Modellering van natuurlijke fluctuaties van grondwaterspiegels op basis van impulsresponies

VEWIN

Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland

kiwa

SWI 95.192

=E.J.M. Veling
WO 20 DE 95=

Modellering van natuurlijke fluctuaties van grondwaterspiegels op basis van impulsresponies

VEWIN

Hydr Th_Lankester95

OPDRACHTGEVER
TUD, faculteit der Civiele Techniek
Kiwa Onderzoek en Advies

OPDRACHTNUMMER
10.0046.023

AUTEUR
J. Lankester

AFDELING
Sectie Hydrologie en Ecologie, TUD

Delft, december 1995

kiwa

Onderzoek en Advies
Groningenhaven 7
Postbus 1072
3430 BB Nieuwegein
Telefoon (030) 606 95 11
Telefax (030) 606 11 65

© 1995 Kiwa N.V.
Niets uit dit drukwerk mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Kiwa N.V., noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd.

SWI 95.192

VOORWOORD

Voor u ligt het rapport van mijn afstudeeronderzoek naar de modellering van de beweging van de grondwaterspiegel op basis van impulsresponsies. Dit onderzoek is een deelstudie in het onderzoek naar de grondwaterspiegeldynamica, een samenwerkingsproject van Kiwa Onderzoek en Advies en de Technische Universiteit Delft. Met dit onderzoek wordt beoogd een nieuwe methode te ontwikkelen om vegetaties te karakteriseren aan de hand van het grondwaterregime.

Dit rapport is op te splitsen in twee delen. In het eerste deel wordt gekeken naar de bepaling van de parameters die impulsresponsies karakteriseren; in het tweede deel wordt de mogelijkheid onderzocht om op basis van deze impulsresponsies het instationaire verloop te bepalen van de grondwaterstand in een bepaald punt.

Voor het volbrengen van dit onderzoek heb ik veel hulp gehad van mijn begeleiders C. Maas, C.B.M. te Stroet en R. Boekelman. Hen wil ik hiervoor hartelijk bedanken; in het bijzonder C. Maas voor de dagelijkse (wekelijkse) begeleiding en C. te Stroet voor het ter beschikking stellen van het model 'Wierden', dat gebruikt is om in het tweede deel van het onderzoek de resultaten van het eerste deel te toetsen.
Ik wil natuurlijk niet vergeten mijn vriendin, Jannekee, te bedanken voor alle steun en toeverlaat en mijn kamergenoten op de afstudeerkamer voor hun hulp, elke keer als ik weer eens ergens niet uitkwam.

Ik wens u veel plezier bij het lezen van dit rapport. Bij vragen of opmerkingen kunt u zich altijd tot mij wenden.

Delft, 12 december 1995

Joost Lankester

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD 1

1 INLEIDING 5
1.1 Voorafgaand 5
1.2 Duurlijnenmethode 6
1.3 De impulsrespons 7
1.4 Doelstelling 9
1.5 Indeling van het rapport 9

2 THEORIE 10
2.1 Inleiding 10
2.2 Relatie van de tijdsmomenten met de impulsrespons 11
2.3 Fysische betekenis van tijdsmomenten 17

3 BRUIKBAARHEIDSONDERZOEK IMPULSRESPONSIEMETHODE EENVOUDIGE GEVALLEN 18
3.1 Inleiding 18
3.2 Keuze model 18
3.3 Werkwijze 18
3.4 Landstrook (1-dimensionaal geval) 19
3.4.1 beschrijving van het model 19
3.4.2 Bepaling van M_0 en M_1 20
3.4.3 Vergelijking van momenten 22
3.4.4 Bepaling van de impulsresponsfunctie 24
3.4.5 vergelijking van de impulsrespons 26
3.4.6 conclusie 28
3.5 Rechthoekig eiland (2-dimensionaal geval) 29
3.5.1 beschrijving van het model 29
3.5.2 Bepaling van M_0 en M_1 29
3.5.3 vergelijking van de momenten 30
3.6 Bepaling van de impulsfunctie 30
3.6.1 algemeen 30
3.6.2 benadering met de impulsresponsiemethode 31
3.6.3 werkelijk verloop met MODFLOW 31
3.6.4 werkelijk verloop met een analytische methode 32
3.6.5 vergelijking van de impulsrespons 32
3.6.6 conclusie 33

4 BRUIKBAARHEIDSONDERZOEK IMPULSRESPONSIEMETHODE ENKELE INGEWIKKELDERE GEVALLEN 34
4.1 Inleiding 34
4.2 Werkwijze 34
4.3 Grondwaterstandsdaling met een put 35
4.3.1 algemeen 35
4.3.2 vergelijking MODFLOW-impulsrespons voor put met vast debiet 35
4.3.3 vergelijking MODFLOW-impulsrespons voor put met vast onttrekkingsnivau 36
4.4 Schuine modellen 37
4.4.1 algemeen 37
4.4.2 initiële stroming door niveauverschil in sloten 37
4.4.3 model met uitwiggende aquifer 37
4.5 Meerdere lagen 38
4.5.1 algemeen 38
4.5.2 twee lagen met verschillende doorlatendheid 38
4.6 Gedraineerd systeem 39
4.7 Conclusie 40

5 INSTATIONAIR REKENEN 41
5.1 Inleiding 41
5.2 Doel van het programma 41
5.3 Bepaling stapfunctie 42
5.3.1 inleiding 42
5.3.2 algemene geval 42
5.3.3 winter- en zomer drainagebasis 43
5.3.4 grondwaterstand bereikt maaiveld 44
5.3.5 drainagesystemen 44
5.4 Beschrijving programma 45
5.4.1 algemeen 45
5.4.2 invoermodule 45
5.4.3 rekenmodule 45
5.4.4 uitvoermodule 46
5.5 Testen 46
5.5.1 modellen 46
5.5.2 testopzet 47
5.5.3 homogeen eiland 47
5.5.4 drainagebasis verandert met het seizoen 49
5.5.5 grondwaterstand bereikt het maaiveld 50
5.5.6 gedraineerd model 51
5.5.7 verklaring afwijkingen bij niet-lineariteit 52

6 WIERDEN-case 54
6.1 Inleiding 54
6.2 Beschrijving van het model 55
6.3 Keuze controle cellen 59
6.4 Bepaling neerslagrespons 61
6.4.1 inleiding 61
6.4.2 met de impulsresponsiemethode 61
6.4.3 met MODFLOW 62
6.5 Vergelijking neerslagrespons 62
6.5.1 constructie stijghoogteverloop 62
6.5.2 conclusie vergelijking 64
6.6 Vereenvoudiging van de 'Wierden Case' 65
6.6.1 inleiding 65
6.6.2 beschrijving methode 65
6.6.3 vergelijking IMPULS en MODFLOW 66
6.6.4 conclusie 67

7 CONCLUSIES 68

8 AANBEVELINGEN 70

LITERATUUR 71

SAMENVATTING 73

Bijlage I : Analytische oplossing rechthoekig eiland
Bijlage II : Waarden van M_0 en M_1 voor 1-dimensionaal testmodel
Bijlage III : Impulsrespons voor 1-dimensionaal testmodel
Bijlage IV : Impulsrespons voor 2-dimensionaal testmodel
Bijlage V : Tijdsmomenten voor 'Wierden Case'
Bijlage VI : Verklarende woordenlijst

1 INLEIDING

1.1 Voorafgaand

Door de onttrekking van grondwater ten behoeve van diverse doelen, zoals drinkwaterwinning, irrigatie en door verbeterde afwatering van gebieden vindt er de laatste decennia een sterke daling van de grondwaterstand plaats, met als gevolg: verdroging van de bodem. Deze verdroging heeft grote effecten op de vegetatie en kan leiden tot uitsterven van bepaalde plantensoorten in een bepaald gebied.
Verdroging is gedefinieerd als 'alle effecten als gevolg van de daling van de grondwaterstand, zowel als gevolg van vochttekort als van mineralisatie en verandering in de invloed van kwel en neerslag' [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1990].
In het laatste decennium is de politieke belangstelling voor dit probleem sterk toegenomen, waardoor er sinds 1987 verschillende onderzoeken zijn uitgevoerd naar de omvang van deze verdroging.
De verdroogde gebieden liggen met name in het pleistocene deel van Nederland en in de duinen. Als belangrijkste veroorzakers van de verdroging worden in deze nota van V & W de landbouw en de grondwaterwinning door waterleidingbedrijven genoemd. Daarom spelen de schadelijke gevolgen van grondwaterwinning op de plantengroei een steeds grotere rol, zowel in het beleid als in de praktijk van de aanvraag van vergunningen voor grondwaterwinning. De bedrijfstak waterleidingbedrijven wordt dan ook steeds vaker geconfronteerd met vragen over de effecten van grondwaterwinningen op natuurwaarden. Een belangrijk deel van die effecten op natuurwaarden zijn de effecten op vegetaties. Hiernaar is al veel onderzoek verricht.
Voor de vegetatie zijn drie standplaatsfactoren van belang:

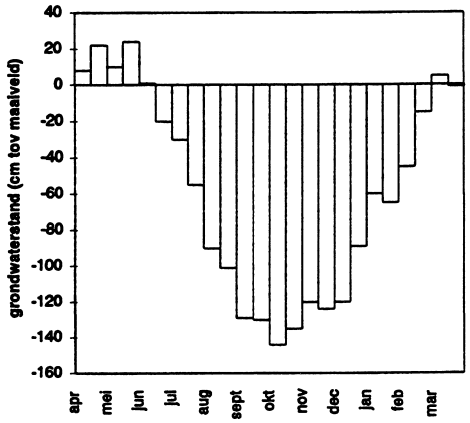
- het grondwaterregime;
- de zuurgraad/basenverzadiging van de bodem;
- de nutriëntenbeschikbaarheid.

Tijdens die onderzoeken is vooral gekeken naar de eerste twee standplaatsfactoren, de abiotische factoren. Ten aanzien van de abiotische factoren, en dan met name het grond- en oppervlaktewater, hebben zich tal van ontwikkelingen voorgedaan. Hieronder vallen de ontwikkeling van modellen en methoden waarmee de effecten van ingrepen in de waterhuishouding op de vegetatie en andere natuurwaarden voorspeld kunnen worden. Als voorbeeld hiervan kunnen o.a. de CML-methode (RU Leiden), ICHORS (RU Utrecht), WAFLO/Natuurtechnisch model (RIN/SWNBL) en ECAM (RU Groningen) worden genoemd [Jansen ea, 1993].
Om de geconstateerde verdroging van natuur en landschap te bestrijden, zijn de laatste paar jaar, in het kader van de regeling Regionaal Integraal Waterbeheer (REGIWA), lokaal reeds maatregelen genomen. Zulke maatregelen houden onder andere in: re-allocatie van pompstations en veranderingen in de landbouwwaterhuishouding waarmee vernatting van verdroogde natuur wordt beoogd.

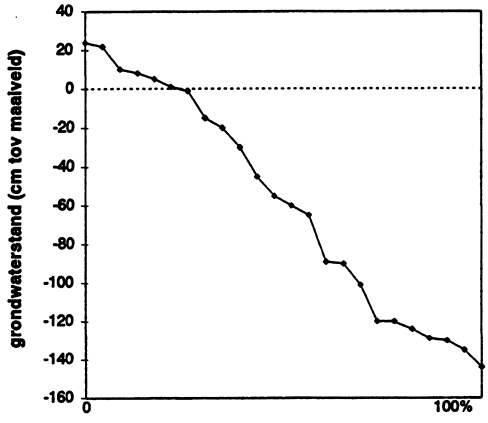
Met zulke ingrepen zijn altijd grote economische belangen gemoeid. Om die verantwoord af te wegen is een goede kwantitatieve beschrijving nodig van de effecten van de maatregelen. Het onderzoek dat in dit verslag beschreven is houdt zich bezig met de verbetering van de voorspelling van de kwantitatieve effecten van die ingrepen.

1.2 Duurlijnenmethode

Uit de bovengenoemde ECAM-methode en de daarin verwerkte ecohydrologische inzichten is enige jaren geleden de duurlijnenmethode ontwikkeld. Deze methode gaat ervan uit dat veranderingen in abiotische standplaatscondities kunnen worden vertaald in veranderingen in de soorten- en/of vegetatiesamenstelling. Deze duurlijnenmethode is gebaseerd op het rangorde model [Bakker e.a., 1979].
De meest direct sturende factor voor het voorkomen van grondwaterafhankelijke plantengemeenschappen is het verloop van de grondwaterstand, die wordt weergegeven in duurlijnen. [Jansen, 1981]. Een duurlijn geeft aan hoe lang de grondwaterstand op een zekere plaats een bepaald niveau overschrijdt. [Jansen ea, 1993]. De tijdsbasis is een jaar, waarin de grondwaterstand twee maal per maand wordt opgenomen. Zo worden er dus per jaar 24 grondwaterstandsmetingen genomen. Een voorbeeld hiervan is te zien in figuur 1.



figuur 1 stijghoogtelijn



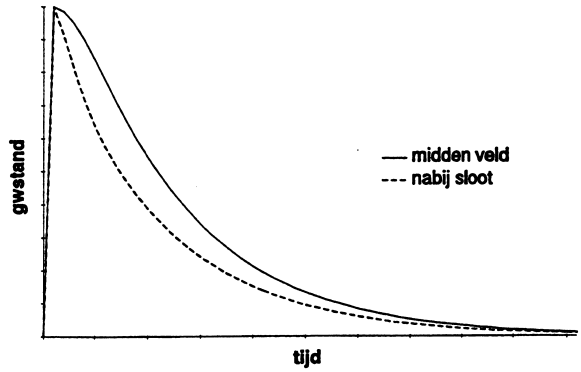
figuur 2 duurlijn geconstrueerd uit stijghoogtelijn

Een duurlijn verkrijgt men nu door de 24 meetwaarden te rangschikken in volgorde van grootte in centimeters onder maaiveld, figuur 2. De duurlijnen zijn elk jaar door wisselende weersomstandigheden verschillend. Daarom wordt er in de praktijk voor vegetatiekarakterisering een bundel duurlijnen van een aantal jaren genomen. Van alle duurlijnen van een vegetatietype is een gemiddelde duurlijn berekend met bijbehorende karakteristieken: hoogste, gemiddelde en laagste waarde en mediaan van de grondwaterstand, alsmede de overstromingsduur. Van elke duurlijnkarakteristiek zijn tevens de hoogste en laagste waarde bepaald. Dit zijn de referentiewaarden voor een vegetatietype. Deze gegevens zijn aanwezig in HYCOSTAT, een database met de referentiecollectie.

Om de effecten van een verandering in het hydrologisch systeem met deze methode te voorspellen worden de duurlijnen bepaald van bepaalde punten in dit systeem. Dit kan met behulp van gemeten stijghoogtelijnen, maar ook met een hydrologisch model van het gebied. Aan de hand van een vegetatiekaart kunnen deze duurlijnen geijkt worden. Door in het model de veranderingen in het hydrologische systeem aan te brengen kunnen met dit model de nieuwe duurlijnen bepaald worden.
Als er hydrologisch niets verandert dan gebeurt er ecologisch ook niets. Als het verloop van de grondwaterspiegel wel verandert dan wordt op basis van de berekende duurlijnkarakteristieken gekeken welke vegetatietypen er kunnen ontstaan en of de bestaande vegetatietypen wel kunnen overleven. Het bovenstaande is tevens sterk afhankelijk van de eventuele veranderingen van de biotische kenmerken. Door het opstellen van beslisregels, waarin staat op grond van welke criteria besloten wordt dat een vegetatie type zich kan ontwikkelen is deze voorspelling geformaliseerd en controleerbaar.
In feite zijn duurlijnen transformaties van de neerslag en verdamping in een bepaald jaar, door de bodemeigenschappen. Door wisselende weersomstandigheden zijn duurlijnen van verschillende jaren dan ook zelden identiek. De gebundelde duurlijnen van een aantal jaren zijn een indicatie voor een bepaald vegetatietype, maar jammer genoeg verstoort de breedte van de bundel het onderscheidend vermogen. Hierdoor is de duurlijnenmethode tamelijk omslachtig en niet nauwkeurig. In de volgende paragraaf wordt een methode voorgesteld die beter kan functioneren.

1.3 De impulsrespons

Duurlijnen zijn transformaties van neerslag en verdamping door de bodemeigenschappen in een jaar. De neerslag is elk jaar weer anders. De bodemeigenschappen daarentegen variëren maar heel weinig of niet per jaar. Beter is het dus als de vegetatie gekarakteriseerd kan worden door alleen de bodemeigenschappen. Het is dan tevens gemakkelijker om te voorspellen wat de gevolgen zijn voor de bestaande vegetatie, van veranderingen in gebiedskenmerken, zoals het starten van een grondwateronttrekking of aanbrengen van drainage. De belangrijkste gebiedskenmerken die invloed hebben op de vegetatie zijn de grondwaterstandsstijging na een hoeveelheid neerslag en de snelheid waarmee het grondwater wegzakt ofwel de reactie van de grondwaterspiegel na een kortdurende regenbui, grafisch weergegeven in figuur 3 op de volgende pagina.
Deze reactie is in feite een respons op de neerslag, die hier impuls genoemd wordt, dus een impulsrespons. Een typische impulsrespons ziet eruit als een zeer scheve kansverdelingsfunctie en kan benaderd worden met een exponentiële functie, welke met twee variabelen beschreven kan worden. Voor een willekeurig punt in een gebied met bepaalde gebiedseigenschappen kan een unieke impulsrespons bepaald worden, met karakteristieke eigenschappen zoals oppervlakte, gemiddelde en standaardafwijking. De hypothese is dat zulke eigenschappen karakteristiek zijn voor de vegetatie ter plaatse van dat punt.



figuur 3 Reactie van de grondwaterspiegel op een zeer kortdurende regenbui met een eenheidsvolume

Hypothese[1]*: De oppervlakte, het gemiddelde en mogelijk ook nog de standaardafwijking van de impulsrespons zijn karakteristiek voor het vegetatietype, en wel in afnemende volgorde van belangrijkheid.*

Deze eigenschappen worden *tijdsmomenten* genoemd omdat ze worden berekend als momenten ten opzichte van de tijd. Ze zijn niet tijdsafhankelijk want zolang er geen waterhuishoudkundige ingrepen worden uitgevoerd in dit gebied veranderen ze niet van waarde.
De belangrijkste momenten van de impulsresponskromme zijn het nulde en het eerste moment. Het nulde-orde-moment, $M_0(x,y)$ geeft aan hoe hoog de grondwaterspiegel zou stijgen als het permanent zou regenen. Het nulde- en het eerste-orde-moment, $M_0(x,y)$ en $M_1(x,y)$ zeggen samen iets over de daling van de grondwaterstand als de regen ophoudt. De verwachting is dat het vegetatietype grotendeels vastligt met deze twee karakteristieken. Momenteel is er onderzoek gaande naar de bruikbaarheid van M_0 en M_1 om vegetaties te karakteriseren. Als deze karakteristieken inderdaad bruikbaar blijken te zijn, zal het belangrijkste probleem worden om ze te berekenen op basis van fysische gegevens van een gebied zoals de kD- en c-waarden, de ligging van waterlopen, de drainagebasis, slootwaterpeilen etc.
De tijdsmomenten M_0 en M_1 zijn dus in een bepaalde mate karakteriserend voor een zekere vegetatie. De vraag is dan hoe je die momenten bepaalt. Hiertoe is door C. Maas een theorie ontwikkeld [C. Maas, 1995]. Hieruit blijkt dat het mogelijk is dat de tijdsmomenten van een lineair systeem, met een stationair grondwatermodel bepaald kunnen worden.
Als deze tijdsmomenten voor een model bepaald zijn, dan bestaat de impulsresponsfunctie voor dit model. Hiermee is het ook mogelijk zijn om de reactie van de grondwaterspiegel te bepalen voor een reeks neerslagimpulsen, zoals een neerslagreeks.

---

[1] overgenomen STW-voorstel "grondwaterspiegeldynamica" (Kiwa, SWI 95.121).

1.4 Doelstelling

Het primaire doel van dit afstudeerverslag is het verkennen van de mogelijkheden om M_0 en M_1 voor een willekeurig model te bepalen, zowel analytisch als met een bestaand grondwatermodel.
Het tweede doel van dit onderzoek is de mogelijkheid verkennen om met behulp van de met deze tijdsmomenten bepaalde impulsrespons, het verloop van de grondwaterspiegel, ten gevolge van een neerslagreeks, te bepalen.
Omdat de methode is gebaseerd op een lineair systeem is het voor beide gevallen belangrijk om te zien wat de effecten zijn van al dan niet lineaire verstoringen zoals putten, drains etc.

1.5 Indeling van het rapport

Dit verslag is stapsgewijs opgebouwd, van theorie tot een model uit de praktijk.
Als eerste is in hoofdstuk 2 de wiskundige theorie achter de impulsresponsfunctie uitgewerkt. Dit levert een wiskundige vergelijking waaraan de tijdsmomenten voldoen.
In hoofdstuk 3 en 4 zijn vervolgens de mogelijkheden verkend om de tijdsmomenten te bepalen met een grondwatermodel. De waarde van deze tijdsmomenten is vervolgens bepaald door de impulsrespons die met deze momenten is bepaald te vergelijken met de impulsrespons van het zelfde model als dit wordt berekend met een instationair grondwatermodel.
In hoofdstuk 5 is een computerprogramma ontwikkeld om een instationaire grondwaterstandsberekening te maken met de impulsresponsiemethode. De resultaten van dit programma zijn voor eenvoudige modellen vergeleken met de resultaten van een berekening met een instationair grondwatermodel.
In hoofdstuk 6 is een case studie beschreven aan de hand van een bestaand model waarin de in het voorgaande hoofdstuk geteste onderdelen verenigd zitten. Hiermee wordt de praktische waarde van de methode bestudeerd.
Tot slot staan in hoofdstuk 7 de conclusies en in hoofdstuk 8 aanbevelingen voor een eventueel vervolgonderzoek.

2 THEORIE

2.1 Inleiding

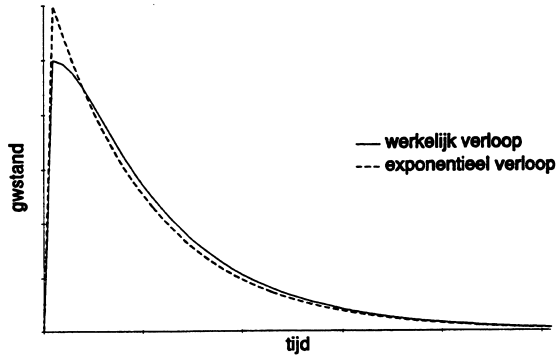
Neerslag die op een gebied valt wordt afgevoerd via het oppervlaktewater en door de bodem van dat gebied, afhankelijk van het reliëf en de geometrie van dat gebied.
Elk gebied heeft een basispeil dat de grondwaterspiegel zal aannemen als er lange tijd geen neerslag valt of verdamping optreedt. Dit wordt ook wel de drainagebasis of ontwateringsbasis genoemd. Dit basispeil is afhankelijk van de (hoogte)ligging van sloten en drains. Theoretisch hoeft dit peil op géén enkele plaats in het gebied gelijk te zijn, maar bij benadering kan gesteld worden dat het overeen komt met de gemiddelde waterstand in de omringende rivieren en watertoevoerende sloten.
Na een willekeurige hoeveelheid instantane neerslag, stel N_0, stijgt de grondwaterspiegel met een hoeveelheid S, weergegeven door

$$S = \frac{N_0}{\varepsilon} \qquad (1)$$

waarin ε de freatische bergingscoëfficiënt is. Na de grondwaterstijging door de neerslag treedt er een zakking van de waterspiegel op totdat de drainagebasis weer wordt bereikt. De snelheid van deze zakking is vooral afhankelijk van de doorlatendheid van de grond en de slootafstand. Zoals al eerder vermeld ziet een typische impulsresponsfunctie eruit als een zeer scheve kansverdelingsfunctie en kan benaderd worden met een exponentiele functie. Deze laatste ligt met twee variabelen vast en is in formulevorm te schrijven als

$$\theta(t) = A e^{-\frac{t}{\alpha}} \qquad (2)$$

Hierin zegt A iets over de initiële stijging van de grondwaterspiegel en α zegt iets over de snelheid waarmee de spiegel weer uitzakt.



figuur 4 Reactie van de grondwaterspiegel op een kortdurende regenbui

Een grafische weergave van deze reactie is te zien in figuur 4, waar een impulsrespons zoals die met een instationair grondwatermodel berekend is

samen met het exponentiële verloop afgebeeld zijn. Door de juiste bepaling van de factoren A en α is het exponentiële verloop zo goed mogelijk aan te passen aan het werkelijke verloop.
Als nu voor elke bui van een neerslagreeks dit verloop bepaald zou worden en al deze gegevens worden gecombineerd dan ontstaat het verloop van de grondwaterspiegel in de tijd. Wiskundig uitgedrukt gebeurt dat volgens de volgende regel

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} N(t-\tau)\,\theta(\tau)\,d\tau \qquad (3)$$

In deze vergelijking is h(t) het verloop van de grondwaterstand, dat zowel van de gebiedseigenschappen, $\theta(\tau)$ als van de meteorologische omstandigheden, $N(t-\tau)$, afhangt.

