakket te kalibreren. De onregelmatige meetfrequentie in de peilbuizen maakt het noodzakelijk om met KALTFN (Bierkens et al., 1999) een transfer-ruismodel ingebed in een kalmanfilter, te kalibreren.

Uit de gekalibreerde parameters van het tijdreeksmodel kunnen de fysische parameters van het hydrologisch systeem geschat worden volgens (Knotters en Bierkens, 2000):

$$\text{De drainageweerstand [dagen]:} \quad \gamma = \frac{\omega}{(1 - \delta)} \quad (2.2)$$

$$\text{De effectieve porositeit [-]:} \quad \phi = \frac{-\Delta t}{\gamma \cdot \ln \delta} \quad (2.3)$$

Gelijktijdige grondwaterstands- en neerslagmetingen met een frequentie van een half uur zijn in dit onderzoek voor de periode van 17 Juli 2003 tot 20 April 2004 gemeten. Deze neerslagcijfers zijn gebruikt voor kalibratie van de tijdreeksmodellen op hoogfrequente meetreeksen van grondwaterstanden voor de geplaatste meetlocaties. De kalibratie van tijdreeksmodellen voor langlopende meetreeksen is uitgevoerd met neerslaggegevens van het KNMI voor station Herwijnen. Verdampingscijfers per etmaal van KNMI station de Bilt zijn voor de hoogfrequente tijdreeksanalyse neergeschaald naar de halfuurs- of uurfrequentie door te wegen naar het gemiddelde temperatuursverloop in een etmaal (Knotters en Jansen, 2004). Er is hierbij een sinusverdeling over een etmaal aangenomen met een minimum om 3:00 uur, een maximum om 15:00 uur en een verhouding minimum/maximum = 1/3.

2.4.2 Opbollingsprofielen

De grondwaterstand tussen drainagemiddelen vertoont afhankelijk van de drainageweerstand en het neerslagoverschot een opbolling. Bij een grotere weerstand kan neerslag minder snel worden afgevoerd naar de drainagemiddelen en ontstaat een grote opbolling. Gegeven een bepaalde drainageweerstand wordt de opbolling bepaald door het neerslagoverschot: hoe groter het neerslagoverschot hoe groter de opbolling. Als voor een bepaalde locatie de drainageweerstand is vastgesteld kan berekend worden welke opbolling afhankelijk van het neerslagoverschot optreedt. De mate van opbolling van het grondwater tussen de drainagemiddelen is van belang voor de realiseren van GGOR en voor het maken van risico inschattingen op wateroverlast afhankelijk van het neerslagoverschot.

Een schatting van de opbolling (h [m]) op een afstand (x [m]) van het perceelsmidden bij een afvoer (q [m²/d]) voor een situatie met alleen horizontale stationaire stroming in een freatisch pakket met constante dikte (D [m]) en doorlatendheid (K [m/d]) naar parallelle drainagemiddelen als gevolg van het neerslagoverschot (N [m/d]) luidt als volgt:

$$\text{Stromingsvergelijking:} \quad q = Kh \frac{dh}{dx} \quad (2.4a)$$

$$\text{Voor Continuïteit} \quad q = N \cdot x \quad (2.4b)$$

$$\text{Te Integreren:} \quad N \cdot x \cdot dx = -K \cdot h \cdot dh \quad (2.4c)$$

$$\text{Na Integratie, } h = h_0; x = 0: \quad N \cdot x^2 = K(h_0^2 - h^2) \quad (2.4d)$$

$$\text{De Opbolling, } h_0 + h \approx 2D: \quad h = h_0 - \frac{N \cdot x^2}{2 \cdot K \cdot D} \quad (2.4e)$$

Dit betreft een sterk vereenvoudigde schematisatie van stroming in een dwarsprofiel loodrecht op de drainagemiddelen waaruit wel duidelijk wordt dat het opbollingsprofiel een kwadratische functie is van de afstand tot het perceelsmidden. Met de formules van Ernst (Ernst, 1956), waarin de drainageweerstand in verticale horizontale, radiale en intree componenten is verdeeld kunnen voor veldsituaties drainageweerstanden en afvoeren worden berekend, hiervoor zijn echter veel, vaak moeilijk te schatten, parameters nodig. De radiale- en intreeweerstand zijn van belang voor de vorm van het opbollingsprofiel. Deze componenten van de drainageweerstand zorgen voor een lokaal hogere weerstand nabij de drainagemiddelen en daardoor voor een steiler verloop nabij de drainagemiddelen.

De gemeten opbollingsprofielen in de meetraaien worden uitzet in figuren 8, 9 en 10 samen met een, op de meetpunten gefit, kwadratisch model zoals wordt verondersteld in formule 2.4.

Opbollingsprofielen zijn bepaald over vier periodes in de winter van 2003-2004. De opbolling (h_0) in het perceelsmidden is het verschil tussen de grondwaterstand in het midden van het perceel (h_m) en het slootpeil (h_p). Uit de opbolling en het neerslagoverschot kan de drainageweerstand als volgt worden berekend:

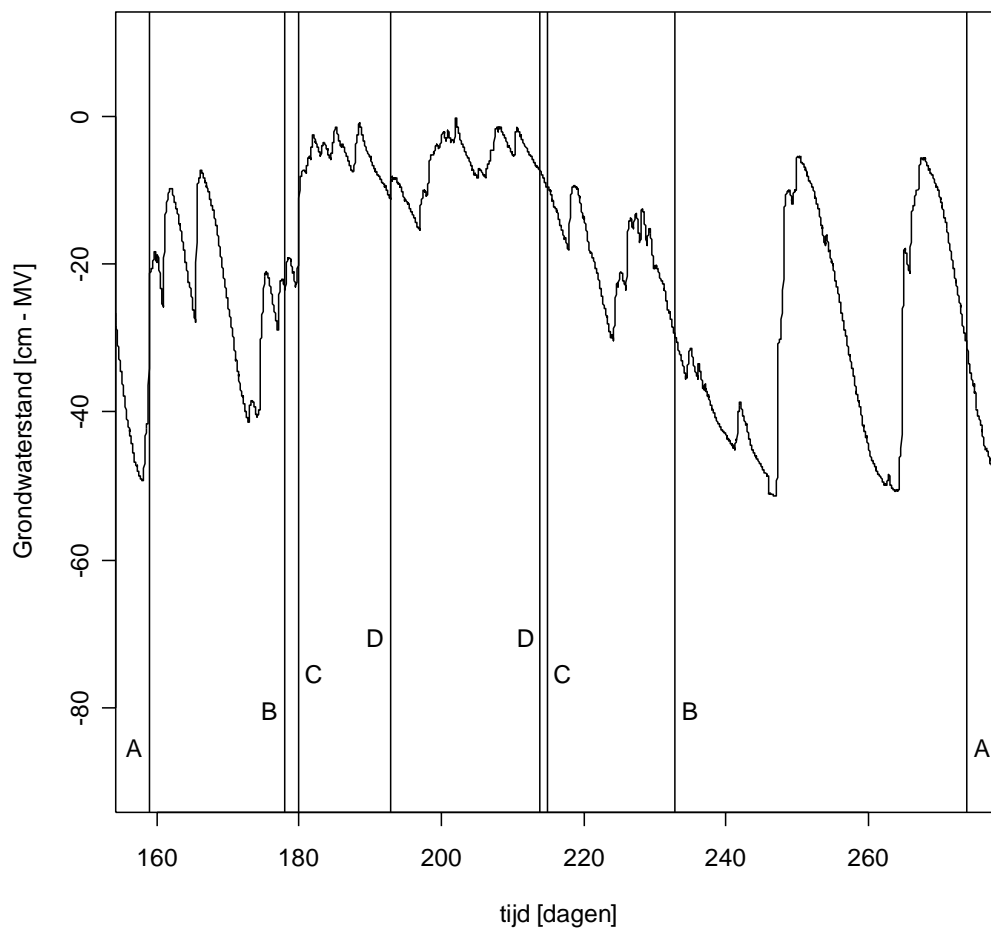
De opbolling [m]:
$$h_0 = h_m - h_p \quad (2.5a)$$

De drainageweerstand [dagen]:
$$\gamma = \frac{h_0}{N} \quad (2.5b)$$

Berekening van de drainageweerstand uit het opbollingsprofiel dient plaats te vinden voor stationaire stroming (CHO TNO, 1986); dat wil zeggen een constante en gelijke af- en aanvoer. Stationaire stroming komt onder natuurlijke omstandigheden nauwelijks voor, het neerslagoverschot is immers niet constant in de tijd. Berekening van de drainageweerstand wordt daarom uitgevoerd met een gemiddeld neerslagoverschot over een periode waarbij het opbollingsprofiel in de begin- en eindsituatie gelijk is. Verondersteld wordt dat het neerslagoverschot geheel wordt afgevoerd en niet leidt tot berging in het profiel. Ook wordt aangenomen dat geen kwel of wegzijging plaatsvindt maar alleen afvoer naar de drainagemiddelen. Het waargenomen opbollingsprofiel kan dan geheel verklaard worden door de weerstand tegen afvoer van het neerslagoverschot naar de drainagemiddelen.

