
Tijdreeksanalyse van grondwaterpeilen: de invloed van het meetinterval

dr.ir. T. van Herwijnen

Een dagelijkse meetreeks van grondwaterpeil, bruto neerslag en verdamping is geanalyseerd op het effect van de lengte van het meetinterval. Ter plaatse wordt drainage goed beschreven met een eenvoudige eerste orde differentiaalvergelijking met een tijdsconstante van 11 dagen.

Gesimuleerde verlenging van het meetinterval tot 2, 3, 7, 14 en 28 dagen leidt tot een vertekening van het model omdat de lengte van het meetinterval niet meer aan de Nyquist-voorwaarde voldoet. Een gevolg is dat foutieve conclusies worden getrokken over de kwaliteit van de drainage ter plekke. Ook maakt de dagelijkse meetserie duidelijk dat het grondwaterpeil ter plekke bepaald wordt door een combinatie van snelle, lokale drainage en een trage component met een aanzienlijk langere tijdsconstante die het drainageniveau bepaalt.

Inleiding

Bij het modelleren van complexe grondwatersystemen wordt tijdreeksanalyse van grondwaterstanden toegepast om verbanden te analyseren en het effect van aanpassingen in het beheer van grondwater te voorspellen. Hierbij wordt als regel gebruik gemaakt van meetseries met een interval van 14 dagen of 1 maand. Binnen de stedelijke bebouwing van Heemstede zijn voor een locatie in de oude strandwal metingen met een interval van 1 dag verricht over een periode van ruim 1 jaar. Deze meetreeks is geanalyseerd voor toenemende (gesimuleerde) lengte van het meetinterval door de meetwaarden te aggregeren. Daarbij wordt het effect van een verlenging van het meetinterval op de modelparameters bestudeerd, alsook de kwaliteit van de modelbeschrijving.

De modelvergelijking

Voor het modelleren van het grondwaterpeil in de stedelijke bebouwing van Heemstede wordt aangenomen dat het peil het resultaat is van 3 mechanismen: (a) neerslag, gemeten als bruto neerslag, (b) verdamping, gemeten als Makkink-verdamping waarop een correctiefactor wordt toegepast voor lokale omstandigheden en (c) de drainage naar het drainagepeil. Ter plaatse wordt het boezempeil op $-0,6$ m NAP gehandhaafd. Niet gemodelleerd zijn andere lokale factoren zoals bijvoorbeeld de mate van verharding of begroeiing waardoor de betekenis van een bergingsfactor of een Makkink-coëfficiënt tot empirische factoren voor de betreffende locatie beperkt blijven.

Dr.ir. T. van Herwijnen is per e-mail te bereiken via: theo.vanh@euronet.nl of per post: ETC Energy Technology Consultancy, Van de Spiegellaan 13, 2101 BL Heemstede.

Als differentiaalvergelijking weergegeven:

$$S(h) \frac{d(h(t) - h_0)}{dt} = -D * S(h) * (h(t) - h_0) + N(t) - c_{\text{Makkinik}} * V(t) \quad (1)$$

waarin $h(t)$ het grondwaterpeil is op tijdstip t , h_0 het basisdrainniveau en $N(t)$ en $V(t)$ de neerslag resp. verdamping op tijdstip t . De drainage wordt beschreven met een constante drainagefactor D en de berging met de bergingsfactor $S(h)$. De berging is een functie van de hoogte van het peil h , met name wanneer het peil het maaiveld nadert. Voor deze eenvoudige analyse wordt echter aangenomen dat $S(h)$ constant is, in het vervolg aangeduid met de bergingsfactor S_0 .

Integratie van vergelijking (1) over een periode van t_1 tot t_2 van een geheel aantal dagen n levert:

$$h(t_2) - h(t_1) = -D * \left[\frac{1}{2} h(t_2) + \frac{1}{2} h(t_1) - h_0 \right] * (t_2 - t_1) + 1/S_0 * \left\{ \sum_n N(t_i) - c_{\text{Makkinik}} * \sum_n V(t_i) \right\} \quad (2)$$

Dagelijkse neerslag en verdamping worden over de betreffende periode gesommeerd; voor de berekening van de integraal van de drainage wordt de trapeziumregel toegepast.