2.2 Relatie van de tijdsmomenten met de impulsrespons

Voor het eenvoudige geval van een homogeen pakket luidt de differentiaalvergelijking voor het verloop van de grondwaterstand [Verruijt, 1982]

$$\nabla^2 h(t) = \frac{\varepsilon}{kD}\frac{\partial h(t)}{\partial t} - \frac{N_e(t)}{kD} \qquad (4)$$

Hierin is h(t) de grondwaterstand, ε de freatische bergingscoëfficiënt, kD de doorlatendheid en $N_e(t)$ de effectieve neerslag.
Als samen met de begin- en randvoorwaarden een willekeurige tijdsreeks $N_e(t)$ van de neerslag gegeven is, kan het bijbehorende verloop van de grondwaterstand opgelost worden, bijvoorbeeld met een numeriek model. In dit onderzoek wordt een andere strategie toegepast. Eerst wordt vergelijking (4) opgelost voor het geval dat $N_e(t)$ een zeer kortdurende neerslag met een eenheidsvolume is. Het zo berekende verloop van de grondwaterstand is per definitie de impulsrespons in een bepaald punt, die we $\theta(t,x,y)$ noemen in plaats van h(t,x,y). Als deze oplossing eenmaal bekend is, kan h(t,x,y) met vergelijking (3) opgelost worden voor elke willekeurige neerslagreeks, wat relatief eenvoudig is. Het grootste probleem -het oplossen van vergelijking (3)- hoeft zo dus maar één keer aangepakt te worden.
Voor $N_e(t)$ wordt dus een impulsfunctie ingevuld

$$N_e(t) = N_0\,\delta(t) \qquad (5)$$

Het verloop van h(t) wordt voor deze speciale neerslagfunctie θ(t) genoemd, waarmee (4) overgaat in

$$\nabla^2\theta(t) = \frac{\varepsilon}{kD}\frac{\partial\theta(t)}{\partial t} - \frac{N_0\delta(t)}{kD} \qquad (6)$$

Ook deze vergelijking is met standaardmethoden op te lossen, (en dat is tijdens dit onderzoek ook regelmatig gedaan) maar de resultaten zijn niet zo eenvoudig te presenteren. In feite wordt in elk punt (x,y) een ander verloop van θ(t) gevonden, en er zouden dus in een groot aantal punten de numerieke waarden van θ(t) voor een voldoende aantal waarden van t opgeslagen moeten worden om later vergelijking (3) toe te kunnen passen. Er kan dus een enorme reductie van de te bewaren informatie verkregen worden door aan te nemen dat θ(t) volgens een e-macht verloopt

$$\theta(t) = Ae^{-\frac{t}{\alpha}} \qquad (t \geq 0) \qquad (2)$$

Van elk punt (x,y) hoeven dan alleen maar de waarden van A en α onthouden te worden, waarmee op elk gewenst moment θ(t) gereconstrueerd kan worden.
Vergelijking (2) is géén exacte oplossing van (6) maar meer een benadering hiervan. A en α moeten zo gekozen worden, dat (2) in elk geval lijkt op de oplossing van (6). **Dit wordt gedaan door te eisen dat het nulde-orde-moment M_0 en het eerste-orde-moment M_1 van (2) gelijk zijn aan M_0 en M_1 van de exacte oplossing.** Deze methode staat bekend als *matching of moments*. De twee momenten M_0 en M_1 van (2) zijn gemakkelijk te vinden

$$M_0 = \int_{-\infty}^{\infty}\theta(t)\,dt = \int_{-\infty}^{\infty}Ae^{-\frac{t}{\alpha}}\,dt = A\alpha \qquad (7)$$

$$M_1 = \int_{-\infty}^{\infty}t\theta(t)\,dt = \int_{-\infty}^{\infty}tAe^{-\frac{t}{\alpha}}\,dt = A\alpha^2 \qquad (8)$$

Om het nulde-orde-moment van de exacte oplossing te vinden wordt (6) links en rechts geïntegreerd met betrekking tot t

$$\nabla^2\int_{-\infty}^{\infty}\theta(t)\,dt = \frac{\varepsilon}{kD}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\partial\theta(t)}{\partial t}\,dt - \frac{N_0}{kD}\int_{-\infty}^{\infty}\delta(t)\,dt$$

of

$$\nabla^2 M_0 = \frac{\varepsilon}{kD} \int_{-\infty}^{\infty} d\theta(t) - \frac{N_0}{kD}$$

of

$$\nabla^2 M_0 = \frac{\varepsilon}{kD} [\theta(t)]_{-\infty}^{\infty} - \frac{N_0}{kD}$$

De eerste term in het rechterlid valt weg, want voordat de korte regenbui (impuls) viel was θ gelijk aan de drainagebasis, en na zeer lange tijd zakt θ weer terug tot de drainagebasis. Resteert dus

$$\boxed{\nabla^2 M_0 = -\frac{N_0}{kD}} \qquad (9)$$

Deze vergelijking heeft precies dezelfde wiskundige gedaante als de vergelijking voor de stationaire grondwaterstijghoogte voor het geval dat er een permanente neerslag met intensiviteit N_0 valt! M_0 kan dus met een standaard stationaire modelcode berekend worden, bijvoorbeeld met MODFLOW, en van de oplossing kunnen kaarten met isolijnen getekend worden.
Om het eerste-orde-moment van de exacte oplossing te vinden wordt (6) links en rechts met t vermenigvuldigd en weer geïntegreerd met betrekking tot t van min- tot plus oneindig

$$\nabla^2 \int_{-\infty}^{\infty} t\theta(t)\,dt = \frac{\varepsilon}{kD} \int_{-\infty}^{\infty} t \frac{\partial \theta(t)}{\partial t} dt - \frac{N_0}{kD} \int_{-\infty}^{\infty} t\delta(t)\,dt$$

of

$$\nabla^2 M_1 = \frac{\varepsilon}{kD} \int_{-\infty}^{\infty} t\,d\theta(t) - 0$$

Ter toelichting op de nul in het rechterlid: per definitie is

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)\,\delta(t)\,dt = f(0)$$

In dit geval is $f(t)=t$ en dus is $f(0)=0$. Verder met $\nabla^2 M_1$

$$\nabla^2 M_1 = \frac{\varepsilon}{kD}[t\theta(t)]_{-\infty}^{\infty} - \frac{\varepsilon}{kD}\int_{-\infty}^{\infty}\theta(t)\,dt$$

De uitdrukking $[t\theta(t)]_{-\infty}^{\infty}$ levert nul op, onder de voorwaarde dat θ sneller naar nul gaat (als $t\to\infty$) dan t naar oneindig gaat. Dit kan veilig aangenomen worden. Tenslotte komt de differentiaalvergelijking voor M_1 uit op

$$\boxed{\nabla^2 M_1 = -\frac{\varepsilon}{kD}M_0} \qquad (10)$$

Dit is alweer wiskundig analoog aan de vergelijking voor de stationaire grondwaterstijghoogte, nu voor het geval van een permanente neerslag met intensiteit $\varepsilon \cdot M_0$. M_0 is bekend zodra (9) opgelost is. Deze uitkomst wordt vermenigvuldigd met ε en als neerslag ingevoerd in MODFLOW. Na oplossing kunnen desgewenst weer isolijnen getekend worden, deze keer voor M_1.

Conclusie: M_0 en M_1 zijn in elk punt (x,y) te berekenen met een standaard stationaire modelcode. Daarna zijn A en α te berekenen met (7) en (8), enigszins omgewerkt

$$A = \frac{M_0^2}{M_1} \qquad (11)$$

$$\alpha = \frac{M_1}{M_0} \qquad (12)$$

Opmerking: De procedure die (9) en (10) opleverde kan worden vervolgd om de algemene uitdrukking te vinden

$$\nabla^{2(n+1)} M_n = -(-\frac{\varepsilon}{kD})^n \frac{N_0}{kD} \qquad (13)$$

Theoretisch kan dus een oneindige reeks van momenten M_0, M_1, M_2,.... opgelost worden. Zo'n reeks legt de exacte oplossing voor $\theta(t)$ volledig vast: er bestaan technieken om een functie te construeren als zijn momenten gegeven zijn. Het ligt niet in het kader van dit onderzoek om die weg in te slaan, maar het is van theoretisch belang te weten dat

deze methode hiermee desgewenst, met de nodige hoeveelheid werk, willekeurig nauwkeurig gemaakt kan worden.

Om differentiaalvergelijkingen (9) en (10) te kunnen oplossen zijn randvoorwaarden nodig in termen van M_0 en M_1. Die worden afgeleid uit de voorwaarden voor $\theta(t)$ op de rand. In de theorie van de grondwaterstroming zijn de meest voorkomende randvoorwaarden

$$\theta = c_1 \qquad \text{(vaste stijghoogte)} \tag{14}$$

$$\frac{d\theta}{dn} = c_2 \qquad \text{(vaste flux)} \tag{15}$$

Integreren met betrekking tot t geeft

$$\int_{-\infty}^{\infty} \theta \, dt = M_0 = \int_{-\infty}^{\infty} c_1 \, dt \tag{16}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\theta}{dn} dt = \frac{dM_0}{dn} = \int_{-\infty}^{\infty} c_2 \, dt \tag{17}$$

Het blijkt dat alleen op zinnige randvoorwaarden uitgekomen wordt als c_1 en c_2 gelijk zijn aan nul. Dan worden

$$\begin{aligned} M_0 &= 0 \\ \frac{dM_0}{dn} &= 0 \end{aligned} \tag{18}$$

Op vergelijkbare wijze kan worden afgeleid

$$\begin{aligned} M_1 &= 0 \\ \frac{dM_1}{dn} &= 0 \end{aligned} \tag{19}$$

De momentenmethode werkt dus alleen voor zogenaamde homogene randvoorwaarden !
Als het probleem inhomogene randvoorwaarden kent, ($c_1 \neq 0$ en $c_2 \neq 0$), wordt $\theta(t)$ gesplitst in een stationair deel en een dynamisch deel

$$\theta(t) = \theta_{st} + \theta_{dyn}(t) \tag{20}$$

Hierin is θ_{st} géén functie van t. Invullen in (6) geeft

$$\nabla^2[\theta_{st}+\theta_{dyn}(t)]=\frac{\varepsilon}{kD}\frac{\partial\theta_{dyn}(t)}{\partial t}-\frac{N_0\delta(t)}{kD} \tag{21}$$

met op de randen van het model

$$\begin{aligned}\theta_{st}+\theta_{dyn}(t)&=c_1\\ \frac{d}{dn}[\theta_{st}+\theta_{dyn}(t)]&=c_2\end{aligned} \tag{22}$$

Dit probleem wordt opgesplitst in twee aparte problemen, één voor θ_{st} en één voor $\theta_{dyn}(t)$

$$\nabla^2\theta_{st}=0 \tag{23}$$

met op de randen van het model

$$\theta_{st}=c_1 \tag{24}$$

danwel

$$\frac{d\theta_{st}}{dn}=c_2 \tag{25}$$

en

$$\nabla^2\theta_{dyn}(t)=\frac{\varepsilon}{kD}\frac{\partial\theta_{dyn}(t)}{\partial t}-\frac{N_0\delta(t)}{kD} \tag{26}$$

met op de randen

$$\theta_{dyn}=0 \tag{27}$$

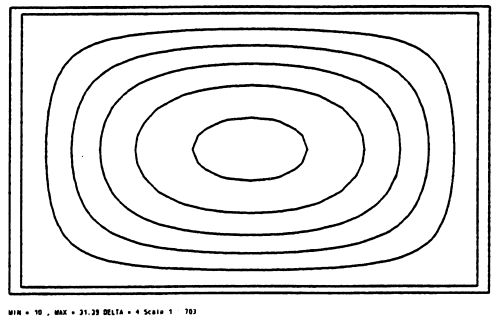
danwel

$$\frac{d\theta_{dyn}}{dn}=0 \tag{28}$$

Op deze manier neemt θ_{st} de inhomogene randvoorwaarden voor zijn rekening. De functie θ_{st} heeft een heldere fysische betekenis: het is de drainagebasis; de diepte dus waarnaar de grondwaterspiegel wegzakt als het lange tijd niet regent. De momentenmethode wordt alleen op θ_{dyn} toegepast, θ_{st} wordt op conventionele wijze opgelost.

2.3 Fysische betekenis van tijdsmomenten

De vergelijkingen voor de impulsmomenten zijn van dezelfde gedaante als de vergelijking voor de stijghoogte. De momenten moeten dus in principe oplosbaar zijn met een stationair modelcode.



figuur 5 Grafische uitvoer van M_0 voor een rechthoekig homogeen model

Als $M_0(x,y)$ voor een rechthoekig homogeen eiland, berekend wordt met het programma MODFLOW ontstaat een isolijnen patroon als in figuur 5. Het nulde-orde-moment zegt iets over hoeveel de grondwaterstand ten opzichte van de drainagebasis stijgt bij een permanente neerslag.
Het eerste-orde-moment heeft als invoer M_0, vermenigvuldigd met de bergingscoëfficiënt. Dit moment geeft aan hoe snel het peil weer zakt als de neerslag weer ophoudt.
Getest is of met deze twee karakteristieken de neerslag respons van de bodem, voor een bepaalde cel, voldoende nauwkeurig wordt gesimuleerd om de vegetatie te karakteriseren. Tevens is getest of met deze twee karakteristieken een instationaire berekening gemaakt kan worden van het grondwaterstandsverloop.
Eventueel kunnen hogere-orde-momenten wat meer detailinformatie toevoegen. Zo geeft het tweede-orde-moment aan of de daling al dan niet gelijkmatig in de tijd plaatsvindt en het derde-orde-moment geeft aan of de daling snel of langzaam op gang komt.

3 BRUIKBAARHEIDSONDERZOEK IMPULSRESPONSIEMETHODE EENVOUDIGE GEVALLEN

3.1 Inleiding

De differentiaalvergelijkingen voor nulde- en eerste-orde-momenten zijn in het vorige hoofdstuk bepaald. Hieronder zijn zij nog eens weergegeven

$$\nabla^2 M_0 = -\frac{N_0}{kD} \tag{9}$$

$$\nabla^2 M_1 = -\frac{\varepsilon}{kD} M_0 \tag{10}$$

Deze vergelijkingen zijn voor eenvoudige problemen nog wel analytisch op te lossen maar meer ingewikkelde problemen zullen sterk vereenvoudigd moeten worden om ze analytisch op te kunnen lossen. Voor deze meer ingewikkelde problemen is het nauwkeuriger en vooral sneller om ze numeriek op te lossen. De gedaante van de vergelijkingen is dezelfde als die van de differentiaalvergelijking voor stationaire grondwaterstroming, die ook door numerieke grondwatermodelcodes gebruikt wordt. De verwachting is dan ook dat het mogelijk is om de tijdsmomenten met een numerieke modelcode te berekenen.

3.2 Keuze model

Er zijn een aantal grondwatermodelcodes welke volgens de bovenstaande differentiaalvergelijking werken. Voor de bepaling van de tijdsmomenten is gekozen voor het programma MODFLOW, in de eerste plaats omdat het vrij beschikbaar is. Het programma is voor eenvoudige modellen makkelijk in gebruik. Het programma is geschikt om zowel stationaire als instationaire berekeningen te maken. Beide mogelijkheden zijn voor mij van belang omdat de tijdsmomenten stationair berekend moeten worden en de neerslagrespons een instationair proces is. MODFLOW werkt volgens een blokgecentreerde eindige differentie methode. Het kan verschillende lagen aan, die zowel opgesloten kunnen zijn als een vrije grondwaterspiegel kunnen hebben. Het is mogelijk om putten, drains, rivieren, neerslag en verdamping te simuleren.

3.3 Werkwijze

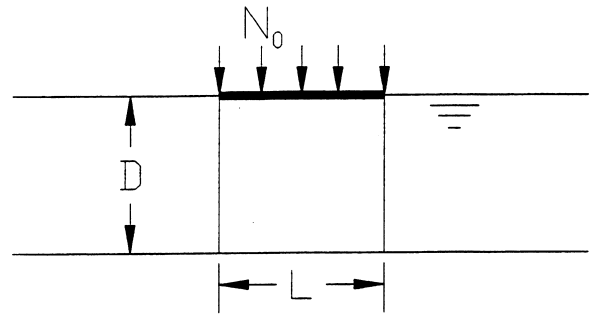
De benadering van de impulsresponsfunctie door een exponentiële functie leidt tot fouten in de berekening van het verloop van de grondwaterstand. Getest is of die fouten klein genoeg zijn om ze te mogen verwaarlozen.

Op onderstaande manier zijn twee gevallen behandeld, zijnde een landstrook en een rechthoekig eiland.
Per geval worden eerst de momenten M_0 en M_1 opgelost. Dat kan zowel analytisch als numeriek. Ter controle en om ervaring op te doen, is dit op beide manieren gedaan. De exponentiële impulsresponsfunctie ligt nu vast. Daarna wordt de werkelijke impulsresponsfunctie bepaald, wat ook weer zowel numeriek als analytisch kan gebeuren. Dit wordt voor beide methoden opgelost. Tenslotte wordt de exponentiële impulsresponsfunctie met de werkelijke impulsrespons vergeleken.

3.4 Landstrook (1-dimensionaal geval)

3.4.1 beschrijving van het model

Een doorsnede van het model dat gebruikt wordt staat afgebeeld in figuur 6.



figuur 6 schema 1-D model

Dit is een model van een homogene opgesloten watervoerende strook met aan weerszijden sloten. Het model is dimensieloos gemaakt door alle lengteschalen te delen door de lengte van het model en te delen door de karakteristieke reactieschaal.
Eerst worden de differentiaalvergelijkingen (9) en (10) voor dit probleem analytisch opgelost. Hieruit ontstaan dan vergelijkingen van M_0 en M_1 over de doorsnede. Als tweede wordt van hetzelfde model een invoer voor MODFLOW gemaakt met een neerslaghoeveelheid van 1, waarna deze wordt berekend met het model.
De uitkomsten voor M_0 en M_1 van de twee methodes worden met elkaar vergeleken en indien ze met elkaar overeenkomen worden voor een aantal nader te bepalen cellen van het model, uit de tijdsmomenten de waarden α en A berekend met vergelijking (11) en (12). Vervolgens wordt met MODFLOW-instationair, en met een exacte methode het verloop van de grondwaterstand na een neerslagimpuls bepaald en vergeleken met het exponentiële impulsverloop.

3.4.2 Bepaling van M_0 en M_1

Analytische bepaling

De differentiaalvergelijkingen van het nulde- en het eerste-orde-moment, M_0 en M_1 zijn in § 2.2 reeds bepaald. Het nulde-orde-moment is gegeven door vergelijking (9)

$$\nabla^2 M_0 = -\frac{N_0}{kD} \tag{9}$$

Het gaat hierbij om een lange rechte strook, waarvan het peil in de lengte niet verandert dus $\frac{\partial^2 M_0}{\partial y^2} = 0$. De differentiaalvergelijking vereenvoudigt hiermee tot

$$\frac{d^2 M_0}{dx^2} = -\frac{N_0}{kD} \tag{31}$$

Om de vergelijking dimensieloos te maken, wordt x eerst gedeeld door de karakteristieke lengteschaal

$$\bar{x} = \frac{x}{L} \tag{32}$$

De vergelijking wordt hierdoor

$$\frac{d^2 M_0}{d\bar{x}^2} = -\frac{L^2 N_0}{kD}$$

Om M_0 dimensieloos te maken wordt de volgende schaling uitgevoerd

$$\overline{M_0} = -M_0 \frac{kD}{L^2 N_0} \tag{33}$$

waarin de laatste term de karakteristieke reactieschaal voorstelt, waardoor uiteindelijk

$$\frac{d^2 \overline{M_0}}{d\bar{x}^2} = 1 \tag{34}$$

ontstaat.

Eenmaal integreren geeft

$$\frac{d\overline{M_0}}{d\bar{x}} = \int d\bar{x} = \bar{x} + C_1$$

Nogmaals integreren geeft

$$\overline{M_0} = \int (\bar{x} + C_1)\, d\bar{x} = (\tfrac{1}{2}\bar{x}^2 + C_1\bar{x} + C_2)$$

Hierin zijn C_1 en C_2 integratieconstanten, die uit de randvoorwaarden opgelost moeten worden.
Die randvoorwaarden zijn:

als $\bar{x}=0$ *dan* $\overline{M_0}=0$
als $\bar{x}=1$ *dan* $\overline{M_0}=0$

Hieruit volgt: $C_1 = -\tfrac{1}{2}$ en $C_2=0$.
De vergelijking voor M_0 wordt dan

$$\boxed{\overline{M_0} = \tfrac{1}{2}\bar{x}^2 - \tfrac{1}{2}\bar{x}} \qquad \textbf{(35)}$$

De differentiaalvergelijking voor het eerste-orde-moment is vergelijking (10)

$$\nabla^2 M_1 = -\frac{\varepsilon}{kD} M_0 \qquad \textbf{(10)}$$

Ook nu geldt $\dfrac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} = 0$ voor alle andere afgeleiden van M_1 naar y,

waardoor de differentiaalvergelijking vereenvoudigt tot

$$\frac{d^2 M_1}{dx^2} = -\frac{\varepsilon}{kD} M_0 \qquad \textbf{(36)}$$

Met onderstaande schaling wordt deze vergelijking dimensieloos te gemaakt.

$$\bar{x} = \frac{x}{L} \qquad \textbf{(32)}$$

$$\overline{M_0} = -M_0 \frac{kD}{L^2 N_0} \tag{33}$$

$$\overline{M_1} = M_1 \frac{kD^2}{\varepsilon L^4 N_0} = M_1 \frac{kD}{L^2 N_0} \cdot \frac{kD}{\varepsilon L^2} \tag{37}$$

Deze laatste parameter is in feite de karakteristieke reactieschaal vermenigvuldigd met de karakteristieke tijdsschaal.
Hiermee wordt de differentiaalvergelijking voor $\bar{M}_1$

$$\frac{d^2\overline{M_1}}{d\bar{x}^2} = \overline{M_0} = \tfrac{1}{2}\bar{x}^2 - \tfrac{1}{2}\bar{x} \tag{38}$$

Eénmaal integreren geeft

$$\frac{d\overline{M_1}}{d\bar{x}} = \int (\tfrac{1}{2}\bar{x}^2 - \tfrac{1}{2}x)\,dx = \tfrac{1}{6}\bar{x}^3 - \tfrac{1}{4}\bar{x}^2 + C_3$$

Nog eens integreren resulteert in $\bar{M}_1$

$$\overline{M_1} = \tfrac{1}{24}\bar{x}^4 - \tfrac{1}{12}\bar{x}^3 + C_3\bar{x} + C_4$$

Hierin zijn C_3 en C_4 de twee nog onbekende integratieconstanten welke uit de randvoorwaarden opgelost worden, deze zijn:

als $\bar{x} = 0$ *dan* $\overline{M_1} = 0$
als $\bar{x} = 1$ *dan* $\overline{M_1} = 0$

Hieruit volgt: $C_3 = \frac{1}{24}$, $C_4 = 0$

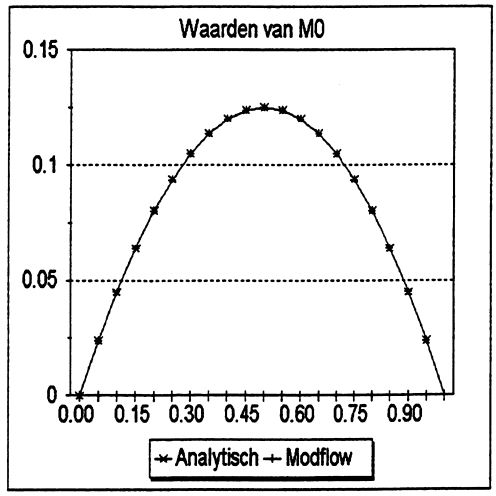
zodat de vergelijking voor $\bar{M}_1$ wordt

$$\boxed{\overline{M_1} = \tfrac{1}{24}\bar{x}^4 - \tfrac{1}{12}\bar{x}^3 + \tfrac{1}{24}\bar{x}} \tag{39}$$

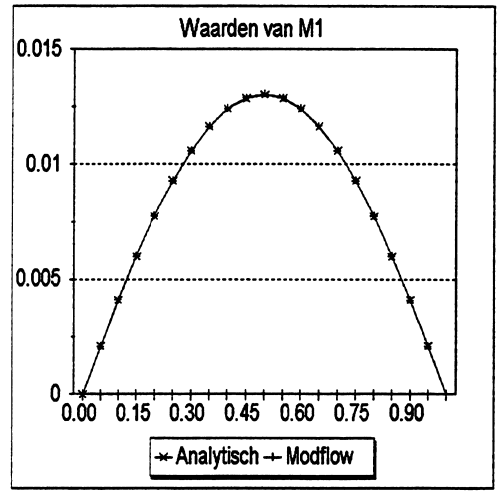
Numerieke bepaling met MODFLOW

Vergelijking (34) geeft de differentiaalvergelijking van het nulde-orde-moment. Het is nu belangrijk aan te tonen dat de oplossing van deze vergelijking vergelijkbaar is met de oplossing van dit model als het met het grondwatermodel MODFLOW-stationair berekend is.
Het eerste-orde-moment kan worden berekend met differentiaalvergelijking (38). Deze lijkt qua gedaante zeer sterk op vergelijking (34) voor $\bar{M}_0$. In de laatste vergelijking is de factor N_0 echter vervangen door $\varepsilon \cdot \bar{M}_0$. Dit betekent dat voor berekening van de waarden van $\bar{M}_1$, als invoer de waarden van $\bar{M}_0$, vermenigvuldigd met ε, genomen kan worden.
Voor de berekening van de momenten met MODFLOW is hetzelfde model gebruikt dat in § 3.4.1 beschreven is.
De vorm van het model is een oneindig lange homogene strook met sloten aan weerszijden. Dit is te modelleren als één rij cellen die aan weerszijden afgesloten zijn omdat er alleen maar stroming naar de sloten toe plaats kan vinden. Voor het aantal cellen in de breedte van het model is 21 genomen, een oneven aantal om de waterstand in het midden van het model te volgen en genoeg cellen voor de nauwkeurigheid. De in te voeren parameters, k-waarde, laagdikte D, breedte, en bergingscoëfficiënt ε zijn allemaal gelijk gesteld aan 1 om het model dimensieloos en vergelijkbaar aan vergelijking (34) en (39) te houden.
De neerslaginvoer voor de berekening van $\bar{M}_0$ is 1 lengteëenheid per tijdseenheid. Voor de berekening van $\bar{M}_1$ is voor de waarden van de neerslaginvoer de matrix van de uitvoer van $\bar{M}_0$ genomen.
De uitvoer van de berekeningen met MODFLOW bestaat dus uit twee matrices met stijghoogtewaarden ten opzichte van de drainagebasis. Deze stijghoogtes zijn de waarden van $\bar{M}_0$ en $\bar{M}_1$.
In bijlage II staan de waarden van $\bar{M}_0$ en $\bar{M}_1$ als uitkomsten van de berekening met MODFLOW.

3.4.3 Vergelijking van momenten



figuur 7 $\bar{M}_0$ over doorsnede



figuur 8 $\bar{M}_1$ over doorsnede

In de vorige paragraaf zijn eerst de vergelijking van het nulde- en eerste-orde-moment voor $0 \leq \bar{x} \leq 1$ bepaald. Tevens zijn de twee momenten voor een model met breedte 1 in MODFLOW bepaald. Ter vergelijking zijn beide resultaten voor $\bar{M}_0$ en $\bar{M}_1$ uitgezet in respectievelijk figuur 7 en 8. De twee lijnen zoals die met MODFLOW en analytisch berekend zijn komen zeer sterk met elkaar overeen. Dit geeft aan dat het inderdaad mogelijk moet zijn om de waarden van $\bar{M}_0$ en $\bar{M}_1$ voor eenvoudige lineaire gevallen te berekenen met een grondwatermodelcode.