Er zijn uit de meetreeksen van (grond)waterstanden vier periodes gekozen waarvoor geldt dat de opbolling in de begin- en eindsituatie ongeveer gelijk is. Gedurende deze vier periodes treedt afhankelijk van het neerslagverloop echter wel variatie in het opbollingsprofiel op (zie figuur 3). De gemeten grond- en oppervlaktewaterstanden in een meetraai zijn daarom, net als het neerslagoverschot, gemiddeld over de vier periodes. Voor elke periode is een drainageweerstand berekend met formule 2.5.

Om na te gaan of een betrouwbare schatting van de drainageweerstand uit het opbollingsprofiel ook mogelijk is zonder hoogfrequente meetreeks van grondwaterstanden is een schatting van de drainageweerstand gemaakt op basis van slechts twee metingen van de grondwaterstand. Door de drainageweerstand te berekenen uit de opbolling aan het begin en einde van een willekeurige 14 daagse periode tussen 1 januari en 31 maart en te relateren aan het neerslagoverschot over deze periode wordt een schatting van de drainageweerstand gemaakt. Deze twee metingen worden gemiddeld als schatting van de opbolling over de veertiendaagse periode en met gemiddeld neerslagoverschot over dezelfde periode volgens formule 2.5 omgerekend in een drainageweerstand.



Figuur 3. Keuze van vier stationaire periodes op basis van het grondwaterstandsverloop voor Eendenkooi op 50 meter uit de sloot. Periode, A van 21 Dec t/m 14 Apr, B van 9 Jan t/m 4 Mrt, C van 11 Jan t/m 15 Feb en D van 24 Jan t/m 14 Feb.

Als berekening van de drainageweerstand uit opbolling plaatsvindt over een periode waarvan niet is vastgesteld of het opbollingsprofiel in de begin- en eindsituatie gelijk zijn kan ook een verschil in berging de berekende waarde beïnvloeden. Er wordt bij de berekening immers uitgegaan van een waterbalans waarbij het gehele neerslagoverschot wordt afgevoerd naar de drainagemiddelen. Als een deel van het neerslagoverschot niet wordt afgevoerd maar tot een verandering in berging leidt zou hiervoor moeten worden gecorrigeerd. Deze correctie is echter lastig omdat hiervoor een schatting van het opbollingsprofiel en de bergingscoëfficiënten nodig zijn.

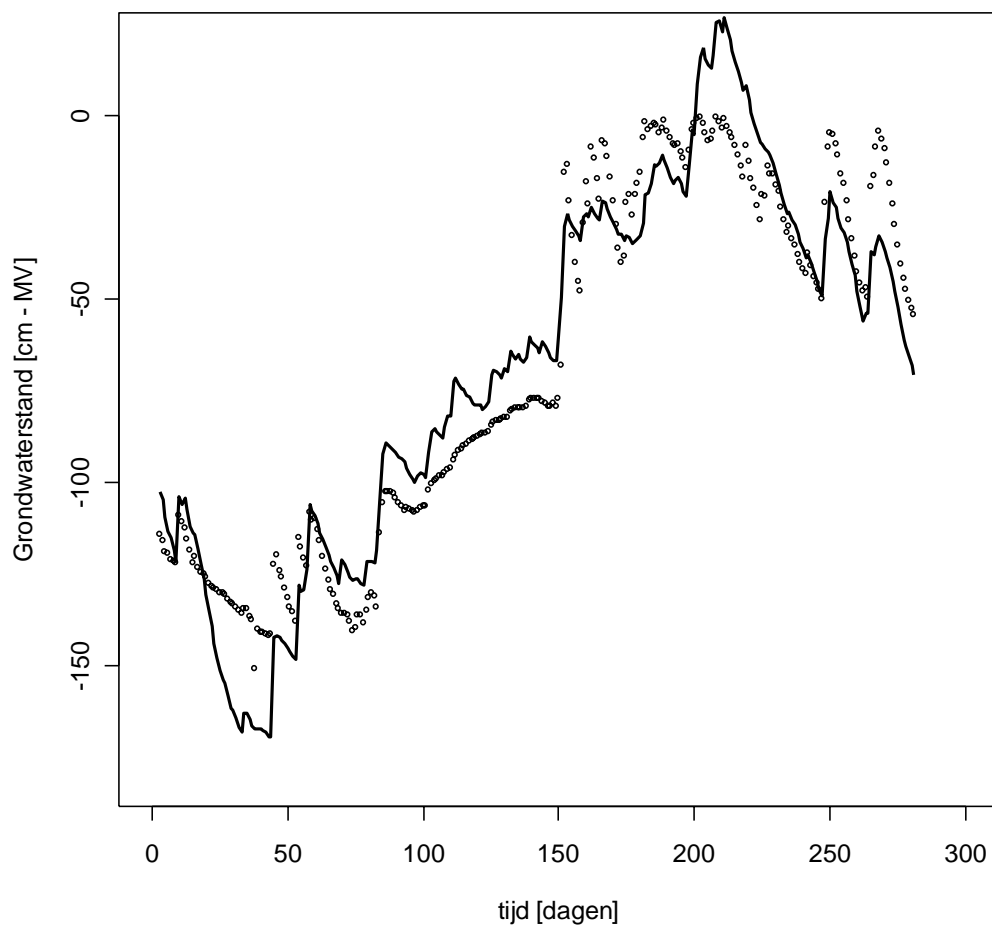
3 Resultaten

3.1 Tijdreeksanalyse

Kalibratie van tijdreeksmodellen is uitgevoerd voor alle meetlocaties waarvoor voldoende metingen van de waterstand beschikbaar zijn, uitgezonderd de slootlocaties. Kalibratieresultaten voor het transfer-ruismodel uit formule 2.1. blijkt afhankelijk van het gebruikte kalibratiealgoritme; kalibraties met GENSTAT en EXCEL leiden voor dezelfde meetreeks tot geringe onderlinge afwijkingen in gekalibreerde tijdreeksparameters. Kalibratie met KALTFN (Bierkens et al., 2002) leidt voor hoogfrequente tijdreeksanalyse vaak tot fysisch niet te verklaren kalibratieresultaten, voor tijdstappen van een dag of langer gaat het beter hoewel ook hier nog regelmatig kalibratieresultaten optreden die fysisch niet verklaarbaar zijn. Alle kalibratieresultaten blijken bijzonder gevoelig voor meetfouten, één foutieve meting van de grondwaterstand op een totaal van meer dan 1000 metingen leidt tot fors afwijkende tijdreeksparameters.

Voor bepaling van de drainageweerstand uit de gekalibreerde tijdreeksparameters is de meetlocatie op 50m van de sloot, vanwege de grootste opbolling, het meest geschikt. De gekalibreerde tijdreeksparameters voor de drie meetlocaties op 50m uit de sloot zijn in tabel 1, 2 en 3 weergegeven. Kalibratie van de hoogfrequente tijdreeksmodellen en presentatie in de figuren is voor de periode van 17 Juli 2003 tot 20 April 2004. Voor elke locatie is de kalibratie achtereenvolgens uitgevoerd voor tijdstappen van een halfuur, zes uur, een dag en vier dagen. Dit leidt tot afwijkende tijdreeksparameters en schattingen van de effectieve porositeit (φ [-]) maar slechts tot beperkt afwijkende schattingen van de drainageweerstand (γ [d]) (zie tabel 1, 2 en 3). De schattingen van de effectieve porositeit uit tijdreeksanalyse voor de meetraaien zijn voor kleigronden laag, de berekende effectieve porositeit voor de langere meetreeksen van grondwaterstanden zijn waarschijnlijker (zie tabel 4).

