Statistische evaluatie invloed grondwaterwinning Rodenmors en wateraanvoer op grondwaterstanden

Icastat
Statistisch Adviesbureau

mei 2005

Statistische evaluatie invloed grondwaterwinning Rodenmors en wateraanvoer op grondwaterstanden

Opdrachtgever: Vitens NV

Auteur:
drs. Paul K. Baggelaar

mei 2005

Icastat
Statistisch Adviesbureau

Niagara 18
1186 JP AMSTELVEEN
Tel.: 020 641 52 11
paul.baggelaar@planet.nl

INHOUD

SAMENVATTING **3**

1 INLEIDING **5**

1.1 PROBLEEMSTELLING 5
1.2 DOELSTELLING VAN DIT PROJECT 5
1.3 HOOFDLIJNEN VAN DE AANPAK 5
1.4 OVER DIT RAPPORT 6

2 GEBIEDSINVENTARISATIE **7**

2.1 GEOGRAFISCHE EN GEOHYDROLOGISCHE SITUATIE 7
2.2 METEOROLOGISCHE OMSTANDIGHEDEN 8
2.3 GRONDWATERONTTREKKINGEN 9
2.3.1 Grondwaterwinning Rodenmors 9
2.3.2 Bronbemaling op winplaats 11
2.3.3 Industriële grondwaterwinningen 11
2.4 WATERHUISHOUDKUNDIGE SITUATIE 11
2.4.1 Het wateraanvoerplan Rodenmors 11
2.4.2 Waterbalans van het wateraanvoergebied 15

3 AANPAK VAN DE TIJDREEKSANALYSE **17**

3.1 SELECTIE GRONDWATERSTANDSREEKSEN 17
3.2 HOOFDKEUZEN VOOR DE MODELONTWIKKELING 17
3.2.1 Meest geschikte tijdseenheid voor het modelleren 18
3.2.2 Verdiscontering meteorologische omstandigheden 18
3.2.3 Verdiscontering grondwaterwinning Rodenmors 19
3.2.4 Verdiscontering bronbemaling voor pompstation Rodenmors 19
3.2.5 Verdiscontering aanvoer van oppervlaktewater (en het peilbeheer) 19
3.2.6 Modelverificatie 20

4 RESULTATEN TIJDREEKSANALYSE **22**

4.1 GEHANTEERDE ALGEMENE MODELVORM 22
4.2 GESCHATTE RELATIES GRONDWATERSTAND EN WINNING RODENMORS 22
4.3 GESCHATTE RELATIES GRONDWATERSTAND EN WATERAANVOER 26
4.4 VERGELIJKING GERAAMDE INVLOEDEN MET VOORAF GERAAMDE INVLOEDEN 28

5 CONCLUSIES EN AANBEVELING **29**

5.1 CONCLUSIES 29
5.2 AANBEVELING 29

REFERENTIES **30**

BIJLAGE 1: ALGEMENE TOELICHTING OP DE BOX-JENKINS-METHODE **31**

BIJLAGE 2: ALGEMENE GEGEVENS PEILFILTERS EN MEETREEKSEN **37**

BIJLAGE 3: GRAFIEKEN GRONDWATERSTANDSREEKSEN **38**

BIJLAGE 4: ONTWIKKELDE TIJDREEKSMODELLEN VAN DE GRONDWATERSTAND **48**

BIJLAGE 5: GRAFIEKEN INVLOED WATERAANVOER OP DE GRONDWATERSTAND **50**

KAART 1 – LOCATIES PEILBUIZEN EN POMPPUTTEN WINNING RODENMORS **55**

KAART 2: INVLOED WINNING RODENMORS OP GRONDWATERSTAND 1E WVP **56**

KAART 3: INVLOED WINNING RODENMORS OP STIJGHOOGTE 2E WVP **57**

KAART 4: INVLOED WATERAANVOER IN ZOMER OP GRONDWATERSTAND 1E WVP ... 58

KAART 5: NETTO-INVLOED OP GRONDWATERSTAND 1E WVP IN ZOMER..... 59

Samenvatting

In dit onderzoek is met statistische analyse vastgesteld in welke mate de grondwaterwinning Rodenmors en het wateraanvoerplan Rodenmors de grondwaterstanden in de omgeving hebben beïnvloed. De grondwaterwinning Rodenmors is in juli 1999 gestart. Ter compensatie van zijn invloed op de grondwaterstanden is in april 1999 het wateraanvoerplan Rodenmors gestart met de aanvoer van oppervlaktewater naar dit gebied.

Waterbalans van het wateraanvoergebied
Om een beeld te krijgen van de omvang en relevantie van de waterstromen in het wateraanvoergebied, hebben we eerst een waterbalans opgesteld, waarbij de volgende vier waterstromen konden worden betrokken: 1) het potentieel neerslagoverschot (bepaald door het verschil tussen neerslag en verdamping), 2) de inlaat van oppervlaktewater, 3) de grondwaterwinning Rodenmors en 4) de uitlaat van oppervlaktewater. De jaarlijkse hoeveelheid ingelaten oppervlaktewater in dit gebied heeft steeds tussen de 65% en 85% geschommeld van de jaarlijkse hoeveelheid gewonnen water op de winplaats Rodenmors. Die winning zal echter ook grondwater uit het diepe watervoerende pakket onttrekken dat van buiten het wateraanvoergebied komt. Verder blijkt dat de inlaat van oppervlaktewater 's zomers zorgt voor een redelijke aanvulling van de waterbalans en in die perioden meer bedraagt dan de winning Rodenmors.

Statistische analyse grondwaterstandsreeksen
Voor deze studie zijn 29 grondwaterstandsreeksen geanalyseerd, die zijn gemeten in 19 peilbuizen binnen een straal van circa 3 km rond de winning Rodenmors. Het betreft 19 reeksen die zijn gemeten in het ondiepe watervoerende pakket en 10 reeksen die zijn gemeten in het diepe watervoerende pakket (het pakket waaruit de winning Rodenmors grondwater onttrekt).

De kern van de gehanteerde methode is dat er per grondwaterstandsreeks een statistisch model wordt ontwikkeld dat de statistische relaties legt tussen de grondwaterstand en zijn kandidaat-invloedsfactoren. Voor onze probleemstelling zijn dat de meteorologische grondwateraanvulling (vertegenwoordigd door het potentieel neerslagoverschot), de winning Rodenmors en de wateraanvoer naar het slotenstelsel rond de winning. Aangezien het aannemelijk is dat de invloed van de wateraanvoer mede afhangt van de diepte van de grondwaterspiegel, is de aanvoer van oppervlaktewater opgesplitst naar twee mogelijke invloedsfactoren, namelijk de zomer- en de winteraanvoer. Deze aanpak komt neer op een statistische reconstructie van de relaties tussen een gemodelleerde grondwaterstandsreeks en zijn mogelijke invloedsfactoren.

Invloed van de winning Rodenmors op de grondwaterstanden
Aan de hand van de resultaten kunnen we de volgende conclusies trekken over de invloed van de winning Rodenmors op de grondwaterstanden in de omgeving:
1. in het diepe watervoerende pakket is een duidelijke verlagingskegel waar te nemen, die zich uitstrekt tot circa 2 km afstand. De maximaal waargenomen verlaging bedraagt 94 cm, op 540 m van het zwaartepunt van de winning;
2. in het ondiepe watervoerende pakket is geen duidelijke verlagingskegel waar te nemen. Er zijn slechts voor drie grondwaterstandsreeksen verlagingen aangetoond in dit pakket. Deze bedragen respectievelijk 5, 12 en 17 cm. De overige geschatte veranderingen van de grondwaterstand door de winning schommelen rond 0 cm.

Invloed van de aanvoer van oppervlaktewater op de grondwaterstanden
Verder kunnen we de volgende conclusies trekken over de invloed van de aanvoer van oppervlaktewater in het wateraanvoergebied op de grondwaterstanden in het ondiepe watervoerende pakket (de conclusies betreffen de zomers van 2003 en 2004):

1. op de twee locaties waar verlagingen door de winning in dit gebied zijn aangetoond, zorgt de zomerse wateraanvoer voor een zodanige compensering, dat netto nog slechts een gemiddelde verlaging van circa 5 cm resteert. In een enkele zomermaand is er door de wateraanvoer zelfs een netto verhoging van enkele cm;
2. op de locaties waar geen verlagingen door de winning zijn aangetoond, zorgt de zomerse wateraanvoer voor een gemiddelde verhoging van de grondwaterstand van 10 tot 30 cm. Hier gaat de zomerse wateraanvoer dus nog verder dan het compenseren van een eventuele verlaging door de winning.

Conclusie
De wateraanvoer zorgt voor een goede compensering van de invloed van de winning Rodenmors op de grondwaterstanden in het ondiepe watervoerende pakket en gaat op veel locaties zelfs nog verder, door ook een deel van de meteorologische verlaging in de zomermaanden te compenseren.

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft aanpak en bevindingen van een onderzoek naar de effecten van de grondwaterwinning Rodenmors en de aanvoer van oppervlaktewater op de grondwaterstanden en stijghoogten in de omgeving van de winplaats Rodenmors.

1.1 Probleemstelling

In juli 1999 is de grondwaterwinning Rodenmors van Vitens gestart. Ter compensatie van de invloed van deze winning op de grondwaterstanden is het wateraanvoerplan Rodenmors opgezet, als samenwerkingsproject tussen het Waterschap Regge en Dinkel en Vitens. De aanvoer van oppervlaktewater in het kader van dat plan is in april 1999 gestart. In de verleende grondwaterwetvergunning Rodenmors (december 1993) is opgenomen dat Vitens binnen 5 jaar na ingebruikname van de grondwaterwinning een rapport dient te sturen aan de Provincie Overijssel, waarin is beschreven wat het effect is van de winning in combinatie met het wateraanvoerplan op de grondwaterstanden. In dat licht heeft Vitens aan Icastat verzocht om met een statistisch onderzoek de effecten van de grondwaterwinning en de wateraanvoer op de grondwaterstanden en stijghoogten in de omgeving vast te stellen.

1.2 Doelstelling van dit project

De doelstelling van dit project is vast te stellen in welke mate de grondwaterstanden in het ondiepe watervoerende pakket en de stijghoogten in het diepe watervoerende pakket zijn beïnvloed door de grondwaterwinning Rodenmors en het wateraanvoerplan Rodenmors.

1.3 Hoofdlijnen van de aanpak

Wij zullen de invloeden van de grondwaterwinning Rodenmors en het wateraanvoerplan Rodenmors statistisch reconstrueren met tijdreeksanalyse volgens de Box-Jenkins-methode. De kern van de methode is dat er voor elke meetreeks van de grondwaterstand of stijghoogte een model wordt ontwikkeld dat de statistische relaties beschrijft met alle mogelijk relevante invloedsfactoren. In dit onderzoeksgebied zijn dat in ieder geval de meteorologische omstandigheden, de grondwaterwinning Rodenmors en het wateraanvoerplan Rodenmors. Zo kan voor elke gemodelleerde meetreeks worden vastgesteld wat de statistische relaties zijn met de verschillende factoren. Aangezien de analyse tevens het betrouwbaarheidsinterval oplevert van elke geschatte relatie, kan direct worden nagegaan of deze al dan niet statistisch significant is. En door een dergelijke analyse afzonderlijk toe te passen op meerdere grondwaterstandsreeksen in de omgeving, wordt een beeld geschetst van het ruimtelijke patroon van de relatie met de verdrogingsbestrijding.

Instrumentarium

Voor de tijdreeksanalyse hebben wij gebruik gemaakt van TRG, een softwarepakket voor tijdreeksanalyse dat is ontwikkeld met de wiskundige programmeertaal Matlab [Van der Meulen, 2004].

Gebruik van de term 'grondwaterstanden' in dit rapport

Uit overwegingen van efficiëntie zullen wij in dit rapport vanaf hier de term 'grondwaterstanden' meestal in brede zin gebruiken, zodat daarmee naast de grondwaterstanden in het ondiepe, freatische watervoerende pakket ook de stijghoogten van het grondwater in het (gedeeltelijk) afgesloten diepe watervoerende pakket kunnen worden aangeduid.

1.4 Over dit rapport

Na deze inleiding beschrijft hoofdstuk 2 de bevindingen van een gebiedsinventarisatie. In hoofdstuk 3 wordt de aanpak beschreven die we hebben gevolgd bij de tijdreeksanalyse. En hoofdstuk 4 presenteert de resultaten. De conclusies van dit onderzoek worden opgesomd in hoofdstuk 5. Het hoofddeel van dit rapport sluit af met een alfabetische lijst van de referenties.

Dit rapport bevat 5 bijlagen. Bijlage 1 geeft een theoretische toelichting op de gehanteerde methode van tijdreeksanalyse. Bijlage 2 vermeldt de relevante gegevens van de voor dit onderzoek gehanteerde peilfilters en meetreeksen. Bijlage 3 toont de grafieken van de bij dit onderzoek betrokken grondwaterstandsreeksen. Bijlage 4 vermeldt de details van de ontwikkelde tijdreeksmodellen van de grondwaterstandreeksen. Tenslotte presenteert bijlage 5 een aantal grafieken van de invloed van de wateraanvoer op de grondwaterstand.

Achterin dit rapport treft u 5 overzichtskaarten aan. Op kaart 1 zijn de locaties van de peilbuizen en van de pompputten van de winning Rodenmors aangegeven. Kaart 2 toont een ruimtelijke weergave van de geschatte invloed van de grondwaterwinning Rodenmors op de grondwaterstand in het ondiepe watervoerende pakket en kaart 3 van de geschatte invloed op de stijghoogte in het diepe watervoerende pakket. Kaart 4 toont een ruimtelijke weergave van de geschatte invloed van de wateraanvoer in de zomer op de grondwaterstand en kaart 5 van hun som (de netto invloed in de zomer).