3.4.4 Bepaling van de impulsresponsfunctie

algemeen

Nu het mogelijk blijkt om de momenten te berekenen met MODFLOW, is het interessant om te zien of de reactie van de grondwaterspiegel op een kortdurende regenbui goed te simuleren is met de impulsresponsiemethode. In hoofdstuk 2 worden de tijdsmomenten uit de impulsresponsfunctie bepaald. Het is dan natuurlijk ook mogelijk om het andersom te doen, dus de impulsrespons met de tijdsmomenten bepalen. De functie hiervan is de e-macht uit vergelijking (2). Het gemiddelde en de wegzaktijd van de exponentiële functie moeten gelijk zijn aan die van het verloop van de werkelijke impulsrespons. MODFLOW biedt de mogelijkheid om instationair te rekenen. Het is hiermee mogelijk om in een zeer korte tijd een neerslag met een effectieve hoeveelheid van 1 te simuleren en het verloop van de grondwaterstand in de tijd te volgen. In deze paragraaf wordt het exponentiële-, exacte- en het met MODFLOW berekende grondwaterverloop bepaald voor het midden en op een kwart van het model. Hierna worden de uitkomsten hiervan met elkaar vergeleken.

benadering met de impulsresponsiemethode

Het verloop in de tijd van de stijghoogte voor een bepaald punt volgens de impulsresponsiemethode wordt berekend met vergelijking (40)

$$h(t,x) = A(x)\, e^{-\frac{t}{\alpha(x)}} \tag{40}$$

De waarde van de parameters A(x) en α(x) kunnen met de vergelijking (11) en (12) bepaald worden

$$A(x) = \frac{M_0(x)^2}{M_1(x)} \tag{11}$$

$$\alpha(x) = \frac{M_1(x)}{M_0(x)} \tag{12}$$

Tabel I Tijdsmomenten, A en α

plaats $\bar{x}$	¼	½
$\bar{M}_0$	0,09375	0,125
$\bar{M}_1$	0,009277	0,013021
α	0,098958	0,104167
A	0,947368	1,2

In figuur 9 en 10 in § 3.4.5 staat de grafische weergave van het stijghoogteverloop in de tijd.

werkelijk verloop met MODFLOW

Voor het bepalen van de impulsrespons met MODFLOW kan hetzelfde model gebruikt worden als gedaan is voor de berekening van de tijdsmomenten. Hiertoe moet het model aangepast worden om er instationair mee te rekenen. Dit houdt in dat er meerdere periodes en een bergingscoëfficiënt gedefinieerd moeten worden.
Het aantal periodes wordt bepaald door het aantal variaties van de invoer. De invoer is in dit geval de neerslagterm, welke in de eerste periode een inhoud van 1 moet hebben en gedurende de respons dient de neerslag gelijk aan 0 te zijn. Er zijn dus 2 periodes gedefinieerd. De eerste periode moet zo kort mogelijk duren, zodat in deze periode nog geen afstroming plaats kan vinden en de impulsresponsfunctie zo goed mogelijk benaderd

wordt, in MODFLOW is dat $1 \cdot 10^{-15}$ tijdseenheid. De neerslag in die periode moet dus gelijk zijn aan $1 \cdot 10^{+15}$. Uit bovenstaande paragraaf blijkt dat de neerslag na een halve tijdseenheid is weggezakt, dus wordt de lengte van de tweede periode een halve tijdseenheid, onderverdeeld in 50 tijdstappen. Er is al eerder bepaald dat de bergingscoëfficiënt gelijk moet zijn aan 1 omdat nog steeds gewerkt wordt met een dimensieloos model. In figuur 9 en 10, § 3.4.5 staat de impuls van de grondwaterstand voor respectievelijk de cellen 6 en 11, dus op $\bar{x}=¼$ en $\bar{x}=½$, grafisch afgebeeld, in bijlage III staat de MODFLOW-uitvoer voor deze cellen.

werkelijk verloop met analytische methode

De respons op een impulsneerslag is ter controle ook analytisch berekend. Hiervoor is een fouriertransformatie uitgevoerd op onderstaande differentiaalvergelijking, [Verruijt, 1982]

$$kD\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\right) = \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial t} \qquad (41)$$

De uitwerking hiervan is te zien in bijlage I. Na de transformatie ontstaat vergelijking (I.1). Deze vergelijking geldt voor een rechthoekig homogeen eiland met een opgesloten laag, met aan alle zijden water. Het model dat in dit deel wordt vergeleken is een lange rechte strook zodat vergelijking (I.1) hiernaar omgewerkt moet worden. Dit geeft (I.2) op

$$\bar{\varphi}(\bar{x},\bar{t}) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,..}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\bar{x})\, e^{-(n^2\bar{t})} \qquad \text{I.2}$$

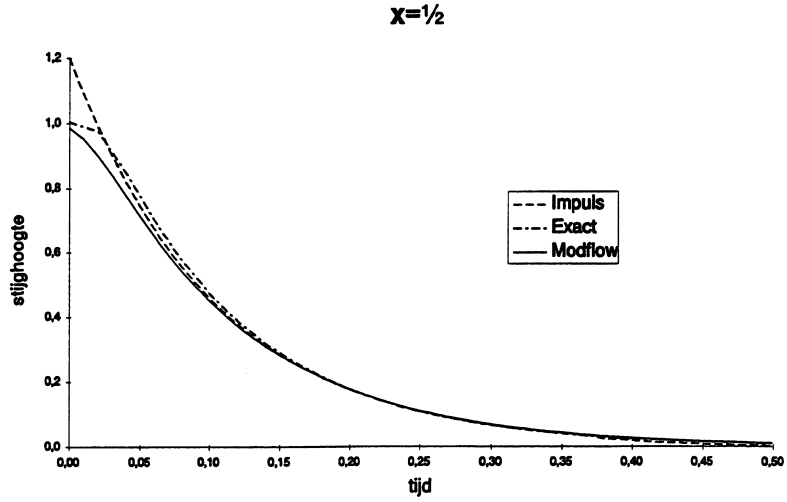
Deze vergelijking is al dimensieloos gemaakt door onderstaande karakteristieke plaatsschaal en -tijdschaal in te vullen

$$\bar{x} = \frac{\pi}{L} x$$
$$\bar{t} = \frac{kD}{\varepsilon L^2} \pi^2 t \qquad (42)$$
$$\bar{\varphi} = \frac{\varepsilon \varphi}{N_0}$$

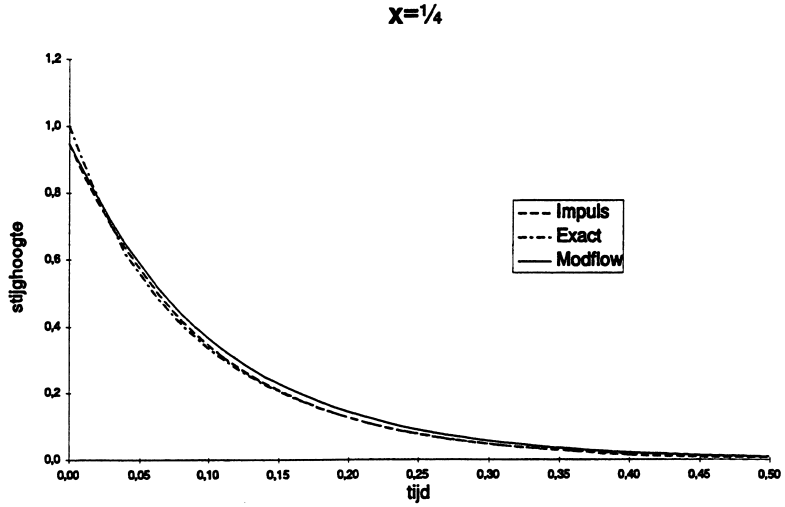
Met behulp van een spreadsheetprogramma is bovenstaande vergelijking uitgerekend voor voldoende waarden van n, wat resulteert in de grafiek in figuur 9 en 10 op de volgende pagina.

3.4.5 vergelijking van de impulsrespons

Na een neerslagimpuls met een inhoud 1 zal de grondwaterstijging gelijk zijn aan N_0/ε, dus 1. Na deze impuls zal de waterspiegel dalen tot de drainagebasis. In onderstaande figuren 9 en 10 staat voor de drie hiervoor beschreven methoden dit verloop afgebeeld voor een punt in het midden van het model en op ¼ van de modelbreedte vanaf de sloot.



figuur 9 vergelijk h(t,½)



figuur 10 vergelijk h(t,¼)

De verlopen in deze figuren hebben alle drie ongeveer dezelfde vorm. Direct na de impuls hebben zowel het MODFLOW-verloop als het exacte verloop de stijghoogte zoals je die zou verwachten, namelijk $N_0/\varepsilon=1$. Vlak hierna is er nog geen zakking van de spiegel, welke langzaam op gang komt. Dit verloop is te wijten aan het verschijnsel dat de grondwaterstroming eerst langs de sloten op gang komt, waarna de zakking steeds verder naar het midden van het model merkbaar wordt. Het exponentiële verloop begint een stuk hoger, waarna het peil direct daalt. De stijghoogte is nu niet gelijk aan 1 maar aan $A=\bar{M}_0^2/\bar{M}_1$. Volgens de theorie in hoofdstuk 2, zouden alle oppervlakten onder de lijnen gelijk aan $\bar{M}_0$ en elkaar moeten

zijn. Voor het midden van het veld geldt $\bar{M}_0$=0,125. De oppervlakten onder de lijnen staan hieronder:

- exponentiële impuls $\bar{M}_0$=0,129
- analytisch $\bar{M}_0$=0,129
- MODFLOW $\bar{M}_0$=0,124

De exponentiële en de exacte impuls hebben een iets groter oppervlak onder de lijn dan MODFLOW voor de periode $\bar{t}$=0 tot 0,50 en ze zijn ook iets groter dan M_0. Het grotere oppervlak van de eerste twee methoden dan MODFLOW is te verklaren doordat MODFLOW op $\bar{t}$=0,50 nog een hogere stijghoogte heeft dan de andere twee methoden, welke dan nagenoeg gelijk aan nul zijn. Als het oppervlak onder de exponentiële lijn analytisch berekend zou worden met vergelijking (7)

$$M_0 = \int_0^\infty \theta(t)\,dt = \int_0^\infty A\,e^{-\frac{t}{\alpha}}\,dt = A\,\alpha \qquad (7)$$

dan is dit exact gelijk aan M_0. De reden van de afwijking die hierboven gevonden wordt zou gezocht moeten worden in het feit dat het oppervlak numeriek is uitgerekend.
Als gekeken wordt naar $\bar{x}$=¼ dan blijken de drie methodes veel dichter bij elkaar te liggen omdat het werkelijke verloop dan veel meer op een exponentiëel verloop lijkt. Duidelijk is dus te zien dat de waterhoogtes meer naar de rand van het gebied sneller uitzakken.

3.4.6 conclusie

Uit deze paragraaf blijkt dat de bepaling van het nulde- en het eerste-ordemoment voor eenvoudige lineaire 1-dimensionale modellen met bovenstaande eigenschappen uitvoerbaar is. Het feit dat de impulsrespons sterk overeen komt met de werkelijke respons geeft aan dat de tijdsmomenten werkelijk gebiedskenmerken zijn en goed zijn te berekenen met een grondwatermodel. Andere afmetingen of doorlatendheid van het model hebben géén invloed op de werking hiervan. Waarschijnlijk geldt dit ook voor meer gecompliceerde modellen, dit wordt in de volgende paragrafen gecontroleerd.

3.5 Rechthoekig eiland (2-dimensionaal geval)

3.5.1 beschrijving van het model

Het model waar nu naar gekeken wordt is nog steeds een lineair homogeen geval. De enige toevoeging op het voorgaande model is dat het nu een 2-dimensionaal model betreft.
Het model is een homogeen rechthoekig eiland met een opgesloten watervoerend pakket, omsloten door water. Ook dit model heeft weer een karakteristieke tijd- en reactieschaal waardoor alle dimensies en waarden gelijk zijn aan 1.
Als eerste wordt weer het nulde- en eerste-orde-moment bepaald. Dit keer gebeurt dat met MODFLOW en met analytische berekening. Indien deze momenten overeenkomen, wordt weer de impulsrespons bepaald met de exponentiële impulsrespons, MODFLOW en de exacte methode voor een aantal karakteristieke plaatsen in het model.

3.5.2 Bepaling van M_0 en M_1

numerieke bepaling met MODFLOW

Voor de bepaling van de tijdsmomenten met MODFLOW is het model dat hierboven beschreven is gemaakt in MODFLOW. In de x- en y-richting zijn elk 21 cellen gedefinieerd, met rondom als randvoorwaarde een vaste stijghoogte. De overige invoergegevens zijn als het 1-D model in de vorige paragraaf.
M_0 is bepaald met een neerslaginvoer van 1 lengteëenheid per 1 vierkante lengteëenheid per tijdseenheid. Voor de bepaling van M_1 is weer de stijghoogtematrix van M_0, vermenigvuldigd met ε als neerslag gedefinieerd. Uiteindelijk zijn er twee uitvoerfiles met 21 x 21 waarden met de stijghoogtes, M_0 en M_1 berekend. Hiermee kunnen voor elk punt de waarden van α en A bepaald worden.

analytische bepaling

Voor bepaling van M_0 en M_1 zijn in bijlage I, de volgende exacte vergelijkingen afgeleid met behulp van Fourier-transformatie

$$\overline{M}_0(\bar{x},\bar{y}) = \frac{16}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,..}^{\infty} \sum_{m=1,3,5,..}^{\infty} \frac{1}{nm} \frac{\sin(n\bar{x})\sin(m\bar{y})}{n^2 + \alpha^2 m^2} \qquad \text{(I.3)}$$

$$\overline{M}_1(\bar{x},\bar{y}) = \frac{16}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,..}^{\infty} \sum_{m=1,3,5,..}^{\infty} \frac{1}{nm} \frac{\sin(n\bar{x})\sin(m\bar{y})}{(n^2 + \alpha^2 m^2)^2} \qquad \text{(I.4)}$$

Deze zijn dimensieloos gemaakt met onderstaande karakteristieke tijd- en reactieschalen

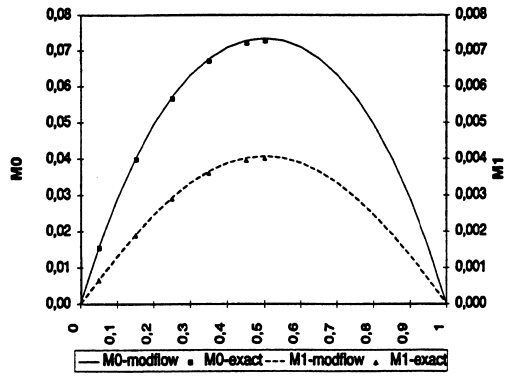
$$\bar{x} = \frac{\pi}{L} x \quad \bar{y} = \frac{\pi}{b} y \quad \alpha = \frac{L}{b} \tag{43}$$

$$\bar{M}_0 = M_0 \pi^2 \frac{kD}{L^2 N_0} \tag{44}$$

$$\bar{M}_1 = M_1 \pi^2 \frac{kD^2}{\varepsilon L^4 N_0} \tag{45}$$

Met behulp van een spreadsheet zijn deze functies berekend met een voldoend aantal waarden van n en m, waarna voor de gewenste punten de waarden van $\bar{M}_0$ en $\bar{M}_1$ bepaald zijn.

3.5.3 vergelijking van de momenten



figuur 11 M_0 en M_1 over halve doorsnede eiland

In het voorgaande deel zijn met MODFLOW en de analytische vergelijkingen de waarden van $\bar{M}_0(x,y)$ en $\bar{M}_1(x,y)$ bepaald. Het bepalen van de momenten met behulp van de exacte methode is een tamelijk tijdrovend karwei, daarom zijn slechts de momenten van een aantal punten over een doorsnede van het eiland berekend, waarna deze in figuur 11, vergeleken zijn met de waarden van MODFLOW voor die punten. Duidelijk is dat er tussen de resultaten van de onderlinge methoden zeer weinig verschillen zijn.

3.6 Bepaling van de impulsfunctie

3.6.1 algemeen

Ook nu is het mogelijk gebleken om de tijdsmomenten te berekenen voor een 2-dimensionaal model. De verwachting is dat de exponentiële impuls-

respons van dit model ook overeen zal komen met de 'werkelijke' respons. De initiële stijghoogte van de exponentiële impulsrespons zal hoger zijn dan van het 1-dimensionale model. In deze paragraaf wordt gekeken of de respons van de onderlinge methodes geen grotere afwijkingen gaat geven door de invloeden van een extra dimensie.
Het hoogteverloop wordt berekend met de exponentiële impulsrespons en ter vergelijking weer met MODFLOW en de analytische oplossing uit bijlage I. De berekeningen worden beperkt tot het midden van het model en wat meer naar de rand toe, om precies te zijn op (½,½) en (¼,½), respectievelijk cel nummer 11,11 en 6,11.

3.6.2 benadering met de impulsresponsiemethode

Ook nu wordt het stijghoogteverloop in de tijd berekend met vergelijking -(40)

$$h(t,x,y) = A(x,y)\, e^{-\frac{t}{\alpha(x,y)}} \tag{40}$$

Met vergelijking (11) en (12) kunnen de parameters α(x,y) en A(x,y) berekend worden

$$A(x,y) = \frac{M_0(x,y)^2}{M_1(x,y)} \tag{11}$$

$$\alpha(x,y) = \frac{M_1(x,y)}{M_0(x,y)} \tag{12}$$

Tabel II geeft voor de gegeven punten de waarden van M_0, M_1, A en α.

Tabel II Tijdsmomenten, A en α

plaats x̄	(¼,½)	(½,½)
$\bar{M}_0$	0,057222	0,073527
$\bar{M}_1$	0,002938	0,004062
α	0,0513	0,0552
A	1,1146	1,3310

3.6.3 werkelijk verloop met MODFLOW

Voor het bepalen van de impulsrespons kan weer hetzelfde model gebruikt worden als voor de bepaling van de tijdsmomenten. De gebruikte werkwij-

ze is nu weer hetzelfde als in § 3.4.4. Er worden dus twee periodes gedefinieerd. In de eerste periode is er een neerslag met een volume van 1 lengteëenheid^3 per lengteëenheid^2, in de tweede periode is de neerslag gelijk aan nul. Ook moet er nu nog een bergingscoëfficiënt ingevoerd worden. De tweede periode wordt berekend tot ½ tijdseenheid in 50 tijdstappen, dan is het peil al bijna gedaald tot nul. In figuur 12 en 13 staan de stijghoogteverlopen grafisch afgebeeld.

3.6.4 werkelijk verloop met een analytische methode

De impulsrespons is ook weer analytisch berekend. De exacte vergelijking is bepaald in bijlage I

$$\bar{\varphi}(\bar{x},\bar{y},\bar{t}) = \frac{16}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,..}^{\infty} \sum_{m=1,3,5,..}^{\infty} \frac{1}{nm} \sin(n\bar{x}) \sin(m\bar{y})\, e^{-(n^2+\alpha^2 m^2)\bar{t}} \qquad \text{(I.1)}$$

Deze vergelijking is al dimensieloos gemaakt door onderstaande karakteristieke plaatsschaal, -reactieschaal en -tijdschaal in te vullen

$$\bar{x} = \frac{\pi}{L} x \quad \bar{y} = \frac{\pi}{b} y \quad \alpha = \frac{L}{b} \quad \bar{\varphi} = \frac{\varepsilon \varphi}{N_0} \qquad \text{(46)}$$

$$\bar{t} = \frac{kD}{\varepsilon L^2} \pi^2 t \qquad \text{(47)}$$

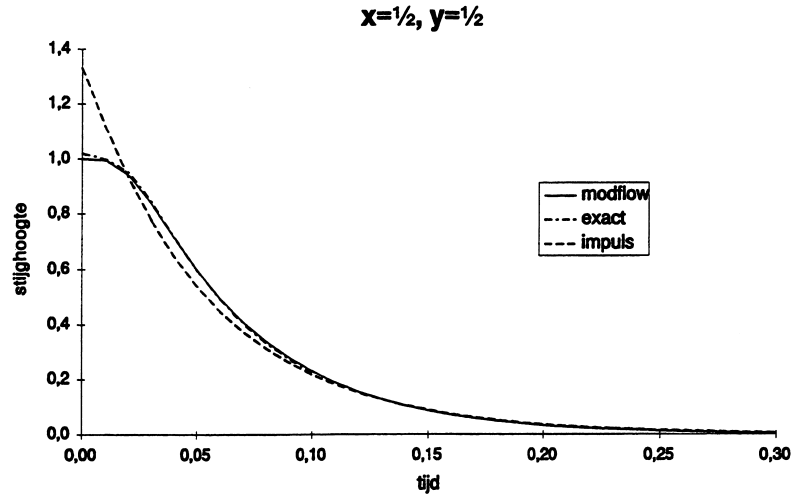
Deze functie is uitgerekend met een spreadsheetprogramma voor de twee punten waar het grafisch verloop vergeleken moet worden.

3.6.5 vergelijking van de impulsrespons

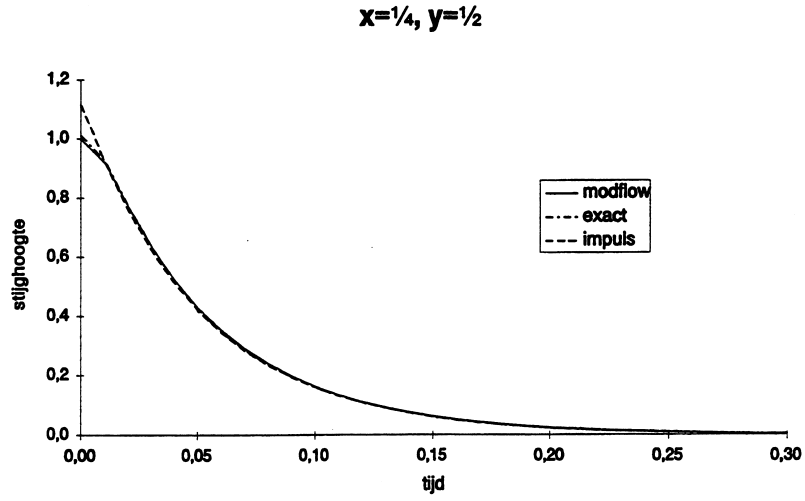
Na de neerslagimpuls vindt er een grondwaterstandsstijging plaats, welke dan langzaam uitzakt. De drie methoden die in figuren 12 en 13 op de volgende pagina staan weergegeven hebben de zelfde karakteristieken als het 1-dimensionale model, dus vlak na de impuls een groot verschil tussen MODFLOW en de exponentiële impuls.
Het nulde-orde-moment in het midden van het veld is gelijk aan $\bar{M}_0$=0,07353.
De oppervlakten onder de lijnen van MODFLOW en de exponentiële impuls moeten hieraan gelijk zijn, deze zijn

- exponentiële impuls $\bar{M}_0$=0,08037
- MODFLOW $\bar{M}_0$=0,07902

Beide waarden zijn van de zelfde orde van grootte, maar wat hoger dan de theoretische waarde. Dit ligt waarschijnlijk aan de manier van berekenen.



figuur 12 vergelijk h(t,½,½)



figuur 13 vergelijk h(t,¼,½)

3.6.6 conclusie

Uit deze paragraaf blijkt weer dat de tijdsmomenten werkelijk gebiedskenmerken zijn. In ieder geval geldt dit voor homogene modellen met een constante laagdikte. In de volgende paragraaf worden aan bovenstaande modellen lineaire verstoringen toegevoegd.

4 BRUIKBAARHEIDSONDERZOEK IMPULSRESPONSIEMETHODE ENKELE INGEWIKKELDERE GEVALLEN

4.1 Inleiding

Nu is gebleken dat het goed mogelijk is om de tijdsmomenten te bepalen voor 'kale' lineaire modellen, is het interessant om te weten wat toevoegingen op die modellen voor effect hebben op de tijdsmomentenbepaling. In dit hoofdstuk wordt de impulsresponsiemethode vergeleken met MODFLOW-instationair voor een aantal verschillende situaties. Achtereenvolgens komen de volgende gevallen aan bod:

- Als eerste wordt gekeken naar een grondwaterstandsdaling ten gevolge van een put, zowel ten gevolge van een vast debiet als een put met een vast onttrekkingsniveau,
- als tweede worden een model met een initiële grondwaterstroming door niveauverschil in de randsloten en een model met een verlopende watervoerende laag bekeken,
- als derde is de impuls van een model bestaand uit twee lagen vergeleken,
- en als vierde is de impuls van een model met drainage onderzocht.

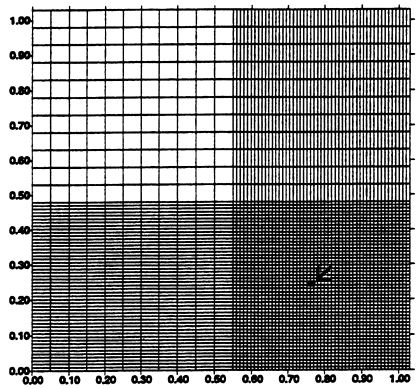
4.2 Werkwijze

De werkwijze in dit hoofdstuk is minder uitgebreid dan in het voorgaande hoofdstuk. De tijdsmomenten en het impulsresponsieverloop worden enkel met het programma MODFLOW berekend omdat het niet in het kader van dit onderzoek ligt om voor verschillende gevallen analytische oplossingen te zoeken maar om de impulsresponsiemethode te toetsen aan een bestaand model.
De modellen worden gebaseerd op de 1- en 2-dimensionale modellen uit het begin van dit hoofdstuk. Hieraan worden dan de gewenste eigenschappen toegevoegd.
De drainagebasis is bij deze modellen niet meer gelijk aan de slootnivaus, daarom moeten deze modellen eerst stationair, zonder neerslag, doorgerekend worden zodat de drainagebasis ontstaat. De uitkomst hiervan wordt de begingrondwaterstand. Hierna wordt het model stationair doorgerekend met de eenheidsneerslag, zodat M_0 uit de stijghoogtes ontstaat. Deze waarden worden weer gebruikt als invoer voor de berekening van M_1.
Nu kan met behulp van vergelijking (2), (11) en (12), de exponentiële impulsresponsfunctie berekend worden.
Nadat dit gebeurd is wordt met MODFLOW-instationair de 'werkelijke' impulsrespons berekend. Deze wordt dan grafisch uitgezet met de exponentiële respons zodat deze twee met elkaar vergeleken kunnen worden.

4.3 Grondwaterstandsdaling met een put

4.3.1 algemeen

Dit geval is gemodelleerd door een put toe te voegen aan het 2-dimensionale model. De put is gesitueerd op (¾,¼). Het model is onderverdeeld in 61 x 61 cellen waarvan de meeste zich in de buurt van de put bevinden

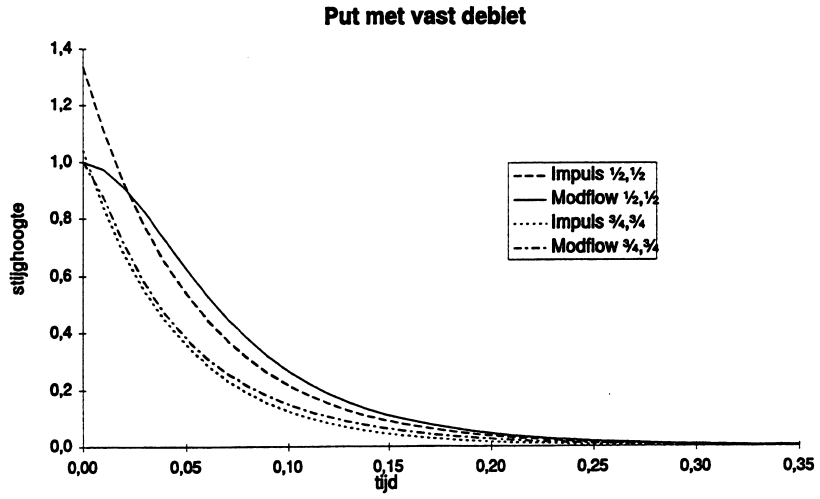


figuur 14 schema model met put bij pijl

omdat daar de grondwaterstandsverhangen het grootst zijn, zie figuur 14 voor het schema.
Er bestaan twee verschillende soorten putten, een put met een vast debiet, en een put met een vast onttrekkingsniveau.

4.3.2 vergelijking MODFLOW-impulsrespons voor put met vast debiet

Een put met een vast debiet zorgt voor een toestroming van de sloten naar die put.

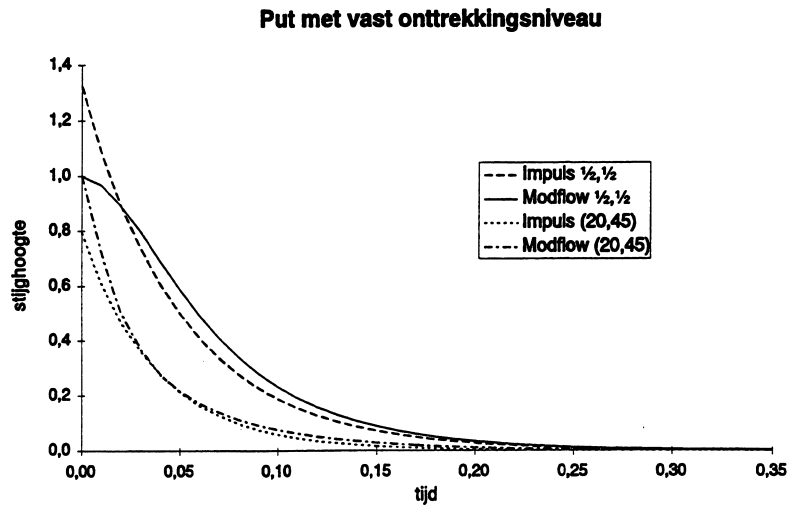


figuur 15 hoogteverloop in de tijd put met vast debiet

Hierdoor daalt de grondwaterstand in de buurt van die put. De waarden van het nulde- eerste-orde-moment blijken gelijk te zijn aan de momentwaarden van hetzelfde model zonder die put. Dit is ook wel logisch omdat

dit model lineair gehouden wordt, met constante kD. Hierdoor kan het beginsel van superpositie gelden.
In figuur 15, op de vorige pagina, staat het hoogteverloop tegen de tijd uitgezet van een punt in het midden van het model en ter plaatse van de put ter vergelijking. In deze figuur is het zelfde stijghoogteverloop te zien als eerder bij een vierkant veld in § 3.6.5. Hieruit mag dus geconcludeerd worden dat een put met een vast debiet geen nadelige invloed heeft op de tijdsmomenten mits de kD constant wordt gehouden.