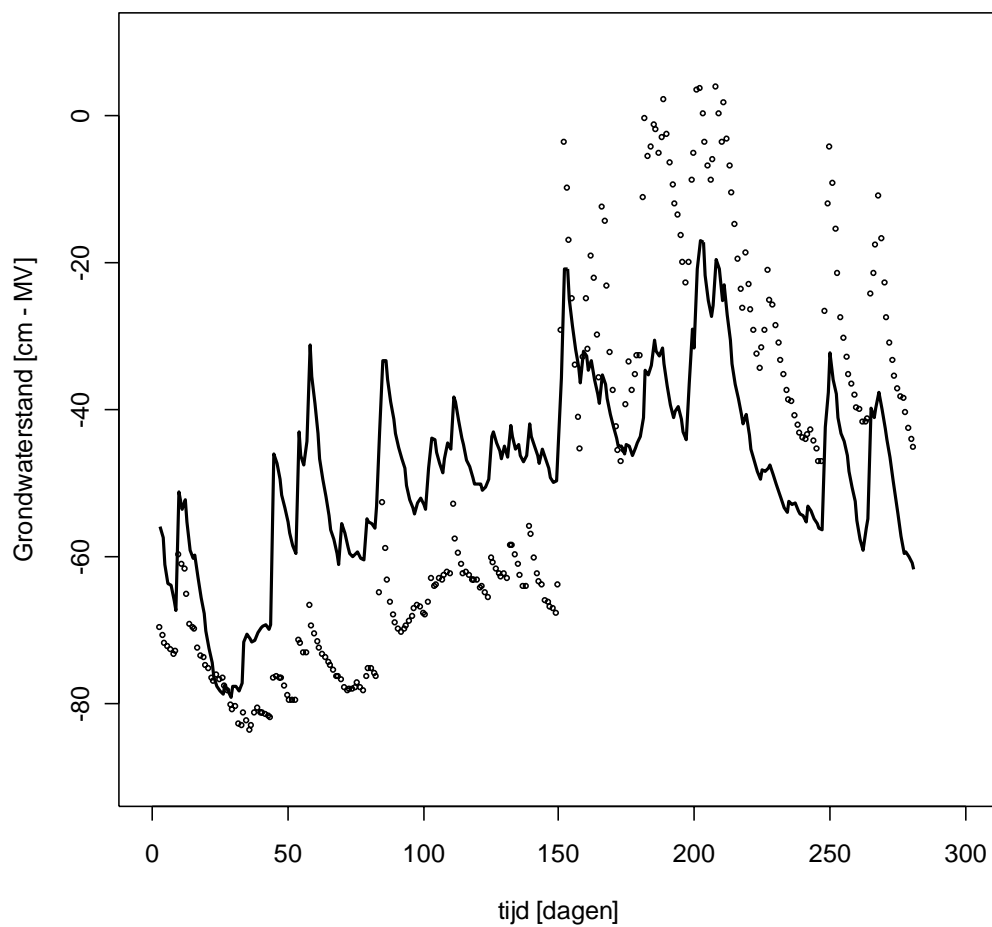
De gekalibreerde tijdreeksmodellen voor een tijdstap van een dag leveren zoals te zien is in figuur 4, 5 en 6 slechts matige fits op. Vooral de maximale opbolling (stijging) in de winter periode blijkt, voor de 'Papensteeg' en 'Natuurterrein' niet door het deterministische deel van het transfer-ruismodel te worden voorspeld. Bij stochastische simulatie hoeft dit niet tot een verkeerde schatting van de extremen, zoals GHG en GLG, te lijden omdat het ruismodel hiervoor compenseert. Voor de bepaling van fysische systeempparameters wordt echter alleen gebruik gemaakt van de het transfer (deterministische) deel van het tijdreeksmodel (zie formule 2.2 en 2.3), hier kan de slechte fit van het transfermodel wel tot verkeerde schattingen van fysische parameters leiden.



Figuur 4. Grondwaterstandsmetingen en het gekalibreerde transfer model voor 'Eendenkooi'.

Tabel 1. Gekalibreerde tijdreeksparameters, drainageweerstand (γ [d]) en effectieve porositeit (φ [-]) voor locatie 'Eendenkooi'

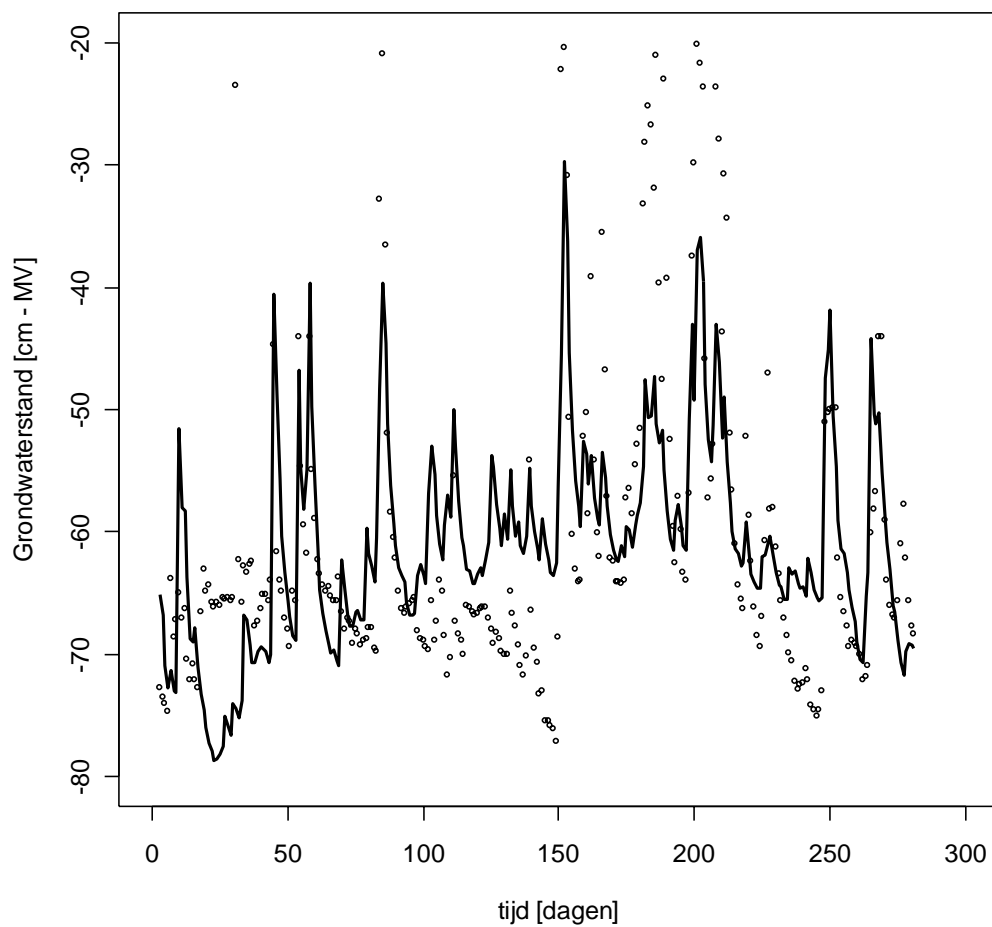
Tijdstap [uur]	$\Delta t=0.5$	$\Delta t=6$	$\Delta t=24$	$\Delta t=24 \Delta m=4d$
Parameter				
δ [-]	1.000	0.995	0.977	0.993
$\omega[\Delta t]$	7.09	11.27	12.26	3.13
d [cm]	-102	-104	-102	-129
ϕ [-]	1.000	0.992	0.963	0.996
γ [d]	492	552	524	462
φ [-]	0.141	0.089	0.081	0.318



Figuur 5. Grondwaterstandsmetingen en het gekalibreerde transfer model voor 'Natuurterrein'.