2 Gebiedsinventarisatie

Bij het statistisch modelleren van een grondwaterstandsreeks is het van belang om de factoren met relevante invloed op die grondwaterstand zo goed mogelijk bij de modellering te verdisconteren. Dit levert namelijk een zuiverder beeld op van de statistische relaties tussen de verschillende invloedsfactoren en de grondwaterstand. Om vast te kunnen stellen wat hier de mogelijke invloedsfactoren zijn, is een gebiedsinventarisatie uitgevoerd. Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van die inventarisatie, met aandacht voor de geografische en geohydrologische situatie (§ 2.1), de meteorologische omstandigheden (§ 2.2), de grondwateronttrekkingen (§ 2.3) en de waterhuishoudkundige situatie (§ 2.4).

2.1 Geografische en geohydrologische situatie

De winning Rodenmors ligt even ten oosten van Denekamp, vlakbij de Duitse grens. Medio 1999 is Vitens daar begonnen met de waterwinning. In de omgeving komen voornamelijk graslanden voor, evenals enkele verspreid liggende bospercelen. Het maaiveld bevindt zich tussen 22 en 27 meter boven NAP. De hoogteverschillen worden veroorzaakt door dekzandruggen en esgronden.

Het gebied ligt in het zogenaamde bekken van Nordhorn, dat in de voorlaatste ijstijd is uitgesleten door het landijs, waarbij de stuwwallen van Ootmarsum, De Lutte en Uelsen zijn gevormd. Met als basis de ondoorlatende grondmorene – keileem –, is het bekken opgevuld met achtereenvolgens erosiemateriaal, smeltwaterafzettingen, humeuze afzettingen en dekzand gecombineerd met smeltwaterafzettingen.

De ondergrond van de winning Rodenmors kan geohydrologisch worden geschematiseerd tot twee watervoerende pakketten, gescheiden door een slecht doorlatend pakket (zie figuur 2.1). De winning vindt plaats aan het 2e (of diepe) watervoerende pakket.

Figuur 2.1: Schema van de opbouw van de ondergrond van de winning Rodenmors (naar [WMO, 1993]).

Diepte tov mv [m]	Pakket	Samenstelling	Geohydrologische Schematisatie	Bodemconstanten	Winning Rodenmors
0 - 9	Twente	fijn tot grof zand, soms leem en veen	1e wvp	kD = 160 m^2/d	
9 - 12	Brørup	zandige klei en veen	sdp	c = 150 d	
12 - 45	Twente / Drenthe	matig fijn tot grof zand, soms klei	2e wvp	kD = 375 m^2/d	
> 45	Drenthe	keileem	basis	c >>>	

Uit de boorbeschrijvingen van de pompputten blijkt dat het 2e watervoerende pakket ter plaatse van de winplaats tot circa 25 m onder maaiveld nog 1 of 2 kleiïge inschakelingen bevat van elk hooguit 2 à 3 m dikte, zodat er daar sprake is van een lokale opsplitsing van dat pakket in enkele subpakketjes. Maar naar het oosten gaande verdwijnen deze inschakelingen weer.

Het grondwater in het bekken van Nordhorn stroomt in beide watervoerende pakketten doorgaans van zuidoost naar noordwest. De freatische grondwaterstand vertoont regionaal gezien een vrij vlak verloop en bevindt zich ongeveer 0,5 tot 1,5 meter onder maaiveld. Door lokale hoogteverschillen kan de grondwaterstand echter meer verschillen vertonen.

2.2 Meteorologische omstandigheden

De belangrijkste invloedsfactor van de grondwaterstand is doorgaans de grondwateraanvulling, maar daar zijn helaas geen meetgegevens over beschikbaar. Als theoretische benadering van deze factor kan echter het potentieel neerslagoverschot dienen. Dat wordt berekend uit de neerslag en de verdamping, bijvoorbeeld op maandbasis volgens:

$$PNO_m = N_m - E_{Makkink,m}$$

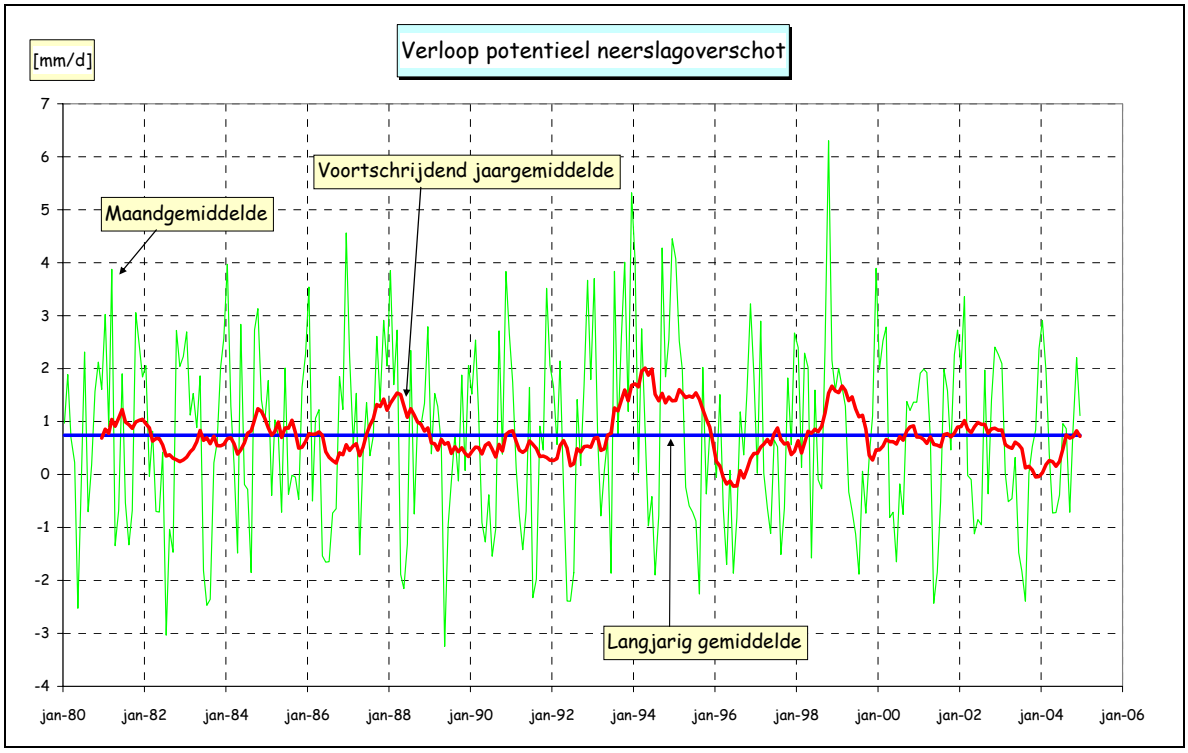
met PNO_m het potentieel neerslagoverschot, N_m de neerslag en $E_{Makkink,m}$ de Makkink-verdamping, alle in maand m (mm/maand). De Makkink-verdamping wordt ook wel de referentie-gewasverdamping genoemd.

Voor deze studie hadden we de beschikking over de volgende meteorologische gegevens:
(1) de neerslag te Denekamp op dagbasis, van 1 januari 1980 t/m 30 september 2003 en op maandbasis van oktober 2003 t/m december 2004;
(2) de Makkink-verdamping op de vliegbasis Twente op dagbasis, van 1 mei 1987 t/m 30 september 2003 en op maandbasis van oktober 2003 t/m december 2004;
(3) de Makkink-verdamping te De Bilt op dagbasis, van 1 januari 1980 t/m 31 december 2002.

Uit de gegevens over de neerslag te Denekamp en de verdamping te Twente hebben we een tijdreeks op maandbasis samengesteld van het potentieel neerslagoverschot, die de periode januari 1980 t/m december 2004 beslaat (zie figuur 2.2). Het ontbrekende deel van de Makkink-verdamping op de vliegbasis Twente (de periode 1 januari 1980 t/m 30 april 1987) is daarbij gereconstrueerd met een lineair regressiemodel dat de relatie tussen deze verdamping en die te De Bilt op dagbasis beschrijft, zoals afgeleid over de periode 1 mei 1987 t/m 31 december 2002. Hun correlatiecoëfficiënt bedraagt over die periode 0,95.
Om te corrigeren voor de maandlengte is elke maandsom van het potentieel neerslagoverschot gedeeld door het aantal dagen in de betreffende maand.

Uit figuur 2.2 blijkt dat de beschouwde periode gekenmerkt wordt door sterk variërende meteorologische situaties, met extreem droge perioden in 1995 en 2003 en extreem natte perioden in 1993 en 1998 (de laatste was echter kortstondiger).

Figuur 2.2: Verloop van het maandgemiddelde van het potentieel neerslagoverschot van januari 1980 t/m december 2004, zoals berekend uit de neerslag te Denekamp en de verdamping te Twente. Tevens zijn het voortschrijdend jaargemiddelde en het langjarig gemiddelde weergegeven.



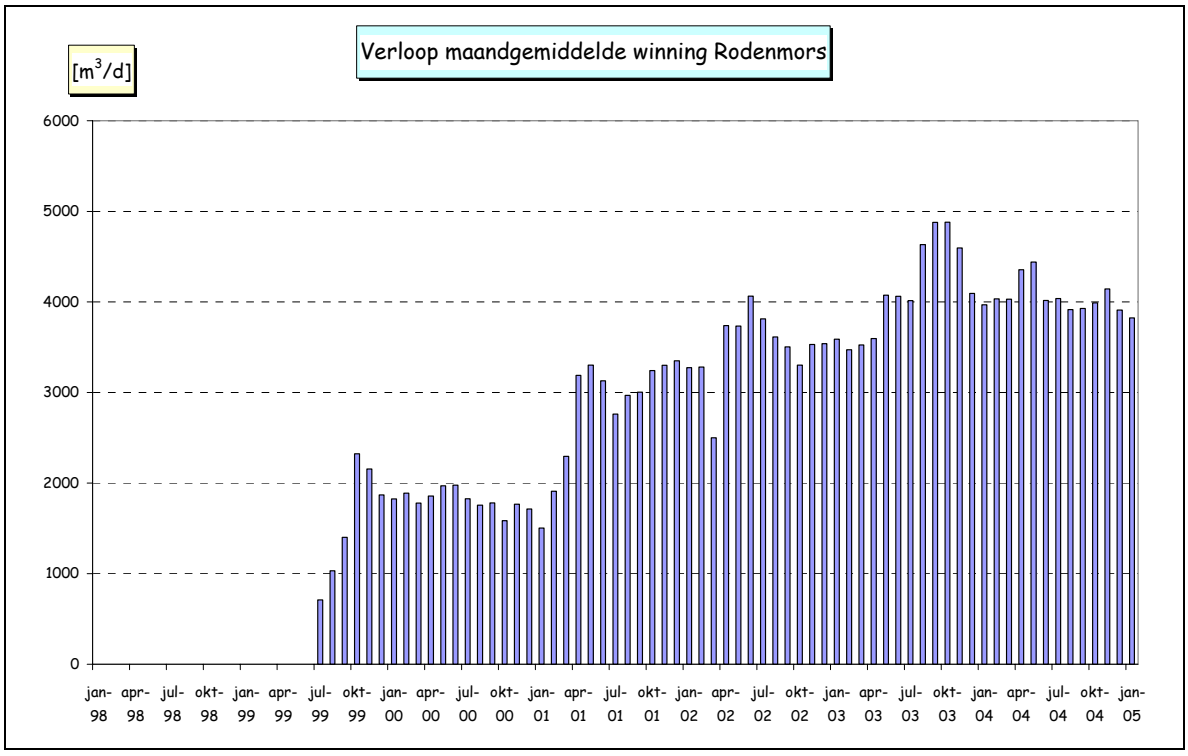
2.3 Grondwateronttrekkingen

De grondwateronttrekkingen in deze omgeving zijn de winning Rodenmors, een bronbemaling en enkele kleinere industriële winningen. Verder is er nog de winning Denekamp van Vitens, gelegen aan de westkant van Denekamp, maar een invloed daarvan op de grondwaterstanden in dit onderzoeksgebied is niet te verwachten, aangezien het een geringe winning betreft (hooguit 0,5 miljoen m^3/jaar) uit het 2e watervoerende pakket, die bovendien op enige afstand is gelegen van de winning Rodenmors (3,1 km).