4.3.3 vergelijking MODFLOW-impulsrespons voor put met vast onttrekkingsnivau



figuur 16 Hoogteverloop in de tijd put met vast ontrekkingsnivau

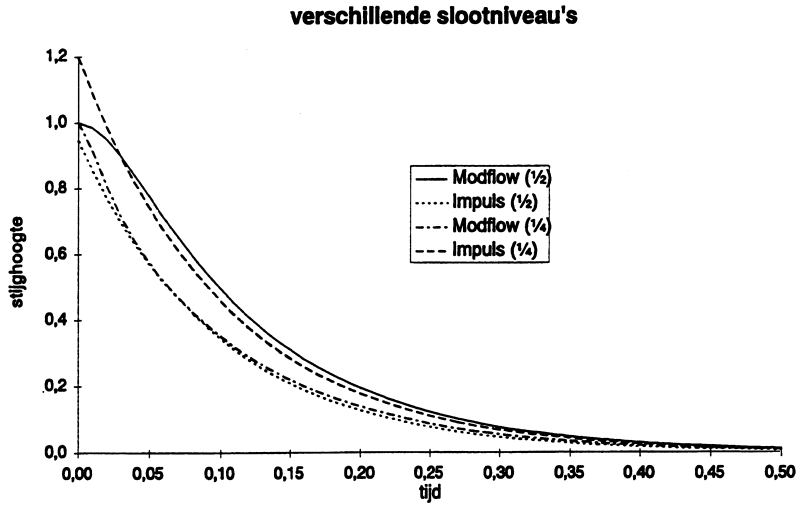
Een put met een vast onttrekkingsniveau levert een nieuwe randvoorwaarde voor het model op, want het waterpeil in de put wordt op een vastgestelde hoogte gehouden. In figuur 16 staat het hoogteverloop van zo'n model afgebeeld, voor een punt in het midden van het model en een punt op kleine afstand van de put, cel 20,45. Ook nu blijkt de impulsrespons maar weinig van MODFLOW-instationair af te wijken. Dit stijghoogteverloop, met name in de buurt van de put, is géén superpositie van twee situaties zoals hierboven het geval was, omdat de stijghoogtes in de put vast worden gehouden waardoor een randvoorwaarde ontstaat. Toch is het goed mogelijk om voor dit geval de tijdsmomenten te bepalen omdat het model, doordat de kD-waarde constant wordt gehouden, wél lineair blijft.
In de praktijk is dit laatste niet altijd het geval, als er sprake is van een vrije waterspiegel kan een variërende kD-waarde optreden en is het model niet meer lineair, dit wordt hier verwaarloosd.

4.4 Schuine modellen

4.4.1 algemeen

Met schuine modellen worden hier 1-dimensionale modellen, die aan de ene zijde andere eigenschappen hebben dan aan de andere zijde, bedoeld. Er wordt de reactie van twee modellen getest. Eerst een model met sloten die aan weerszijden een verschillend peil hebben, dus verschillende randvoorwaarden, waardoor een initiële grondwaterstroming ontstaat. Hiernaast een model met een uitwiggend watervoerend pakket, dus met verlopende kD-waarde. De verwachting is dat het eerste model hetzelfde zal reageren als het homogene 1-dimensionale model, maar het tweede model heeft een variërende kD-waarde, waarvan de invloed niet bekend is.

4.4.2 initiële stroming door niveauverschil in sloten

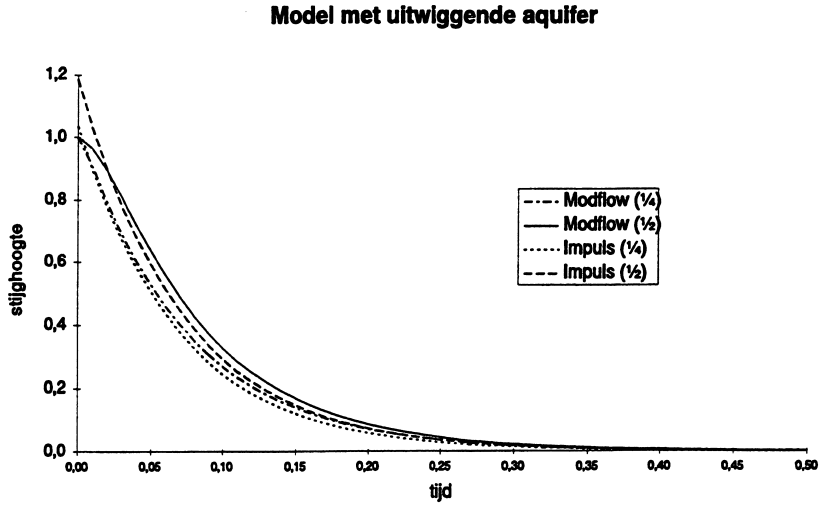


figuur 17 hoogteverloop in de tijd verschillende slootpeilen

In figuur 17 staat het hoogteverloop van een 1-dimensionaal model met eenheidslengte en constante kD waarde. Het slootpeil is aan de ene rand gelijk 2 en aan de andere kant 1, gelijk aan maaiveld. Het nulde en eerste momentverloop is gelijk aan dat van een systeem met gelijke slootpeilen, dit geldt ook voor het impulsverloop in de tijd. De tijdsmomentenbepaling voor dit systeem levert dus geen problemen op.

4.4.3 model met uitwiggende aquifer

Op de volgende pagina, in figuur 18 staat het hoogteverloop voor een schuine aquifer afgebeeld. Ook dit model heeft een eenheidslengte. De dikte en ook het slootpeil varieert lineair van 1 aan de linkerzijde tot 2 aan de rechterzijde. De kD waarde varieert dus ook van 1 tot 2. Ook hier levert dit geen probleem op.



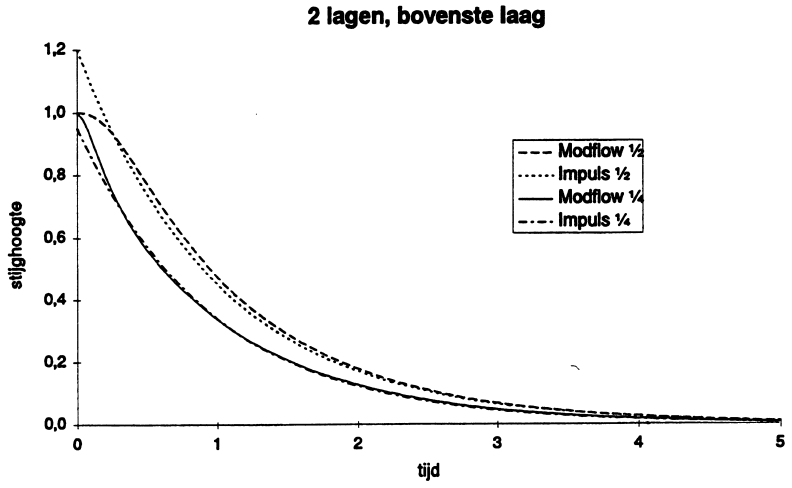
figuur 18 hoogteverloop voor een schuine aquifer

4.5 Meerdere lagen

4.5.1 algemeen

Systemen met meerdere lagen kunnen verschillende eigenschappen hebben. Uitgaande van twee lagen kan een model per laag verschillende weerstanden hebben, bijvoorbeeld de onderste laag een kleine en de bovenste laag een grote weerstand zoals een kleilaag bovenop een zandpakket. Het is ook mogelijk dat een model een weerstandslaag heeft tussen de lagen in, zoals een kleilens. De invloed van deze eigenschappen op de tijdsmomenten wordt in deze paragraaf onderzocht.

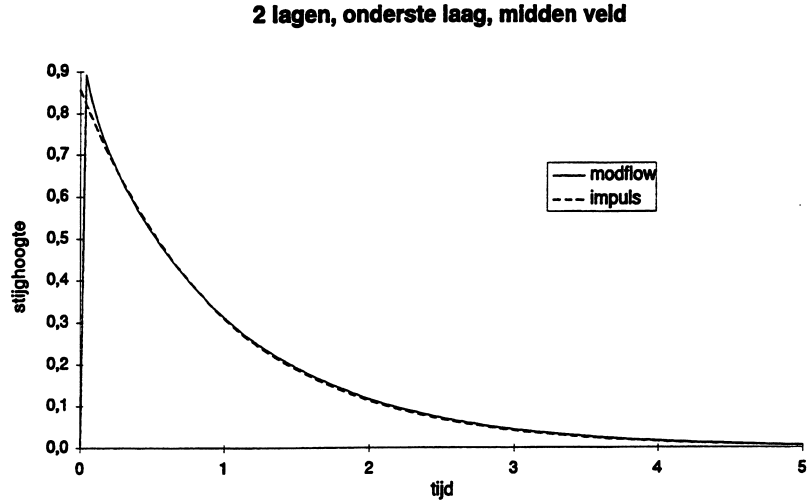
4.5.2 twee lagen met verschillende doorlatendheid



figuur 19 hoogteverloop in de tijd bovenste laag

De invloed van twee lagen met verschillende doorlatendheid op de impulsrespons is onderzocht met een 1 dimensionaal model, bestaande uit twee

afgesloten lagen. De bovenste laag heeft een kleine doorlatendheid en staat aan weerszijden in contact met een sloot. De onderste laag heeft een 10 keer grotere doorlatendheid en is aan weerszijden afgesloten. De neerslag zal dan voornamelijk door de bovenste laag direct naar de onderste laag stromen en in de buurt van de sloten weer via de bovenste laag naar de sloot stromen.
De impulsrespons is berekend voor beide lagen, voor de bovenste laag staat die weergegeven in figuur 19, vorige pagina, en voor de onderste laag staat de respons in figuur 20.

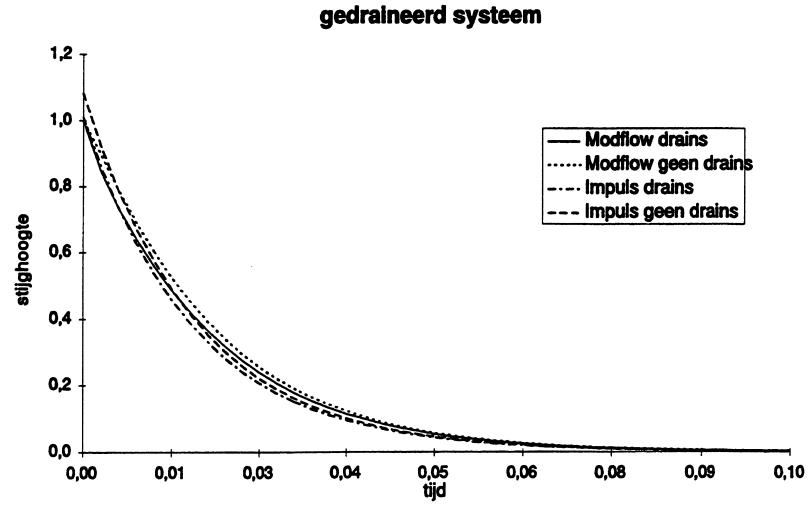


figuur 20 hoogteverloop in de tijd onderste laag

De exponentiële impulsrespons van dit 2-lagig systeem blijkt voor beide lagen goed gelijk te lopen aan MODFLOW-instationair. De onderste laag heeft een hogere doorlatendheid, waardoor de impulsrespons over de gehele breedte ongeveer hetzelfde is, daarom is alleen de respons van het midden weergegeven. In figuur 20 is te zien dat het één tijdstap duurt voordat de stijghoogtes in de onderste laag reageren op de impuls. Waarschijnlijk is dit een afwijking van modflow omdat hier gewerkt wordt met een oneindig korte impuls, die direct in alle lagen merkbaar zou moeten zijn.

4.6 Gedraineerd systeem

Een drainagesysteem heeft de eigenschap dat het vanaf een bepaalde stijghoogte water uit een systeem kan afvoeren door een weerstand. Zolang alle drains in een model onder water staan is het systeem lineair. In de volgende test wordt de impulsresponsreactie van een gedraineerd systeem bekeken. Als basis voor dit model is weer het 1-dimensionale model genomen. De drains in dit model zijn gedefinieerd door om de andere cel een de volgende drainparameters in te vullen, weerstand van 2 lengteëenheden per tijdseenheid en drainhoogte gelijk aan bovenkant watervoerende laag.
In figuur 21, volgende pagina, staat het hoogteverloop van dit model. De impulsrespons is gevolgd voor twee naast elkaar gelegen cellen in het midden, waarvan er één gedraineerd is en de andere niet. Te zien is in de



figuur 21 hoogteverloop

figuur dat de impulsresponsies allemaal goed met elkaar overeenkomen en dat het niet echt uitmaakt of een cel met drains of dat een cel zonder drains gevolgd wordt.

4.7 Conclusie

De testen in dit hoofdstuk laten zien dat MODFLOW en de impulsresponsiemethode sterk vergelijkbare resultaten laten zien voor de geteste gevallen. In alle gevallen geeft MODFLOW een meer of minder S-vormig stijghoogteverloop. Direct na de impulsbui komt de stijghoogte op een constant niveau, waarna het steeds sneller gaat dalen. Dit komt doordat er over het gehele model een neerslag van 1 wordt ingevoerd, welke door de bodem naar de sloten rondom af wordt gevoerd. Op t_0 is het verhang van de grondwaterstand gelijk aan nul, waardoor er ook geen afstroming is. Dit verhang loopt het eerst op aan de randen omdat daar het water het eerst wegstroomt. Het verhang meer naar het midden van het model reageert wat later waardoor de daling van de grondwaterstand aanvankelijk wat minder snel begint. Als de impulsneerslag parabolisch ingevoerd zou worden met een inhoud van 1, dan moet het verloop exact overeen komen met de impulsmethode.
De geteste modellen in dit hoofdstuk zijn allemaal fictief met in de praktijk onmogelijke verhoudingen en zeer grote neerslag invoer. Of de resultaten voor meer werkelijke modellen met meer reële dimensies en een reële neerslaginvoer ook goed overeenkomen wordt hierna onderzocht door een neerslagreeks te koppelen aan de exponentiële impulsresponsiemethode.

5 INSTATIONAIR REKENEN

5.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is de reactie van de exponentiële impulsresponsiemethode op een hoeveelheid neerslag vergeleken met de respons zoals die door MODFLOW berekend wordt. De hiervoor gebruikte modellen waren dimensieloos gemaakt, zodat de resultaten zouden gelden voor alle gelijksoortige modellen. De exponentiële impulsrespons bleek in alle lineaire gevallen goede gelijkenis te vertonen met de numeriek berekende impulsrespons. Het moet dus ook mogelijk zijn om het werkelijke verloop ten gevolge van een neerslagreeks, van de grondwaterstand van een bepaald model te simuleren met deze methode.
Hiertoe moeten de tijdsmomenten voor een bepaald gebied berekend worden. Zoals inmiddels bekend ligt hiermee de impulsrespons vast. Als een neerslagreeks verdeeld wordt in tijdstappen, en de neerslaghoeveelheid in die tijdstap vermenigvuldigd wordt met de impulsrespons, dan is dat de respons van de neerslag. Per tijdstap de stijghoogte van de voorgaande stap vermenigvuldigen met de impusrespons en hierbij de de neerslagrespons van deze tijdstap optellen, levert het stijghoogteverloop op van de grondwaterspiegel ten gevolge van die neerslagreeks.
Daar het in de praktijk meestal gaat om neerslagreeksen met een groot aantal waarden is het praktisch om dit proces te automatiseren. Hiervoor is een PASCAL-programma geschreven dat aan de hand van de impulsresponsiemethode het verloop van de grondwaterstand, ten gevolge van een neerslagreeks, berekent.
De naam van het programma is 'IMPULS'. Als eerste is in dit hoofdstuk een ontwerp voor dit programma gemaakt. Hiertoe is eerst nog eens het precieze doel ervan bepaald. Hierna is de vergelijking voor de numerieke berekening van de neerslagrespons bepaald uit de vergelijking van instationaire grondwaterstroming. Tot slot is de werking van dit programma getest op een aantal eenvoudige modellen met een reële neerslagreeks.

5.2 Doel van het programma

- In eerste instantie is het doel van het programma te kijken of het mogelijk is het lineair-dynamische gedrag van een grondwaterspiegel ten gevolge van een neerslagreeks, goed met een exponentiële impulsrespons te simuleren. Dit is gedaan met de volgende modellen:
  - eenvoudig lineair model,
  - de drainagebasis verandert per seizoen,
  - het grondwater bereikt af en toe het maaiveld,
  - op een bepaald niveau bevindt zich een drainagesysteem.
- Uiteindelijk is het de bedoeling dat van een willekeurig model, door middel van een stationaire berekening van een grondwatermodel, M_0 en M_1 voor een bepaalde cel berekend worden. Deze waarden, tezamen met een neerslagreeks worden ingevoerd in het programma, waarna het programma als uitvoer een reeks waarden van de grondwaterstand

geeft. Dit moet vergelijkbaar zijn met de uitvoer van hetzelfde model in een bestaand instationair grondwatermodel met dezelfde neerslagreeks als invoer.

5.3 Bepaling stapfunctie

5.3.1 inleiding

Neerslagreeksen zijn meestal gegeven in de vorm van een lijst met neerslagsommen over bepaalde vaste periodes, bijvoorbeeld decaden. De vergelijking voor het hoogteverloop in de tijd, vergelijking (3), moet dus omgewerkt worden tot een numerieke stapfunctie. Dit wordt hieronder gedaan voor het lineaire geval waarbij modelparameters altijd gelijk blijven. Daarna wordt nog eens gekeken naar veranderingen van de reactie van het model door bijvoorbeeld drains of wisselende drainagebasis per seizoen.

5.3.2 algemene geval

Het hoogteverloop van de stijghoogte van het grondwater in de tijd ten gevolge van een neerslagreeks wordt weergegeven door vergelijking (3)

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} N(t-\tau)\theta(\tau)\,d\tau \qquad (3)$$

Deze vergelijking is in feite de som van het produkt van alle stapjes in de neerslagreeks, vermenigvuldigd met de respons van de desbetreffende cel. De respons kan benaderd worden door vergelijking

$$\theta(t) = A e^{-\frac{t}{\alpha}} \qquad (2)$$

waardoor de volgende vergelijking ontstaat

$$h(t) = A \int_{0}^{t} N(t-\tau) e^{-\frac{\tau}{\alpha}}\,d\tau \qquad (48)$$

De neerslagterm, N(t-τ), is de effectieve hoeveelheid neerslag die op tijdstip (t-τ) valt. Vergelijking (48) geldt voor het geval dat op t=0 de stijghoogte gelijk is aan de drainagebasis. Als h(0) hieraan ongelijk is, dan is de reactie van de stijghoogte op een hoeveelheid neerslag, N, te vinden door het superpositiebeginsel toe te passen

$$h(t) = h_0 e^{-\frac{t}{\alpha}} + A \int_{0}^{t} N(t-\tau)\, e^{-\frac{\tau}{\alpha}}\,d\tau \qquad (49)$$

In de praktijk is de neerslagterm gegeven als een reeks van neerslagsommen over gelijke tijdstapjes, Δt. De toe- of afname van de stijghoogte per tijdstap, i, is te berekenen met

$$h_i = h_{i-1} e^{-\frac{\Delta t}{\alpha}} + A N_{eff,i} \int_0^{\Delta t} e^{-\frac{t}{\alpha}} dt \qquad (50)$$

De tweede term is uit te werken volgens

$$A N_{eff,i} \int_0^{\Delta t} e^{-\frac{t}{\alpha}} = -\alpha A N_{eff,i} [e^{-\frac{t}{\alpha}}]_0^{\Delta t} = -\alpha A N_{eff,i} (e^{-\frac{\Delta t}{\alpha}} - 1) = \alpha A N_{eff,i} (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\alpha}})$$

zodat de vergelijking van de stijghoogte op i wordt

$$h_i = h_{i-1} e^{-\frac{\Delta t}{\alpha}} + A \alpha N_{eff,i} (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\alpha}}) \qquad (51)$$

De effectieve neerslag $N_{eff,i}$, kan bij benadering worden beschreven door

$$N_{eff} = N - fE \qquad (52)$$

Hierin is N de neerslag die valt en E de openwaterverdamping. f is de gewasfactor die de openwaterverdamping corrigeert voor de aard van het verdampende gewas.
Als het nooit meer zou regenen zou h_i uiteindelijk naar nul dalen. Beter is het om de grondwaterstand ten opzichte van een bepaald referentieniveau, de drainagebasis d, te berekenen. Hiermee wordt het uiteindelijke model dat voor het instationaire rekenen wordt gebruikt als volgt

$$h_i = (h_{i-1} - d) e^{-\frac{\tau}{\alpha}} + A \alpha (N_i - fE) \cdot (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\alpha}}) + d \qquad (53)$$

5.3.3 winter- en zomer drainagebasis

In veel polders wordt door het waterschap het polderpeil in de zomer verhoogd, danwel in de winter verlaagd. Dit resulteert in een verandering van de drainagebasis van die polder. De reden hiervoor is dat de zomer een drogere periode is met relatief veel verdamping. Door de drainagebasis te verhogen krijgen de planten nog voldoende vocht om te groeien. 's-Winters is er door de hogere neerslagwaarden juist meer berging nodig en in het voorjaar dient het vochtgehalte in de grond laag te zijn om snelle opwarming en sneller een grote draagkracht voor landbouwmachines te verkrijgen. Het is ook mogelijk dat het polderpeil in de winter hoger is dan in de zomer doordat er meer water door het hydrologisch systeem moet worden afgevoerd. Als gevolg hiervan kunnen greppels gevuld worden met water en meewerken aan de afvoer van de neerslag.

Het effect van deze slootpeilwisseling op de grondwaterstand is vergelijkbaar met de normale impulsrespons. Door d in vergelijking (53) te variëren met het seizoen is dit effect verwerkt. Verschillende slootwaterstanden kunnen ook verschillende tijdsmomenten veroorzaken welke per seizoen kunnen worden ingevoerd. De in de hydrologie gebruikelijke seizoenswisselingen, waar IMPULS ook mee zal rekenen zijn op de data 1 oktober en 1 april.

5.3.4 grondwaterstand bereikt maaiveld

Als het grondwater het maaiveld bereikt kan er sprake zijn van in het ene uiterste geval, directe afstroming naar omringende sloten en in het andere uiterste geval plasvorming waarvan het water uiteindelijk bij afnemende regenval weer infiltreert.
Het primaire doel van het programma is te kijken hoe de methode werkt in instationaire situaties. Het gaat te ver om dit probleem in detail op te lossen, daarom wordt er van uitgegaan dat het water dat aan het maaiveld komt direct uit het systeem verdwijnt.

5.3.5 drainagesystemen

Als het systeem niet lineair is en bij een bepaalde grondwaterstand van eigenschappen verandert, bijvoorbeeld door droogvallende sloten of een drainagesysteem, dan veranderen de tijdsmomenten ook. In zo'n geval zal er met twee verschillende tijdsmomenten gerekend moeten worden. Het model gebruikt dan de drainerende momenten als de grondwaterstand het niveau van de drainage bereikt en gebruikt de niet-drainerende momenten als de grondwaterstand weer daalt tot onder het drainageniveau.
Voor de numerieke berekening van het stijghoogteverloop kan nog wel vergelijking (53) gebruikt worden maar bij inwerkingtreding van het drainagesysteem veranderen de waarden van M_0 en M_1 en het drainageniveau. Dit wordt dan een gewogen gemiddelde van het slootniveau en het drainbuisniveau, volgens onderstaande vergelijking, welke is afgeleid door C. Maas. voor het analyseren van grondwaterstandsreeksen

$$d = d_{drains} - \frac{\alpha_{drains}}{\alpha_{sloot}}(d_{drains} - d_{sloot}) \qquad (54)$$

Deze vergelijking is voor verbetering vatbaar, maar dat valt buiten het kader van dit onderzoek

5.4 Beschrijving programma

5.4.1 algemeen

Het programma koppelt een neerslagreeks met behulp van vergelijking (53) aan de impulsrespons van een bepaald punt en berekent het stijghoogteverloop in de tijd. Het programma bestaat uit een invoer, reken en uitvoermodule.

5.4.2 invoermodule

In de invoermodule worden voor het te berekenen punt de volgende gegevens gevraagd;

- de **tijdsmomenten** voor de zomersituatie,
- de **drainagebasis** voor de zomersituatie,
- indien gewenst, de **tijdsmomenten** voor de wintersituatie,
  - de **drainagebasis** voor de wintersituatie,
- indien gewenst, de **tijdsmomenten** indien er gedraineerd wordt,
  - het **peil** waar de drainage in werking treedt,
- de **beginstijghoogte**,
- de **maaiveldhoogte**,
- de **gewasfactor**,
- de naam van de **neerslagfile**,
- de naam van de file waar het **hoogteverloop** in komt.

De neerslaginvoerfile is gebonden aan een aantal formatteringseisen:

- de invoer moet gegeven zijn in mm neerslag per 10 dagen,
- op elke regel moeten achtereenvolgens staan datum, neerslag en verdamping, gescheiden door één of meer spaties. De datumopmaak is als volgt: de eerste twee karakters geven het jaar, de volgende twee karakters de maand en de laatste twee geven de dag aan.
  bv. dag 11 tot 20 van de maand maart 1994 wordt aangegeven als 940320.
- er mogen niet meer dan 432 regels in de invoer staan, dit is gelijk aan 12 jaar. Is de invoerreeks langer dan dient deze te worden gesplitst en is de beginstijghoogte van de tweede reeks de eindstijghoogte van de eerste reeks.

5.4.3 rekenmodule

In deze module worden de ingelezen neerslaghoeveelheden omgerekend naar stijghoogtes met vergelijking (53). De tijdstap hiervoor is 1 dag. Indien er geen waarden voor de wintersituatie zijn ingevoerd wordt het hele jaar door met de gegevens van de zomer gerekend. Als er wel verschil is tussen zomer en winter wordt gedurende de maanden april t/m september met de zomergegevens gerekend en van oktober t/m maart met de wintergegevens. Per tijdstap worden dus de maand en het seizoen bepaald. Tevens wordt per tijdstap de grondwaterstand vergeleken met het peil van

het drainagesysteem. Indien de grondwaterstand hierboven komt worden de tijdsmomenten en het gecorrigeerde drainagepeil, zie vergelijking (54), van het gedraineerde systeem gebruikt. Als er geen drainagegegevens worden ingevoerd dan wordt het peil van het drainagesysteem zo hoog gesteld dat de grondwaterstand nooit hierboven kan komen.
Als de grondwaterstand boven het maaiveld komt dan wordt de grondwaterstand hieraan gelijk gesteld en de hoeveelheid water die boven het maaiveld staat wordt opgeslagen als afgestroomd water.