Tabel 2. Gekalibreerde tijdreeksparameters, drainageweerstand (γ [d]) en effectieve porositeit (φ [-]) voor locatie 'Natuurterrein'

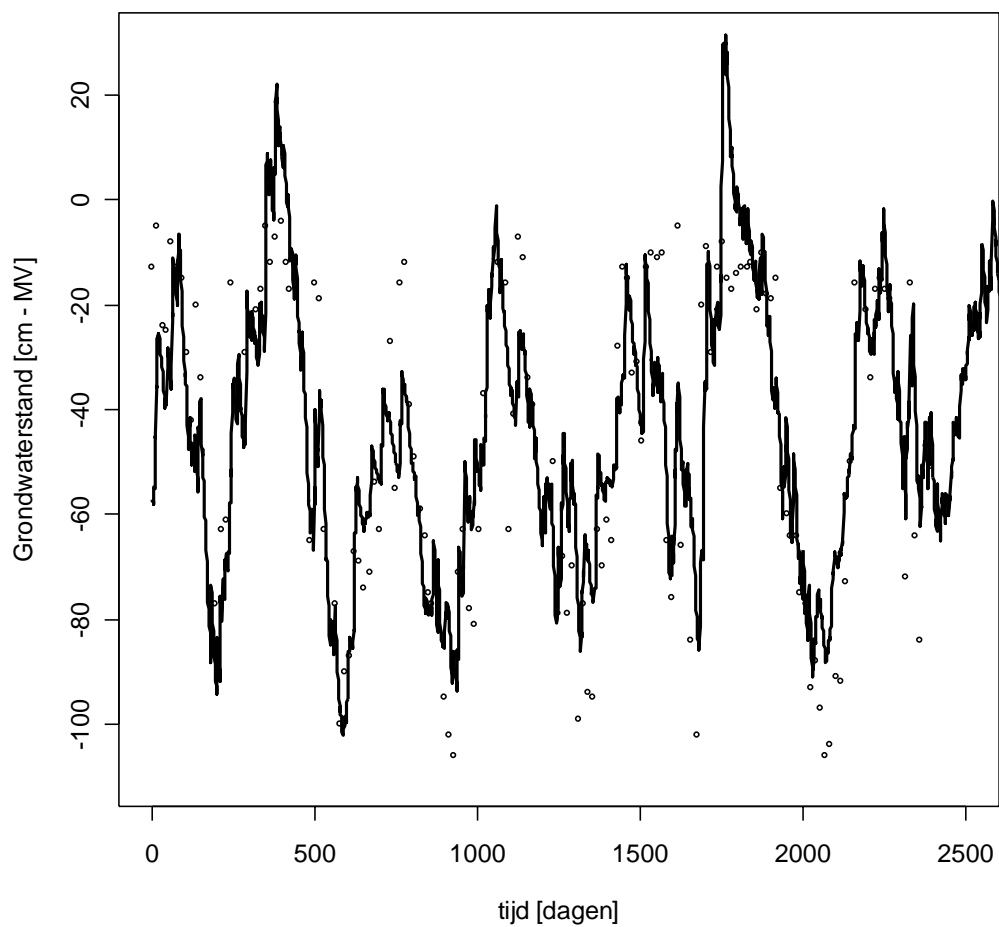
Tijdstap [uur]	$\Delta t=0.5$	$\Delta t=6$	$\Delta t=24$	$\Delta t=24 \Delta m=4d$
Parameter				
δ [-]	0.997	0.970	0.874	0.929
$\omega[\Delta t]$	11.29	10.82	10.23	9.20
d [cm]	-45	-44	-44	-59
ϕ [-]	1.000	0.996	0.979	0.858
γ [d]	90	90	81	130
φ [-]	0.088	0.091	0.091	0.105



Figuur 6. Grondwaterstandsmetingen en het gekalibreerde transfer model voor de 'Papensteeg'.

Tabel 3. Gekalibreerde tijdreeksparameters, drainageweerstand (γ [d]) en effectieve porositeit (φ [-]) voor locatie 'Papensteeg'

Tijdstap [uur]	$\Delta t=0.5$	$\Delta t=6$	$\Delta t=24$	$\Delta t=24 \Delta m=4d$
Parameter				
δ [-]	0.993	0.904	0.656	0.790
$\omega[\Delta t]$	15.49	15.94	13.02	10.86
d [cm]	-64	-64	-64	-65
ϕ [-]	0.997	0.924	0.708	0.767
γ [d]	49	42	38	52
φ [-]	0.064	0.060	0.063	0.082



Figuur 7. Grondwaterstandsmetingen en het gekalibreerde transfer model voor OLGA-buis 39GP7011.

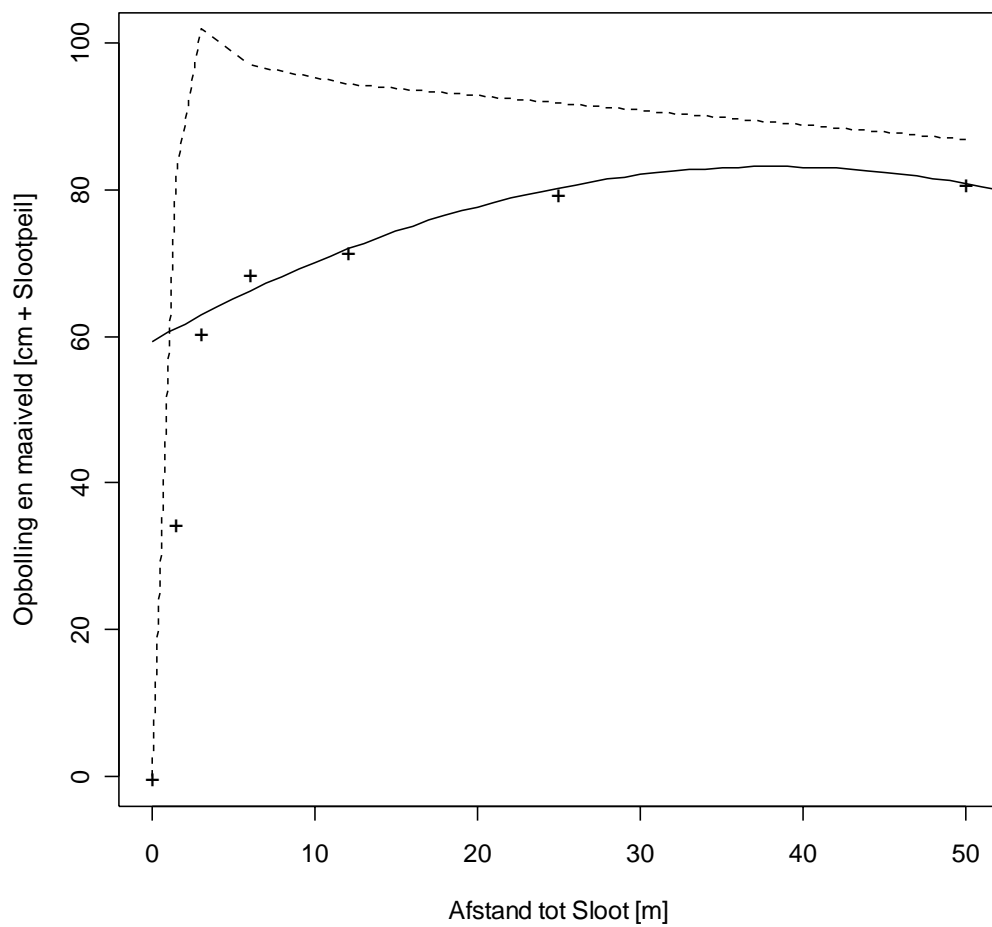
Tabel 4. Gekalibreerde tijdreeksparameters, drainageweerstand (γ [d]) en effectieve porositeit (φ [-]) voor OLGA-buizen

OLGA-buis	39GP7009	39GP7010	39GP7011
Parameter			
δ [-]	0.983	0.983	0.976
ω [d]	6.294	5.593	4.927
d [cm]	-80	-94	-57
ϕ [-]	0.961	0.967	0.936
λ [d]	364	325	202
φ [-]	0.158	0.177	0.200