2.3.1 *Grondwaterwinning Rodenmors*

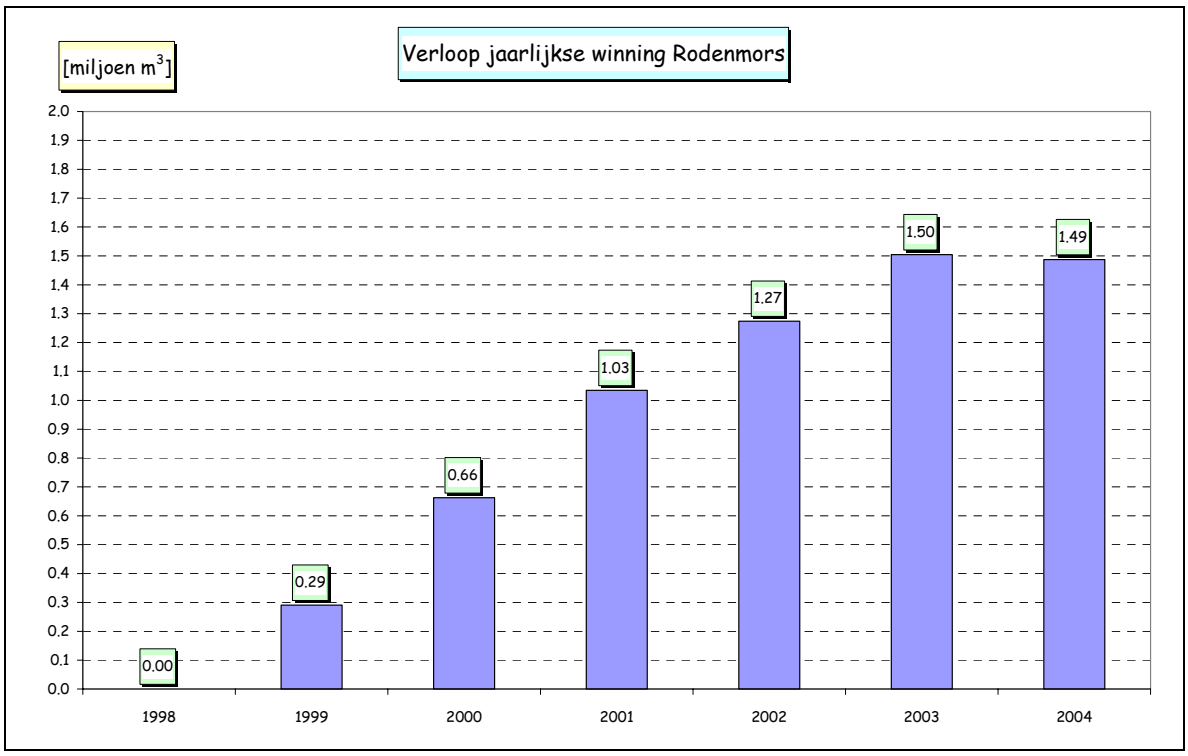
De grondwaterwinning Rodenmors is in juli 1999 gestart met 9 pompputten, waarvan de pompfilters zich globaal tussen 24 en 45 meter onder maaiveld bevinden, in het 2e watervoerende pakket. De onttrekkingshoeveelheden zijn op dagbasis slechts beschikbaar vanaf eind oktober 1999, maar gelukkig beschikte Vitens nog over ramingen van de maandelijkse onttrekkingshoeveelheden van de voorafgaande periode van juli t/m oktober (respectievelijk 22.000, 32.000, 42.000 en 72.000 m^3).
Om te corrigeren voor de maandlengte is de maandgemiddelde onttrekking berekend door de maandsom van de onttrekking te delen door het aantal dagen in de betreffende maand. Het verloop van deze maandgemiddelde onttrekking is weergegeven in figuur 2.3.

Figuur 2.3: Verloop van de maandgemiddelde grondwaterwinning op de winplaats Rodenmors.



Verder is in figuur 2.4 het verloop van de jaarlijkse onttrekking weergegeven. Deze jaarlijkse onttrekking is vanaf de start in medio 1999 geleidelijk toegenomen tot circa 1,5 miljoen m^3 in 2003 en 2004.

Figuur 2.4: Verloop van de jaarlijkse grondwaterwinning op de winplaats Rodenmors.



2.3.2 *Bronbemaling op winplaats*

Ten behoeve van de bouw van het pompstation Rodenmors is bronbemaling toegepast in de periode half april 1997 tot en met februari 1998. Daarbij is totaal circa 136.000 m^3 grondwater onttrokken uit het 1e watervoerende pakket. In de periode van mei 1997 tot oktober 1997 was dit circa 100.000 m^3 (ongeveer 25.000 m^3/mnd) en van oktober 1997 tot en met begin februari 1998 circa 36.000 m^3.

2.3.3 *Industriële grondwaterwinningen*

Er bevinden zich in de onderzoeksomgeving geen relevante industrïele grondwaterwinningen (met een onttrekking van meer dan 100.000 m^3/jaar). Wel zijn er enkele kleine grondwateronttrekkingen geweest. Door een metaalbedrijf in Denekamp is in het jaar 2000 circa 18.000 en in het jaar 2001 circa 16.000 m^3 onttrokken. Het bedrijf bevindt zich in het noordoosten van Denekamp, 1,6 km ten westen van het zwaartepunt van de winning Rodenmors. En door het grenskantoor SuBat is in het jaar 2001 circa 5.000 m^3 onttrokken. Dit bevindt zich 1,6 km ten noordwesten van het zwaartepunt van de winning Rodenmors. Gezien de omvang van deze onttrekkingen en hun afstanden, zullen ze geen invloed hebben gehad op de grondwaterstanden in het onderzoeksgebied.

2.4 Waterhuishoudkundige situatie

In het gebied komen enkele grotere waterlopen voor (zie figuur 2.5). Het kanaal Almelo-Nordhorn loopt langs de noordrand van Denekamp in noordoostelijke richting naar Nordhorn. En aan de oostkant van het onderzoeksgebied, even over de Duitse grens, loopt de Rammelbeek, die zich uitstrekt van het zuidoosten naar het noordwesten. Tenslotte bevindt zich aan de westkant van het gebied het Omleidingskanaal, dat zich uitstrekt van het zuiden naar het noorden en dat het kanaal Almelo-Nordhorn kruist even ten noordoosten van Denekamp. Dit kanaal is begin jaren zestig gegraven, om een groot gedeelte van de afvoer van de Dinkel om te leiden en zo verdere overstromingen in het stroomgebied van die beek te voorkomen.

Gezien hun bodemweerstanden kunnen het kanaal Almelo-Nordhorn en het Omleidingskanaal afhankelijk van de periode zowel een infiltrerende als een drainerende functie hebben [WMO en WRD, 1990; WMO, 1992].

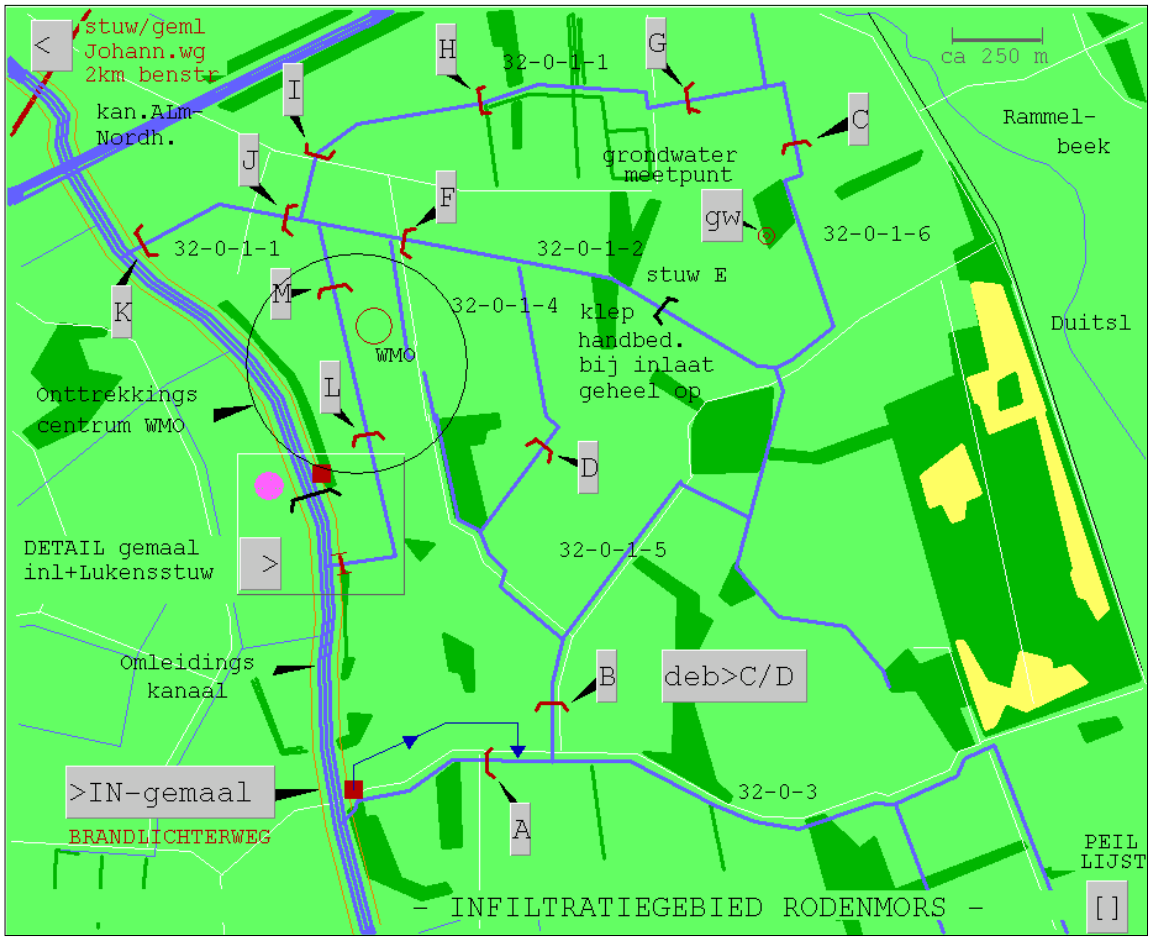
In de jaren zestig is de ruilverkaveling 'Denekampse Veld' in dit gebied uitgevoerd, waarbij de waterhuishouding is aangepast aan landbouwkundige eisen. Het oorspronkelijk zeer dichte slotenstelsel, met veel kleine en ondiepe sloten, is daarbij teruggebracht tot minder watergangen, maar met een grotere diepte.

2.4.1 *Het wateraanvoerplanRodenmors*

In 1998 is het wateraanvoerplan Rodenmors gerealiseerd, als een samenwerkingsproject tussen het Waterschap Regge en Dinkel en het toenmalige WMO[1] (thans Vitens). Het plan beoogt de effecten van de winning Rodenmors terug te dringen, door water vanuit het Omleidingskanaal in het gebied te pompen. Daartoe zijn enkele waterlopen verbeterd en zijn andere toegevoegd. Bovendien zijn twee inlaatlocaties gerealiseerd – het gemaal Brandlichterweg en de inlaat Lukens (zie figuur 2.5) – en zijn in diverse waterlopen stuwen geplaatst, zodat het oppervlaktewaterwater over het gebied kan worden verdeeld en ook op peil kan worden gehouden. Het wateraanvoergebied beslaat een oppervlakte van 431 hectare.

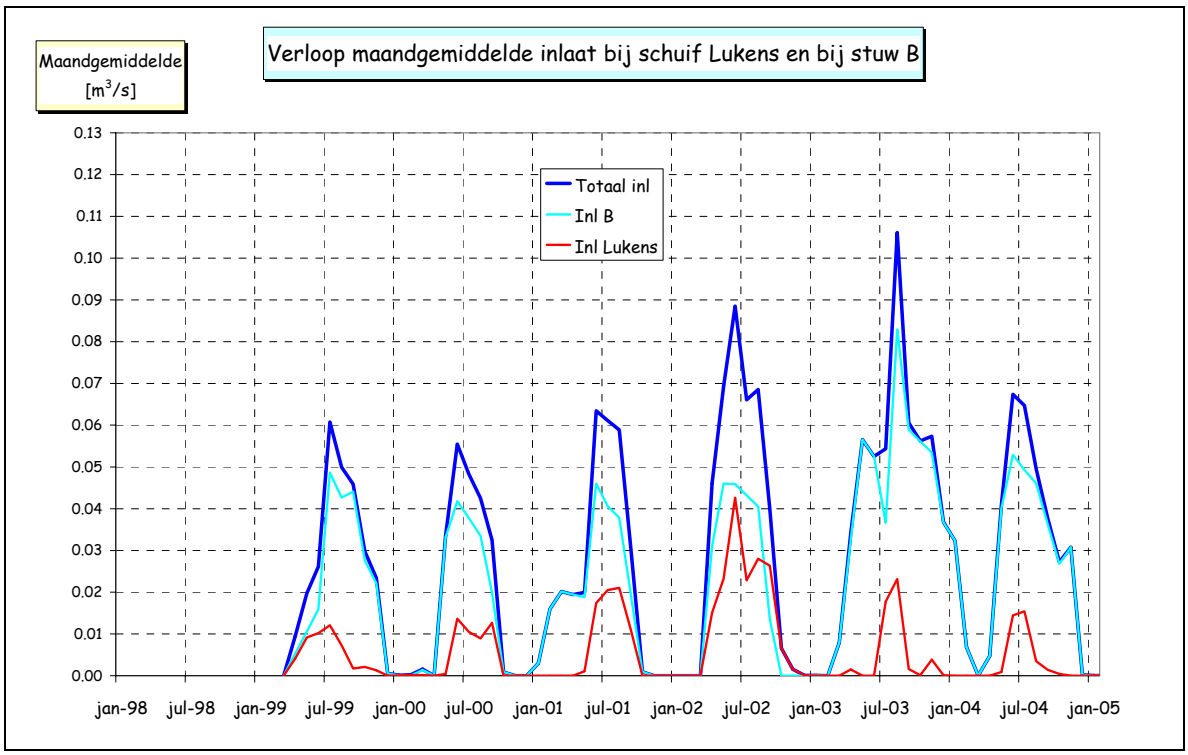
[1] De Waterleiding Maatschappij Overijssel.

Figuur 2.5: Waterlopen, stuwen en gemalen in het wateraanvoergebied Rodenmors.



In april 1999 is gestart met de extra wateraanvoer naar dit gebied. Dit omvat enerzijds water dat bij de inlaat Lukens het gebied binnenstroomt en anderzijds het ingelaten water bij stuw B, dat afkomstig is van het gemaal Brandlichterweg, al dan niet aangevuld met de natuurlijke afvoer uit een gebied ten zuiden van het wateraanvoergebied, ter grootte van 286 hectare. Uit figuur 2.6 blijkt dat de inlaat bij stuw B doorgaans het grootste deel uitmaakt van de totale inlaat van het wateraanvoergebied.

Figuur 2.6: Het verloop van de maandgemiddelde inlaat bij schuif Lukens en bij stuw B, alsmede hun som, zijnde de totale inlaat van het wateraanvoergebied.