5.4.4 uitvoermodule

Na het openen van de uitvoerfile worden de gegevens van de invoer hierin weggeschreven. Na uitvoering van de berekening worden per regel de datum, het nummer van de dag, de stijghoogte- en de afstroming van die dag weggeschreven.

5.5 Testen

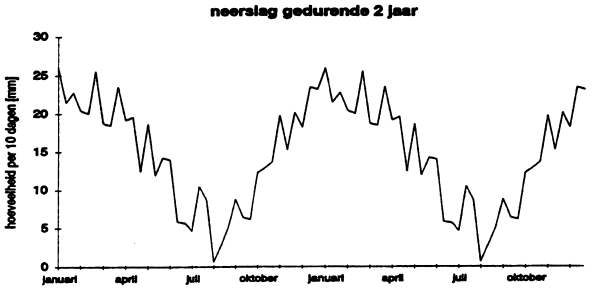
5.5.1 modellen

Er zijn voor onderstaande onderdelen testen uitgevoerd.

- Het **lineair-dynamische gedrag**. Hiertoe zijn twee modellen met verschillende randvoorwaarden gecontroleerd.
  - Het eerste model is een homogeen rechthoekig eiland vergelijkbaar met het model uit § 3.5. Dit model is de eerste test voor het eenvoudigste lineaire geval.
  - Om het effect van een plotselinge slootpeilverandering in MODFLOW te vergelijken met de impulsresponsiemethode, kan weer het eerste model gebruikt worden. De sloten moeten dan in MODFLOW als rivieren gedefinieerd worden waarvan het peil per tijdstap veranderd kan worden. De laagdikte van het watervoerend pakket kan in beide gevallen gelijk gehouden worden omdat de verandering van het slootpeil en dus de drainagebasis erg klein is ten opzichte van de laagdikte.
- Het **niet-lineair-dynamische gedrag**. Hiervoor zijn drie testen uitgevoerd welke de volgende drie situaties weerspiegelen.
  - Het geval dat de grondwaterstand het maaiveld bereikt. Hiertoe is hetzelfde model gebruikt als voor het lineaire geval. Hieraan is echter een drainage toegevoegd met een zeer kleine weerstand waardoor al het water dat ter plaatse van die drains komt direct afvloeit.
  - Als er een drainagesysteem in het model zit met een bepaalde intreeweerstand, kan de grondwaterstand boven die drains uitkomen. Indien dat laatste het geval is dan veranderen de tijdsmomenten en de drainagebasis. Hiertoe moeten de tijdsmomenten zowel voor de ongedraineerde situatie als voor de gedraineerde situatie berekend worden.

5.5.2 testopzet

Van elk model worden eerst weer de tijdsmomenten berekend met behulp van MODFLOW. Hieruit volgen matrices met M_0 en M_1. Na het berekenen van de tijdsmomenten wordt hetzelfde model gedefinieerd als een instationair model met 36 periodes. Deze periodes zijn elk 10 dagen groot, welke zijn verdeeld in 10 tijdstappen. De neerslag wordt per periode ingevoerd en is dus de sommatie van de neerslag in die 10 dagen.



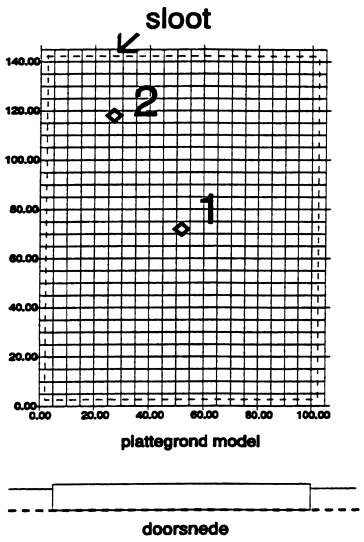
figuur 22 neerslagreeks

In figuur 22 staat de te gebruiken neerslagreeks weergegeven. Deze reeks is gegenereerd met een randomfunctie en bij een sinusfunctie opgeteld, zodoende is een reeks gekregen die in de praktijk voor zou kunnen komen.
Het model wordt nu instationair doorgerekend met MODFLOW, waarna de stijghoogte-uitvoer voor de te vergelijken punten wordt gegenereerd.
Voor de hierboven genoemde punten wordt tevens het stijghoogteverloop met het programma IMPULS berekend. Hiertoe worden uit de matrices met M_0 en M_1 de waarden van de tijdsmomenten voor de betreffende punten gehaald. Deze worden ingevoerd in het programma, waarna het doorgerekend wordt met bovenstaande neerslagreeks. De uitvoer hiervan bestaat uit een reeks met de dagelijkse grondwaterstanden.
De laatste reeks en de reeks berekend met MODFLOW worden samen ingelezen in een spreadsheetprogramma, en grafisch weergegeven met de grafiekfunctie om ze met elkaar te vergelijken.

5.5.3 homogeen eiland

modelbeschrijving

Voor het simuleren van de reactie van de grondwaterstand op een neerslaginvoer in geval van een homogeen eiland, is een model gemaakt met dezelfde gedaante als het 2-dimensionale model uit § 3.5. De dimensies zijn echter niet gelijk aan 1, maar er zijn enigszins realistische waarden voor gekozen, zie figuur 23, zie volgende pagina.
Het model is een homogeen eiland met constante kD en een opgesloten watervoerend pakket van constante dikte met rondom een sloot zonder intreeweerstand welke is gesimuleerd door de randknopen een vaste stijghoogte te geven.



figuur 23 schema model

De parameters zijn de volgende:

- afmetingen: 100 x 140 m^2
- aantal cellen: 21 x 29
- laagdikte: 9 m.
- aantal lagen: 1
- porositeit: 0,3
- doorlatendheid: 12 m/d

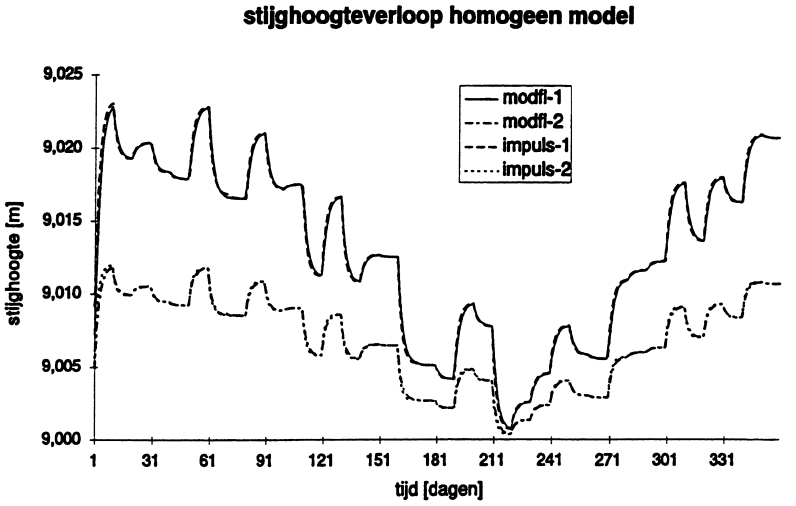
Het grondwaterstandsverloop wordt voor twee cellen gevolgd, cel 1 (11,15), de middelste cel, en een cel die meer naar de rand ligt, cel 2 (6,6).

testresultaten

Tabel III Tijdsmomenten, A en α

plaats	(11,15)	(6,6)
M_0	8,94666	4,61469
M_1	18,2251	7,45958
α	2,03708	1,61648
A	4,39189	2,85477

In tabel III staan de resultaten van de tijdsmomentenberekening, welke de invoer zijn van het programma IMPULS.
Het grondwaterstandsverloop is op de volgende pagina weergegeven in figuur 24. Duidelijk is te zien dat het verloop, berekend met MODFLOW en berekend met IMPULS, sterk overeenkomen.
Na verandering van de neerslagintensiteit treedt er enig verschil op tussen beide methoden. Dit verschil is te wijten aan het verschil in de snelheid van reageren op een impuls tussen MODFLOW en de exponentiële



figuur 24 hoogteverloop ten gevolge van neerslagreeks

impulsresponsfunctie.
De fluctaties van de stijghoogtes zijn in dit model aan de lage kant, doordat de doorlatendheid aan de hoge kant is en de intreeweerstand van de sloot gelijk is aan nul.

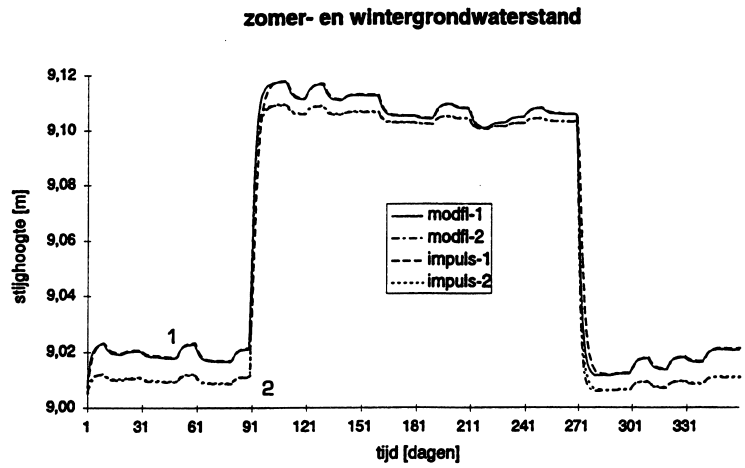
5.5.4 drainagebasis verandert met het seizoen

modelbeschrijving

Voor deze situatie kan het model gebruikt worden dat in de paragraaf hiervoor is beschreven. De randen moeten dan wel als rivieren worden gedefinieerd omdat de peilen gedurende de berekening veranderen. In de winter, dus gedurende de maanden oktober tot en met maart, is het peil in de rivier 9,0 meter, en in de zomer, de overige maanden, is het peil 9,1 meter. Het verloop wordt weer gevolgd voor de cellen (11,15) en (6,6).

resultaten

Omdat er aan de dimensies en de doorlatendheid niets veranderd is ten opzichte van de vorige paragraaf gelden de momenten zoals die zijn afgebeeld in tabel III. Het maakt voor de tijdsmomenten geen verschil of het slootniveau 9,0 of 9,1 m is omdat de kD-waarde constant blijft. In de praktijk zal de kD-waarde door een peilstijging ook iets groter worden, maar dat is meestal verwaarloosbaar ten opzichte van de oorspronkelijke kD-waarde omdat de pakketdikte relatief veel groter is dan de stijghoogte. In figuur 25, volgende pagina, staat het hoogteverloop van de gevolgde cellen. Bij zowel de peilstijging als de daling lopen de beide lijnen goed gelijk aan elkaar.



figuur 25 hoogteverloop met wisselende drainagebasis

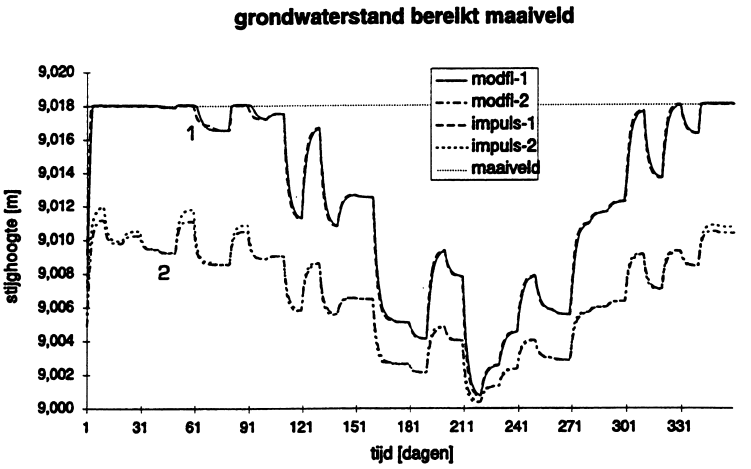
5.5.5 grondwaterstand bereikt het maaiveld

modelbeschrijving

Zoals al eerder is geschreven in § 5.3.4, wordt verondersteld dat indien het grondwater het maaiveld bereikt, het overtollige water meteen uit het systeem verdwijnt. Dit is met MODFLOW te simuleren door op maaiveldhoogte een drainagelaag te modelleren, met een zeer grote doorlatendheid, zodat al het water dat boven dit niveau komt direct afstroomt. Om dit met de impulsresponsiemethode te simuleren moeten de tijdsmomenten berekend worden voor een model waar de drains uitgelaten worden, waarna het grondwaterstandsverloop met IMPULS kan worden doorgerekend. Hierbij moet de hoogte van het maaiveld bij de invoer worden ingevuld. IMPULS laat dan zelf het water dat boven het maaiveld uitkomt afvloeien.
Om dit verschijnsel te testen is het model gebruikt dat tevens in voorgaande paragrafen gebruikt is. De tijdsmomenten zijn dus hetzelfde als die in tabel III staan afgebeeld. De maaiveldhoogte is 1,8 cm boven het drainageniveau, zodat de grondwaterstand een deel van de tijd boven het maaiveld staat en een groot deel er onder, zie figuur 24.

resultaten

De reactie van de grondwaterstand op de neerslagreeks staat in figuur 26, volgende pagina.
De grondwaterstand in cel 1 bereikt al snel het maaiveld, waar het overtollige water afvloeit. Na ongeveer 60 dagen is er een vermindering van de neerslag, waardoor de grondwaterspiegel weer onder het maaiveld zakt. De impulsresponsiemethode reageert hier iets trager op dan MODFLOW. Voor deze cel is het verloop van de grondwaterspiegel wel gelijkend aan het verloop van MODFLOW.
In cel 2 is dit niet zo het geval. Zodra de grondwaterspiegel in punt 1 het maaiveld bereikt treedt er een verschil op tussen de lijn van MODFLOW



figuur 26 stijghoogteverloop, grondwaterstand bereikt maaiveld

en van IMPULS. Deze laatste ligt dan een stuk hoger dan de stijghoogtelijn van MODFLOW. Hiervoor is een verklaring gevonden die later in dit hoofdstuk gegeven wordt.

5.5.6 gedraineerd model

modelbeschrijving

Als er in een model een drainagesysteem gesitueerd is, dan reageert het lineair zolang de grondwaterspiegel dit systeem nog niet bereikt heeft. Zodra de waterstand boven het niveau van de drains uitkomt, reageert de grondwaterspiegel anders op de neerslag, en is het systeem niet meer lineair.
Om te testen of het grondwaterstandsverloop van een gedraineerd systeem nu wel of niet te simuleren is met IMPULS, wordt een model gemaakt van een watervoerend pakket, afgesloten door een alleen in verticale richting waterdoorlatend pakket met een drainagesysteem. Dit drainagesysteem is verdeeld over het gehele model. Om dit te modelleren is hetzelfde model gebruikt als in de vorige subparagraaf. Hierin is een drainage aanwezig op 1,5 cm boven het watervoerende pakket en tevens de drainagebasis, welke gelijkmatig verdeeld is over het gehele model. De weerstand wordt gesteld op 2 m^2/dag. Van dit model zijn de tijdsmomenten twee keer berekend, met de drains 'aan' en met de drains 'uit'. Er zijn nu dus dubbele waarden van de tijdsmomenten, zie tabel IV. Als de drains nu in het programma IMPULS 'aangezet' worden, vraagt IMPULS om zowel de waarden van de tijdsmomenten zonder als met drains.

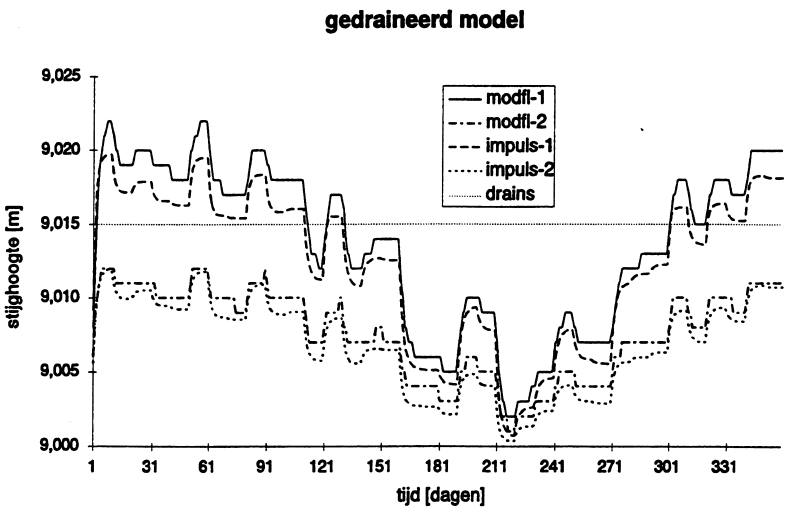
resultaten

Na berekenen van de stijghoogtelijnen in de tijd ontstaat figuur 27 volgende bladzijde.
Over het algemeen laten beide methoden ongeveer hetzelfde verloop van de grondwaterstand zien. Het verloop zoals het berekend is met IMPULS

laat echter zodra de grondwaterstand boven de drainagehoogte komt een ander beeld zien dan MODFLOW. Dit verschijnsel was ook al te zien als de grondwaterstand het maaiveld bereikt. Van dit verschijnsel wordt in de volgende paragraaf een verklaring gevonden.

Tabel IV Tijdsmomenten, A en α gedraineerd model

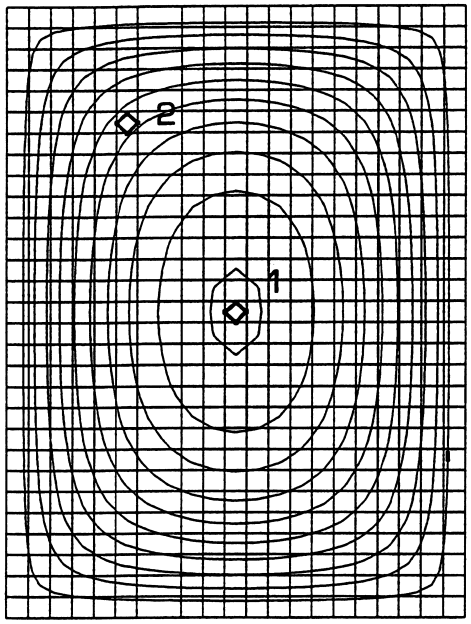
plaats	zonder drainage		met drainage	
	(11,15)	(6,6)	(11,15)	(6,6)
M_0	8,947	4,615	5,742	3,268
M_1	18,23	7,463	7,958	3,472
α	2,038	1,617	1,386	1,062
A	4,391	2,854	4,143	3,076



figuur 27 stijghoogteverloop gedraineerd systeem

5.5.7 verklaring afwijkingen bij niet-lineariteit

De in de vorige paragraaf behandelde niet-lineaire modellen vertoonden beide dezelfde soort afwijking. In figuur 28, volgende pagina, is het isolijnenpatroon van het gedraineerde model, berekend met MODFLOW-instationair, te zien. De lijnen lopen van buiten naar binnen van 9,0 tot 9,20 m met een stapgrootte van 0,02 meter. Het gearceerde deel is het deel dat boven de drainage uitkomt. Nummer 1 en 2 geven celnummer 1 en 2 aan, waarvan in figuur 27 het stijghoogteverloop te zien is.
MODFLOW berekent het stijghoogteverloop door een balans te maken van het hele model. Als er dus water wordt afgevoerd door bijvoorbeeld drains, dan verdwijnt dit ook uit het systeem. Met de impulsresponsiemethode bereken je het verloop per punt. Als in de middelste cel de grondwaterspie-



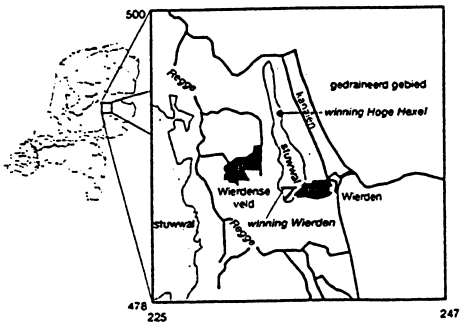
figuur 28 isohypsenpatroon op t=60 dagen

gel de drains bereikt stapt het programma over op de tijdsmomenten voor een gedraineerd systeem. IMPULS berekent dus het verloop alsof over het hele model water uit de drains verdwijnt. Er hoeft dus minder water door de bodem te stromen, waardoor de stijghoogte voor het punt lager uitkomt. Voor een cel meer naar de rand, bijvoorbeeld cel 2 in figuur 28, treedt dan precies het omgekeerde op. Als in het midden de grondwaterstand de drains bereikt dan heeft de grondwaterstand in cel 2 de drainage nog niet bereikt, waardoor nog steeds de tijdsmomenten zonder drainageeigenschappen worden gebruikt, terwijl er elders in het model wel gedraineerd wordt. Hierdoor treden dus ter plaatse van dat punt voor IMPULS hogere grondwaterstanden op.
Dit betekent dat de impulsresponsiemethode moeite heeft met niet-lineaire systemen. Of dit altijd problemen oplevert met zulke gevallen zal moeten blijken uit meerdere testen.

6 WIERDEN-case

6.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is een computerprogramma ontwikkeld waarmee met behulp van de impulsresponsiemethode de reactie van de grondwaterstand op een neerslagreeks bepaald kan worden. Het programma is getest op een aantal eenvoudige modellen, waarmee eenvoudige situaties zijn nagebootst. De effecten van deze situaties, homogeen model, veranderende drainagebasis, grondwaterstand bereikt maaiveld en drainage aanwezig, zijn voor elk geval apart bekeken. Nu de effecten hiervan bekend zijn zal de impulsresponsiemethode gebruikt worden om de reactie van een model van een bestaand gebied op een neerslagreeks te vergelijken met de reactie van dit gebied als het instationair wordt doorgerekend met MODFLOW. Hiervoor is een gebied rond Wierden gekozen omdat daar al een gecalibreerd MODFLOW-model van bestaat. [te Stroet, 1995]. (Dit model is gemaakt door Chris B.M. te Stroet in samenwerking met J. Hoogendoorn, om zijn promotieonderzoek, 'Calibration of stochastic groundwater flow models', te toetsen.)



figuur 29 lokatie van het gebied 'Wierden' [te Stroet, 1995]

Wierden is een plaats in de provincie Overijssel, Nederland, zie figuur 29. Het model beslaat een oppervlakte van 22 bij 22 km^2, bestaande uit drie delen:

- Twee gestuwde gebieden, welke zijn gevormd tijdens de laatste ijstijd. Deze worden gekenmerkt door een hoge ligging van het maaiveld, met een dikke onverzadigde zone en op een diepte van ongeveer 10 meter een heterogene kleilaag.
- Eén gebied wordt gedomineerd door de rivier 'de Regge' aan de westzijde, welke verder tussen de twee stuwwallen doorloopt.
- Een intensief gedraineerd gebied aan de oostzijde van het model. Hierin bevinden zich twee gereguleerde kanalen.

Over bijna het hele gebied bevinden zich droogvallende greppels, welke een drainerende werking hebben.
De waterlopen in het model zijn in te delen in drie orden, 1^e, 2^e en 3^e-orde waterlopen.
Ook is er nog een klein gebied waarin de freatische waterspiegel wordt beïnvloed door een veenlaag. Dit gebied heet het 'Wierdense Veld'.

Tevens zijn er nog diverse plaatsen waar water wordt onttrokken voor drink- en/of industriewaterdoeleinden.
In dit hoofdstuk staat eerst een beschrijving van het model.
Omdat het hoogteverloop alleen per cel vergeleken kan worden, wordt een aantal cellen geselecteerd. Hierna wordt voor die cellen, met MODFLOW, de impulsresponsfunctie bepaald en het instationaire verloop van de grondwaterspiegel ten gevolge van een neerslagreeks berekend. Met IMPULS wordt dan het verloop van de grondwaterstand volgens de impulsresponsiemethode berekend met dezelfde neerslagreeks. Deze twee reeksen worden dan weer grafisch vergeleken.

6.2 Beschrijving van het model

Gebruikte informatie

De informatie voor het maken van dit model is afkomstig van de 'Overijsselse Grondwaterkaart' Dit is een verzameling van bekende data over de hydrologische parameters van de provincie Overijssel. De soorten data die gebruikt zijn de volgende:
- Geologische informatie over formaties;
- Gegevens van ongeveer 1200 boorgaten;
- Sonderingen;
- Pomptesten;
- Testen bij bestaande bronnen.

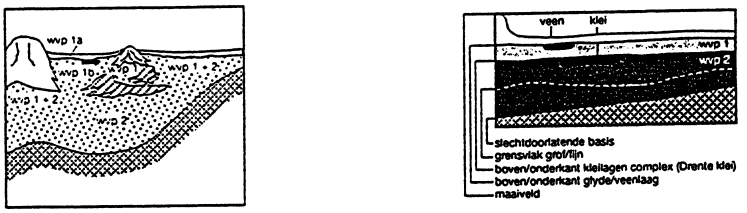
De gegevens over het oppervlaktewater zijn afkomstig van het plaatselijke waterschap. Het systeem is onderverdeeld in drie orden
- 1^{e}-orde waterlopen: Dit zijn de grotere waterlopen met gereguleerde waterstand. Alle relevante parameters hiervan zijn bekend.
- 2^{e}-orde waterlopen: Hiervan zijn de afmetingen en hoogtes bekend, maar de toevoer van water is niet gegarandeerd zodat ze in droge tijden kunnen uitdrogen.
- 3^{e}- en hogere orde waterlopen: hiervan is enkel de lokatie bekend.

De neerslag en verdampingsgegevens zijn afkomstig van het KNMI in de vorm van 10-daagse waarden. De onttrokken hoeveelheden door de winputten zijn afkomstig van het drinkwaterbedrijf 'WMO' in de vorm van maandelijkse onttrekkingshoeveelheden.

hydrologische schematisatie

De hydrologische schematisatie van het model bestaat uit twee lagen. Ze worden alleen in het midden van het model van elkaar gescheiden door een kleilens, welke zich onder de stuwwal in het midden bevindt. De bovenste laag wordt afgedekt door een systeem bestaande uit zeer fijn zand en een veenlaag ter plaatse van het 'Wierdense Veld', welke enige verticale weerstand veroorzaakt.
Bij Wierden bevinden zich een aantal putten, deze onttrekken water uit de onderste laag. Deze onderste laag bestaat aan de onderzijde uit grover materiaal en meer naar boven toe uit fijner materiaal.