Voor een set equidistante waarnemingen ($\Delta t = t_2 - t_1$) levert vergelijking (2) een lineaire relatie:

$$h(t_2) = a * h(t_1) + b * \sum_n N_i + c * \sum_n V_i + d \quad (3)$$

waarbij in de coëfficiënten a , b , c en d de vier modelparameters D , S_0 , c_{Makkinik} en het basisdrainniveau h_0 zijn verwerkt:

$$a = \frac{2 - D * \Delta t}{2 + D * \Delta t} \quad (4a)$$

$$b = \frac{2}{S_0 * (2 + D * \Delta t)} \quad (4b)$$

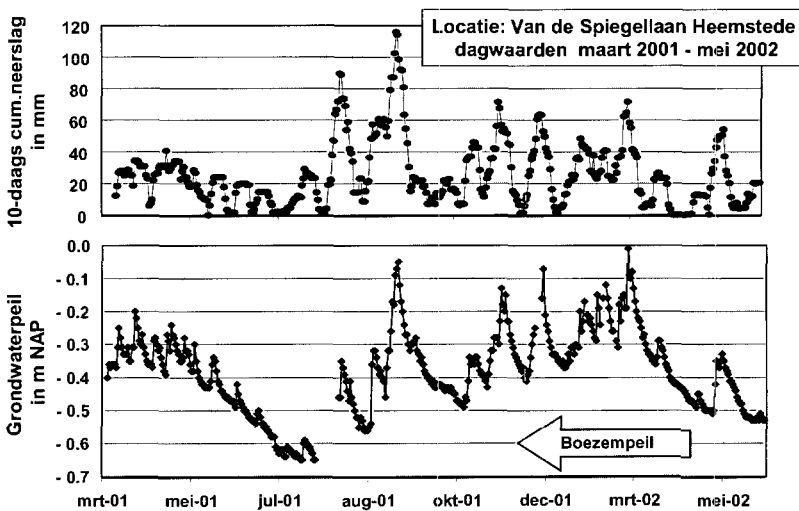
$$c = \frac{-2 * c_{\text{Makkinik}}}{S_0 * (2 + D * \Delta t)} \quad (4c)$$

$$d = \frac{2 D * \Delta t * h_0}{(2 + D * \Delta t)} \quad (4d)$$

Nadrukkelijk zijn ook het basisdrainniveau h_0 en de verdampingsfactor c_{Makkinik} in de analyse betrokken. Hoewel voor c_{Makkinik} als regel de waarde 0,7 wordt aangenomen, wordt in de literatuur een breed bereik van waarden gerapporteerd, bijvoorbeeld in Stuyfzand, 1993. Ook het effectieve drainniveau h_0 kan afwijken van het niveau van $-0,60$ m NAP van het op enige afstand (circa 70 m) gelegen boezemwater.

De metingen

Het grondwaterpeil is gemeten in een peilbuis met de kop (+ 0,19 m NAP) gelegen in het maaiveld. De peilbuis steekt 2 m diep op een locatie in de oude strandwal (van de Spiegel-
laan, Heemstede) waar het grondwaterniveau in holoceen wadzand wordt gemeten. In de meetreeks van 6 maart 2001 tot 31 mei 2002 ontbreken 24 metingen. De dagelijkse neerslag in Heemstede, $N(t)$, en de Makkink-verdamping op Schiphol, $V(t)$, zijn door het KNMI gerapporteerd. Figuur 1 toont voor de onderzoeksperiode het verloop van het 10-daags cumulatief voor de neerslag en de dagwaarden van het grondwaterpeil.



Figuur 1: Waarnemingen van bruto neerslag en grondwaterpeil.

De regressieanalyse

Voor een interval met een lengte van n dagen ($n = 1, 2, 3, 7, 14, 28$) zijn uit de oorspronkelijke meetreeks nieuwe meetpunten geconstrueerd door gemeten peil bij aanvang, $h(t-1)$, en gemeten peil aan het einde van het interval, $h(t)$, te combineren met de somming van neerslag $N(t)$ en verdamping $V(t)$ over de betreffende periode. Door uitsluitend opeenvolgende intervallen te kiezen in het vervolg aangeduid als 'geen overlap' wordt het meten met een groter interval gesimuleerd; hierbij gaat informatie van de tussenliggende metingen van grondwaterpeil verloren. Daarom zijn ook berekeningen uitgevoerd 'met overlap' waarbij uit de beschikbare metingen alle mogelijke meetpunten met de gewenste intervalgrootte van n dagen zijn geconstrueerd (zie het diagram van figuur 4).