Tabel 2.1 vermeldt de jaarsommen van de inlaat over de periode 2000 t/m 2004.

Tabel 2.1: De jaarsommen van de inlaat bij schuif Lukens, bij stuw B en de totale waterinlaat van het wateraanvoergebied, alle over de periode 2000 t/m 2004 (in miljoen m³).

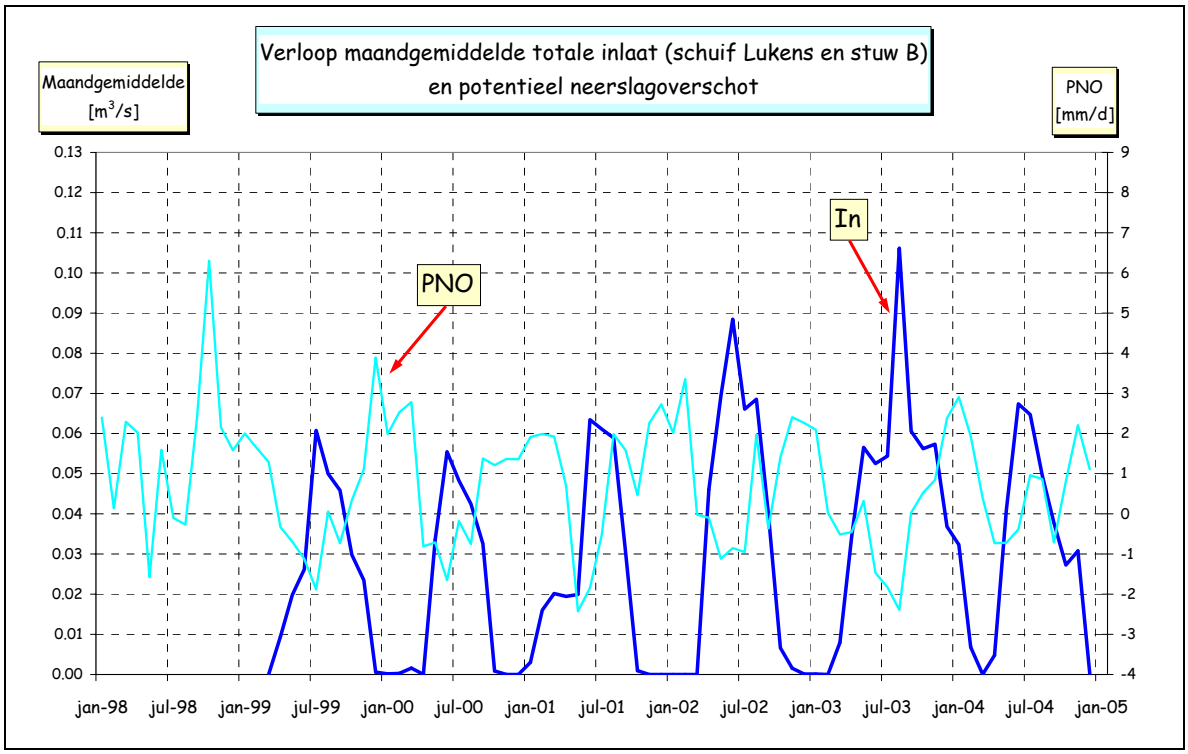
	Inlaat Lukens	Inlaat stuw B	Inlaat Totaal
2000	0.123	0.446	0.569
2001	0.188	0.584	0.771
2002	0.439	0.582	1.020
2003	0.128	1.254	1.383
2004	0.096	0.862	0.958

Aangezien de inlaat dient om het water in het wateraanvoergebied op peil te houden, vindt deze voornamelijk in droge perioden plaats. In figuur 2.7 is te zien dat de inlaat vooral plaatsvindt in perioden met een negatief potentieel neerslagoverschot. De meeste aanvoer vond plaats in het droge jaar 2003, namelijk circa 1,4 miljoen m³.

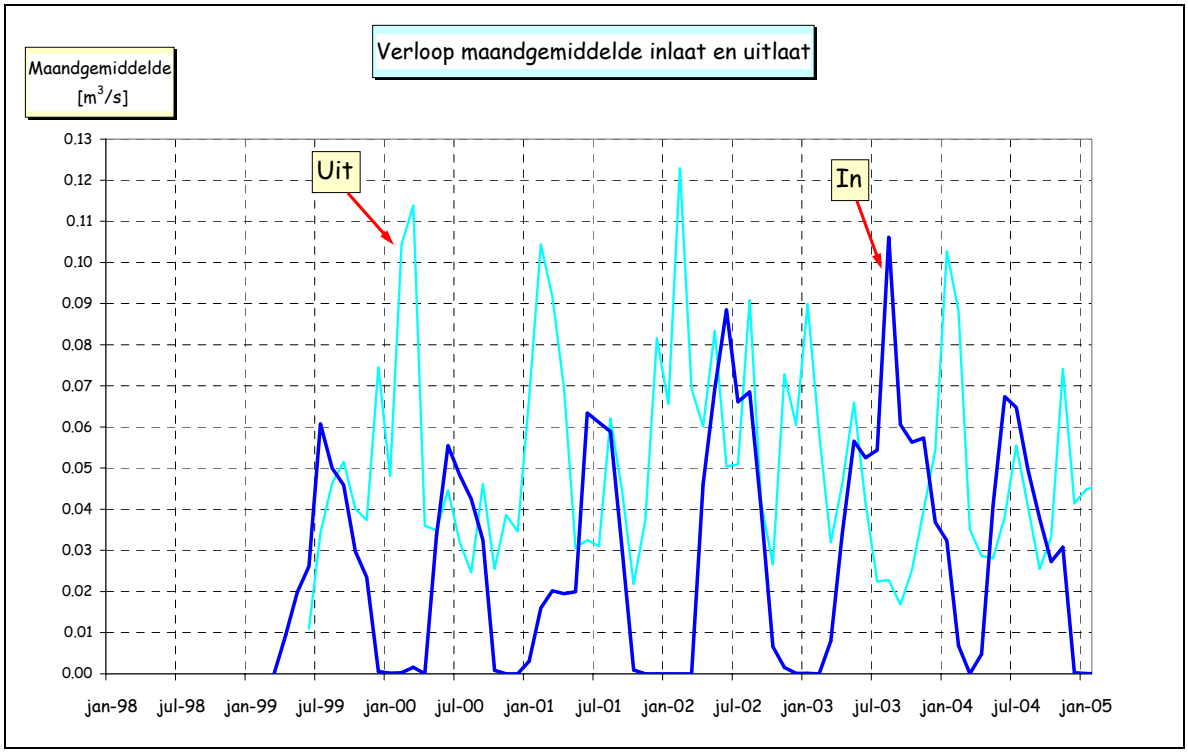
Bij het ontwerpen van het watertoevoerplan is er rekening mee gehouden dat de afvoer van de Dinkel hooguit 14 dagen per jaar zo laag zou zijn (bepaald uit het gemiddelde over de jaren 1976 – 1991), dat inlaat van oppervlaktewater uit het Omleidingskanaal niet mogelijk zou zijn. Maar zelfs in de zeer droge zomer van 2003 bleek inlaat nog elke dag mogelijk. We mogen dus concluderen dat de beschikbaarheid van aan te voeren oppervlaktewater geen probleem vormt.

Bij stuw K wordt het oppervlaktewater uit het gebied weer geloosd op het Omleidingskanaal. In figuur 2.8 is zowel het verloop van de inlaat als het verloop van de uitlaat van het wateraanvoergebied weergegeven, beide op maandbasis.

Figuur 2.7: Het verloop van de maandgemiddelde totale inlaat van het wateraanvoergebied en van het maandgemiddelde potentieel neerslagoverschot.



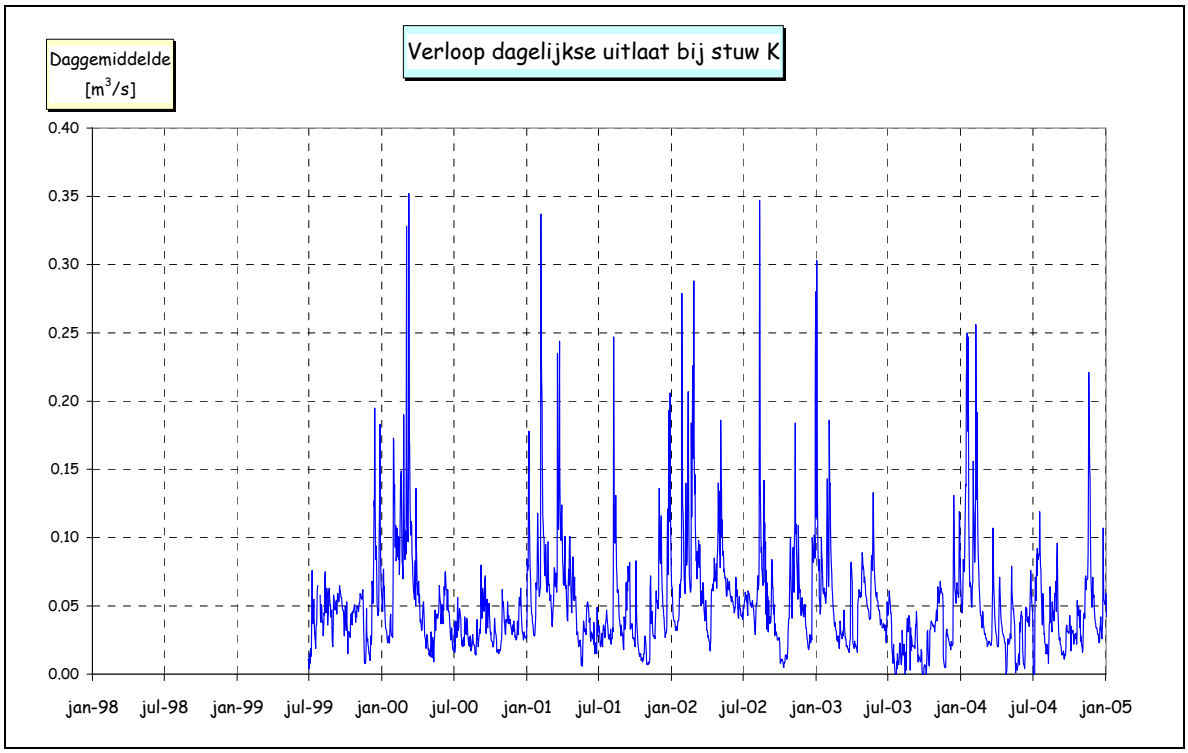
Figuur 2.8: Verloop van de maandgemiddelde inlaat en de maandgemiddelde uitlaat van het wateraanvoergebied.



Figuur 2.9 toont de uitlaat van het wateraanvoergebied bij stuw K op dagbasis. Uit deze figuur blijkt dat er gedurende enkele korte perioden in de zomers van 2003 en 2004 geen uitvoer was. De perioden waren 19 t/m 22 juli, 13 augustus en 26 t/m 29 september 2003 en 2 t/m 5 juli 2004. Aangezien er toen vermoedelijk te weinig water beschikbaar was in

die omgeving, verdient het aanbeveling om in droge perioden meer water in te laten via de schuif Lukens (dit is technisch mogelijk). Die schuif bevindt zich namelijk niet ver van stuw K.

Figuur 2.9: Verloop van de dagelijkse uitlaat van het wateraanvoergebied bij stuw K.



Voor elk stuwvak in het gebied worden zomer- en winterpeilen nagestreefd. Het zomerpeil ligt daarbij ergens tussen de 15 en 45 cm hoger dan het winterpeil. De overgang van winter- naar zomerpeil was meestal in mei of juni en de overgang van zomer- naar winterpeil meestal in september of oktober [Waterschap Regge en Dinkel, 2003].

2.4.2 *Waterbalans van het wateraanvoergebied*

Om een beeld te krijgen van de omvang en relevantie van de waterstromen in het wateraanvoergebied, hebben we een waterbalans van dat gebied opgesteld.

Bij het opstellen van de waterbalans waren meetgegevens beschikbaar over de volgende waterstromen:

1. het potentieel neerslagoverschot,
2. de inlaat van oppervlaktewater (som van de inlaat bij schuif Lukens en bij stuw B),
3. de grondwaterwinning Rodenmors en
4. de uitlaat van oppervlaktewater (bij stuw K).

Behalve door het neerslagoverschot en de inlaat van oppervlaktewater, zal er water het gebied binnenkomen doordat de winning Rodenmors ook grondwater uit het 2e watervoerende pakket onttrekt van *buiten* het wateraanvoergebied. En verder vindt er mogelijk nog aanvulling van grondwater plaats vanuit het Omleidingskanaal en het kanaal Almelo - Norhorn. Van deze twee ingaande waterstromen zijn echter geen meetgegevens beschikbaar, zodat die niet konden worden verdisconteerd in de waterbalans.

Het potentieel neerslagoverschot is omgerekend tot een waterstroom, door deze variabele te vermenigvuldigen met het oppervlak van het wateraanvoergebied (431 hectare). De waterbalans is berekend als de som van de vier bekende waterstromen, waarbij de ingaande

hoeveelheden (het potentieel neerslagoverschot in neerslagrijke perioden en het ingaande oppervlaktewater) positief meetelden en de uitgaande hoeveelheden (het potentieel neerslagoverschot in droge perioden, de grondwaterwinning Rodenmors en de uitlaat van oppervlaktewater) negatief meetelden.