Het gebied wordt aan de onderzijde afgesloten door een ondoorlatende laag, deze hydrologische basis loopt op van ongeveer 120 m -NAP in het



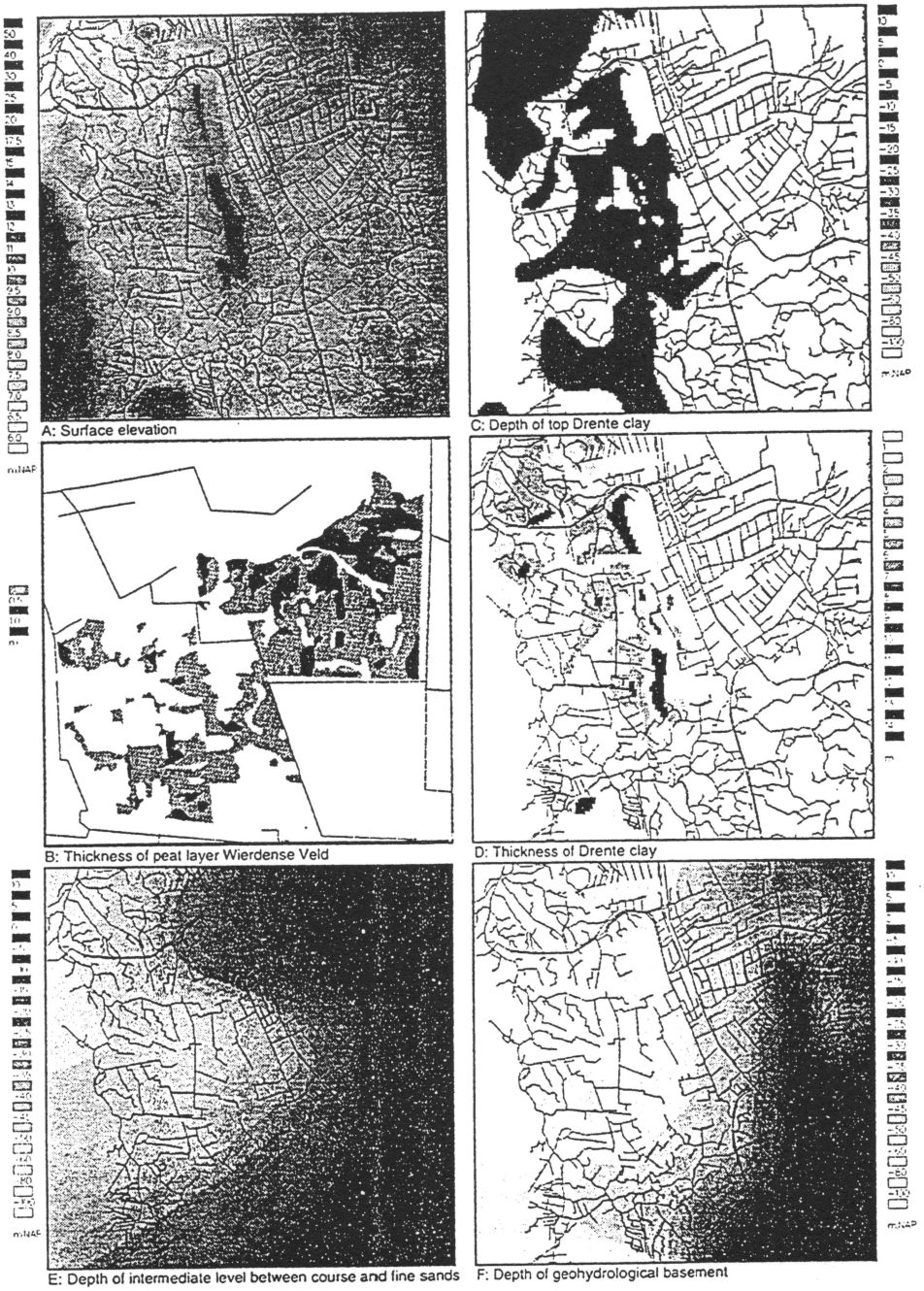
figuur 30 doorsnede van het gebied en model [te Stroet, 1995]

noordwesten naar 10 m +NAP in het zuidoosten van het model. Figuur 30 geeft een hydrologische schematisatie van een doorsnede van het gebied en een doorsnede van het model.
In figuur 31, volgende pagina, zijn zes plattegrondjes van het model te zien met:

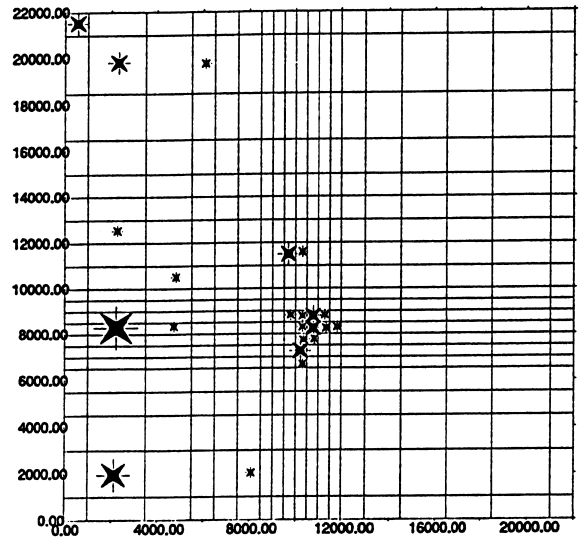
- In figuur 31-A de hoogtes van het oppervlak,
- in figuur 31-B de dikte van de veenlaag in het Wierdense Veld,
- in figuur 31-C en 31-D, respectievelijk de diepte en de dikte van de kleilaag deze is verdeeld in een aantal dikteklassen. De dikte van deze laag varieert sterk doordat hij tijdens de ijstijd sterk is vervormd,
- in figuur 31-E wordt de diepte van de grenslaag tussen het fijne en grovere zand in de tweede laag weergegeven,
- in figuur 31-F staat tot slot de diepte van de ondoorlatende laag.

overige parameters

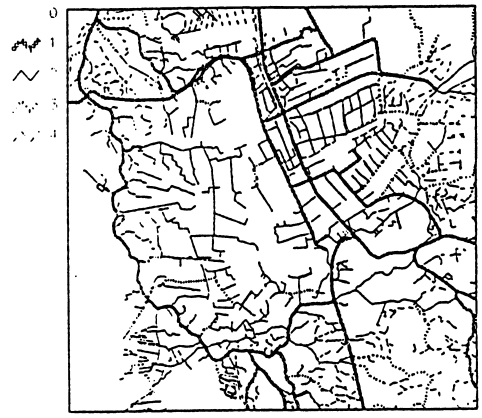
De waarden van de verticale stroomweerstand, 'c-waarden', zijn verdeeld volgens de dikteklassen van de kleilaag. De kD waarden zijn bepaald aan de hand van de doorlatendheid en de dikte van de laag voor elke cel. De bergingscoëfficiënt is over het hele model gelijk aan 0,16.
De waterniveau's zijn onderscheiden voor elke orde van de waterlopen. De derde-orde waterlopen functioneren alleen als drains. Deze hebben een vast waterniveau en geen diepte, waardoor ze alleen water kunnen afvoeren als de omringende grondwaterstanden hoger zijn dan dit niveau. Als ze lager liggen dan gebeurt er niks. Voor de eerste en tweede-orde waterlopen is een zomer en winter waterstand gedefinieerd.
In figuur 32, 2 pagina's verder, staat de verdeling van het grid over het model. In deze figuur zijn tevens de lokaties van de waterontrekkingsputten te zien. Ter plaatse van Wierdense Veld in het midden is een concentratie van putten.
In figuur 33 is de werkelijke loop van de rivieren en sloten te zien en in figuur 34 staat weer het grid met daarin per cel aangegeven of er een sloot of rivier van orde 1 of 2 doorloopt of niet. Duidelijk is te zien dat een groot deel van het model voorzien is van sloten en rivieren.
De neerslag wordt ingevoerd in de bovenste laag. De verdamping is lineair afhankelijk van de afstand tussen het maaiveld en de grondwaterspiegel. Langs de randen van het model hebben de cellen een vaste stijghoogte gekregen.



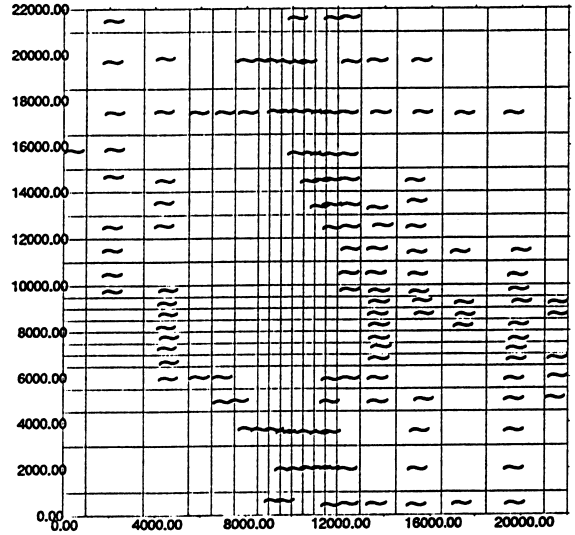
figuur 31 geometrie [te Stroet, 1995]



figuur 32 lokatie van de putten



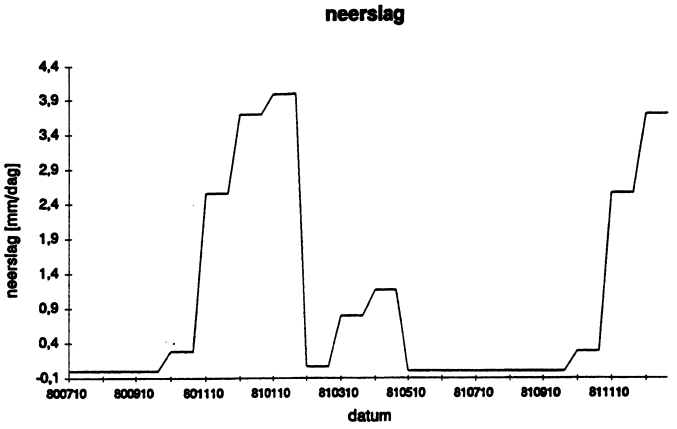
figuur 33 lokatie van waterlopen [te Stroet,1995]



figuur 34 lokatie van watervoerende waterlopen

simulatie

De instationaire situatie is gesimuleerd voor een periode van 1½ jaar, welke begint in juli 1989 en loopt tot en met december 1990. In deze periode zijn

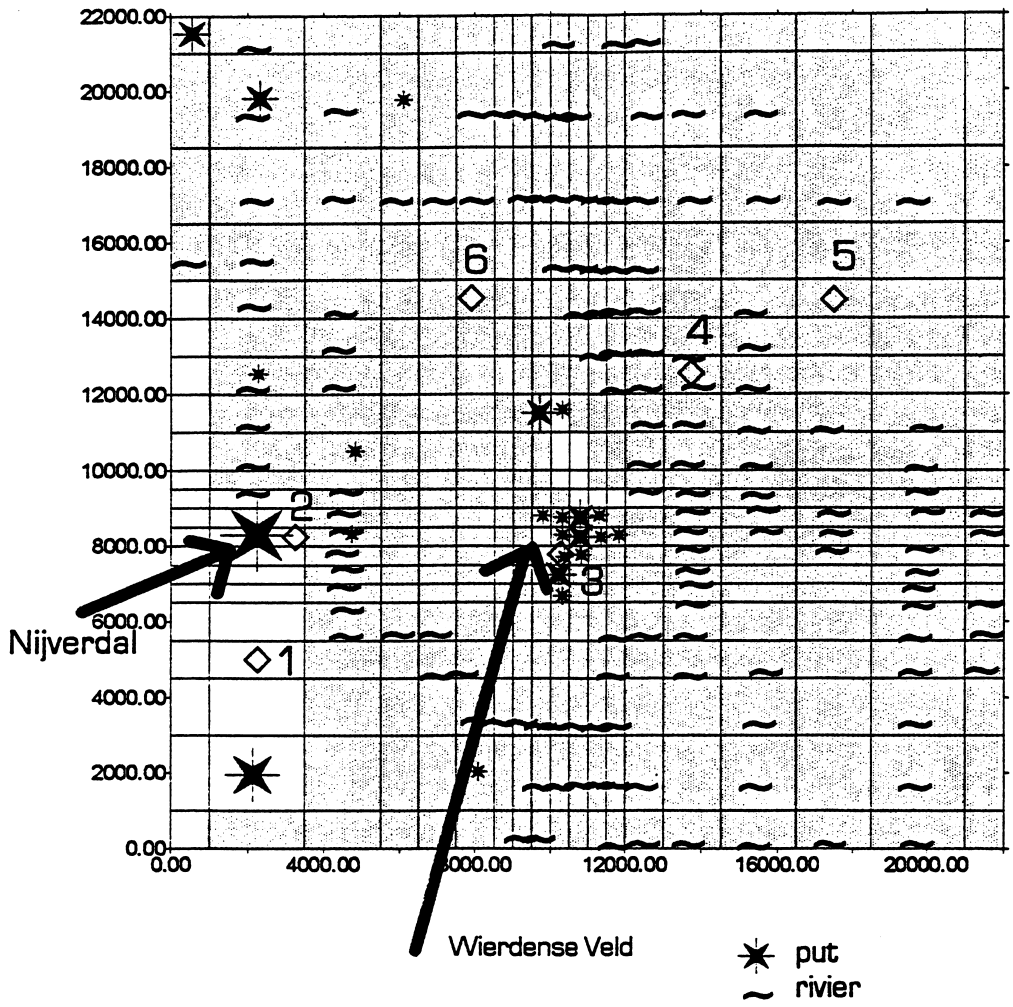


figuur 35 neerslagreeks voor 'Wierden' model

voor de waterstanden en bedweerstand van de rivier twee waarden gebruikt, de zomer- en winterwaarden. In de winter die in dit geval van oktober tot en met maart loopt zijn de rivierwaterstanden gemiddeld hoger dan in de zomer wanneer de weerstand tussen de rivier en de bodem groter is.
De onttrekking van putten is opgegeven in m^3 per maand. In de simulatie is er dus voor elke maand een reeks waarden van de onttrekking van de putten gegeven. De neerslag- en de verdampingsreeks zijn gegeven in 10-daagse waarden, welke voor de simulatie zijn omgerekend naar maandelijkse-waarden. Per maand zijn er twee tijdstappen, waardoor er dus over 1½ jaar 36 waarden van de grondwaterspiegel uitkomen.

6.3 Keuze controle cellen

Het is niet praktisch om de neerslagrespons van alle 399 cellen in het model te bepalen. Dit zou heel veel werk opleveren en tevens geeft het weinig meer informatie dan 4 à 6 cellen. Het is met minder cellen wel belangrijk dat er cellen worden uitgekozen die karakteristiek zijn voor de verschillende delen van het model. De onderdelen waar het model uit bestaat zijn: putten, drainage, rivieren, een kleilens en een vast peil aan de randen.
Een aantal kenmerkende punten zijn: het puttenveld in 'Wierdense Veld' aan de rand van de kleilaag, de grote put bij Nijverdal, ergens langs een rivier, het sterk gedraineerde gebied in het noordoosten van het gebied en het ongedraineerde deel in het zuidwesten van het gebied.
In figuur 36 is een schema van het model afgebeeld met daarin de lokaties van de putten en de rivier. Tevens is het gedraineerde deel grijs gearceerd.



figuur 36 schema model met putten, rivieren en drainage

De te controleren cellen zijn in deze figuur aangegeven met een ruit en een nummer. Deze zijn:

-1: cel nr. (2,18), ongedraineerd deel langs rand van het model.
-2: cel nr. (2,13), ongedraineerd deel ter plaatse van de grote onttrekking ter plaatse van Nijverdal.
-3: cel nr. (10,14), het puttenveld ter plaatse van Wierdense Veld, gedraineerd.
-4: cel nr. (15,7), een punt vlak langs de rivier.
-5: cel nr. (17,5), een punt in het sterk gedraineerde deel in het noordoosten van het gebied.
-6: cel nr. (6,5), een punt in het minder sterk gedraineerde deel ten westen van de rivier.

6.4 Bepaling neerslagrespons

6.4.1 inleiding

Het model heeft in de zomer andere rivierparameters dan in de winter. De putontrekkingswaarden variëren per maand. Dit zou per maand een andere drainagebasis en impulsrespons opleveren. Het programma IMPULS is in staat om met in de zomer en winter andere drainagebasis en impulsrespons te werken. Voor de putten moeten dan gemiddelde onttrekkingswaarden per seizoen gebruikt worden. De tijdsmomenten moeten dus evenals de drainagebasissen voor zowel de zomer als de winter berekend worden. Een groot deel van het model is voorzien van een drainagesysteem dat werkt als de grondwaterstand een bepaald niveau bereikt, zodat dan de responsieëigenschappen wijzigen. Het programma IMPULS heeft, zoals al eerder vermeld, een mogelijkheid om hiermee rekening te houden. Door de grove indeling van de cellen, waardoor er per cel vaak meerdere drainagepeilen zijn en de drainage dus voor sommige cellen trapsgewijs in werking treedt, wordt deze mogelijkheid niet gebruikt.

6.4.2 met de impulsresponsiemethode

Voor het bepalen van de tijdsmomenten wordt weer de al eerder toegepaste methode gebruikt, allereerst wordt het model stationair doorgerekend zonder dat neerslag valt. Hieruit volgt de drainagebasis. Deze drainagebasis wordt vervolgens in het model ingevoerd als beginstijghoogte. Daarna is het model doorgerekend met een neerslag die een waarde heeft van 1 m/dag. De stijghoogtes ten opzichte van de drainagebasis zijn dan numeriek gelijk aan de waarden van M_0. Deze waarden zijn, vermenigvuldigd met de bergingscoëfficiënt, ingevoerd in de neerslagfile, waarna stationair doorrekenen M_1 oplevert. Dit is zowel voor de zomer als voor de wintersituatie gedaan. In de zomersituatie is echter een neerslag van 1 mm per dag aangehouden waarna de stijghoogtes vermenigvuldigd zijn met 1000 om de juiste tijdsmomenten te verkrijgen.

Tabel V waarden van tijdsmomenten voor de zomersituatie

zomer	1	2	3	4	5	6
dr. basis	9,65	5,58	3,27	8,31	9,08	6,11
M_0	$1{,}698\cdot10^{3}$	$1{,}293\cdot10^{3}$	$4{,}160\cdot10^{3}$	$1{,}033\cdot10^{2}$	$7{,}862\cdot10^{2}$	$1{,}417\cdot10^{3}$
M_1	$3{,}882\cdot10^{5}$	$2{,}488\cdot10^{5}$	$1{,}212\cdot10^{6}$	$5{,}250\cdot10^{3}$	$7{,}454\cdot10^{4}$	$1{,}36210^{5}$
A	223,5	184,5	255,8	35,3	96,5	109,6
α	6,958	6,419	8,275	2,546	6,343	4,767

Dit is gedaan omdat in de zomer een deel van de drains niet onder water staat en dus ook geen water opneemt. Als er een neerslag van 1 meter per

dag wordt ingevoerd dan staan alle drains onder water en worden er dus eigenlijk te lage tijdsmomenten berekend.
De resultaten hiervan staan in bijlage V. In tabel V en VI, hieronder, staan de waarden van M_0, M_1 en de hoogtes van de drainagebasissen.

Tabel VI waarden van tijdsmomenten voor de wintersituatie

winter	1	2	3	4	5	6
dr. basis	9,56	5,67	4,18	8,02	9,03	9,93
M_0	$1{,}463 \cdot 10^3$	$1{,}087 \cdot 10^3$	$1{,}564 \cdot 10^3$	$4{,}185 \cdot 10^1$	$1{,}926 \cdot 10^2$	$2{,}382 \cdot 10^2$
M_1	$3{,}151 \cdot 10^5$	$1{,}905 \cdot 10^5$	$3{,}125 \cdot 10^5$	$6{,}207 \cdot 10^2$	$5{,}963 \cdot 10^3$	$1{,}244 \cdot 10^4$
A	215,4	175,3	199,8	14,8	31.0	52,2
α	6,793	6,202	7,828	2,827	6,221	4,561

Deze gegevens voor elk punt worden ingevuld in IMPULS, waarna er een reeks grondwaterstanden wordt berekend. Deze staan afgebeeld voor de punten 1 t/m 6 in figuur 37, 38 en 39 op de volgende bladzijde.

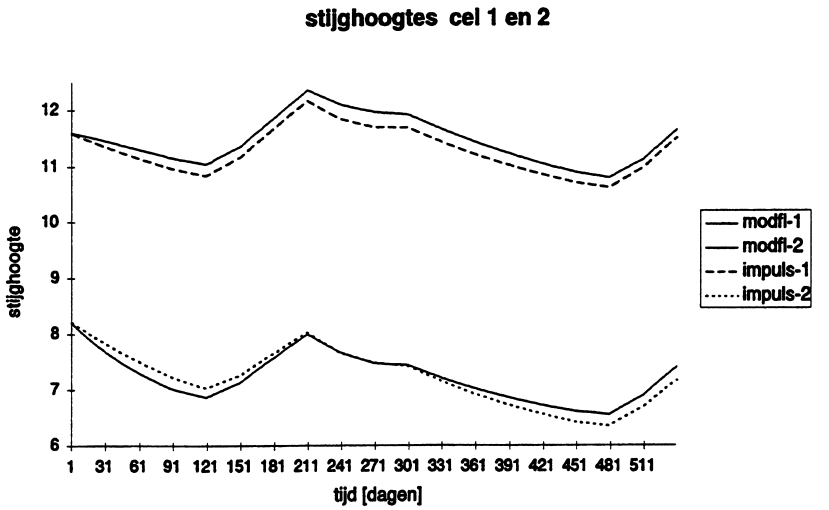
6.4.3 met MODFLOW

Het model dat gebruikt is voor berekening van de tijdsmomenten is geschikt gemaakt voor instationaire berekening en is aangepast zodat de uitvoer hiervan net als de uitvoer van IMPULS per dag wordt gegeven. Per seizoen wordt de onttrekkingshoeveelheid per put gemiddeld over dat seizoen genomen. Er ontstaan dus 30 dagen maal 18 maanden is 540 grondwaterstandswaarden. Deze uitvoer staat per 'gemeten' cel naast de uitvoer van IMPULS afgebeeld in figuur 37, 38 en 39.

6.5 Vergelijking neerslagrespons

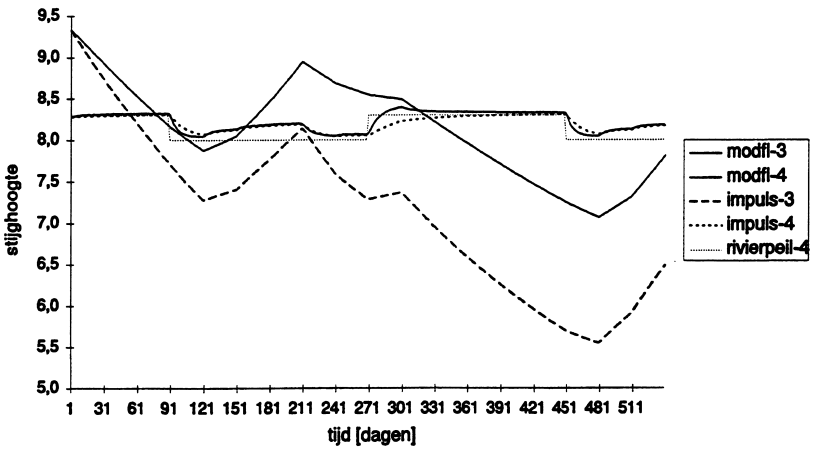
6.5.1 constructie stijghoogteverloop

Om de neerslagrespons zoals die met beide methoden is berekend met elkaar te vergelijken zijn de verlopen per punt naast elkaar uitgezet op een horizontale tijdschaal. In figuur 37, 38 en 39 staan de neerslagresponsen van cel 1 t/m 6. In elke figuur staat het verloop van twee cellen, en per cel staat het impulsresponsieverloop uitgezet tegen het verloop dat met MOD-FLOW berekend is. De getrokken lijnen geven het verloop van MOD-FLOW weer en de gestippelde lijnen geven het verloop weer dat berekend is met IMPULS.



figuur 37 stijghoogteverloop tegen de tijd uitgezet voor cel 1 en 2

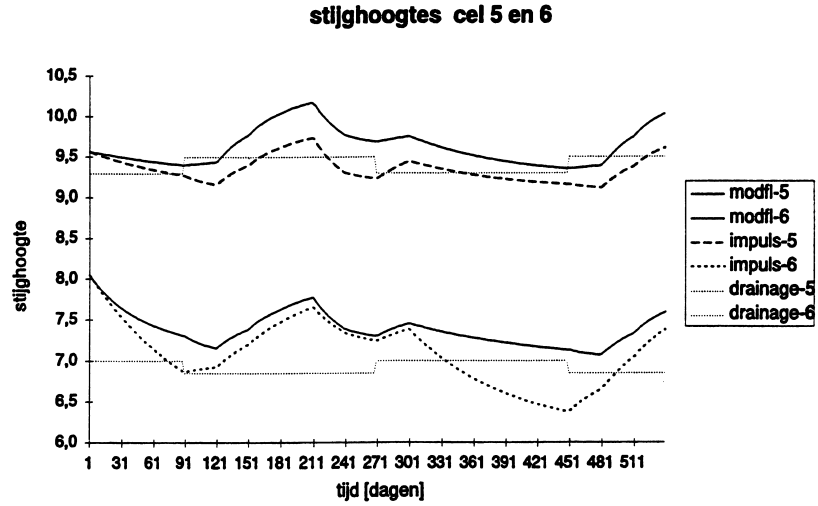
In figuur 37 staat het verloop van cel 1 (2,18) en cel 2 (2,13) weergegeven.
De verlopen van beide methoden komen redelijk overeen. In cel 2 bevindt zich een put, waardoor het stijghoogteniveau van deze cel erg laag is. Beide cellen liggen vlak langs de rand van het model waar de stijghoogte vastgelegd is door de randvoorwaarde. Beide punten bevinden zich in een niet gedraineerd gedeelte.



figuur 38 stijghoogteverloop tegen de tijd uitgezet voor cel 3 en 4

In figuur 38 staat het stijghoogteverloop voor cel 3 (10,14) en cel 4 (15,7) uitgezet. Cel 3 bevindt zich ter plaatse van Wierdense Veld. Hier zit een groot aantal putten, die de grondwaterstand ter plaatse sterk omlaag trekken. Tevens zijn de cellen rondom gedraineerd. In het verloop van cel 4 is veel overeenkomst tussen IMPULS en MODFLOW, maar in cel 3 ontstaat een met de tijd groter wordend verschil tussen beide methoden tot wel 1,5 meter. Dit is waarschijnlijk te wijten aan het verschil in de snelheid van de reactie tussen beide methoden, dat bij deze cel heel groot is. Cel 4 bevindt zich ter plaatse van de rivier, waardoor een grote demping veroorzaakt wordt doordat de rivier het omringende grondwater als het

ware vasthoudt. Het rivierpeil wordt aangegeven met een lichte stippellijn. Duidelijk is te zien dat het grondwaterpeil het verloop van het rivierniveau met enige vertraging volgt. Na een rivierpeilverandering is duidelijk te zien dat beide methdodes anders hierop reageren. MODFLOW reageert een stuk sneller hierop dan IMPULS.



figuur 39 stijghoogteverloop tegen de tijd uitgezet voor cel 5 en 6

In figuur 39 staat het stijghoogteverloop van cellen 5 (17,5) en 6 (6,5). Voor beide cellen geldt hier dat het verloop van de twee methoden niet goed met elkaar overeenkomt. Beide cellen zitten op enige afstand van de rivieren. De invloed hiervan zal dan ook niet zo groot zijn. Wel zitten beide cellen in een met slootjes gedraineerd veld. De hoogte van deze drainage is weergegeven met de twee lichte stippellijnen. In beide gevallen is de drainage constant in werking omdat de stijghoogteverlopen van MODFLOW steeds gemiddeld boven de drains liggen.