Met multiple lineaire regressie zijn de waarden voor de coëfficiënten van vergelijking (3) en hun 95% betrouwbaarheidsinterval bepaald. Uit deze coëfficiënten zijn voor de model-

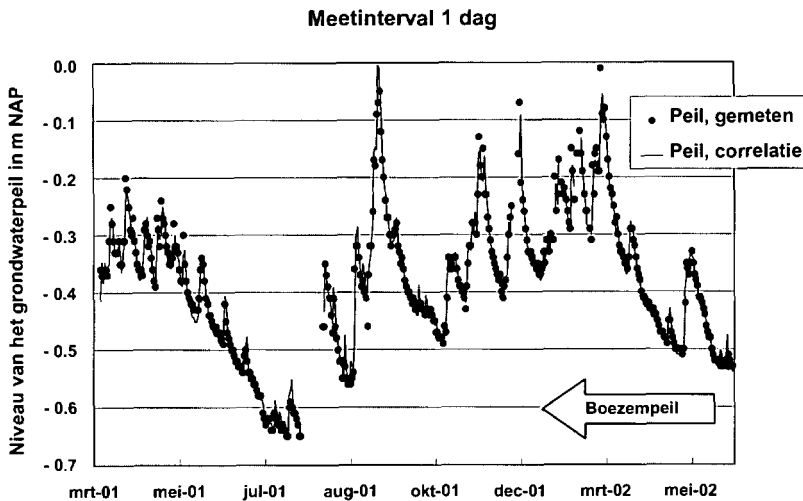
parameters de beste waarden alsook een 95% waarschijnlijkheidsminimum en maximum waarde berekend. De kwaliteit van de beschrijving van de meetpunten wordt uitgedrukt in de standaarddeviatie van $h(t)$ en de regressieparameter R^2 .

Tenslotte werd de kwaliteit van het model beoordeeld door in vergelijking (2) als startpeil voor een interval, $h(t_i)$, de waarde toe te passen die resulteert uit de berekening van het voorgaande interval. Met andere woorden, differentiaalvergelijking (1) wordt dan geïntegreerd met de gevonden waarden voor de coëfficiënten.

Resultaten

Analyse van de 1-dag serie

De kwaliteit van de regressie van de reeks van 421 metingen is goed. Dit blijkt uit figuur 2, uit de grootte en de verdeling van de regressieresiduen (figuur 3a) en uit de waarden van R^2 (0,973) en standaarddeviatie van $h(t)$ (0,020 m).

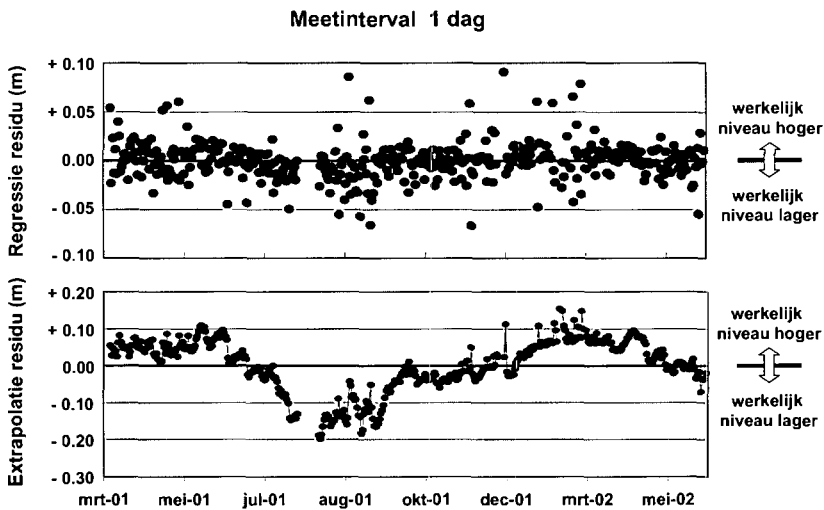


Figuur 2: Correlatie van meetwaarden met regressieresultaat.

Tabel 1 toont de waarden van de parameters zoals deze uit de coëfficiënten zijn berekend. Toepassing van de gevonden coëfficiënten in een seriematige berekening van vergelijking (2), het de facto integreren van vergelijking (1), geeft het extrapolatieresidu (figuur 3b). Naast de experimentele ruis blijkt dit residu van de extrapolatie een systematische trend te vertonen: een traag proces beïnvloedt de grondwaterstand in significante mate. Het niveauverschil tussen het zomerdal en de winterpiek van deze trage component bedraagt ruim 0,25 m.

Tabel 1: Parameterwaarden voor 1-dags meetinterval.