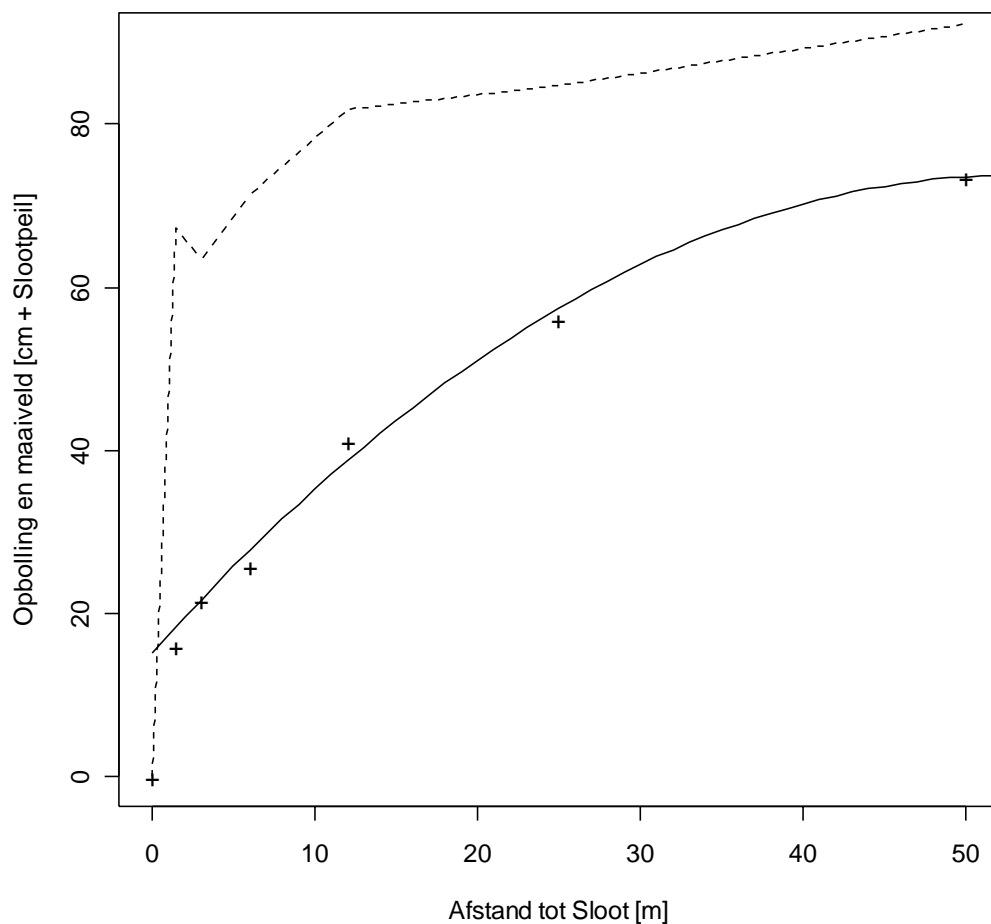
3.2 Opbollingsprofielen

3.2.1 De drainageweerstand over een stationaire periode

De gemiddelde grondwaterstanden t.o.v. het gemiddeld slootpeil is voor elke meetraai voor vier stationaire periodes uitgezet in een opbollingsprofiel. De begin en eindtijdstippen van deze vier periodes zijn bepaald op basis van het grondwaterstandsverloop op 50m uit de sloot in 'Eendenkooi' (zie § 2.2, figuur 3). Door de gemiddelde (grond)waterstanden over de periode van 24 Januari t/m 14 Februari is in elke meetraai is een kwadratisch model gefit conform de veronderstelde vorm van het opbollingsprofiel uit formule 2.4. Bij het fitten van het opbollingsprofiel zijn de slootlocatie en de locatie 1.5 meter uit de sloot niet gebruikt omdat het in formule 2.4 veronderstelde verband alleen van toepassing is als de horizontale weerstand de voornaamste weerstand is. Dichtbij een sloot spelen echter de radiale- en intree weerstand een belangrijke rol, waardoor een steiler verloop verwacht mag worden. Uit de figuren 8, 9 en 10 blijkt dat het veronderstelde kwadratische opbollingsprofiel door de metingen op 3, 6, 12, 25 en 50 meter uit de sloot wordt ondersteund. Voor 'Eendenkooi' en 'Papensteeg' blijken, getuige het niveau verschil tussen de sloot en het meetpunt 3 meter uit de sloot, de intree- en radiale weerstand nabij de sloot een belangrijke component van de drainageweerstand te vormen. Waarschijnlijk wordt de hoge intree en radiale weerstand in deze percelen veroorzaakt door een nagenoeg droogstaande sloot in de winterperiode, terwijl het permanent hoge slootpeil in het perceel 'Natuurterrein' tot een veel geringere intree en radiale weerstand leidt.



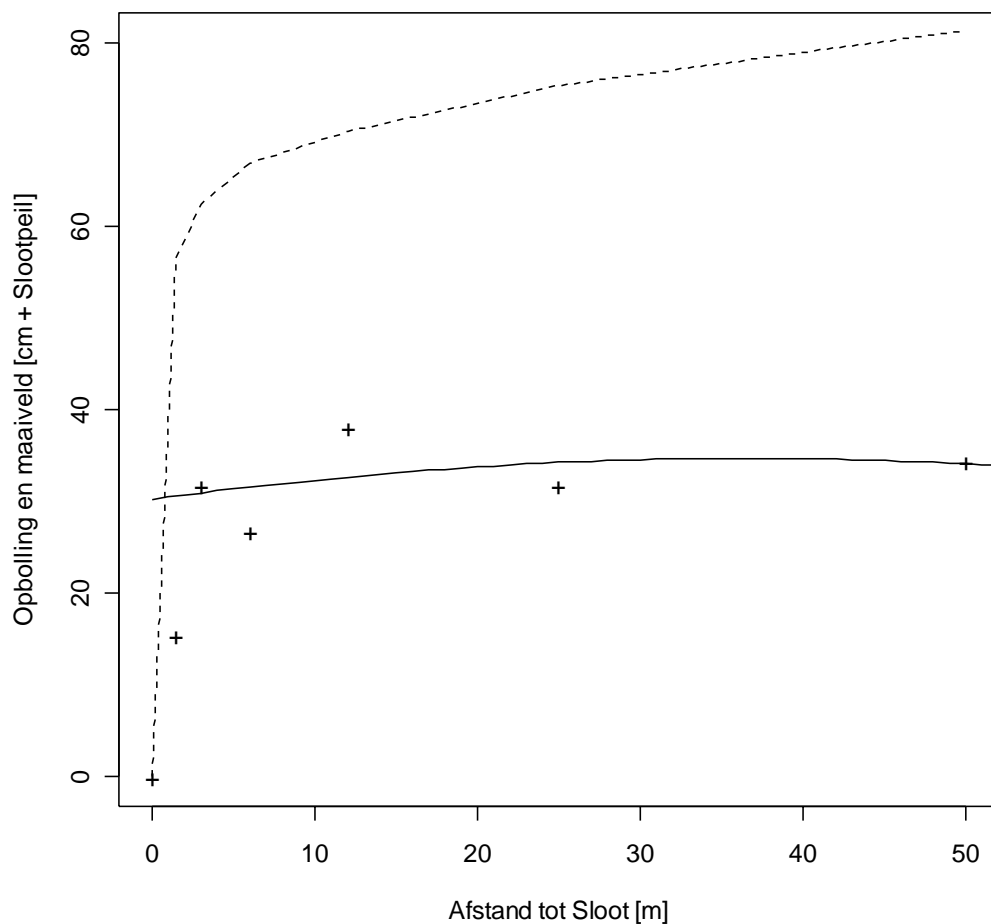
Figuur 8. Gemeten maaiveldhoogte (- -) gemiddelde opbolling (+) en veronderstelde vorm van het opbollingsprofiel (—) voor 'Eendenkooi



Figuur 9. Gemeten maaiveldhoogte (-) gemiddelde opbolling (+) en veronderstelde vorm van het opbollingsprofiel (—) voor 'Natuurterrein'.

Tabel 5. Neerslagoverschot (N) [mm/d], Opbolling (h_0) [cm] en Drainageweerstand (γ) [d] voor verschillende periodes op drie locaties 50 m uit de sloot.

Periode	N	Eendenkooi		Natuurterrein		Papensteeg	
		h_0	γ	h_0	γ	h_0	γ
21 Dec t/m 14 Apr	1.41	66	472	57	406	21	147
9 Jan t/m 4 Mrt	2.26	76	337	66	294	28	122
11 Jan t/m 15 Feb	3.00	80	266	72	241	33	111
24 Jan t/m 14 Feb	3.50	81	231	74	210	34	98



Figuur 10. Gemeten maaiveldhoogte (-) gemiddelde opbolling (+) en veronderstelde vorm van het opbollingsprofiel (—) voor 'Papensteeg'.