6.5.2 conclusie vergelijking

In het vorige hoofdstuk is gebleken dat het voor lineaire gevallen mogelijk is om het instationaire verloop van de grondwaterstand met IMPULS te bepalen en dat niet-lineaire onderdelen in een model dit verstoren. In de 'Wierden Case' zitten een aantal niet-lineaire aspecten, namelijk drains en rivieren. Uit deze zes grafieken blijkt dat het bepalen van een instationair stijghoogteverloop voor een niet-lineair model niet zomaar mogelijk is. Bij de bepaling van de tijdsmomenten is uitgegaan van een gemiddelde neerslag van 1 mm/dag. Hierdoor zullen een aantal sloten wel en een aantal geen water afvoeren. Deze situatie hoeft niet gelijk te zijn aan de instationaire situatie. Bij cel 1 en 2 gaat dit nog wel goed, maar die cellen zitten vlak langs een rand met vaste stijghoogtes. Deze cellen zijn niet voorzien van drainage, waardoor de impulsrespons alleen beïnvloed wordt door enkele nabijgelegen cellen met wel drainage.
Bij het verloop van cel 3 lopen de lijnen van IMPULS en MODFLOW sterk uit elkaar. Ook hier geldt dat de impulsrespons die van een gedraineerd model is en dus een hogere doorlatendheid heeft. Hierdoor is het

stijghoogteverloop, zoals dat berekend is met IMPULS, lager dan het verloop van MODFLOW.
Cel 4 is gedefinieerd als een riviercel. Dit betekent dat de waterstand in deze cel, afhankelijk van de bodemweerstand, ongeveer gelijk moet zijn aan het peil van de rivier. Dit komt ook naar voren in de waarde van A en α in tabel V en VI. A is relatief klein, dus een kleine reactie op een regenbui, α is ook relatief klein, dus een reactie dempt snel uit, dus het grondwaterniveau zal niet veel verschillen van het rivierpeil. Dit is ook goed te zien aan het verloop in figuur 38.
Cel 5 en 6 liggen beide in een sterk gedraineerd gebied. De verlopen die berekend zijn met MODFLOW liggen in beide cellen gedurende het gehele jaar, boven het gemiddelde niveau van de drains. Ter plaatse van deze cellen zou het model dus lineair moeten zijn. Lineariteit hangt echter niet af van enkele cellen, maar van het hele model. Als gekeken wordt naar de omringende cellen, dan blijkt dat daar wel afwisselend gedraineerd wordt, en dus niet-lineariteit optreedt, die de reacties in cel 5 en 6 beïnvloeden.

6.6 Vereenvoudiging van de 'Wierden Case'

6.6.1 inleiding

Uit het voorgaande blijkt dat de impulsrespons alleen goed te bepalen is voor lineaire systemen. Als het mogelijk zou zijn om een model als het vorige zodanig te veranderen dat het een lineair model wordt, dan moet het dus wel mogelijk zijn om goede neerslagrespons te bepalen.
Hieronder wordt een methode beschreven waarmee een model lineair gemaakt kan worden. Deze methode wordt toegepast op het model van de 'Wierden Case'.

6.6.2 beschrijving methode

Een niet-lineair model kan lineair worden gemaakt door de niet-lineaire onderdelen van dat model zo te veranderen dat ze lineair worden. Hiermee wordt de werkelijkheid, afhankelijk van de oorspronkelijke mate van niet-lineariteit, in meer of mindere mate geweld aangedaan. Hieronder staan een aantal stappen die ondernomen moeten worden om een niet-lineair model zo te veranderen dat het lineair wordt.

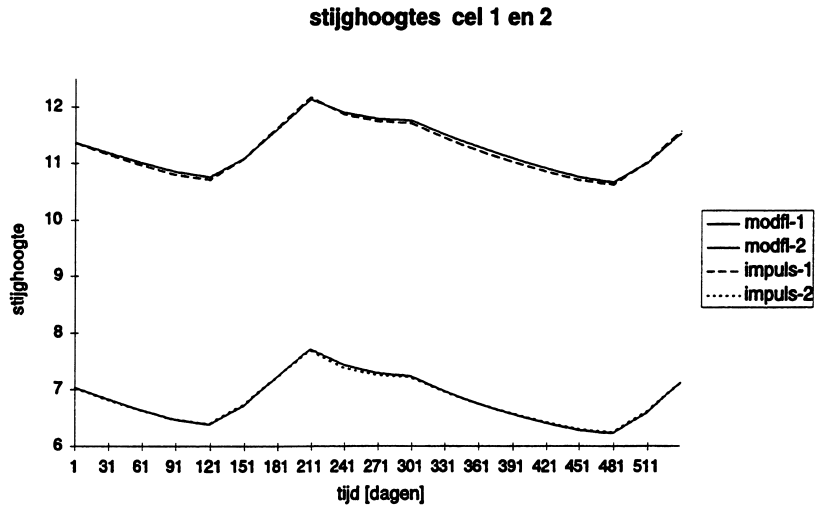
- Het model moet eerst stationair worden doorgerekend, met alle modules aan, maar zonder neerslag, hierdoor ontstaat de drainagebasis.
- Hierna moeten alle sloot-, rivier- en drainagepeilen en vaste randstijghoogtes op **nul** worden gesteld, maar niet uitgezet, en putten moeten worden **uit**gezet, omdat die het peil ter plaatse onder het drain-niveau trekken, waardoor niet-lineariteit ontstaat. Met dit model worden M_0 en M_1 berekend. Met deze tijdsmomenten kan het instationaire stijghoogteverloop volgens de impulsresponsiemethode berekend worden.
- Met bovenstaande instellingen wordt het model met MODFLOW-instationair doorgerekend om het stijghoogteverloop te berekenen.

- Om het werkelijke peil te verkrijgen, worden de stijghoogte-verlopen die hiervoor berekend zijn bij de in het eerste punt bepaalde drainage-basis opgeteld.

Deze methode is toegepast op het model van de 'Wierden Case'. De drainagebasis van dit model was al eerder berekend. Alle beginstijghoogtes zijn vervolgens op nul gesteld. Tevens zijn alle rivier- en drainagepeilen ook op nul gesteld en de put is uit het model verwijderd. Hierna zijn de tijdsmomenten en het stijghoogteverloop met MODFLOW en IMPULS berekend.

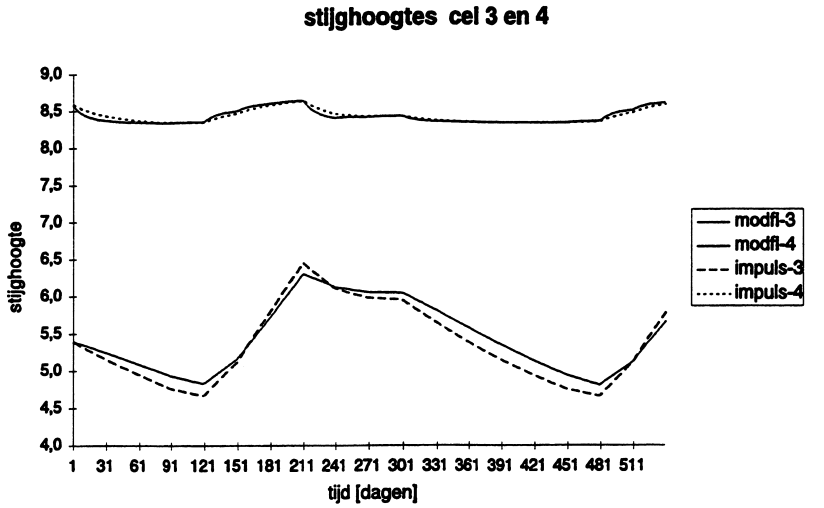
6.6.3 vergelijking IMPULS en MODFLOW

Van dit gelineariseerde model zijn voor dezelfde cellen als in § 6.3 de stijghoogteverlopen berekend. Deze zijn afgebeeld in figuur 40 (cel 1 en 2), 41 (cel 3 en 4) en 42 (cel 5 en 6).

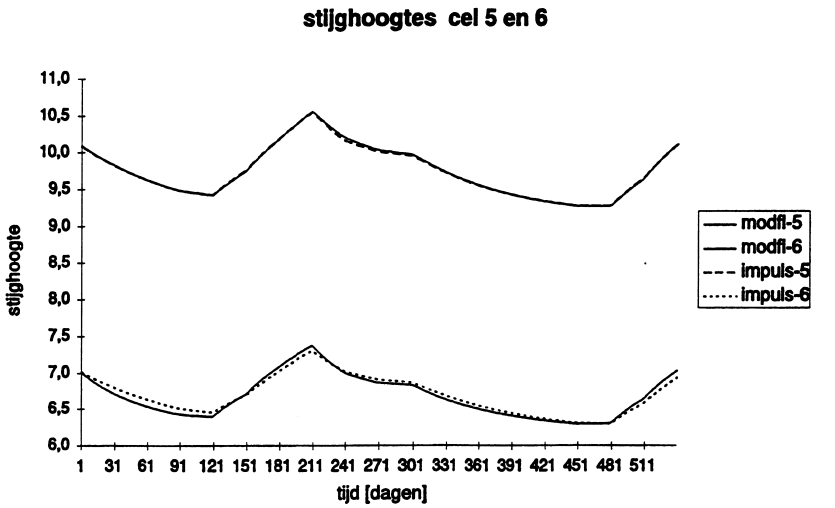


figuur 40 stijghoogteverloop gelineariseerd model, cel 1 en 2

De stijghoogteverlopen zijn globaal te vergelijken met die in § 6.5.1. Was er in die paragraaf meestal een redelijk groot verschil tussen het verloop van MODFLOW en IMPULS, de verlopen in deze paragraaf laten zien dat een gelineariseerd model veel minder verschil oplevert.
De afgebeelde stijghoogteverlopen die berekend zijn met IMPULS hebben maar relatief zeer kleine afwijkingen met de stijghoogteverlopen, berekend met MODFLOW. Alleen in cel 3, ter plaatse van het puttenveld en boven de kleilens is toch enige afwijking te zien tussen de twee methoden. Deze cel liet vóór de linearisatie al een grote afwijking zien. Het stijghoogteverloop dat berekend is met IMPULS reageert in deze cel sneller op een neerslagverandering dan het verloop dat met MODFLOW berekend is. Dit zou verklaard kunnen worden doordat ten gevolge van de kleilens het water in de buurt van deze cel minder snel begint met afstromen, waardoor de S-curve (zie § 4.7) wat minder stijl begint. Het nulde- en eerste-orde-moment van deze cel hebben dan echter wel dezelfde waarde.



figuur 41 stijghoogteverloop gelineariseerd model, cel 3 en 4



figuur 42 stijghoogteverloop gelineariseerd model, cel 5 en 6

6.6.4 conclusie

Uit bovenstaande linearisatie van het model 'Wierden', blijkt dat de afwijkingen van IMPULS in de vorige paragraaf grotendeels toe te wijzen zijn aan de niet-lineariteit van het model. De resultaten van de berekening met IMPULS na linearisatie komen veel meer met MODFLOW overeen. Dit wil echter niet zeggen dat deze resultaten ook realistisch zijn. Door de linearisatie wordt het model namelijk zo veranderd dat bepaalde niet-lineaire processen verdwijnen. Vergelijking van de stijghoogtelijnen uit § 6.5.1 met die uit § 6.5.5 geeft al aan dat er veel verschil zit tussen het resultaat van een lineair en van een niet-lineair model.

7 CONCLUSIES

In de inleiding is gesteld dat de grondwaterstandsrespons van een gebied karakteriserend is voor de vegetatie in dat gebied. Die respons blijkt te benaderen met een exponentiële functie, welke is te beschrijven met twee parameters. Deze twee parameters zijn de tijdsmomenten, M_0 en M_1, welke respectievelijk het gemiddelde en de daalsnelheid van de respons beschrijven.
De hoofdvraag is: hoe bepaal je die momenten. Daartoe zijn in hoofdstuk 2 de vergelijkingen van de tijdsmomenten afgeleid uit de differentiaalvergelijking voor het verloop van de grondwaterspiegel van een homogeen pakket. Hieruit blijkt dat deze vergelijkingen de gedaante hebben van een stationaire grondwaterstroming in een homogeen pakket. Hieruit is geconcludeerd dat het mogelijk moet zijn om de tijdsmomenten te bepalen met behulp van een numeriek grondwatermodel.
Dit is getest met een aantal eenvoudige lineaire modellen door hiervan het nulde- en eerste-orde-moment te bepalen.
Hieruit zijn de volgende conclusies getrokken:

- Met behulp van een stationair-grondwatermodel is het goed mogelijk om de tijdsmomenten M_0 en M_1 te bepalen. Deze komen overeen met analytische berekening.
- Met deze tijdsmomenten ligt de reactie van de grondwaterstand op een neerslagimpuls vast.
- Deze tijdsmomenten zijn voor lineaire modellen voor elke grondwaterstand een juiste karakterisering van de abiotische gebiedskenmerken.
- Niet-lineaire modellen hebben variërende tijdsmomenten. Hierdoor heeft een lokatie niet één paar tijdsmomenten en is dus niet met twee tijdsmomenten te karakteriseren.

Het tweede doel van dit onderzoek was de mogelijkheid verkennen om met behulp van de met deze tijdsmomenten bepaalde impulsrespons, het verloop van de grondwaterspiegel, ten gevolge van een neerslagreeks, te bepalen.
Hiertoe is in het tweede deel van dit onderzoek een computerprogramma 'IMPULS' geschreven dat aan de hand van de exponentiële impulsrespons het verloop van de grondwaterspiegel ten gevolge van een neerslagreeks berekent. Dit programma is op een aantal eenvoudige modellen en tenslotte op een model van een bestaand gebied, Wierden, getest.
Uit deze tests is het volgende geconcludeerd.

- De exponentiële impulsrespons, die berekend is met twee tijdsmomenten heeft in het algemeen een iets ander verloop dan de impulsrespons, die berekend is met een grondwatermodel. Dit heeft geen nadelige invloed op de methode.
- Voor lineaire modellen, is met het programma IMPULS het verloop van de grondwaterstand als gevolg van een neerslagreeks te berekenen. Deze reactie komt goed overeen met de reactie van hetzelfde model op dezelfde neerslagreeks, als deze wordt berekend met een instationair grondwatermodel.

- Niet-lineaire onderdelen van een model zoals drains die maar een deel van de tijd werken, zorgen voor een verstoring van de methode.
  - Deze verstoring kan enigszins worden verminderd door tijdsmomenten te berekenen voor het model met de drains zowel 'aan' als 'uit' zodat er dus twee paar tijdsmomenten ontstaan en IMPULS als de grondwaterstand het drain-niveau bereikt met aangepaste tijdsmomenten gaat rekenen.
  - Bovenstaande werkt alleen goed als alle drains tegelijk in werking treden. IMPULS berekent namelijk het verloop van de grondwaterstand per cel terwijl de tijdsmomenten voor het gehele gebied worden berekend. Als dan in één punt het drainniveau wordt bereikt dan wordt overgeschakeld op de tijdsmomenten die berekend zijn als alle drains in het gebied in werking zijn terwijl alleen in de buurt van die cel de drainage wordt bereikt, hierdoor treden er afwijkingen op.
- Er kan algemeen gesteld worden dat deze methode werkt voor gebieden waarvan het watervoerende pakket een grote dikte heeft, en waar niet te veel variatie optreedt in de werking van eventuele drains.

8 AANBEVELINGEN

Met dit afstudeeronderzoek is een deel van het onderzoek naar de grondwaterspiegeldynamica voltooid. Voor vervolgonderzoek zouden de volgende punten moeten worden bekeken.

- In dit onderzoek is enkel gekeken naar de mogelijkheden voor bepaling van de tijdsmomenten en de bruikbaarheid van de impulsrespons voor instationaire berekening van de stijghoogtes. Om inzicht in de vegetatiekarakterisering met behulp van de tijdsmomenten te krijgen moet een relatie gelegd worden tussen tijdsmomenten en vegetaties. Dit vergt een apart onderzoek.
- Bij niet-lineaire modellen werkt de impulsrespons niet goed. Dit is waarschijnlijk zo sterk van invloed op de vegetatiekarakterisering dat hiervoor eerst een oplossing gezocht moet worden voordat het eerste punt van deze aanbevelingen uitgevoerd kan worden.
- Er zijn twee verschillende richtingen van onderzoek denkbaar:
  - Momenteel wordt de impulsrespons bepaald ten opzichte van de drainagebasis. In plaats daarvan zou zij bepaald kunnen worden ten opzichte van de gemiddelde grondwaterstand.
  - Ook zou de respons van de grondwater ten gevolge van een sinusvormige neerslagreeks bepaald kunnen worden, waarbij de amplitude van de sinus overeenkomt met de gemiddelde amplitude van de seizoensneerslag. Uit de demping en de vertraging van de sinusvormige fluctuatie (die het niet-lineaire gedrag in zich heeft) zijn dan de parameters van de impulsrespons af te leiden.

LITERATUUR

Anderson, Mary P., William W. Woessner, 1992, Applied groundwater modeling, Simulation of Flow and Advective Transport, Academic press inc., California, USA.

Bakker, T.W.M., J.A. Klijn & F.J. Van Zadelhoff, 1979. Duinen en duinvalleien. Een landschaps-oecologische studie van het Nederlandse duingebied. Pudoc, Wageningen.

Chiang Wen-Hsing, Wolfgang Kinzelbach, 1992, Handleiding MODFLOW deel 1 t/m 7, Kassel University, Department of Civil Engeneering, Germany

Dam J.C. van, 1992, Hydrologie, collegediktaat F15A, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Ciciele Techniek, Vakgroep Gezondheidstechniek & Waterbeheersing, Sectie Hydrologie.

Hooghart, J.C., Gespreksgroep hydrologische terminologie, 1986, Verklarende hydrologische woordenlijst, Commissie voor hydrologisch onderzoek TNO-I11.

Jansen, A.J.M., T.H.M. Croese, M.H. Jalink, C.J.S. Aggenbach, U. Vegter, M.W.A. de Haan, D.H. Baggelaar, Y.C. Drost, H.W. Wullink, A. Kap, C. Maas, M.W. van Gerven, J. Supèr, A.Th.W. Eysink, P.C. de Hullu, R. van Leeuwen, E. Takman, J.J. Kleuver, T.W.M. Bakker, H.G.J.M. van der Hagen, december 1993, Van hydrologische ingreep naar ecologische effectvoorspelling, enkele resultaten en toepassingen van hydrologisch onderzoek, mededeling nummer 122, Vewin-onderzoekprogramma 1988-1992, Kiwa onderzoek en advies, Nieuwegein.

Jansen, P.C., 1981. Verwerking, interpretatie en toepassingsmogelijkheden van grandwaterstandsgegevens met behulp van overschrijdingsduurlijnen, ICW-nota 1260, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.

Kop, J.H., 1994, Groundwater abstraction and artificial recharge, collegediktaat N13, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Ciciele Techniek, Vakgroep Gezondheidstechniek & Waterbeheersing, Sectie Hydrologie.

Maas, C., 1995, Grondwaterspiegeldynamica, Onderzoeksvoorstel ter verbetering van de duurlijnmethode, SWI 95.121, Kiwa onderzoek en advies, Nieuwegein.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1990, Derde Nota Waterhuishouding, Water voor nu en later, Regeringsbeslissing, SDU uitgeverij, 's-Gravenhage.

Te Stroet, C.B.M., 1995, Calibration of stochastic groundwater flow models, Estimation of System Noise Statistics and Model Parameters, proefschrift, Technische Universiteit Delft.

Veen, G.J. van der, A.C. Garritsen, juni 1994, Kennisoverzicht ecohydrologie, Een inventarisatie van kennis en expertise op het gebied van ecohydrologie en verdroging, NOV - rapport 7, Koninklijke Vermande bv.

Verruijt, A., 1982, Groundwater Flow, The Macmillan Press LTD, Sutton

SAMENVATTING

Voor het voorspellen van de gevolgen voor vegetaties van veranderingen in een geohydrologisch systeem wordt sinds enige jaren gewerkt met de duurlijnenmethode. Een duurlijn geeft aan hoe lang de grondwaterstand per jaar op een zekere plaats een bepaald niveau overschrijdt. Duurlijnen van opeenvolgende jaren vormen een bundel die veel zegt over de hoeveelheid vocht op die plaats en daarmee over het vegetatietype. In samenwerking met Kiwa onderzoek en Advies wordt er dit jaar een nieuwe methode ontwikkeld, waarmee vegetaties gekarakteriseerd kunnen worden aan de hand van de reactie van de grondwaterspiegel op een regenbui, ofwel de impulsrespons.

In dit afstudeeronderzoek zijn de mogelijkheden onderzocht om deze impulsrespons vast te leggen met twee parameters, die tijdsmomenten worden genoemd. Het eerste moment, M_0, zegt iets over de stijging van grondwaterspiegel als het permanent zou regenen. Het tweede moment, M_1, zegt iets over hoe snel het peil weer zakt als de regen ophoudt. Er vanuit gaande dat de impulsespons te benaderen is met een zeer scheve exponentiële kansverdelingsfunctie is een methode gezocht om de tijdsmomenten te berekenen. Hiernaast is gezocht naar de mogelijkheden om een instationair verloop van de grondwaterstand ten gevolge van een neerslagreeks te simuleren met behulp van de impulsresponsfunctie.

Uit dit onderzoek blijkt dat de tijdsmomenten eenvoudig te berekenen zijn met een stationair grondwatermodel, zoals MODFLOW. Deze tijdsmomenten, ingevoerd in een exponentiële functie leveren voor lineaire modellen een goede benadering op van de impulsrespons. Tevens blijkt deze exponentiële impulsrespons bruikbaar om het stijghoogteverloop van de grondwaterspiegel ten gevolge van een neerslagreeks te bepalen. Helaas leveren modellen die niet lineair zijn, afwijkingen op. Hoe ongunstig deze afwijkingen zijn voor de vegetatiekarakterisering moet blijken uit een vervolgonderzoek naar de relatie tussen de tijdsmomenten en vegetaties.

A Hoogteverloop in de tijd

Uit onderstaande differentiaalvergelijking kan het hoogteverloop in de tijd worden bepaald voor een homogeen rechthoekig eiland.

$$kD\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}\right) = \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

Deze vergelijking kan dimensieloos worden gemaakt als onderstaande waarden worden ingevuld:

$$\bar{x} = \frac{\pi}{L} x \qquad \bar{y} = \frac{\pi}{b} y \qquad \alpha = \frac{L}{b} \qquad \bar{\varphi} = \frac{\varepsilon \varphi}{N_0}$$

$$\bar{t} = t\pi^2 \frac{kD}{\varepsilon L^2}$$

waarna de vergelijking wordt:

$$\frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \bar{x}^2} + \alpha^2 \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \bar{y}^2} = \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \bar{t}}$$

met als randvoorwaarden: $\bar{\varphi}(0,\bar{y},\bar{t}) = 0$

$$\bar{\varphi}(\pi,\bar{y},\bar{t}) = 0$$

$$\bar{\varphi}(\bar{x},0,\bar{t}) = 0$$

$$\bar{\varphi}(\bar{x},\pi,\bar{t}) = 0$$

beginvoorwaarde: $\bar{\varphi}(\bar{x},\bar{y},\bar{0}) = 1$

Oplossing van dit stelsel dmv Fouriertransformatie mbt x en y:

$$-n^2 \bar{\bar{\varphi}} - \alpha^2 m^2 \bar{\bar{\varphi}} = \frac{d\bar{\bar{\varphi}}}{dt}$$

$$\bar{\bar{\varphi}}(0) = \frac{4}{nm}$$

met n=1,3,5,...
m=1,3,5,...

Oplossing:

$$\bar{\bar{\varphi}}(\bar{t}) = \bar{\bar{\varphi}}(0)\, e^{-(n^2+\alpha^2 m^2)\bar{t}}$$
$$= \frac{4}{nm} e^{-(n^2+\alpha^2 m^2)\bar{t}}$$

Fourier-inversie:

$$\bar{\varphi}(\bar{x},\bar{y},\bar{t}) = \frac{16}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,..}^{\infty} \sum_{m=1,3,5,..}^{\infty} \frac{1}{nm} \sin(n\bar{x}) \sin(m\bar{y})\, e^{-(n^2+\alpha^2 m^2)\bar{t}} \qquad \text{(I.1)}$$

waarin:

$$\bar{x} = \frac{x}{L}\pi \qquad \bar{y} = \frac{y}{b}\pi \qquad \alpha = \frac{L}{b} \qquad \bar{\varphi} = \frac{\varepsilon\varphi}{N_0}$$

$$\bar{t} = t\pi^2 \frac{kD}{\varepsilon L^2}$$

Vergelijking I.1 bestaat uit een vermenigvuldiging van een $\bar{x}$-term met een $\bar{y}$-term. In het geval van een (oneindig) lange strook land met aan weerszijden sloten kan de $\bar{y}$-term uitgedeeld worden, waardoor de volgende vergelijking ontstaat:

$$\bar{\varphi}(\bar{x},\bar{t}) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5,..}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n\bar{x})\, e^{-(n^2\bar{t})} \qquad \text{(I.2)}$$

B Nulde moment, M_0

Het nulde moment kan worden bepaald met de volgende differentiaalvergelijking:

$$kD\left(\frac{\partial^2 M_0}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M_0}{\partial y^2}\right)=-N_0$$

Deze vergelijking kan dimensieloos worden gemaakt als onderstaande waarden worden ingevuld:

$$\bar{x}=\frac{\pi}{L}x \quad \bar{y}=\frac{\pi}{b}y \quad \alpha=\frac{L}{b}$$

$$\overline{M}_0=M_0\pi^2\frac{kD}{L^2N_0}$$

waarna het stelsel over gaat in:

$$\frac{\partial^2\overline{M}_0}{\partial\bar{x}^2}+\alpha^2\frac{\partial^2\overline{M}_0}{\partial\bar{y}^2}=-1$$

met als randvoorwaarden: $\overline{M}_0(0,\bar{y})=0$

$$\overline{M}_0(\pi,\bar{y})=0$$

$$\overline{M}_0(\bar{x},0)=0$$

$$\overline{M}_0(\bar{x},\pi)=0$$

Oplossing van dit stelsel dmv Fouriertransformatie mbt x en y:

$$-n^2\overline{\overline{M}}_0-\alpha^2m^2\overline{\overline{M}}_0=\frac{4}{nm}$$

met n=1,3,5,...
m=1,3,5,...

Oplossing:

$$\overline{\overline{M}}_0 = \frac{4}{nm}\frac{1}{n^2+\alpha^2 m^2}$$

Fourier-inversie:

$$\boxed{\overline{M}_0(\bar{x},\bar{y}) = \frac{16}{\pi^2}\sum_{n=1,3,5,..}^{\infty}\sum_{m=1,3,5,..}^{\infty}\frac{1}{nm}\frac{\sin(n\bar{x})\sin(m\bar{y})}{n^2+\alpha^2 m^2}} \qquad \text{(I.3)}$$

waarin:

$$\bar{x} = \frac{\pi}{L}x \qquad \bar{y} = \frac{\pi}{b}y \qquad \alpha = \frac{L}{b}$$

$$\overline{M}_0 = M_0\pi^2\frac{kD}{L^2 N_0}$$

C Eerste moment, M_1

$$kD\left(\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2}\right)=-\varepsilon M_0$$

Deze vergelijking kan dimensieloos worden gemaakt als onderstaande waarden worden ingevuld:

$$\bar{\pi}=\frac{\pi}{L}x \quad \bar{y}=\frac{\pi}{b}y \quad \alpha=\frac{L}{b}$$

$$\bar{M}_0=M_0\pi^2\frac{kD}{L^2N_0}$$

$$\bar{M}_1=M_1\pi^4\frac{kD^2}{\varepsilon L^4N_0}=M_1\pi^2\frac{kD}{L^2N_0}\cdot\pi^2\frac{kD}{\varepsilon L^2}$$

waarna de vergelijking over gaat in:

$$\frac{\partial^2\bar{M}_1}{\partial\bar{x}^2}+\alpha^2\frac{\partial^2\bar{M}_1}{\partial\bar{y}^2}=-\bar{M}_0$$

met als randvoorwaarden: $\bar{M}_1(0,\bar{y})=0$

$$\bar{M}_0(\pi,\bar{y})=0$$

$$\bar{M}_1(\bar{x},0)=0$$

$$\bar{M}_1(\bar{x},\pi)=0$$

Oplossing van dit stelsel dmv Fouriertransformatie mbt x en y:

$$-n^2\bar{\bar{M}}_1-\alpha^2m^2\bar{\bar{M}}_1=-\bar{\bar{M}}_0$$

met n=1,3,5,...
m=1,3,5,...