Meetinterval 1 dag parameter	beste waarde	95% interval		
		min	max	in.
Tijdsconstante	10,9	8,9	14,0	d
Berging	15,2%	14,1%	16,5%	
Makink-coëfficiënt	0,49	0,21	0,77	
Basisdrainniveau	-0,51	-0,58	-0,43	m NAP

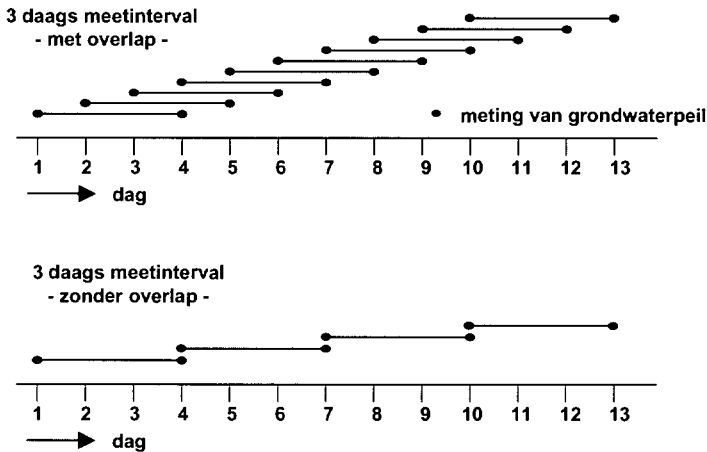


Figuur 3. Regressie (3a) en extrapolatie residu (3b) van de modellering van de 1-dags serie

Op basis van de modelparameters is vervolgens de statistiek van het effect van neerslag en verdamping op de variatie in het grondwaterpeil bepaald. Gemiddeld stond het peil 0,12 m boven het gevonden basispeil van -0,51 m NAP. Het 95% waarschijnlijkheidsinterval loopt van -0,62 m NAP tot -0,15 m NAP, een bereik van 0,47 m. In vergelijking tot het bereik van 0,25 m in de onverklaarde, trage component moet worden geconcludeerd dat zij van dezelfde orde van grootte zijn. Metingen met een lange periode met het doel de trage component te volgen zullen significant verstoord worden door de grote variabiliteit van de snelle component. Dit aspect wordt hieronder verder uitgewerkt.

Simulatie van langere meetintervallen met overlap

Deze analyse is herhaald voor 'meetpunten' met een meetinterval van 2, 3, 7, 14 en 28 dagen. Bij het construeren van deze meetpunten kunnen de perioden tussen twee grondwaterpeilingen overlappend worden gekozen waardoor geen informatie verloren gaat. Dit wordt in figuur 4 geïllustreerd voor meetpunten met een 3-daags meetinterval. De geschetste periode van 13 dagen levert met overlap 10 meetpunten terwijl dit er zonder overlap slechts 4 zijn. Zo waren bijvoorbeeld uit de 1-daagse meetserie 415 3-daagse meetpunten te construeren.



Figuur 4: Illustratie van toepassing van overlap.

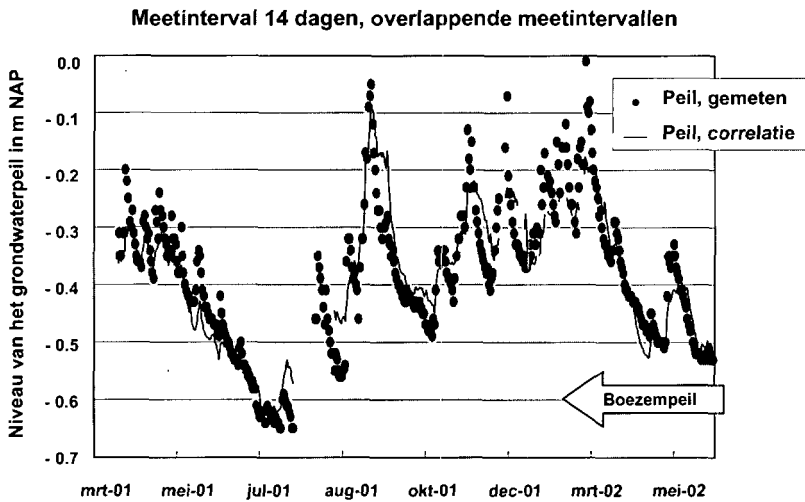
Tabel 2 laat zien dat met het toenemen van de lengte van het meetinterval de kwaliteit van de correlatie, beoordeeld als R^2 en standaarddeviatie σ , significant afneemt en dat de waarden van de parameters verschuiven; met name de tijdsconstante, τ , en de bergingsfactor S_0 zijn meer dan verdubbeld wanneer de periode is toegenomen tot 28 dagen.