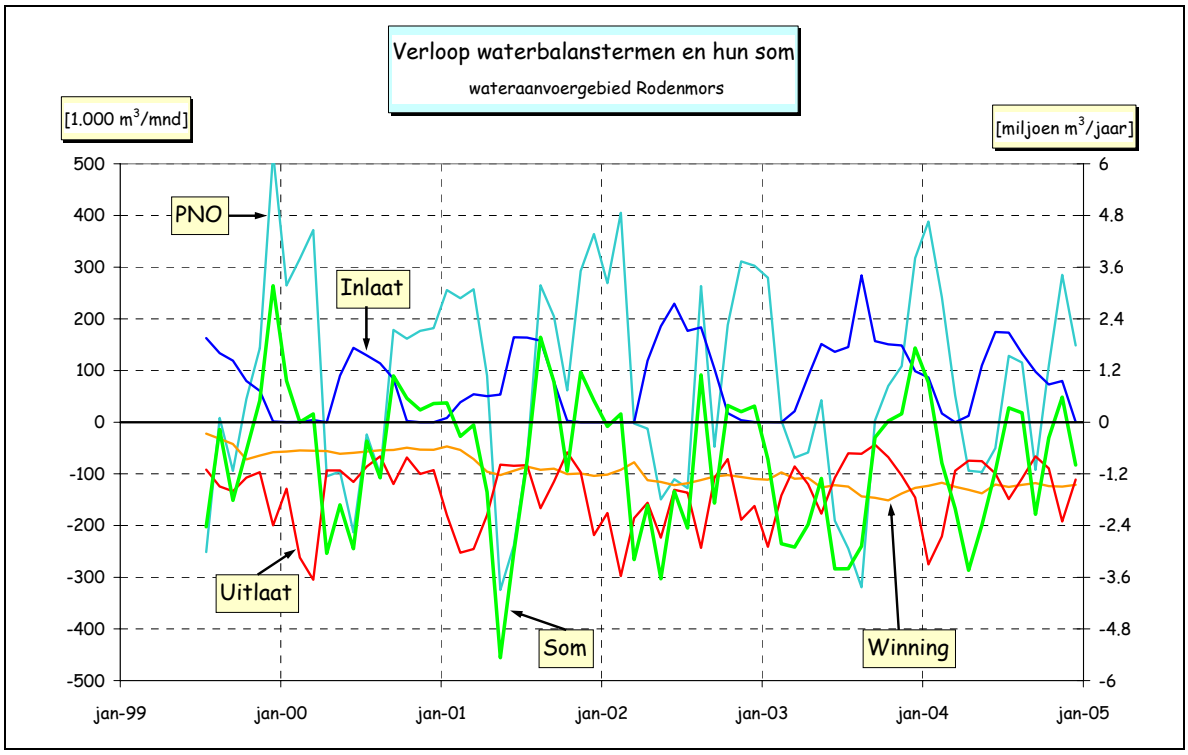
Het verloop van de vier bekende waterstromen en van hun som is op maandbasis weergegeven in figuur 2.10. Uit de figuur blijkt dat de som van de waterbalans het sterkst is gecorreleerd aan het neerslagoverschot. Tevens blijkt dat de inlaat van oppervlaktewater 's zomers zorgt voor een redelijke aanvulling van de waterbalans en in die perioden ook meer bedraagt dan de winning Rodenmors.

Tabel 2.2 vermeldt de jaarsommen van elk van de vier bekende waterstromen en van hun som. Uit deze tabel blijkt dat de jaarlijkse hoeveelheid ingelaten water steeds tussen de 65%en 90% heeft bedragen van de jaarlijkse hoeveelheid gewonnen water op de winplaats Rodenmors. De jaarsommen zijn steeds negatief, doordat niet alle ingaande waterstromen konden worden verdisconteerd (zie boven). Maar in het jaar 2003 (een droog jaar) is de jaarsom nog sterker negatief, doordat er geen aanvulling was vanuit het neerslagoverschot.

Tabel 2.2: De jaarsommen van elk van de waterstromen en van hun som (periode 2000 t/m 2004).

	[miljoen m^3]				
Jaar	PNO	Inlaat	Winning	Uitlaat	Som
2000	1.1	0.6	-0.7	-1.5	-0.5
2001	1.4	0.8	-1.0	-1.8	-0.6
2002	1.3	1.0	-1.3	-2.1	-1.0
2003	-0.1	1.4	-1.5	-1.4	-1.5
2004	1.1	1.0	-1.5	-1.6	-0.9
Som	4.9	4.7	-6.0	-8.3	-4.7

Figuur 2.10: Het verloop van de vier waterbalanstermen en van hun som, alle op maandbasis.



3 Aanpak van de tijdreeksanalyse

Dit hoofdstuk beschrijft de details van de aanpak die we hebben gevolgd bij de tijdreeksanalyse. In § 3.1 is aangegeven welke grondwaterstandsreeksen zijn gehanteerd. En in § 3.2 worden de hoofdkeuzen voor de modelontwikkeling toegelicht.

3.1 Selectie grondwaterstandsreeksen

Op basis van de volgende criteria zijn grondwaterstandsreeksen geïdentificeerd, die in aanmerking komen om het effect van de wateraanvoer en van de winning Rodenmors statistisch te reconstrueren:

1. het filter bevindt zich in het 1e of 2e watervoerende pakket;
2. de peilbuis bevindt zich binnen circa 3 km afstand van de winplaats Rodenmors;
3. de reeks begint niet later dan 1 april 1996, zodat deze minstens 3 jaar vóór de start van de wateraanvoer begint;
4. de reeks eindigt niet eerder dan 1 augustus 2002, zodat deze minstens 3 jaar na de start van de winning Rodenmors doorloopt.

Er bleken 42 grondwaterstandsreeksen te voldoen aan deze criteria, afkomstig uit 19 peilbuizen. Van elke peilbuis hebben wij de meetreeks van het bovenste filter geselecteerd en indien beschikbaar ook de meetreeks van het onderste filter, mits deze zich in het 2e watervoerende pakket bevond. Zo resteerden er uiteindelijk 29 meetreeksen voor de statistische analyse.

De locaties van de 19 peilbuizen zijn weergegeven op kaart 1 (evenals de locaties van de pompputten van de winning Rodenmors). In bijlage 2 zijn de algemene gegevens van de geselecteerde peilfilters vermeld, namelijk peilbuiscode (zowel de nieuwe als de oude code), filternummer, X- en Y-coördinaat, maaiveldshoogte, filterstelling (boven- en onderkant) en afstand tot het zwaartepunt van de winning Rodenmors.

Visuele controle grondwaterstandsreeksen

Alvorens met de statistische analyse te beginnen, zijn de grondwaterstandsreeksen onderzocht op het voorkomen van 'uitbijters' en vreemde verlopen. Als uitbijters zijn díe meetresultaten aangemerkt die niet in het normale beeld passen. Voor het vaststellen van uitbijters en vreemde verlopen zijn de grafieken van de grondwaterstandsreeksen visueel beoordeeld, gebruik makende van hydrologische kennis en ervaring met betrekking tot grondwaterstandsreeksen. De aldus gevonden uitbijters zijn, indien dit vanuit hydrologisch en statistisch oogpunt verantwoord kon worden geacht, gecorrigeerd door te interpoleren.

Het verloop van elke meetreeks is - zonodig na correctie - grafisch weergegeven in bijlage 3. In elke grafiek is tevens het verloop van de grondwaterwinning Rodenmors weergegeven. Tenslotte is in elke grafiek de maaiveldshoogte aangegeven.

We zien in deze grafieken bijvoorbeeld dat de winning Rodenmors op twee locaties langs de westkant van het Omleidingskanaal (B29A0085 en B29A0070) een kwelsituatie van het 2e watervoerende pakket naar het 1e watervoerende pakket heeft doen wegvallen.

3.2 Hoofdkeuzen voor de modelontwikkeling

Voor de ontwikkeling van een statistisch model van een grondwaterstandsreeks biedt de door Box en Jenkins aanbevolen iteratieve aanpak een geschikt kader, met als onderdelen:

1) modelidentificatie, 2) schatting modelparameters en 3) verificatie van het model [Box and Jenkins, 1976]. Maar zelfs binnen deze gestructureerde aanpak zijn er nog belangrijke keuzen nodig. Zo moet worden besloten:

a) wat de meest geschikte tijdseenheid is voor het modelleren (§ 3.2.1);
b) hoe de mogelijke invloedsfactoren bij de modellering te betrekken. Hier zijn dit:
   - ❖ de meteorologische situatie (§ 3.2.2);
   - ❖ de grondwaterwinning Rodenmors (§ 3.2.3);
   - ❖ de bronbemaling voor het pompstation (§ 3.2.4);
   - ❖ de aanvoer van oppervlaktewater (en het peilbeheer) (§ 3.2.5).

Tenslotte is in § 3.2.6 toegelicht hoe de modellen zijn geverifieerd.

3.2.1 *Meest geschikte tijdseenheid voor het modelleren*

Om tot verantwoorde modellen te kunnen komen, dient de tijdseenheid die bij het modelleren van de grondwaterstand wordt gehanteerd aan te sluiten op de dynamiek van de verschillende processen die de grondwaterstand beïnvloeden. Daarbij is met name van belang welke responstijden optreden, oftewel hoe lang het duurt voordat de invloed van een verandering van een invloedsfactor op de grondwaterstand is uitgewerkt.

Uit verkennende exercities bleek dat de responstijden van de grondwaterstand hier kunnen variëren van hooguit een maand (respons op de aanvoer van oppervlaktewater) en circa 2 maanden (respons op grondwaterwinning Rodenmors) tot 10 à 15 maanden (respons op neerslagoverschot). Gezien deze responstijden hebben wij ervoor gekozen de grondwaterstanden te modelleren op *maand*basis. Een aanvullend argument hiervoor is dat de gegevens over het potentieel neerslagoverschot niet eenvoudig zijn om te zetten naar dezelfde halfmaandelijkse basis als de grondwaterstandsreeksen, aangezien die laatste niet equidistant zijn gemeten (doorgaans op of rond de 14e en 28e van elke maand). Om te kunnen modelleren op maandbasis zijn alle betrokken tijdreeksen omgezet tot reeksen van maandgemiddelden.

Wijze van omzetten van de basisreeksen

Alle grondwaterstandsreeksen, die doorgaans twee meetwaarden per maand bevatten (op of rond de 14e en de 28e), hebben we omgezet tot reeksen van maandgemiddelde grondwaterstanden, door per maand de meetwaarden te middelen. Het verlies aan informatie over het verloop van de grondwaterstand door het middelen van halfmaandelijkse meetwaarden naar maandwaarden zal gering zijn, gezien de zeer grote autocorrelatie (op te vatten als een maat voor de overlap in informatie) van halfmaandelijkse meetwaarden van de grondwaterstand.

De basisreeksen van de grondwaterwinning Rodenmors, de bronbemaling, het potentieel neerslagoverschot en de aanvoer van oppervlaktewater, die alle bestaan uit maand*sommen*, hebben we omgezet tot reeksen van maand*gemiddelden*, door per maand de maandsom te delen door het aantal dagen in die maand.

3.2.2 *Verdiscontering meteorologische omstandigheden*

De meteorologische omstandigheden vormen doorgaans de belangrijkste invloedsfactor van de grondwaterstand, zodat het van groot belang is deze afdoende te verdisconteren bij het statistisch modelleren van de grondwaterstand. Er zijn verschillende manieren om de meteorologische omstandigheden te verdisconteren bij het modelleren. Bij dit onderzoek zijn de meteorologische omstandigheden verdisconteerd door het potentieel neerslagoverschot op te nemen als invloedsfactor in het model. Voor elke gemodelleerde grondwaterstandsreeks afzonderlijk is de transferfunctie van het potentieel neerslagoverschot gepostuleerd op basis van een visuele beoordeling van het gewitte kruiscorrelogram. Deze laats-

te geeft een indruk van de dynamische reactie van de grondwaterstand op een plotselinge toename van het neerslagoverschot (zie bijlage 1 voor een toelichting).

3.2.3 *Verdiscontering grondwaterwinning Rodenmors*

Bij de modelidentificatie bleek uit de gewitte kruiscorrelogrammen dat de responstijd van de grondwaterstand op de winning Rodenmors circa 2 à 3 maanden bedraagt. Uit een gevoeligheidsanalyse bleek echter dat de resultaten van de modellering nauwelijks werden beïnvloed door de responstijd die werd gepostuleerd met de transferfunctie van de winning, zodat er enige vrijheid is in het postuleren van de responstijd. We hebben daarom bij elke modellering de transferfunctie van de winning gepostuleerd met 3 modelparameters, volgens[2]:

$$Y_t = \omega_0 \cdot Q_t - \omega_1 \cdot Q_{t-1} - \omega_2 \cdot Q_{t-2} + ... + N_t$$

met Y de grondwaterstand [cm NAP], Q de winning [1.000 m³/d], N de ruis, ω_k (k = 0,1,2) de modelparameter voor een tijdsverschuiving van k maanden [cm/(1.000 m³/d)] en t de maandindex. Hierdoor kan dus rekening worden gehouden met een responstijd van 2 maanden.

3.2.4 *Verdiscontering bronbemaling voor pompstation Rodenmors*

De bronbemaling voor de bouw van het pompstation Rodenmors vond plaats in de periode half april 1997 tot en met februari 1998. Aangezien te verwachten is dat de responstijd van de grondwaterstand op een bronbemaling niet lang zal zijn, is de transferfunctie van de bronbemaling bij de modellering gepostuleerd met 2 modelparameters, volgens:

$$Y_t = \omega_0 \cdot B_t - \omega_1 \cdot B_{t-1} + ... + N_t$$

met Y de grondwaterstand [cm NAP], B de bronbemaling [1.000 m³/d], N de ruis, ω_k (k = 0 en 1) de modelparameter voor een tijdsverschuiving van k maanden [cm/(1.000 m³/d)] en t de maandindex.