Het opbollingsprofiel voor de meetraai 'Papensteeg' vertoont nauwelijks opbolling er is alleen een niveau verschil van ongeveer 30 cm tussen het slootpeil en het grondwater. De radiale- en intreeweerstand nabij de sloot zijn hier een belangrijke component in de drainageweerstand terwijl de horitontale weerstand nauwelijks tot opbolling verder van de sloot leidt. Dit kan worden verklaard uit de grotere doorlatendheid zoals bij een profielverloop gedeeltelijk bestaand uit zand verwacht mag worden. Ook de gemelde maar niet waargenomen drainage speelt mogelijk een rol bij de lagere horizontale weerstand.

De opbollingsprofielen van de drie meetlocaties blijken behoorlijk te verschillend ondanks hun ligging dicht bij elkaar en in vergelijkbare landschappelijke situatie. Deze verschillen kunnen worden vastgesteld omdat hier een complete meetraai beschikbaar was om het opbollingsprofiel te schatten, anders waren de verschillende weerstandscomponenten van de drainageweerstand niet te scheiden geweest. Indien waterbeheerders maatregelen willen nemen om wateroverlast te verminderen of

GGOR te realiseren is het wenselijk om niet alleen inzicht te hebben in de drainageweerstand maar ook in de wijze waarop deze weerstand is opgebouwd omdat hiermee een betere inschatting van de effectiviteit van bijvoorbeeld peilverhoging, uitdiepen van de sloot of de aanleg van buisdrainage kan worden gemaakt.

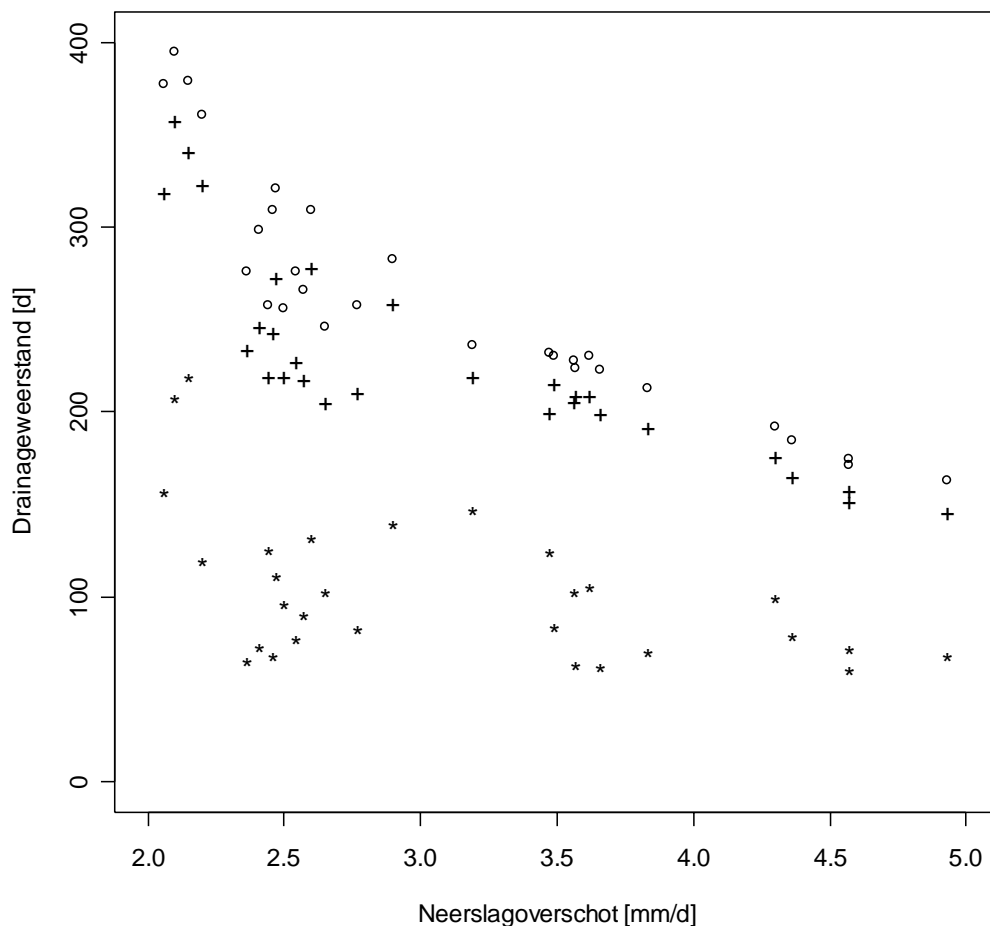
Als voor de locaties 50 meter uit de sloot voor alle drie de percelen de drainageweerstand wordt berekend uit het gemiddeld opbollingsprofiel en neerslagoverschot voor vier periodes volgens formule 2.5, levert dat voor de drie percelen opbollingen, neerslagoverschotten en drainageweerstanden op zoals weergegeven in tabel 5.

De berekende drainageweerstand blijkt afhankelijk van de periode waarover berekening plaatsvindt. Volgens de definitie van de drainageweerstand dient berekening plaats te vinden bij stationaire stroming (CHO TNO, 1986). In dit geval betekent dat een constant neerslagoverschot, hetgeen onder natuurlijke omstandigheden niet over een aaneengesloten periode van meerdere dagen voorkomt. De berekende drainageweerstanden zijn daardoor noodgedwongen allemaal berekend over een situatie die weliswaar over de gehele periode als stationair beschouwd mag worden maar binnen deze periode niet stationair is (zie figuur 3). Dat wil zeggen dat de opbolling niet constant is binnen de meetperiodes, maar wel ongeveer gelijk op het begin- en eindtijdstip van elke periode.

De lagere berekende drainageweerstand bij een groter neerslagoverschot (zie tabel 5) kan worden verklaard uit het samengaan van een relatief grote opbolling samen met een relatief hoog slootpeil in een natte periode. De horizontale stroming vindt, door een hogere grondwaterstand, immers in een dikker watervoerendpakket plaats en de natte omtrek van de sloot is door het hogere slootpeil ook groter waardoor zowel de radiale- als intree weerstand afnemen. Waarschijnlijk is dit een belangrijke reden voor de lagere schattingen van de drainageweerstand in een natte periode. Dit effect kan nog worden versterkt doordat bij een geringere opbolling een grotere kwelflux zal optreden waardoor de afvoer naast het neerslagoverschot bestaat uit kwel. De afvoer wordt dan onderschat en dat leidt tot een overschatting van de drainageweerstand in een droge situatie.

3.2.2 De drainageweerstand benaderd

Door een drainageweerstand te berekenen uit de opbolling aan het begin en einde van een willekeurige 14-daagse periode tussen 1 januari en 31 maart en deze opbolling te relateren aan het neerslagoverschot over deze periode wordt een schatting van de drainageweerstand gemaakt, zonder dat hiervoor een hoogfrequente meetreeks van waterstanden nodig is. Een eventueel verschil in berging tussen de begin- en eindsituatie zal de schatting van de drainageweerstand naar verwachting echter minder nauwkeurig maken. Schattingen van de drainageweerstand voor 34 veertiendaagse periodes met een neerslagoverschot groter dan 2 mm/d van de in totaal beschikbare 78 veertiendaagse periodes tussen 1 januari en 31 maart zijn weergegeven in figuur 11.



Figuur 11. Schattingen van de drainageweerstand voor een veertiendaagse periode bij een neerslagoverschot groter dan 2 mm/dag voor drie locaties. \circ = 'Eendenkooi', $+$ = 'Natuurterrein' en $*$ = 'Papensteeg'.

Schattingen van de drainageweerstanden uit figuur 11 voor de drie locaties bij neerslagoverschotten van 2.26, 3.00 en 3.50 mm/d staan in tabel 6.

Vergelijking van de drainageweerstanden in tabellen 5 en 6 toont aan dat de drainageweerstand ook nauwkeurig kan worden vastgesteld over een willekeurige veertiendaagse winter periode met een neerslagoverschot groter dan 2 mm/d.