Voor het veel gebruikte meetinterval van 14 dagen is een uitgebreide analyse gemaakt. Figuur 5 laat zien dat er trendmatige verschillen ontstaan tussen de meetwaarden en de regressie. Met name de snelle respons op neerslagpieken wordt niet gevolgd. De regressie-residuen in figuur 6a vertonen een bredere spreiding dan de residuen in figuur 3a en zijn gedurende bepaalde perioden trendvolgend. De standaardafwijking bedraagt 0,05 m tegen 0,02 m bij de regressie van de 1-daagse metingen. Het verschil tussen meetwaarde en modelberekening, de extrapolatie, vertoont meer ruis dan het vergelijkbare residu van de 1-daagse serie zoals een vergelijking van figuur 3b en figuur 6b leert. Ook is de bandbreedte kleiner (circa 0,20 m). De modelparameters verschuiven het model in de richting van de

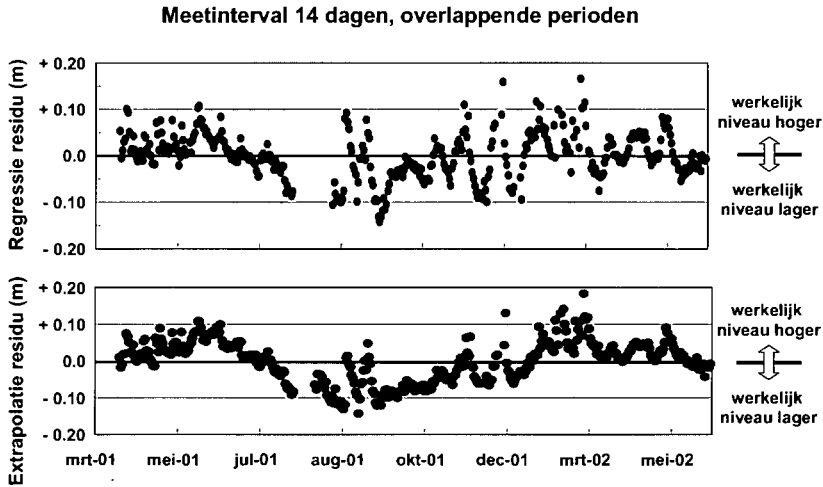
trage component, ten koste van de accuratesse in de beschrijving van de snelle netto-neerslagcomponent.

Tabel 2: Modelparameters voor overlappende perioden van toenemende lengte.

Periode	Aantal meetpunten	Correlatie r^2	Standaard-deviatie σ	Nyquist-getal	$\tau = 1/D$	S_0	$C_{Moklink}$	h_0 NAP
Met overlap tussen de meetintervallen								
dagen			m	-	d	%	-	m
1	421	0,973	0,020	10,9	10,9	15,2%	0,49	-0,51
2	419	0,959	0,025	5,9	11,9	16,5%	0,55	-0,51
3	415	0,946	0,028	4,2	12,7	17,5%	0,60	-0,50
7	407	0,886	0,043	2,1	14,6	19,6%	0,70	-0,49
14	392	0,843	0,050	1,4	19,2	25,0%	0,71	-0,49
28	378	0,769	0,061	0,9	24,8	33,3%	0,80	-0,48



Figuur 5: Metingen versus correlatie voor 14d meetserie (overlap).



Figuur 6: Regressie (6a) en extrapolatie residu (6b) van de modellering 14-dagen interval, met overlap.

Simulatie van langere meetintervallen zonder overlap

Tenslotte werd een analyse uitgevoerd waarbij de gesimuleerde meetintervallen aaneensluitend werden gekozen, in plaats van overlappend. Hiermee wordt de in de praktijk gebruikelijke meetroutine gesimuleerd. Een beeld van de mogelijke spreiding van uitkomsten wordt verkregen door het opbouwen van meerdere reeksen waarnemingen die elk op een andere dag aanvangen. Zo zijn voor een periodelengte van 14 dagen, 14 verschillende reeksen te construeren.