3.2.5 *Verdiscontering aanvoer van oppervlaktewater (en het peilbeheer)*

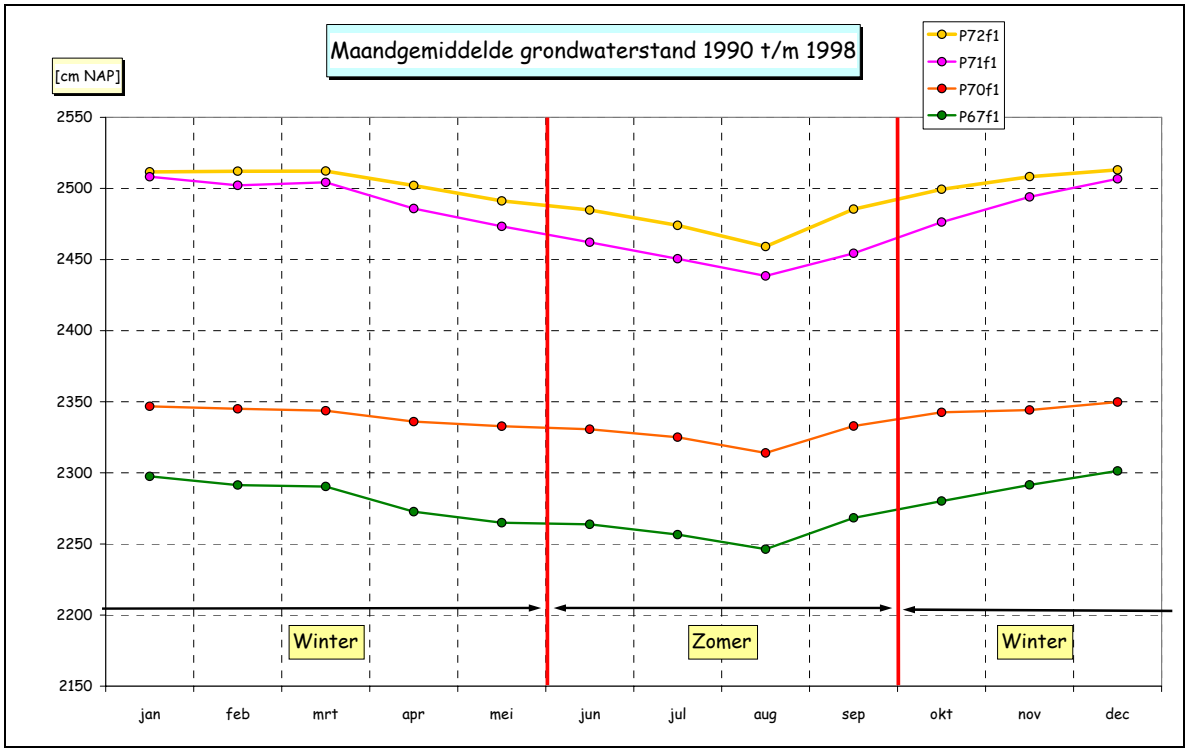
De aanvoer van oppervlaktewater naar het gebied is gestart in april 1999. Op theoretische gronden kan worden aangenomen dat de invloed van wateraanvoer op de grondwaterstand ondermeer zal afhangen van de diepte van de grondwaterstand onder maaiveld. Naarmate de grondwaterstand dieper ligt kan er namelijk meer oppervlaktewater infiltreren en kan deze dus meer beïnvloed worden. Daardoor zal de invloed van de wateraanvoer op een bepaalde grondwaterstand dus niet alleen afhangen van de mate waarin die grondwaterstand is verlaagd door de winning Rodenmors en van de locatie in het systeem, maar ook van het seizoen. Om bij de tijdreeksanalyse van een grondwaterstand voldoende rekening te kunnen houden met die niet-lineaire invloed, zijn wij nagegaan welke seizoensindeling hierbij past. Daartoe hebben wij van een viertal grondwaterstandsreeksen in dit gebied de gemiddelde seizoensmatige fluctuatie uitgezet over de periode 1990 t/m 1998 (zie figuur 3.1). Het betreft dus een periode vóór de start van de wateraanvoer en de winning Rodenmors. Op basis van de geconstateerde fluctuaties hebben wij besloten om bij de tijdreeksanalyse van de grondwaterstanden rekening te houden met twee verschillende invloeden van de wateraanvoer, namelijk een zomer- en een winterinvloed. Om deze invloeden te kunnen schatten is de wateraanvoer bij de tijdreeksanalyse vertegenwoordigd door de volgende twee invoerreeksen:

1) wateraanvoer zomer: deze reeks is in juni, juli, augustus en september gelijk aan de wateraanvoer en anders steeds gelijk aan 0;
2) wateraanvoer winter: deze reeks is in oktober t/m mei gelijk aan de wateraanvoer en anders steeds gelijk aan 0.

[2] Zie bijlage 1 voor een uitgebreidere toelichting op het transfer-ruismodel.

We zijn er bij het modelleren van uit gegaan dat de respons van de grondwaterstand op de wateraanvoer zich nog binnen dezelfde maand voltrekt.

Figuur 3.1: De maandgemiddelde grondwaterstand over de periode 1990 t/m 1998, voor elk van een viertal grondwaterstandsreeksen.



Het peilbeheer zal ook invloed uitoefenen op de grondwaterstand, vooral in de directe omgeving van waterlopen. Maar die invloed zal dermate sterk zijn verstrengeld met andere invloedsfactoren, dat het niet mogelijk is die onafhankelijk van elkaar te schatten. Als het een stuwvak betreft waarin het peilbeheer niet is veranderd door het wateraanvoerplan, dan zal de invloed van het peilbeheer sterk zijn verstrengeld met die van het neerslagoverschot, dat immers ook een sterke seizoenscyclus vertoont. En als het een stuwvak betreft waarin het peilbeheer wél is veranderd door het wateraanvoerplan, dan zal de invloed van het zomerpeil sterk zijn verstrengeld met die van de aanvoer van oppervlaktewater in de zomer en zal de invloed van het winterpeil sterk zijn verstrengeld met die van de aanvoer van oppervlaktewater in de winter. Gezien deze verstrengelingen hebben we het peilbeheer niet als aparte invloedsfactor meegenomen bij het modelleren van de grondwaterstand.

3.2.6 *Modelverificatie*

Bij de modelontwikkeling is voor elk tijdreeksmodel nagegaan of voldoende werd voldaan aan de belangrijke vooronderstelling dat de modelresiduën 'witte ruis' vormen, dat wil zeggen dat de modelresiduën afkomstig zijn uit dezelfde normale kansverdeling, met gemiddelde nul en geen autocorrelatie vertonen (zie bijlage 1). Indien nodig is het tijdreeksmodel op basis van de bevindingen van deze verificatie aangepast.

De statistische modellering leverde voor elke bij de modellering betrokken invoerreeks een schatting op van zijn statistische evenwichtsrelatie met de betreffende grondwaterstand, evenals de bijbehorende standaardfout (zie bijlage 1 voor een toelichting). Hiermee kunnen we vaststellen of er al dan niet sprake is van een statistisch significante relatie. We noemen een relatie hier statistisch significant, als de absolute waarde van de geschatte

evenwichtsrelatie groter is dan tweemaal zijn standaardfout. Dit komt neer op het hanteren van een betrouwbaarheid van circa 95%.

4 Resultaten tijdreeksanalyse

Na een korte toelichting op de gehanteerde algemene modelvorm (§ 4.1) worden in dit hoofdstuk de resultaten van de tijdreeksanalyse van de 29 grondwaterstandsreeksen tabelmatig en grafisch gepresenteerd. In § 4.2 worden de geschatte relaties met de winning Rodenmors vermeld en in § 4.3 de geschatte relaties met de wateraanvoer in respectievelijk de zomer en de winter, waarbij ook is aangegeven in hoeverre de wateraanvoer de invloed van de winning compenseert. Tenslotte worden onze resultaten in § 4.4 vergeleken met de door een grondwatermodel berekende gecombineerde invloed van de winning Rodenmors en de wateraanvoer op de grondwaterstanden.

4.1 Gehanteerde algemene modelvorm

In het voorgaande is beredeneerd dat we ter evaluatie van de invloeden van de winning Rodenmors en de wateraanvoer een statistische relatie willen leggen tussen de grondwaterstandsreeks en de tijdreeksen van (1) het potentieel neerslagoverschot, (2) de winning Rodenmors, (3) de bronbemaling op de winplaats en (4) de aanvoer van oppervlaktewater, opgesplitst naar zomer- en winteraanvoer. Om dit te bewerkstelligen zijn we bij de tijdreeksanalyse voor de grondwaterstandsreeksen in het wateraanvoergebied uitgegaan van de volgende algemene vorm van het Box-Jenkins-model voor die grondwaterstand:

$$Y_t = f_1(PNO_t) + f_2(Q_t) + f_3(B_t) + f_4(A_{Z,t}) + f_5(A_{W,t}) + N_t$$

met Y_t de gemiddelde grondwaterstand in de peilbuis in maand t [cm NAP], f_1, f_2, f_3, f_4 en f_5 transferfuncties, PNO het potentieel neerslagoverschot in maand t [mm/d], Q_t de winning Rodenmors in maand t [1.000 m^3/d], B_t de bronbemaling in maand t [1.000 m^3/d], $A_{Z,t}$ en $A_{W,t}$ de zomer- en winteraanvoer van oppervlaktewater in maand t [1.000 m^3/d] en N_t de modelruis in maand t [cm NAP]. Deze modelruis is op te vatten als het niet door de betrokken invloedsfactoren beschreven deel van Y_t. Voor de grondwaterstandsreeksen buiten het wateraanvoergebied zijn de zomer- en winteraanvoer van oppervlaktewater niet als mogelijke invloedsfactoren bij de modellering betrokken. De bronbemaling gaf met geen enkele gemodelleerde grondwaterstandsreeks een statistisch significante relatie en is daarom verder weggelaten. De details van de 29 ontwikkelde tijdreeksmodellen zijn vermeld in bijlage 4.

4.2 Geschatte relaties grondwaterstand en winning Rodenmors

De bij de tijdreeksanalyse geschatte relaties tussen de grondwaterstand en de winning Rodenmors zijn samengevat in tabel 4.1, met onderscheid tussen het 1e en 2e watervoerende pakket en waarbij de peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning. In de tabel is tevens is de standaardfout van elke schatting vermeld, die is op te vatten als een maat voor de precisie van de schatting. Als de absolute waarde van een geschatte relatie groter is dan tweemaal zijn standaardfout, dan spreken we van een statistisch significante relatie (met 95% betrouwbaarheid). De bij het modelleren geschatte relaties gelden voor een winningsomvang van 1.000 m^3/d. Er van uitgaande dat deze relaties causaal zijn, hebben we deze in de laatste twee kolommen van tabel 4.1 geëxtrapoleerd naar een winningsomvang van 1,5 miljoen m^3/jaar.

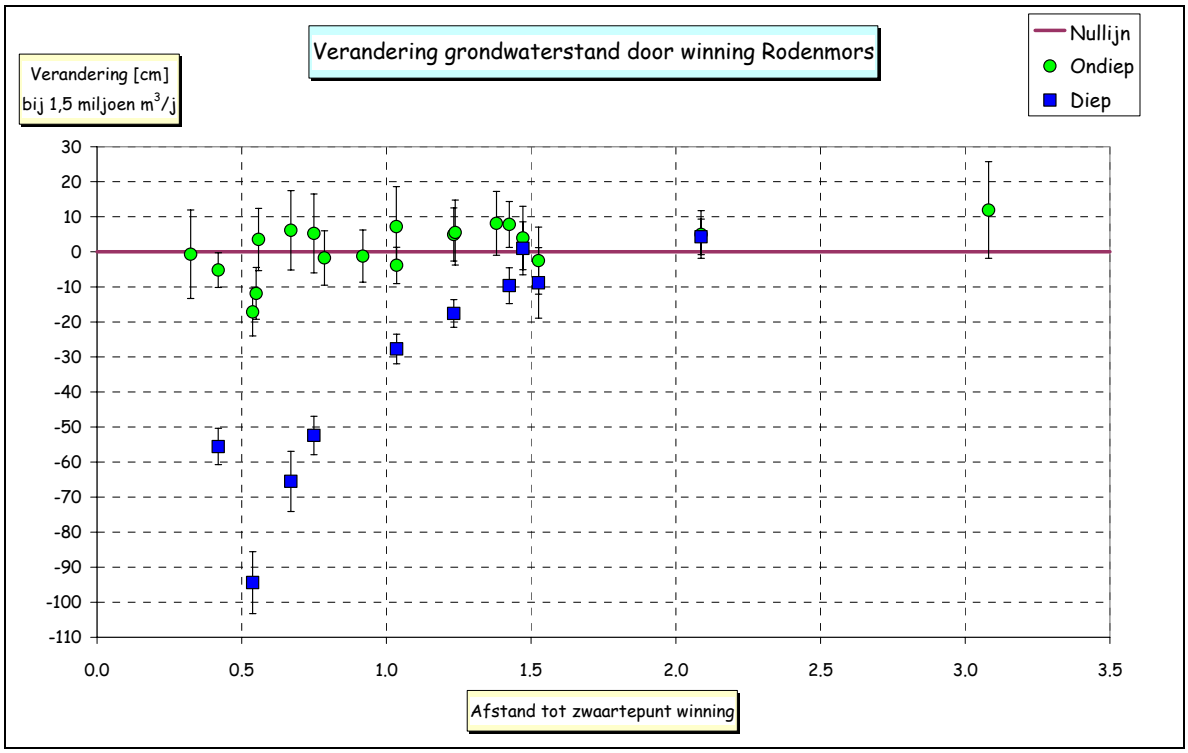
Tabel 4.1: Geschatte relaties tussen de grondwaterstand en de winning Rodenmors, evenals de standaardfout van elke schatting, met onderscheid tussen het 1e en 2e watervoerende pakket. In de twee laatste kolommen zijn deze resultaten lineair geëxtrapoleerd naar een winning van 1,5 miljoen m³/jaar. De statistisch significante schattingen (met 95%-betrouwbaarheid) zijn vet gedrukt en gearceerd. De peilbuizen zijn per watervoerend pakket gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning.