Oplossing:

$$\overline{\overline{M}}_1 = \frac{4}{nm}\frac{1}{(n^2+\alpha^2 m^2)^2}$$

Fourier-inversie:

$$\boxed{\overline{M}_1(\bar{x},\bar{y}) = \frac{16}{\pi^2}\sum_{n=1,3,5,..}^{\infty}\sum_{m=1,3,5,..}^{\infty}\frac{1}{nm}\frac{\sin(n\bar{x})\sin(m\bar{y})}{(n^2+\alpha^2 m^2)^2}} \qquad \text{(I.4)}$$

waarin:

$$\bar{x} = \frac{x}{L}\pi \qquad \bar{y} = \frac{y}{b}\pi \qquad \alpha = \frac{L}{b}$$

$$\overline{M}_1 = M_1\pi^4\frac{kD^2}{\varepsilon L^4 N_0} = M_1\pi^2\frac{kD}{L^2 N_0}\cdot\pi^2\frac{kD}{\varepsilon L^2}$$

Bijlage II

Waarden van M_0 en M_1 voor 1-dimensionaal testmodel

	lokatie	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
MODFLOW:	M0	0,000000	0,023750	0,045000	0,063750	0,080000	0,093750	0,105000	0,113750	0,120000	0,123750	0,125000	0,123750	0,120000	0,113750	0,105000	0,093750	0,080000	0,063750	0,045000	0,023750	0,000000
	M1	0,000000	0,002079	0,004088	0,006004	0,007751	0,009299	0,010611	0,011662	0,012427	0,012893	0,013048	0,012893	0,012427	0,011662	0,010611	0,009299	0,007751	0,006004	0,004087	0,002078	0,000000
Analytisch	M0	0,000000	0,023750	0,045000	0,063750	0,080000	0,093750	0,105000	0,113750	0,120000	0,123750	0,125000	0,123750	0,120000	0,113750	0,105000	0,093750	0,080000	0,063750	0,045000	0,023750	0,000000
	M1	0,000000	0,002073	0,004088	0,005980	0,007733	0,009277	0,010588	0,011636	0,012400	0,012865	0,013021	0,012865	0,012400	0,011636	0,010588	0,009277	0,007733	0,005980	0,004087	0,002073	0,000000
MODFLOW	alpha	0,000000	0,087517	0,091080	0,094186	0,096893	0,099185	0,101060	0,102519	0,103560	0,104186	0,104394	0,104187	0,103561	0,102520	0,101080	0,099184	0,096892	0,094182	0,091054	0,087507	0,000000
	A	0,000000	0,271378	0,494182	0,676855	0,825649	0,945203	1,038887	1,109554	1,158748	1,187781	1,197391	1,187772	1,158739	1,109544	1,038887	0,945211	0,825668	0,676888	0,494213	0,271408	0,000000
Analytisch	alpha	0,000000	0,087292	0,090833	0,093958	0,096667	0,098958	0,100833	0,102292	0,103333	0,103958	0,104167	0,103958	0,103333	0,102292	0,100833	0,098958	0,096667	0,093958	0,090833	0,087292	0,000000
	A	0,000000	0,272076	0,495413	0,678492	0,827586	0,947368	1,041322	1,112016	1,161290	1,190381	1,200000	1,190381	1,161290	1,112016	1,041322	0,947368	0,827586	0,678492	0,495413	0,272076	0,000000

x = ½					x = ¼			
Tijd					Tijd			
	Impuls	analytisch	Modflow			Impuls	analytisch	Modflow
0,00	1,2000	1,0045	0,9857		0,00	0,9474	1,0000	0,9474
0,01	1,0902	0,9898	0,9513		0,01	0,8563	0,8943	0,8693
0,02	0,9904	0,9752	0,9004		0,02	0,7740	0,7885	0,7887
0,03	0,8997	0,9105	0,8401		0,03	0,6996	0,7019	0,7142
0,04	0,8174	0,8458	0,7765		0,04	0,6324	0,6152	0,6473
0,05	0,7425	0,7740	0,7133		0,05	0,5716	0,5573	0,5875
0,06	0,6746	0,7022	0,6529		0,06	0,5167	0,4994	0,5338
0,07	0,6128	0,6400	0,5962		0,07	0,4670	0,4542	0,4854
0,08	0,5567	0,5778	0,5438		0,08	0,4221	0,4090	0,4416
0,09	0,5058	0,5261	0,4956		0,09	0,3815	0,3723	0,4018
0,10	0,4595	0,4745	0,4514		0,10	0,3449	0,3356	0,3657
0,11	0,4174	0,4320	0,4111		0,11	0,3117	0,3055	0,3329
0,12	0,3792	0,3895	0,3743		0,12	0,2818	0,2755	0,3030
0,13	0,3445	0,3546	0,3408		0,13	0,2547	0,2508	0,2758
0,14	0,3130	0,3198	0,3103		0,14	0,2302	0,2261	0,2511
0,15	0,2843	0,2911	0,2825		0,15	0,2081	0,2059	0,2286
0,16	0,2583	0,2625	0,2572		0,16	0,1881	0,1856	0,2081
0,17	0,2346	0,2390	0,2341		0,17	0,1700	0,1690	0,1894
0,18	0,2132	0,2155	0,2131		0,18	0,1537	0,1524	0,1724
0,19	0,1937	0,1962	0,1940		0,19	0,1389	0,1387	0,1570
0,20	0,1759	0,1769	0,1766		0,20	0,1255	0,1251	0,1429
0,21	0,1598	0,1610	0,1608		0,21	0,1135	0,1139	0,1301
0,22	0,1452	0,1452	0,1464		0,22	0,1026	0,1027	0,1184
0,23	0,1319	0,1322	0,1332		0,23	0,0927	0,0935	0,1078
0,24	0,1198	0,1192	0,1213		0,24	0,0838	0,0843	0,0981
0,25	0,1089	0,1085	0,1104		0,25	0,0757	0,0767	0,0893
0,26	0,0989	0,0978	0,1005		0,26	0,0685	0,0692	0,0813
0,27	0,0898	0,0891	0,0915		0,27	0,0619	0,0630	0,0740
0,28	0,0816	0,0803	0,0833		0,28	0,0559	0,0568	0,0674
0,29	0,0741	0,0731	0,0758		0,29	0,0506	0,0517	0,0614
0,30	0,0674	0,0659	0,0690		0,30	0,0457	0,0466	0,0559
0,31	0,0612	0,0600	0,0628		0,31	0,0413	0,0424	0,0508
0,32	0,0556	0,0541	0,0572		0,32	0,0373	0,0383	0,0463
0,33	0,0505	0,0493	0,0521		0,33	0,0337	0,0348	0,0421
0,34	0,0459	0,0444	0,0474		0,34	0,0305	0,0314	0,0384
0,35	0,0417	0,0404	0,0432		0,35	0,0276	0,0286	0,0349
0,36	0,0379	0,0365	0,0393		0,36	0,0249	0,0258	0,0318
0,37	0,0344	0,0332	0,0358		0,37	0,0225	0,0235	0,0289
0,38	0,0245	0,0299	0,0326		0,38	0,0174	0,0212	0,0263
0,39	0,0223	0,0273	0,0296		0,39	0,0157	0,0193	0,0240
0,40	0,0202	0,0246	0,0270		0,40	0,0142	0,0174	0,0218
0,41	0,0155	0,0201	0,0246		0,41	0,0118		0,0199
0,42	0,0130	0,0177	0,0224		0,42	0,0103		0,0181
0,43	0,0118	0,0161	0,0204		0,43	0,0093		0,0165
0,44	0,0095	0,0140	0,0185		0,44	0,0084		0,0150
0,45	0,0077	0,0123	0,0169		0,45	0,0076		0,0136
0,46	0,0067	0,0110	0,0154		0,46	0,0070		0,0124
0,47	0,0055	0,0098	0,0140		0,47	0,0070		0,0113
0,48	0,0042	0,0085	0,0127		0,48	0,0069		0,0113
0,49	0,0034	0,0075	0,0116		0,49	0,0065		0,0094
0,50	0,0027	0,0071	0,0116		0,50	0,0068		0,0094
M0	1,2915	1,2893	1,2388		M0	0,0977	0,0970	0,1041

x=¼ y=½					x=½ y=½			
Tijd					Tijd			
	impuls	modflow	analytisch			impuls	modflow	analytisch
0,00	1,1146	0,9993	1,0094		0,00	1,3310	1,0000	1,0194
0,01	0,9173	0,9164	0,9221		0,01	1,1106	0,9942	0,9984
0,02	0,7550	0,7682	0,7689		0,02	0,9267	0,9407	0,9509
0,03	0,6214	0,6349	0,6334		0,03	0,7733	0,8357	0,8419
0,04	0,5114	0,5230	0,5204		0,04	0,6453	0,7142	0,7154
0,05	0,4209	0,4304	0,4272		0,05	0,5384	0,5985	0,5965
0,06	0,3464	0,3542	0,3507		0,06	0,4493	0,4968	0,4931
0,07	0,2851	0,2914	0,2879		0,07	0,3749	0,4105	0,4061
0,08	0,2347	0,2398	0,2363		0,08	0,3128	0,3384	0,3338
0,09	0,1931	0,1973	0,1940		0,09	0,2610	0,2787	0,2742
0,10	0,1590	0,1623	0,1592		0,10	0,2178	0,2294	0,2251
0,11	0,1308	0,1335	0,1307		0,11	0,1817	0,1888	
0,12	0,1077	0,1099	0,1073		0,12	0,1516	0,1554	
0,13	0,0886	0,0904	0,0881		0,13	0,1265	0,1278	0,1246
0,14	0,0729	0,0744	0,0723		0,14	0,1056	0,1052	
0,15	0,0600	0,0612	0,0593		0,15	0,0881	0,0865	
0,16	0,0494	0,0504	0,0487		0,16	0,0735	0,0712	
0,17	0,0407	0,0414	0,0400		0,17	0,0613	0,0586	0,0566
0,18	0,0335	0,0341	0,0328		0,18	0,0512	0,0482	
0,19	0,0275	0,0280	0,0269		0,19	0,0427	0,0397	
0,20	0,0227	0,0231	0,0221		0,20	0,0356	0,0326	0,0313
0,21	0,0187	0,0190	0,0182		0,21	0,0297	0,0269	
0,22	0,0154	0,0156	0,0149		0,22	0,0248	0,0221	
0,23	0,0126	0,0129	0,0122		0,23	0,0207	0,0182	0,0173
0,24	0,0104	0,0106			0,24	0,0173	0,0150	
0,25	0,0086	0,0087			0,25	0,0144	0,0123	
0,26	0,0070	0,0072			0,26	0,0120	0,0101	
0,27	0,0058	0,0059	0,0056		0,27	0,0100	0,0083	0,0079
0,28	0,0048	0,0048			0,28	0,0084	0,0069	
0,29	0,0039	0,0040			0,29	0,0070	0,0056	
0,30	0,0032	0,0033	0,0031		0,30	0,0058	0,0046	0,0043
0,31	0,0027	0,0027			0,31	0,0049	0,0038	
0,32	0,0022	0,0022			0,32	0,0041	0,0031	
0,33	0,0018	0,0018			0,33	0,0034	0,0026	
0,34	0,0015	0,0015			0,34	0,0028	0,0021	
0,35	0,0012	0,0012	0,0011		0,35	0,0024	0,0017	0,0016
0,36	0,0010	0,0010			0,36	0,0020	0,0014	
0,37	0,0008	0,0008			0,37	0,0016	0,0012	
0,38	0,0007	0,0007			0,38	0,0014	0,0010	
0,39	0,0006	0,0006			0,39	0,0011	0,0008	
0,40	0,0005	0,0005	0,0004		0,40	0,0010	0,0007	0,0006
0,41	0,0004	0,0004			0,41	0,0008	0,0005	
0,42	0,0003	0,0003			0,42	0,0007	0,0004	
0,43	0,0003	0,0003			0,43	0,0006	0,0004	
0,44	0,0002	0,0002			0,44	0,0005	0,0003	
0,45	0,0002	0,0002	0,0002		0,45	0,0004	0,0002	0,0002
0,46	0,0001	0,0001			0,46	0,0003	0,0002	
0,47	0,0001	0,0001			0,47	0,0003	0,0002	
0,48	0,0001	0,0001			0,48	0,0002	0,0001	
0,49	0,0001	0,0001			0,49	0,0002	0,0001	
0,50	0,0001	0,0001	0,0001		0,50	0,0002	0,0001	0,0001
M0	6,2979	6,2703			M0	8,0379	7,9023	

0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
0,000E+00	1,285E+02	2,005E+02	8,254E+02	9,772E+02	4,684E+02	2,757E+02	2,334E+02	1,716E+02	1,752E+02	1,668E+02	4,777E+02	6,690E+02	6,885E+02	4,544E+02	2,528E+02	1,459E+03	1,308E+03	0,000E+00
0,000E+00	1,248E+02	3,426E+02	1,784E+02	2,154E+02	2,142E+02	7,748E+02	6,971E+02	1,133E+02	4,694E+01	2,334E+02	1,912E+02	2,824E+02	3,500E+02	3,074E+02	2,987E+02	2,997E+02	3,825E+02	0,000E+00
0,000E+00	1,430E+02	9,835E+02	1,023E+03	1,216E+03	1,208E+03	2,592E+03	1,568E+03	1,150E+03	2,686E+02	9,735E+01	2,279E+02	1,704E+02	2,510E+02	7,339E+02	4,505E+02	8,140E+02	8,170E+02	0,000E+00
0,000E+00	3,740E+02	2,655E+02	1,174E+03	1,309E+03	1,417E+03	1,972E+03	1,856E+03	1,646E+03	1,213E+03	2,026E+02	1,542E+02	4,465E+02	2,614E+02	4,483E+02	4,138E+02	7,862E+02	1,162E+03	0,000E+00
0,000E+00	7,182E+02	2,969E+02	1,832E+03	1,976E+03	1,511E+03	2,075E+03	2,145E+03	2,024E+03	1,749E+03	1,043E+03	2,043E+02	1,869E+02	3,191E+02	3,639E+02	1,488E+02	6,089E+02	7,312E+02	0,000E+00
0,000E+00	5,724E+02	3,678E+02	1,946E+03	2,550E+03	2,319E+03	2,594E+03	2,800E+03	2,829E+03	2,525E+03	1,993E+03	1,499E+03	2,021E+02	1,338E+02	1,033E+02	1,618E+02	5,026E+02	4,912E+02	0,000E+00
0,000E+00	2,770E+02	1,325E+03	2,247E+03	3,092E+03	2,955E+03	3,023E+03	3,033E+03	3,137E+03	3,001E+03	2,480E+03	2,140E+03	1,823E+03	4,088E+02	3,928E+02	9,878E+01	9,839E+01	4,143E+02	0,000E+00
0,000E+00	3,037E+02	1,355E+03	2,354E+03	2,921E+03	3,229E+03	3,536E+03	3,849E+03	3,715E+03	3,469E+03	2,840E+03	2,658E+03	2,016E+03	5,386E+02	5,073E+02	3,379E+02	3,885E+02	1,837E+02	0,000E+00
0,000E+00	4,588E+02	6,739E+02	2,399E+03	2,933E+03	3,267E+03	3,524E+03	3,862E+03	3,610E+03	5,009E+03	3,369E+03	2,885E+03	2,343E+03	1,146E+03	2,215E+02	1,333E+02	7,069E+02	7,820E+01	0,000E+00
0,000E+00	9,709E+02	4,132E+02	2,363E+03	2,919E+03	3,326E+03	3,658E+03	3,911E+03	3,526E+03	3,875E+03	3,427E+03	3,298E+03	2,468E+03	1,747E+03	1,451E+02	3,377E+02	2,089E+02	1,085E+02	0,000E+00
0,000E+00	1,162E+03	3,242E+02	2,212E+03	2,808E+03	3,354E+03	3,803E+03	4,094E+03	3,546E+03	3,827E+03	3,760E+03	2,947E+03	2,551E+03	1,879E+03	3,155E+02	2,788E+02	5,604E+01	5,805E+02	0,000E+00
0,000E+00	1,293E+03	3,838E+02	2,128E+03	2,749E+03	3,234E+03	3,724E+03	4,134E+03	3,556E+03	5,124E+03	3,313E+03	3,031E+03	2,545E+03	1,775E+03	3,258E+02	5,808E+02	1,384E+02	5,754E+02	0,000E+00
0,000E+00	1,394E+03	3,737E+02	1,989E+03	2,599E+03	3,110E+03	3,515E+03	3,779E+03	3,643E+03	4,160E+03	3,425E+03	3,538E+03	2,467E+03	1,458E+03	3,728E+02	3,110E+02	5,168E+02	1,397E+02	0,000E+00
0,000E+00	1,472E+03	3,416E+02	1,784E+03	2,315E+03	2,826E+03	3,070E+03	3,246E+03	3,475E+03	3,338E+03	3,936E+03	3,410E+03	2,278E+03	1,364E+03	3,310E+02	2,758E+02	1,045E+03	1,190E+02	0,000E+00
0,000E+00	1,538E+03	3,177E+02	1,485E+03	1,978E+03	2,550E+03	2,880E+03	3,010E+03	3,102E+03	2,988E+03	2,891E+03	2,669E+03	1,956E+03	1,014E+03	2,002E+02	1,827E+02	1,080E+03	9,670E+01	0,000E+00
0,000E+00	1,626E+03	4,911E+02	2,564E+02	8,274E+02	2,022E+03	2,392E+03	2,564E+03	2,622E+03	2,546E+03	2,350E+03	1,977E+03	9,705E+02	3,366E+02	1,762E+02	3,418E+02	2,926E+02	1,223E+02	0,000E+00
0,000E+00	1,698E+03	8,861E+02	9,515E+02	2,050E+02	8,860E+02	1,601E+03	1,704E+03	1,795E+03	1,712E+03	1,609E+03	1,355E+03	2,737E+02	8,877E+02	3,555E+02	4,943E+02	1,887E+03	5,880E+02	0,000E+00
0,000E+00	1,892E+03	1,110E+03	5,431E+02	6,343E+02	1,982E+02	2,331E+02	2,535E+02	2,535E+02	1,805E+02	2,277E+02	1,786E+02	1,779E+02	5,679E+02	3,609E+02	2,642E+02	1,408E+03	9,657E+02	0,000E+00
0,000E+00	1,331E+03	7,789E+02	8,797E+02	1,258E+03	1,105E+03	5,488E+02	3,701E+02	2,767E+02	2,809E+02	3,241E+02	3,027E+02	1,847E+02	2,581E+02	5,023E+02	2,539E+02	1,089E+03	8,648E+02	0,000E+00
0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

Bijlage V
Tijdsmomenten voor 'Wierden Case'

0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
0,000E+00	2,919E+03	8,209E+03	5,599E+04	7,261E+04	3,109E+04	1,346E+04	1,000E+04	6,665E+03	7,106E+03	8,245E+03	3,752E+04	6,093E+04	6,415E+04	3,392E+04	1,576E+04	2,958E+05	1,986E+05	0,000E+00
0,000E+00	3,413E+03	1,911E+04	9,814E+03	1,227E+04	1,419E+04	8,077E+04	7,190E+04	7,866E+03	2,145E+03	1,183E+04	8,409E+03	1,325E+04	1,980E+04	1,511E+04	1,237E+04	1,666E+04	1,698E+04	0,000E+00
0,000E+00	6,084E+03	8,943E+04	1,155E+05	1,486E+05	1,761E+05	5,071E+05	2,764E+05	1,809E+05	3,084E+04	7,602E+03	1,496E+04	9,463E+03	9,328E+03	3,965E+04	3,085E+04	6,990E+04	1,037E+05	0,000E+00
0,000E+00	2,493E+04	1,475E+04	7,258E+04	9,601E+04	1,362E+05	3,255E+05	2,805E+05	2,248E+05	1,519E+05	1,732E+04	1,290E+04	3,898E+04	1,518E+04	1,567E+04	2,375E+04	7,454E+04	1,652E+05	0,000E+00
0,000E+00	6,671E+04	2,150E+04	1,648E+05	2,279E+05	1,060E+05	2,592E+05	2,326E+05	2,883E+05	2,034E+05	7,832E+04	2,077E+04	1,788E+04	2,554E+04	2,075E+04	5,080E+03	5,631E+04	8,662E+04	0,000E+00
0,000E+00	4,509E+04	2,999E+04	2,246E+05	2,862E+05	1,196E+05	3,681E+05	3,173E+05	5,769E+05	2,631E+05	3,484E+05	2,577E+05	2,729E+04	1,304E+04	5,250E+03	5,030E+03	3,539E+04	4,123E+04	0,000E+00
0,000E+00	2,040E+04	1,187E+05	2,426E+05	4,249E+05	1,945E+05	4,646E+05	4,312E+05	5,181E+05	6,546E+05	3,996E+05	3,966E+05	2,976E+05	5,527E+04	3,413E+04	2,976E+03	3,039E+03	2,090E+04	0,000E+00
0,000E+00	2,785E+04	1,351E+05	2,321E+05	3,917E+05	2,334E+05	4,899E+05	6,829E+05	6,662E+05	8,590E+05	5,919E+05	4,666E+05	3,322E+05	7,298E+04	5,265E+04	1,879E+04	2,306E+04	5,537E+03	0,000E+00
0,000E+00	5,939E+04	6,486E+04	3,412E+05	3,155E+05	2,206E+05	4,586E+05	5,857E+05	7,850E+05	2,079E+06	8,472E+05	4,592E+05	4,407E+05	1,580E+05	2,041E+04	5,776E+03	6,554E+04	1,575E+03	0,000E+00
0,000E+00	1,578E+05	4,106E+04	3,180E+05	3,579E+05	3,717E+05	6,395E+05	7,840E+05	5,990E+05	5,952E+05	8,350E+05	6,404E+05	4,305E+05	2,476E+05	1,307E+04	2,079E+04	1,178E+04	3,632E+03	0,000E+00
0,000E+00	2,086E+05	3,185E+04	2,455E+05	3,153E+05	3,815E+05	4,517E+05	9,175E+05	7,377E+05	9,550E+05	1,043E+06	6,386E+05	5,205E+05	3,310E+05	3,148E+04	1,736E+04	1,798E+03	5,098E+04	0,000E+00
0,000E+00	2,488E+05	3,944E+04	2,960E+05	3,801E+05	4,007E+05	4,602E+05	8,499E+05	7,466E+05	1,169E+06	6,524E+05	6,657E+05	5,042E+05	2,571E+05	3,086E+04	4,752E+04	6,246E+03	5,041E+04	0,000E+00
0,000E+00	2,926E+05	3,943E+04	2,349E+05	3,661E+05	3,133E+05	4,862E+05	5,993E+05	8,153E+05	1,212E+06	4,083E+05	8,698E+05	4,223E+05	9,685E+04	3,256E+04	2,018E+04	4,459E+04	5,540E+03	0,000E+00
0,000E+00	3,107E+05	3,386E+04	1,807E+05	2,290E+05	3,217E+05	3,888E+05	4,875E+05	7,278E+05	6,748E+05	5,816E+05	4,044E+05	3,093E+05	1,112E+05	2,574E+04	1,639E+04	1,409E+05	2,933E+03	0,000E+00
0,000E+00	3,348E+05	3,027E+04	1,817E+05	2,249E+05	3,146E+05	3,276E+05	3,807E+05	4,030E+05	3,551E+05	4,684E+05	3,057E+05	2,034E+05	6,970E+04	1,176E+04	8,145E+03	1,516E+05	2,003E+03	0,000E+00
0,000E+00	3,662E+05	4,573E+04	2,421E+04	9,152E+04	2,553E+05	2,793E+05	3,061E+05	3,031E+05	3,480E+05	2,679E+05	2,972E+05	1,218E+05	2,756E+04	8,834E+03	2,097E+04	2,904E+04	3,265E+03	0,000E+00
0,000E+00	3,882E+05	8,203E+04	9,855E+04	1,724E+04	9,707E+04	1,821E+05	1,860E+05	1,634E+05	1,600E+05	1,744E+05	1,413E+05	2,474E+04	9,450E+04	2,388E+04	4,727E+04	4,860E+05	5,557E+04	0,000E+00
0,000E+00	3,820E+05	9,553E+04	4,591E+04	4,471E+04	1,390E+04	1,525E+04	1,561E+04	1,694E+04	1,086E+04	1,403E+04	9,351E+03	8,452E+03	2,847E+04	1,684E+04	1,619E+04	3,130E+05	8,785E+04	0,000E+00
0,000E+00	2,718E+05	6,687E+04	1,105E+05	1,959E+05	1,565E+05	6,224E+04	3,157E+04	1,626E+04	1,520E+04	1,716E+04	1,462E+04	5,816E+03	9,497E+03	3,777E+04	1,245E+04	1,904E+05	1,189E+05	0,000E+00
0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

BEGRIP	BESCHRIJVING
abiotisch	behorend tot de niet levende natuur
biotisch	behorend tot de levende natuur
duurlijn	lijn die het verloop van een bepaalde tijd weergeeft, uitgaande van de gesommeerde tijd waarin die factor een bepaalde waarde aanneemt; hierbij gebruikt voor de stijghoogte van het grondwater
duurlijnenmethode	een methode om te toetsen of een bepaalde ingreep via veranderingen in de grondwaterstand leidt tot veranderingen in de vegetatie
ecohydrologie	de wetenschap die de directe en indirecte relaties tussen hydrologie en ecologie bestudeert, waarbij de ecologie als indivatie van de hydrologische karakteristiek wordt gebruikt en omgekeerd de hydrologische karakteristiek de potenties van de ecologie kan duiden
ecologie	de wetenschap van de relatie tussen levende systemen en hun omgeving en de eigenschappen van beide
gewasfactor	factor die de openwaterverdamping corrigeert voor de aard van het verdampende gewas
grondwaterafhankelijke vegetaties (freatofyten)	aan de invloedssfeer van grondwater gebonden planten
grondwaterregime	alle factoren die van invloed zijn op de grondwaterbewegingen
HYCOSTAT	Computerprogramma dat gegevens over peilbuizen en vegetatie opslaan en beheren. Het kan duurlijnen berekenen en opslaan en koppelen aan bijbehorende vegetaties.
hydrologie	de leer van het voorkomen, het gedrag en de chemische en fysische eigenschappen van water in al zijn verschijningsvormen op en beneden het aardoppervlak, uitgezonderd het water in de zeeën en oceanen.
model	geschematiseerde voorstelling van de werkelijkheid of een deel daarvan.
modelcode	Computerprogramma waarmee al dan niet stationaire berekeningen gemaakt kunnen worden van een (grondwater) model.
openwaterverdamping	de mate van verdamping van onafgeschermd water

BEGRIP	BESCHRIJVING
oppervlaktewater	het water dat stroomt over of verblijft op het aardoppervlak
standplaatsfactoren	variabele eigenschappen van een standplaats, waaraan eeb statisch verklarend kenmerk ontleend kan worden met betrekking tot de bestaansvoorwaarden voor de planten.
stijghoogte	het drukverschil van het grondwater ten opzichte van de atmosferische druk, d.w.z. het niveau tot waar het grondwater in een bepaalde laag stijgt ten opzichte van een zeker referentieniveau
tijdsmomenten	Onveranderlijke gebiedskenmerken die zekere hydrologische gedragingen van een gebied typeren