De resultaten in tabel 3 tonen de resultaten voor de 14-dagen cluster als volgt: voor elke meetreeks van in dit geval 14-daagse metingen is de analyse integraal uitgevoerd. Vervolgens zijn voor elk van de parameters uit de 14 resultaten de gemiddelde waarde, de laagste waarde en de hoogste waarde bepaald. De laatste twee resultaten zijn in tabel 3 aangeduid als 'Range, laagst' respectievelijk 'Range, hoogst'. Daarnaast is aangegeven binnen welk bereik de 95% betrouwbaarheidsintervallen van deze 14 verschillende waarden van de parameters liggen.

Ter vergelijking zijn de resultaten voor de regressie voor een gelijke intervalgrootte, 14 dagen, met overlap weergegeven. Met name het aanzienlijk groter aantal meetpunten geeft hier een veel betere definitie van de parameters.

Tabel 3: Modellerings op basis van 14-daagse meetintervallen.

Cluster: 14 dagen, geen overlap		Range		95% interval		
(14x ca. 30 metingen)	gemiddeld	laagst	hoogst	laagst	hoogst	
Tijdsconstante	19,2	14,5	29,4	8,7	65,0	d
Bergingsfactor	25,8%	19,7%	36,6%	14,8%	65,8%	-
C _{Makkkk}	0,77	0,40	1,32	-0,02	2,13	-
Basisniveau	-0,49	-0,57	-0,42	-0,74	-0,28	m NAP

Cluster: 14 dagen, met overlap		Range		95% interval		
(392 metingen)	waarde	laagst	hoogst	laagst	hoogst	
Tijdsconstante	19,2			16,9	22,0	d
Bergingsfactor	25,0%			23,2%	27,1%	-
C _{Makkkk}	0,71			0,57	0,86	-
Basisniveau	-0,49			-0,53	-0,46	m NAP

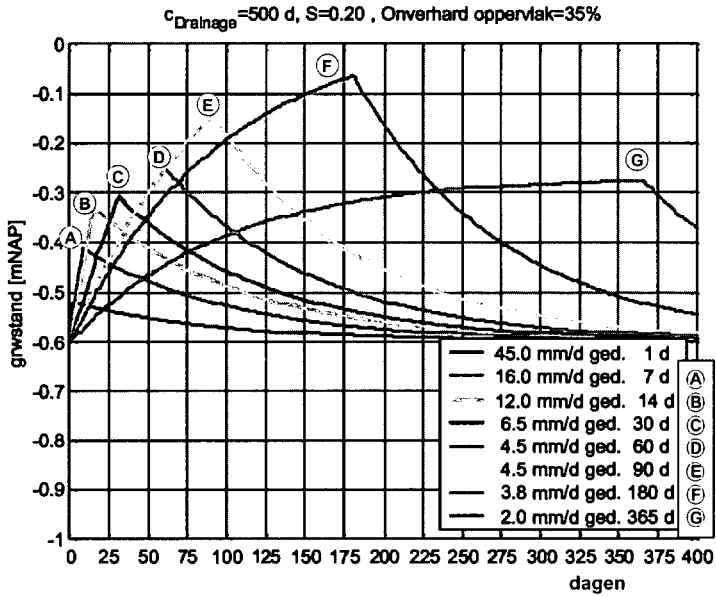
Modeltoepassing

Bij de discussie over de oorzaak van het optreden van grondwateroverlast in Heemstede staat de vraag centraal of de drainage adequaat is. Olsthoorn heeft een reeks niet-overlappende 14-daagse grondwaterpeilmetingen voor een locatie op circa 50 m van het meetpunt geanalyseerd (Olsthoorn, 2001). Op basis van zijn op die metingen gekalibreerde model werden grondwaterstanden berekend voor een serie neerslagreeksen. Uit de resultaten concludeert Olsthoorn dat als gevolg van gebrekkige drainage met name langdurige regen tot overlast leidt (figuur 7).