Tabel 6. Schatting van de drainageweerstanden uit opbollingsprofielen voor 14 daagse periodes op drie locaties voor verschillende neerslagoverschotten

	Eendenkooi	Natuurterrein	Papensteeg
$N[\text{mm/d}]$	$\gamma[\text{d}]$	$\gamma[\text{d}]$	$\gamma[\text{d}]$
2.26	325	275	120
3.00	250	225	110
3.50	225	210	100

3.3 Het elektrisch geleidingsvermogen

In de tabel 8 zijn de EGV-metingen in de meetraaien weergegeven. De afstand 0 is het water in de sloot. De overige waarden zijn bepaald in de grondwaterstandbuizen van de drie meetraaien met oplopende afstanden tot de sloot.

In juli en augustus lagen op de meetlocaties het EGV respectievelijk tussen 22 – 40 mS/m en 23 – 53 mS/m. Deze waarden duiden er op dat het een menging is van rivierwater dat ingelaten wordt, regenwater en grondwater. We kunnen het aanduiden als een matig basen rijk schoon grondwatertype. In tabel 7 zijn van de belangrijkste watertypen uit de hydrologische kringloop het EGV weergegeven (Kemmers, et al, in prep).

Indien de waterkwaliteit bepaald zou worden door voornamelijk ingelaten rivierwater, hetgeen in de zomerperiode aannemelijk is, zou een hoger elektrisch geleidingsvermogen zijn waargenomen (zie tabel 7). Aangezien de meetlocaties in de laagst gelegen delen van de kom liggen is het waarschijnlijk dat het rivierwater hier slechts beperkt invloed heeft omdat het gebiedseigen neerslag- en grondwater niet geheel worden afgevoerd maar zich vermengt met een beperkte hoeveelheid ingelaten rivierwater. Op basis van het gemeten elektrisch geleidingsvermogen is niet met zekerheid te zeggen of al dan niet kwel optreedt. Omdat in de sloten ook geen roestvorming is waargenomen wordt aangenomen dat geen kwel van betekenis optreedt.

Tabel 7. Typische waarden van het elektrisch geleidingsvermogen voor een aantal watertypen (bron: Kemmers, et al, in prep).

Watertype	EGV [mS/m]
Regenwater (atmoel.)	5
Hard grondwater (Lithoel.)	65
Zacht grondwater	22
Zeewater (Thalassoel.)	5200
Rijnwater	100

Er is geen duidelijk verloop van het EGV afhankelijk van de afstand tot de sloot. De gemeten waarden in Papensteeg zijn iets hoger dan op de andere twee locaties en hier is ook het EGV van het grondwater iets hoger dan in de sloot. Het iets hogere geleidingsvermogen in Papensteeg is mogelijk het gevolg van het intensievere landbouwkundig gebruik van dit perceel, de andere twee percelen worden minder intensief gebruikt of als natuur beheerd. Ook zal de zandondergrond van 'Papensteeg' bij een zelfde potentiaalverschil tot een groter kwelflux leiden dan in de andere percelen, waardoor mogelijk een hoger elektrisch geleidingsvermogen wordt gemeten.

Tabel 8. Het elektrisch geleidingsvermogen op twee dagen voor de drie meetraaien.

Locatie	Afstand tot sloot (m)	EGV [mS/m]	
		16juli	22-Aug
Natuurterrein	0	38	35
Natuurterrein	1,5	27	25
Natuurterrein	3	23	23
Natuurterrein	6	22	24
Natuurterrein	12	29	27
Natuurterrein	25	36	36
Natuurterrein	50	36	37
Eendenkooi	0	34	32
Eendenkooi	1,5	30	32
Eendenkooi	3	31	34
Eendenkooi	6	37	26
Eendenkooi	12	35	31
Eendenkooi	25	33	35
Eendenkooi	50	29	26
Papensteeg	0	38	38
Papensteeg	1,5	38	45
Papensteeg	3	33	53
Papensteeg	6	37	40
Papensteeg	12	33	40
Papensteeg	25	33	42
Papensteeg	50	39	49

3.4 Vergelijking van berekende drainageweerstanden

Omdat de berekeningswijze van de drainageweerstand uit het opbollingsprofiel het best aansluit bij de definitie van drainageweerstand wordt dit berekeningsresultaat hier als referentie gebruikt. De, op deze wijze berekende drainageweerstand, varieert al met een factor twee afhankelijk van de periode waarover berekening plaatsvindt. Volgens de definitie dient berekening plaats te vinden voor een stationaire situatie en die is onder natuurlijke omstandigheden zo kort dat deze periode zich in praktische zin niet leent voor berekening van de drainageweerstand. Daarnaast zijn er fysische verklaringen mogelijk voor de verschillende berekeningsresultaten afhankelijk van de periode waarover berekening plaatsvindt. Als wordt aangenomen dat de relatief grote opbolling in een natte periode gepaard gaat met een relatief hoger slootpeil dan mag een lagere drainageweerstand verwacht worden. De horizontale stroming vindt door een hogere grondwaterstand immers in een dikker watervoerendpakket plaats en de natte omtrek van de sloot is groter waardoor de intreeweerstand afneemt met als gevolg een lagere drainageweerstand.

Voor 'Papensteeg' en 'Natuurterrein' leveren de berekende drainageweerstand uit opbolling waarden die ongeveer de 2.5 keer zo groot zijn als die uit tijdreeksanalyse. Voor 'Eendenkooi' is de schatting van de drainageweerstand uit opbolling ongeveer de helft van die uit tijdreeksanalyse. Een mogelijke verklaring voor het feit dat soms overschatting en soms onderschatting optreedt is de mate waarin het transfer gedeelte van het tijdreeksmodel de seizoensfluctuatie correct modelleert. Bij

'Eendenkooi' overschat het tijdreeksmodel de seizoensfluctuatie de hoogste grondwaterstanden volgens het model zijn een overschatting van de gemeten grondwaterstanden (zie figuur 3). Bij 'Natuurterrein' en 'Papensteeg' onderschat het transfereerdeel van het tijdreeksmodel de seizoensfluctuatie de hoogste grondwaterstanden volgens het model zijn een onderschatting van de gemeten grondwaterstanden (zie figuren 4 en 5). Dat een tijdreeksmodel geen goede inschatting levert van het grondwaterstandsverloop kan diverse redenen hebben maar een belangrijke reden is dat de meetperiode van 9 maanden te kort is voor een goede kalibratie (Knotters en Bierkens, 1999). Uit tijdreeksmodellering op OLGA-buis 38GP7011 blijkt dat hieruit een drainageweerstand wordt geschat die redelijk overeenstemt met die bepaald uit de opbolling in dit perceel. Figuur 7 Geeft aan dat voor buis GP397011 de seizoensfluctuatie redelijk met het tijdreeksmodel wordt ingeschat en over achtereenvolgende jaren niet consequent tot een over- of onderschatting leidt. Voor de OLGA-buizen 38GP7009 en 38GP7010 is een goede vergelijking lastig omdat deze buizen wel dichtbij de meetraai Natuurterrein liggen maar in een ander perceel, de orde grootte van de berekende drainageweerstanden stemt echter redelijk overeen (zie tabel 4 en 5).

Schattingen van de drainageweerstand uit opbolling over een veertiendaagse periode waarvan niet is vastgesteld of het een stationaire situatie betreft leveren vergelijkbare waarden als de schattingen uit opbolling over een stationaire periode. Dit geeft aan dat bepaling van de drainageweerstand ook zonder hoogfrequente meetreeks, waaruit een stationaire periode wordt gekozen, op basis van slechts twee metingen mogelijk is. Deze beide metingen van de grondwaterstand dienen wel uitgedrukt te worden t.o.v. het slootpeil om de opbolling te kunnen bepalen.

4 Conclusies

De vorm van de opbollingsprofielen in de drie raaien blijken behoorlijk te verschillen ondanks hun korte onderlinge afstand in een vergelijkbare landschappelijke situatie. Deze verschillen kunnen worden vastgesteld omdat in deze studie complete raaien, van sloot tot perceelsmiddens, beschikbaar waren om de opbollingsprofielen te schatten. Hierdoor kunnen de bijdragen van de horizontale weerstand en de radiale- en/of intreeweerstand aan de drainageweerstand inzichtelijk worden gemaakt. Indien waterbeheerders maatregelen willen nemen om wateroverlast te verminderen of GGOR te realiseren is het wenselijk om niet alleen inzicht te hebben in de drainageweerstand maar ook in de bijdragen van de componenten waaruit deze weerstand is opgebouwd. Voor een Gd-kartering is vooral de waarde van de drainageweerstand zelf van belang en hoe deze zo efficiënt mogelijk kan worden vastgesteld.