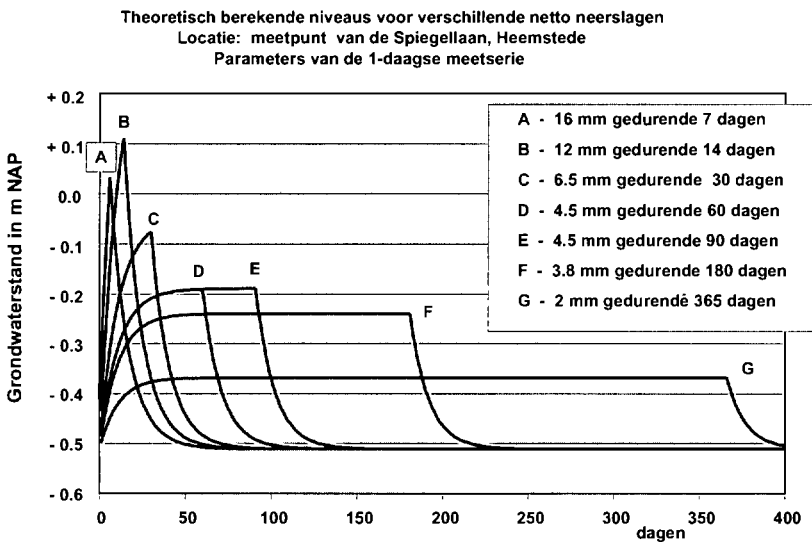
Met behulp van vergelijking (1) zijn voor dezelfde neerslagreeksen grondwaterpeiltijdreeksen berekend met de parameterwaarden bepaald uit de 1-dags meetserie. Deze resultaten, figuur 8, geven het omgekeerde beeld: juist de korte, hevige buien leiden tot overlast omdat dan de bergingscapaciteit tekort schiet. Na afloop van de bui is de daling van de grondwaterstand snel. Zulk gedrag wordt in genoemde referentie beschreven als adequaat drainerend: 90% in 40 dagen. Ook zijn de evenwichtsniveaus voor het grondwaterpeil bij langdurige regen ongeveer half zo hoog als berekend in figuur 7.

Deze vergelijking van twee verschillende, beide op metingen gebaseerde berekeningen demonstreert het grote belang van het toepassen van een meetinterval dat overeen komt met de dynamiek van de processen waarover de uitspraken worden gedaan.

Een 14-daags meetinterval is onvoldoende om drainagegedrag met een tijdsconstante van 11 dagen te bemeten en te beschrijven. Volgens het Nyquist-sampling-theorema (Oppenheim en Willksy, 1983) dient een meetinterval maximaal de helft te zijn van de tijdsconstante van het te bestuderen proces. Anders beïnvloedt de meting de waarneming en kan een vertekening ontstaan zoals bekend uit de proef waarbij een snel draaiend wiel wordt bekeken met een stroboscoop met een meetinterval dat langer is dan de omlooptijd van het wiel. Het wiel lijkt langzaam te draaien, stil te staan of zelfs achteruit te draaien, afhankelijk van het belichtingsinterval van de stroboscoop.



Figuur 7: Berekend effect van neerslag op grondwaterpeil (Olsthoorn, 2001).



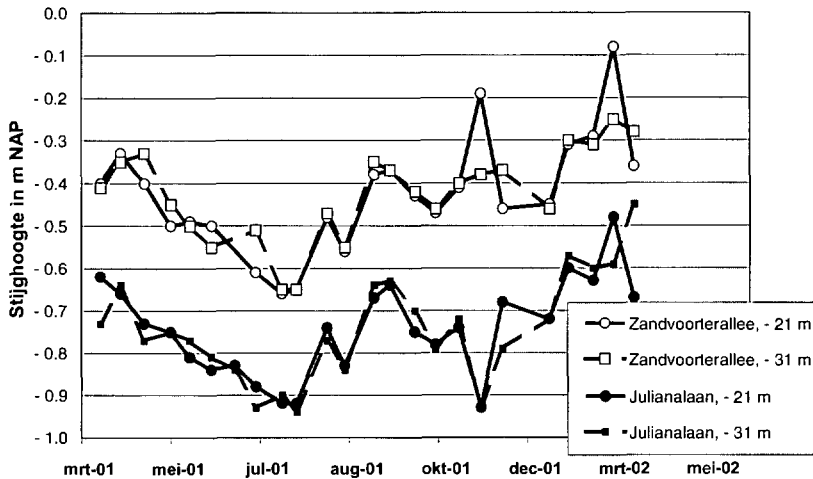
Figuur 8: Berekend effect van neerslag op grondwaterpeil.

De in deze studie beschreven meetreeks van grondwaterpeilen blijkt samengesteld uit twee, vergelijkbaar grote bijdragen van (a) drainage van netto neerslag met een tijdsconstante van 10,9 dag en (b) een trage component die wellicht een tijdsconstante van 1 jaar heeft. Het Nyquist-theorema stelt dat in dit geval met een frequentie van 5 dagen of sneller gemeten moet worden om de snelle component goed in beeld te krijgen. Uit tabel 2 blijkt dat de originele meetserie met een meetinterval van 1 dag ruimschoots voldoet aan die voorwaarde (Nyquist getal 10,9). Vervolgens kan uit het regressieresidu een beeld worden verkregen van de tweede, trage component.

Metingen met een periode van 14 dagen bevatten voor dit meetpunt onvoldoende informatie om de respons op de neerslag te beschrijven. Zij leveren echter tevens een slechte basis voor het bestuderen van de trage component omdat het beeld te zeer wordt vertekend door de grote schommelingen in het grondwaterpeil als gevolg van de snelle component. In het hier beschreven aanpak worden die snelle schommelingen weggefilterd.

Conclusies

- 1 Op basis van de 1-daagse metingen is het effect van bruto neerslag en verdamping op de veranderingen in de grondwaterstand nauwkeurig te beschrijven. Daarnaast blijkt uit deze analyse dat een traag mechanisme ter plekke een sterke bijdrage levert aan het niveau van het grondwaterpeil. Dit trage mechanisme is niet gecorreleerd met directe neerslag of verdamping die immers beiden reeds in het model zijn verdisconteerd. De range van circa 0,25 m van deze residuale component is groot ten opzichte van de marge tussen boezempeil en maaiveld (0,60 – 0,80 m) en verkleint significant de ruimte voor berging van neerslag.
- 2 De gemodelleerde, snelle drainage component verklaart circa 2/3 van de gemeten variatie in de grondwaterstand. Het resterende trage 1/3 deel is mogelijk te correleren met veranderingen van de stijghoogte in de diepere watervoerende pakketten (figuur 9). Hiertoe dient een nadere analyse te worden uitgevoerd.
- 3 De gevonden waarde voor de tijdsconstante voor drainage, 10,9 dag, geeft aan dat de afvoer van neerslag snel is. Zo werd in september 2001 een bijzonder zware neerslagpiek met een maximum cumulatief van 115 mm over 10 dagen (21/9/2001) in 45 dagen (5/11/2001) afgebouwd tot nagenoeg het basisniveau (figuur 1). Deze afbouwtijd correspondeert met de vuistregel van 3 maal de tijdsconstante voor het geheel vereffenen van een lineair effect.
- 4 Op basis van deze analyse kan worden geconcludeerd dat ter plekke drainage van neerslag naar het basisniveau snel en adequaat is. Alleen de extreme neerslagpiek van 115 mm 10-daags cumulatief vroeg meer dan 0,50 m bergingsruimte. De drainageontwerpstandaard van 60 mm bruto neerslag per 10-dagen correspondeert, zonder correctie voor enige verdamping, met een bergingsruimte van 0,43 m welke normaal gesproken te accommoderen is tussen een maaiveld van 0 tot + 0,20 m NAP en een boezempeil van -0,60 m NAP.
- 5 Bij het meten aan een dynamisch systeem dienen de resultaten getoetst te worden aan het Nyquist-theorema. Voor de besproken meetreeks wordt duidelijk uit de resultaten voor de gesimuleerde 14-daagse meetserie, zowel zonder overlap als met overlap, dat niet aan de Nyquist-voorwaarde is voldaan; de gevonden tijdsconstante van 19 dagen



Figuur 9: Gemeten verloop van de stijghoogte in het 1° watervoerend pakket (-21, -31 m).

zou eerst valide zijn indien met een interval van 9 dagen of korter is gemeten. Uit tabel 2 blijkt dat bij meetintervallen van 7 dagen of sneller voor het drainageproces aan deze voorwaarden wordt voldaan. Metingen met de gebruikelijke periode van 14 dagen geven op deze locatie geen correcte informatie over de drainage van neerslag.

Dankwoord

De auteur is dank verschuldigd aan Jaap Stelling voor het consciëntieus uitvoeren van de grondwaterpeilingen en aan de Gemeente Heemstede en Wareco voor het beschikbaar stellen van de neerslag en verdampingsgegevens.

Dit onderzoek wordt uitgevoerd in het kader van het Actiecomité tegen Grondwateroverlast in Heemstede ('AC-GWOH').

Referenties

- Olsthoorn, T.N. (2001)** Effect van natte en droge perioden op de grondwaterstand in Heemstede; Gemeentewaterleidingen Amsterdam, Vogelenzang
- Oppenheim, A.V. en A.S.Willsky (1983)** Signals and Systems; Prentice Hall International Inc., Londen.
- Stuyfzand, P.J. (1993)** Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands; KIWA, Nieuwegein.