De drie berekeningswijzen van de drainageweerstand, namelijk

1. uit tijdreeksparameters,
 2. uit gemiddelde opbollingsprofielen over een stationaire periode
 3. uit opbolling over een veertiendaagse periode tussen 1 januari en 31 maart
- leiden tot een verschillende schatting van de drainageweerstand. Omdat de berekeningswijze van de drainageweerstand uit het gemiddeld opbollingsprofiel over een stationaire periode het best aansluit bij de definitie van drainageweerstand wordt dit berekeningsresultaat hier als referentie gebruikt. Ook hierin is echter al een variatie van een factor twee in de berekende drainageweerstand waarneembaar afhankelijk van de periode waarover berekening plaatsvindt.

Ook de schattingen van de drainageweerstand uit gekalibreerde tijdreeksparameters blijken variabele uitkomsten op te leveren afhankelijk van het gebruikte kalibratiealgoritme en de lengte van het modelinterval. De drainageweerstand geschat uit tijdreeksparameters blijkt zowel een over- als onderschatting tot een factor twee t.o.v. van de referentie te kunnen opleveren. Een mogelijke verklaring voor het feit dat soms overschatting en soms onderschatting optreedt is de mate waarin het transfer gedeelte van het tijdreeksmodel de seizoensfluctuatie correct modelleert. Bij 'Eendenkooi' overschat het tijdreeksmodel de seizoensfluctuatie de hoogste grondwaterstand volgens het model is een overschatting van de gemeten grondwaterstanden. Bij 'Natuurterrein' en 'Papensteeg' onderschat het transfereerde gedeelte van het tijdreeksmodel de seizoensfluctuatie. Een mogelijke verklaring voor het gegeven dat de gekalibreerde tijdreeksmodellen geen goede inschatting leveren van de totale fluctuatie is dat de meetperiode van 9 maanden te kort is voor een goede kalibratie. Gezien de variatie in berekende drainageweerstanden en benodigde meetperiode lijkt deze bepalingswijze minder geschikt voor toepassing in een grootschalige Gd-kartering

Schattingen van de drainageweerstand uit opbolling over een veertiendaagse periode waarvan niet is vastgesteld of het een stationaire situatie betreft leveren vergelijkbare waarden als de schattingen uit opbolling over een stationaire periode. Dit geeft aan dat bepaling van de drainageweerstand ook zonder hoogfrequente meetreeks, waaruit een stationaire periode wordt gekozen, op basis van slechts twee metingen mogelijk is. Deze beide metingen van de grondwaterstand dienen wel uitgedrukt te worden t.o.v. het slootpeil om de opbolling te kunnen bepalen. Deze bepalingswijze biedt van de drie onderzochte de beste mogelijkheden om te worden toegepast in een grootschalige Gd-kartering.

Het gemeten elektrisch geleidingsvermogen duidt er op dat het een menging is van rivierwater dat ingelaten wordt, regenwater en grondwater. Indien de waterkwaliteit bepaald zou worden door voornamelijk ingelaten rivierwater, hetgeen in de zomerperiode aannemelijk is, zou een hoger elektrisch geleidingsvermogen zijn waargenomen. Aangezien de meetlocaties in de laagst gelegen delen van de kom liggen is het waarschijnlijk dat het rivierwater hier slecht beperkt invloed heeft omdat het gebiedseigen neerslag- en grondwater niet geheel worden afgevoerd maar zich vermengt met een beperkte hoeveelheid ingelaten rivierwater. Op basis van het gemeten elektrisch geleidingsvermogen is niet met zekerheid te zeggen of al dan niet kwel optreedt, in elk geval blijkt de invloed van rivierwater beperkt. We kunnen het aanduiden als een matig basen rijk schoon grondwatertype.

De meest effectieve manier om schattingen van de drainageweerstand te verkrijgen voor gebruik bij een Gd-kartering in gebieden met een klei deklaag lijkt te zijn om dit te doen middels schattingen van het opbollingsprofiel over een veertiendaagse periode. De meetlocaties dienen echter wel t.o.v. elkaar wat betreft hoogte ligging te worden ingemeten, omdat anders geen opbolling kan worden geschat. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van een waterpas maar dat is tijdrovend, en daardoor minder geschikt binnen een grootschalige Gd-kartering. Misschien is het ook mogelijk om via precieze locatiebepaling met GPS en een gedetailleerd hoogtemodel (AHN van 5x5 meter) de hoogteliggingen van de beide meetlocaties te schatten. Voor de vaststelling van een werkbare en effectieve werkwijze wordt aanbevolen om een praktijk proef uit te voeren waarin de verschillende werkwijzen voor bepaling van het onderlinge hoogteverschil op nauwkeurigheid en efficiëntie worden onderzocht.

Literatuur

- Bierkens, M., Bron, W., en Knotters, M. (2002). VIDENTE 1.1: a graphical user interface and decision support system for stochastic modelling of water table fluctuations at a single location. Includes documentation of the programs KALMAX, KALTFN, SSD and EMERALD and introductions to stochastic modelling. Second, revised, edition. Rapport 613, Alterra.
- Bierkens, M., Knotters, M., en van Geer, F., 1999. Tijdreeksanalyse nu ook toepasbaar bij onregelmatige meetfrequenties. *Stromingen*, 5(2):43–54.
- Commissie voor hydrologisch onderzoek TNO, 1986. Verklarende hydrologische woordenlijst. Rapport No. 16, TNO.
- Ernst, L.F., 1956 Calculation of steady state flow of groundwater in vertical cross sections, *Netherlands Journal of Agricultural Science* 4: 126-131.
- Finke, P.A., T. Hoogland, M.F.P. Bierkens, D.J. Brus, M. Knotters en F. de Vries, 1999. Pilot naar een nieuwe beschrijving van grondwaterkaarten in het Weerijsg gebied. Methodiekontwikkeling met extrapolatie naar een Plan van Aanpak voor Noord-Brabant. Staring Centrum, Wageningen.
- De Gruijter, J.J., J.B.F. van der Horst, G.B.M. Heuvelink, M. Knotters en T. Hoogland, 2004. Grondwater opnieuw op de kaart. Methodiek voor de actualisering van grondwaterstands-informatie en perceelclassificatie naar uitspoelingsgevoeligheid voor nitraat. Rapport 915, Alterra.
- Heesen, H.C. van, 1970. Presentation of the seasonal fluctuation of the water table on soil maps. *Geoderma* 4: 257-278.
- Kemmers, R.H., S.P.J. van Delft, J.W.J. van der Gaast, 2004. Kwel en Waterlood; ontwikkeling van een methode voor kartering van kwel en de evaluatie van de gevolgen van peilbeheer voor kwelatronen. Rapport 1034, Alterra.
- Knotters, M. en Bierkens, M., 1999. Hoe lang moet je de grondwaterstand meten om iets over de dynamiek te weten? *Stromingen*, 5(4):5–12.
- Knotters, M. en Bierkens, M., 2000. Physical basis of time series models for water table depths. *Water Resources Research*, 36:181–188.
- Knotters, M., T. Hoogland en J. van der Gaast, 2002. Nieuwe informatie over de grondwaterdynamiek: wensen en mogelijkheden. Rapport 548, Alterra.

Knotters, M. en P.C. Jansen, 2004, Drempel-nietlineariteit in ondiepe grondwaterregimes: Modellerings van hoogfrequente reeksen met TARSO, DR, KALMAX, KALTFN, SSD en SWAP. Rapport 981, Alterra.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000. Anders omgaan met water. Waterbeleid in de 21^e eeuw. Den Haag, Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Projectgroep Waterlood De Leijen, 2001. Beter werken met 'Waterlood'. Een proeftoepassing in het herinrichtingsgebied 'De Leijen'. Rapport 267, Alterra.

Stowa, 2001. Normering regionale wateroverlast: opzet en inhoud van het normeringssysteem. Utrecht, Stowa.

Stowa, 2003. Praktijkttoepassing van het Waterlood-instrumentarium. Stowa-rapport 2004-03. Utrecht, Stowa.

Unie van Waterschappen, 2002. Waterbeheer 21^e eeuw. WB21: aanleiding, afspraken en maatregelen. Den Haag, Unie van Waterschappen.