				Relatie	St fout	Relatie	St fout
Peilbuis	Filt	wvp	Afst [km]	[cm/(1.000 m³/d)]		[cm/(1.5 Mm³/j)]	
B29A0163	1	1	0.32	-0.2	1.5	-1	6
B29A0085	1	1	0.42	**-1.3**	0.6	**-5**	2
B29A0067	1	1	0.54	**-4.2**	0.8	**-17**	3
B29A0161	1	1	0.55	**-2.9**	0.9	**-12**	4
B29A0164	1	1	0.56	0.9	1.1	4	4
B29A0080	1	1	0.67	1.5	1.4	6	6
B29A0081	1	1	0.75	1.3	1.4	5	6
B29A0160	1	1	0.79	-0.4	0.9	-2	4
B29A0084	1	1	0.92	-0.3	0.9	-1	4
B29A0083	1	1	1.03	1.8	1.4	7	6
B29A0070	1	1	1.04	-0.9	0.6	-4	3
B29A0069	1	1	1.23	1.2	0.9	5	4
B29A0159	1	1	1.24	1.3	1.1	6	5
B29A0162	1	1	1.38	2.0	1.1	8	5
B29A0082	1	1	1.42	**1.9**	0.8	**8**	3
B29A0071	1	1	1.47	1.0	1.1	4	5
B29A0073	1	1	1.53	-0.6	1.2	-3	5
B29A0072	1	1	2.09	1.2	0.8	5	3
B29A0158	1	1	3.08	2.9	1.7	12	7
B29A0085	2	2	0.42	**-13.5**	0.6	**-56**	3
B29A0067	3	2	0.54	**-23.0**	1.1	**-94**	4
B29A0080	2	2	0.67	**-15.9**	1.0	**-66**	4
B29A0081	3	2	0.75	**-12.8**	0.7	**-52**	3
B29A0070	2	2	1.04	**-6.7**	0.5	**-28**	2
B29A0069	3	2	1.23	**-4.3**	0.5	**-18**	2
B29A0082	3	2	1.42	**-2.3**	0.6	**-10**	3
B29A0071	2	2	1.47	0.2	0.9	1	4
B29A0073	6	2	1.53	-2.2	1.2	-9	5
B29A0072	5	2	2.09	1.0	0.6	4	3

De resultaten zijn ook weergegeven in figuur 4.1., waarbij deze zijn uitgezet tegen de afstand tot de winning. De figuur geeft tevens het bijbehorende 95%-betrouwbaarheids-

interval van elke geschatte relatie, zijnde het interval begrensd door de schatting ± tweemaal de standaardfout. Als voldaan wordt aan alle randvoorwaarden die aan het tijdreeksmodel ten grondslag liggen (zie bijlage 1) en er sprake is van een volledig causale relatie, dan zal dat interval met 95% betrouwbaarheid de *werkelijke* invloed van de winning bevatten. De resultaten voor de grondwaterstanden in het 1e watervoerende pakket zijn ruimtelijk weergegeven in kaart 2 en die voor de stijghoogten in het 2e watervoerende pakket in kaart 3.

Figuur 4.1: Geschatte relaties tussen de grondwaterstand en de winning Rodenmors, uitgezet tegen de afstand tot het zwaartepunt van de winning. Tevens is het 95%-betrouwbaarheidsinterval van elke schatting weergegeven.



We kunnen aan de hand van tabel 4.1, figuur 4.1 en de kaarten 2 en 3 de volgende conclusies trekken over de invloed van de winning Rodenmors op de grondwaterstanden in de omgeving:

1. in het 2e watervoerende pakket is een duidelijke verlagingskegel waar te nemen, die zich uitstrekt tot 1,5 à 2 km afstand. De maximaal waargenomen verlaging bedraagt 94 cm, op 540 m van het zwaartepunt van de winning;
2. de verlaging van de dichtst bij de winning gemeten grondwaterstand in het 2e watervoerende pakket (B29A0085, filter 2) wijkt af van het beeld van die verlagingskegel. Dit kan er op wijzen dat het betreffende filter zich in een deel van het 2e watervoerende pakket bevindt dat enigszins is afgescheiden van de rest van dat watervoerende pakket door een lokale afscheidende laag (zie ook § 2.1). Een andere optie is dat er daar water uit het Omleidingskanaal infiltreert (de betreffende peilbuis bevindt zich namelijk slechts enkele tientallen meters westelijk van het Omleidingskanaal), zodat de verlagingen enigszins worden tegengegaan;
3. in het 1e watervoerende pakket is geen duidelijke verlagingskegel waar te nemen. Er zijn slechts voor drie grondwaterstandsreeksen verlagingen aangetoond in dit pakket.

Deze bedragen respectievelijk 5, 12 en 17 cm. De overige geschatte veranderingen van de grondwaterstand door de winning schommelen rond 0 cm[3];

4. de dichtst bij de winning gelegen grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket (B29A0163, filter 1) is niet beïnvloed door de winning. Dit zal veroorzaakt zijn doordat de betreffende peilbuis zich pal naast een belangrijke infiltratiebuis bevindt.

[3] Er is in één geval (B29A0082, filter 1) weliswaar een statistisch significante *positieve* relatie geschat tussen de winning en de grondwaterstand, maar het is fysisch onmogelijk dat dit een causale relatie betreft ("de winning verhoogt de grondwaterstand"). We gaan er daarom van uit dat het hier slechts een toevallige en dus geen causale relatie betreft. Bij de door ons gehanteerde betrouwbaarheid van 95% zal er overigens gemiddeld 1 op de 20 maal onterecht een relatie als statistisch significant worden aangeduid. En wij hebben hier 29 reeksen geanalyseerd.

4.3 Geschatte relaties grondwaterstand en wateraanvoer

De bij de tijdreeksanalyse geschatte relaties tussen de grondwaterstand en de zomer- en winteraanvoer van oppervlaktewater zijn samengevat in tabel 4.2, waarbij de peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning.

Tabel 4.2: Geschatte relaties tussen de grondwaterstand en de zomer- en winteraanvoer van oppervlaktewater, evenals de standaardfout van elke schatting. De statistisch significante schattingen (met 95%-betrouwbaarheid) zijn vet gedrukt en gearceerd. Voor beide seizoenen is tevens de gemiddelde invloed van de wateraanvoer in de jaren 2003 en 2004 op de betreffende grondwaterstand vermeld. De peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning Rodenmors. Aangezien de relaties alleen zijn geschat voor de peilbuizen in het wateraanvoergebied, zijn er voor enkele reeksen geen resultaten.

				Zomer		Zomer '03 en '04		Winter		Winter '03 en '04	
			Afst	Relatie	St fout	Relatie	St fout	Relatie	St fout	Relatie	St fout
Peilbuis	Filt	wvp	[km]	[cm/1.000 m^3/d]		[cm]		[cm/1.000 m^3/d]		[cm]	
B29A0163	1	1	0.32	**6.7**	1.1	**32**	5	1.7	1.4	3	3
B29A0085	1	1	0.42								
B29A0067	1	1	0.54	**2.3**	0.7	**11**	3	1.5	1.2	3	2
B29A0161	1	1	0.55	**1.7**	0.7	**8**	3	1.3	1.0	3	2
B29A0164	1	1	0.56								
B29A0080	1	1	0.67	**2.9**	0.7	**13**	3	1.7	0.9	4	2
B29A0081	1	1	0.75	**3.7**	0.7	**17**	3	1.8	1.0	4	2
B29A0160	1	1	0.79	1.2	0.8	6	4	0.4	1.1	1	2
B29A0084	1	1	0.92	**4.3**	0.8	**20**	4	1.3	1.1	3	2
B29A0083	1	1	1.03	**2.8**	0.7	**13**	3	**2.8**	0.9	**6**	2
B29A0070	1	1	1.04								
B29A0069	1	1	1.23								
B29A0159	1	1	1.24	**2.0**	0.8	**9**	4	0.2	1.0	0	2
B29A0162	1	1	1.38	**2.3**	0.8	**11**	4	1.2	1.1	3	2
B29A0082	1	1	1.42	**1.5**	0.6	**7**	3	0.1	0.9	0	2
B29A0071	1	1	1.47	0.4	0.9	2	4	-0.6	1.3	-1	3
B29A0073	1	1	1.53								
B29A0072	1	1	2.09								
B29A0158	1	1	3.08								
B29A0085	2	2	0.42								
B29A0067	3	2	0.54	0.7	0.9	3	4	0.2	1.3	1	3
B29A0080	2	2	0.67	**1.8**	0.9	**9**	4	-2.0	1.2	-4	3
B29A0081	3	2	0.75	**2.0**	0.6	**9**	3	0.6	0.8	1	2
B29A0070	2	2	1.04								
B29A0069	3	2	1.23								
B29A0082	3	2	1.42	1.0	0.6	5	3	-0.1	0.8	0	2
B29A0071	2	2	1.47	0.1	0.8	0	4	0.0	1.2	0	3
B29A0073	6	2	1.53								
B29A0072	5	2	2.09								

Uit tabel 4.2 blijkt dat van de 12 geanalyseerde grondwaterstandsreeksen met filter in het 1e watervoerende pakket, er 10 statistisch significant gerelateerd zijn aan de wateraanvoer in de zomer (en één van deze is ook nog statistisch significant gerelateerd aan de water-

aanvoer in de winter). Verder blijkt dat deze grondwaterstanden in de zomers van 2003 en 2004 gemiddeld tussen circa 10 en 30 cm zijn verhoogd door de wateraanvoer.

In kaart 4 zijn de geschatte gemiddelde verhogingen van deze 10 grondwaterstandsreeksen door de wateraanvoer in de zomers van 2003 en 2004 ruimtelijk weergegeven.

Van deze 10 grondwaterstandsreeksen hebben wij ook de tijdreeksen gereconstrueerd van de statistisch significante invloeden die zij hebben ondergaan door de winning Rodenmors en/of de wateraanvoer in de zomer en/of de wateraanvoer in de winter, alsmede van de som van deze invloeden. Deze tijdreeksen zijn weergegeven in bijlage 5. In onderstaande tabel 4.3 zijn de relevante kengetallen van die tijdreeksen in de zomers van 2003 en 2004 vermeld, zodat direct kan worden beoordeeld in welke mate de wateraanvoer de winningsinvloed in die recente zomerperioden - met maximale winning - heeft gecompenseerd.

Tabel 4.3: Voor elk van 10 grondwaterstandsreeksen in het wateraanvoergebied, met filter in het 1e watervoerende pakket, de gemiddelde invloed van de winning Rodenmors, de gemiddelde invloed van de wateraanvoer in de zomer en de netto invloed, alles berekend over de zomers van de jaren 2003 en 2004. In de laatste kolom is ook het maximum van de netto invloed op de betreffende grondwaterstand over die periode vermeld. De peilbuizen zijn gerangschikt naar de afstand tot het zwaartepunt van de winning Rodenmors. Alleen de statistisch significante schattingen zijn vermeld.

				Gemiddelde invloed in zomer			Maximum
					Wateraanvoer	Netto	Netto
Peilbuis	Filt	wvp	Afst [km]	Winning [cm]	Zomer [cm]	invloed [cm]	invloed [cm]
B29A0163	1	1	0.32	niet signif.	**32**	**32**	**62**
B29A0067	1	1	0.54	**-17**	**11**	**-6**	**3**
B29A0161	1	1	0.55	**-12**	**8**	**-4**	**1**
B29A0080	1	1	0.67	niet signif.	**13**	**13**	**26**
B29A0081	1	1	0.75	niet signif.	**17**	**17**	**34**
B29A0084	1	1	0.92	niet signif.	**20**	**20**	**40**
B29A0083	1	1	1.03	niet signif.	**13**	**13**	**26**
B29A0159	1	1	1.24	niet signif.	**9**	**9**	**18**
B29A0162	1	1	1.38	niet signif.	**11**	**11**	**21**
B29A0082	1	1	1.42	niet signif.	**7**	**7**	**13**

We kunnen aan de hand van tabel 4.3 de volgende conclusies trekken over de beinvloeding van de grondwaterstanden in het 1e watervoerende pakket in het wateraanvoergebied door niet-natuurlijke factoren (winning en wateraanvoer) in de zomers van 2003 en 2004:

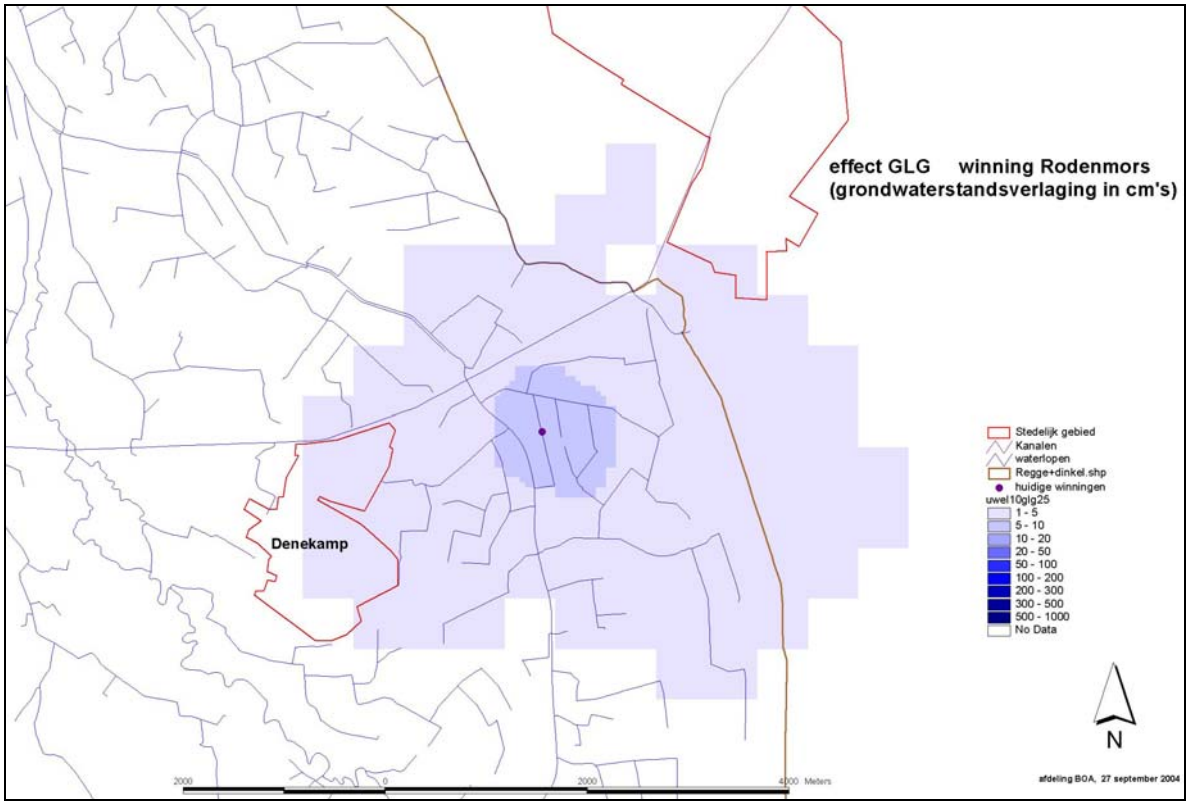
1. op de twee locaties waar verlagingen door de winning zijn aangetoond, zorgt de zomerse wateraanvoer voor een zodanige compensering, dat netto nog slechts een gemiddelde verlaging van circa 5 cm resteert. In een enkele zomermaand is er door de wateraanvoer zelfs een netto verhoging van enkele cm;
2. op de locaties waar geen verlagingen door de winning zijn aangetoond, zorgt de zomerse wateraanvoer voor een gemiddelde verhoging van de grondwaterstand van 10 tot 30 cm. Hier gaat de zomerse wateraanvoer dus nog verder dan het compenseren van een eventuele verlaging door de winning.

In kaart 5 zijn de netto-invloeden van de winning Rodenmors en de wateraanvoer in de zomers van 2003 en 2004 ruimtelijk weergegeven.

4.4 Vergelijking geraamde invloeden met vooraf geraamde invloeden

Het Waterschap Regge en Dinkel heeft de gecombineerde invloed van de winning Rodenmors en de aanvoer van oppervlaktewater langs theoretische weg laten berekenen door TNO-NITG met een grondwatermodel. Figuur 4.2 toont de ruimtelijke spreiding van de berekende gecombineerde invloed op de GLG (Gemiddeld Laagste Grondwaterstand), die min of meer kenmerkend mag worden geacht voor de droge zomermaanden.

Figuur 4.2: De gecombineerde invloed van de winning Rodenmors en het wateraanvoerplan op de GLG, zoals berekend met een grondwatermodel.



We zien in figuur 4.2 dat de berekende gecombineerde invloed in een straal van 500 à 750 m rond het zwaartepunt van de winning tussen de 5 en 10 cm bedraagt. Daarbuiten, tot circa 3 km afstand is de berekende invloed verwaarloosbaar, namelijk tussen de 1 en 5 cm.

Als we deze resultaten vergelijken met de resultaten van onze statistische analyse, zoals vermeld in tabel 4.3, dan valt het volgende op:

1. onze resultaten voor B29A0067, filter 1 en B29A0161, filter 1, gelegen op respectievelijk 540 en 550 m ten noorden van het zwaartepunt van de winning Rodenmors, namelijk een gemiddelde netto-invloed in de zomer van circa 5 cm verlaging, stemmen goed overeen met die van het grondwatermodel;
2. onze overige resultaten, die wijzen op een gemiddelde netto-invloed in de zomer van 10 tot 30 cm verhoging, wijken af van die van het grondwatermodel, aangezien dat nergens verhogingen van de GLG aangeeft.

5 Conclusies en aanbeveling

5.1 Conclusies

Op basis van het hiervoor beschrevene kunnen we de onderstaande conclusies trekken.

1. De jaarlijkse hoeveelheid ingelaten oppervlaktewater in het wateraanvoergebied heeft steeds tussen de 65% en 85% geschommeld van de jaarlijkse hoeveelheid gewonnen water op de winplaats Rodenmors.

2. De winning Rodenmors zal ook grondwater uit het 2e watervoerende pakket onttrekken dat van buiten het wateraanvoergebied komt.

3. De inlaat van oppervlaktewater zorgt 's zomers voor een redelijke aanvulling van de waterbalans en bedraagt in die perioden meer dan de winning Rodenmors.

4. Door de winning Rodenmors is in het 2e watervoerende pakket een duidelijke verlagingskegel ontstaan, die zich uitstrekt tot circa 2 km afstand. De maximaal waargenomen verlaging bedraagt 94 cm, op 540 m van het zwaartepunt van de winning.

5. Door de winning Rodenmors is in het 1e watervoerende pakket geen duidelijke verlagingskegel ontstaan. Er zijn slechts voor drie grondwaterstandsreeksen verlagingen aangetoond in dit pakket. Deze bedragen respectievelijk 5, 12 en 17 cm. De overige geschatte veranderingen van de grondwaterstand door de winning schommelen rond 0 cm.

6. Op de twee locaties in het wateraanvoergebied waar verlagingen van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket door de winning zijn aangetoond, zorgt de zomerse wateraanvoer voor een zodanige compensering, dat netto nog slechts een gemiddelde verlaging van circa 5 cm resteert. In een enkele zomermaand is er door de wateraanvoer zelfs een netto verhoging van enkele cm.

7. Op de locaties in het wateraanvoergebied waar geen verlagingen van de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket door de winning zijn aangetoond, zorgt de zomerse wateraanvoer voor een gemiddelde verhoging van de grondwaterstand van 10 tot 30 cm.

8. Aangezien zelfs in de zeer droge zomer van 2003 de aanvoer van oppervlaktewater nog elke dag mogelijk bleek, mogen we concluderen dat de beschikbaarheid van aan te voeren oppervlaktewater geen probleem vormt.

9. De wateraanvoer zorgt voor een goede compensering van de invloed van de winning Rodenmors op de grondwaterstanden in het 1e watervoerende pakket en gaat op veel locaties zelfs nog verder, door ook een deel van de meteorologische verlaging in de zomermaanden te compenseren.

5.2 Aanbeveling

Aangezien er in droge perioden kortstondig geen uitvoer is bij stuw K en er dan vermoedelijk te weinig water beschikbaar is in die omgeving, verdient het aanbeveling om in droge perioden meer water in te laten via de schuif Lukens (dit is technisch mogelijk). Die schuif bevindt zich namelijk niet ver van stuw K.

Referenties

Baggelaar, P.K. (1988): 'Tijdreeksanalyse bij verlagingsonderzoek: principe en voorbeeld'. H_2O (21), 1988, Nr. 16, blz. 443 – 450.

Box, G.E.P. and Jenkins, G.M. (1976): 'Time Series Analysis, Forecasting and Control'. Holden Day, San Francisco.

KNMI (1972): 'Klimaatatlas van Nederland'. KNMI, De Bilt.

McLeod, G. (1983): 'Box Jenkins in Practice'. Time Series Library, Gwilym Jenkins & Partners Ltd., Lancaster.

Van der Meulen, E.C.J. (2004): 'Handleiding TRG'. AMO Adviesbureau Modellering en Optimalisatie, Hengelo.

Waterschap Regge en Dinkel (2003): 'Tussenevaluatie Rodenmors'.

WMO en WRD (1990): 'Denekamp 2 - uitwerking slootproef'. Waterleiding Maatschappij Overijssel N.V. en Waterschap Regge en Dinkel, Zwolle, 1990.

WMO (1992): 'Denekamp 2 – niet-stationaire modelsimulatie ten behoeve van de effectberekeningen'. X.T. Ngo, Waterleiding Maatschappij Overijssel N.V., Zwolle, 1992.

WMO (1993): 'Rapport ex artikel 17 van de grondwaterwet inzake de vergunningaanvraag voor de grondwateronttrekking in de gemeente Denekamp door de Waterleiding Maatschappij Overijssel N.V.' GW 2435/HND, maart 1993.

Bijlage 1: Algemene toelichting op de Box-Jenkins-methode

Aan de hand van tijdreeksanalyse volgens de Box-Jenkins-methode [Box and Jenkins, 1976], kan de tijdreeks van een variabele beschreven worden met een discreet lineair dynamisch stochastisch model. In het nu volgende geven we een beknopte uitleg van deze methode. Voor een diepgaande theoretische verhandeling wordt verwezen naar het standaardwerk [Box and Jenkins, 1976]. Voor een praktisch gerichte verhandeling wordt verwezen naar [McLeod, 1983].

Uitleg aan de hand van systeemtheorie
Het principe van de Box-Jenkins benadering kan goed worden toegelicht aan de hand van begrippen uit de systeemtheorie. Een systeem zal daartoe - enigszins intuïtief - worden omschreven als een deel van de werkelijkheid, dat via in- en uitgangssignalen wisselwerkingen vertoont met z'n omgeving. De grondwaterstand in een peilbuis zullen we dan opvatten als het uitgangssignaal (hier: de uitvoerreeks) van een systeem, dat wordt aangedreven door meerdere ingangssignalen (hier: invoerreeksen of ook wel dynamische invloedsfactoren). In het geval van een (freatische) grondwaterstand zullen deze laatste voornamelijk van meteorologische aard zijn. Een dergelijk systeem kan mathematisch worden uitgeschreven als:

$$Y(t) = g(G, X, t) \qquad 1$$

met Y de grondwaterstand, $g(\cdot)$ één of andere functie, G een verzameling modelparameters, X de verzameling dynamische invloedsfactoren en t de continue tijd.

Als we de grondwaterstand empirisch willen modelleren verdient het echter aanbeveling deze te beschouwen als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem:

- discreet: omdat relevante gegevens over de grondwaterstand en de dynamische invloedsfactoren meestal slechts beschikbaar zijn in de vorm van discrete tijdreeksen;
- lineair: omdat dit de minste theoretische en praktische problemen oplevert, bovendien is gebleken dat veel systemen redelijk beschreven kunnen worden met lineaire modellen;
- dynamisch: omdat de tijd een essentiële rol speelt in het gedrag van de uitvoerreeks;
- stochastisch: omdat zo'n systeem nooit exact (deterministisch) kan worden beschreven, enerzijds vanwege de benadering die is ingevoerd door de discretisatie en linearisatie, anderzijds vanwege het feit dat het onmogelijk is álle dynamische invloedsfactoren bij de beschrijving mee te nemen.

Een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem kan mathematisch worden uitgeschreven als:

$$Y_t = f(F, X', t) + N_t \qquad 2$$

met Y de grondwaterstand, $f(\cdot)$ een lineaire functie, F een verzameling modelparameters, X' een deelverzameling van de dynamische invloedsfactoren, N de ruis en t de discrete tijdsindex. Omdat de algemene vorm van de Box-Jenkins modellen ook kan worden uitgeschreven als bovenstaande formule, is de Box-Jenkins-methode bij uitstek geschikt om zo'n systeem langs empirische weg te beschrijven. En omdat de methode er op is gericht het stochastische element terug te brengen tot een verschijnsel dat minimaal is en dat bekende waarschijnlijkheidswetten volgt, kunnen er uitspraken omtrent het systeem worden gedaan met minimale en kwantificeerbare onzekerheden.

Statistisch modelleren van een tijdreeks
De klassieke statistische methodologie is zelden geschikt voor een statistische modellering van tijdreeksen, omdat deze gebaseerd is op onafhankelijke waarnemingen, terwijl de waarnemingen in een tijdreeks vaak niet onafhankelijk van elkaar zijn. De belangrijkste bijdragen

van Box en Jenkins tot de oplossing van dit probleem bestonden uit de formulering van een familie van statistische modellen om tijdreeksen te beschrijven en uit aanwijzingen tot een verantwoorde modelbouw [Box and Jenkins, 1976]. Voor de modellering van een tijdreeks ontwikkelden ze twee benaderingen, namelijk univariate modellering aan de hand van een Arima-model en transfer-ruismodellering aan de hand van een transfer-ruismodel. Beide zullen in het nu volgende kort en voornamelijk intuïtief worden omschreven.

Univariaat modelleren
Bij de univariate modellering wordt uitsluitend uitgegaan van de te modelleren tijdreeks, die wordt beschouwd als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem dat wordt aangedreven door een stochastische invoerreeks. Deze laatste is onbekend en ontstaat eigenlijk pas in de modelleerfase als het modelresidu. De modellering is er dan ook op gericht dit terug te brengen tot een verschijnsel dat bekende waarschijnlijkheidswetten volgt ('witte ruis') en een minimale variantie heeft. De variantie mag in dit verband als een soort maat voor de onzekerheid van het model worden beschouwd.
Witte ruis kan worden opgevat als een volledig toevallig signaal, bestaande uit een opeenvolging van onafhankelijke trekkingen uit een normale kansverdeling, met gemiddelde nul en variantie σ_a^2.
Het zal duidelijk zijn dat de univariate benadering nauwelijks inzicht levert in het beschouwde systeem. Het wordt wel veel toegepast om voorspellingen van een bepaalde variabele te genereren. Deze zijn dan uitsluitend gebaseerd op een statistische analyse van het gedrag van deze variabele in het verleden. Deze toepassing heeft dan ook vooral opgang gemaakt in de economie, met zijn gecompliceerde en minder inzichtelijke dynamische systemen.

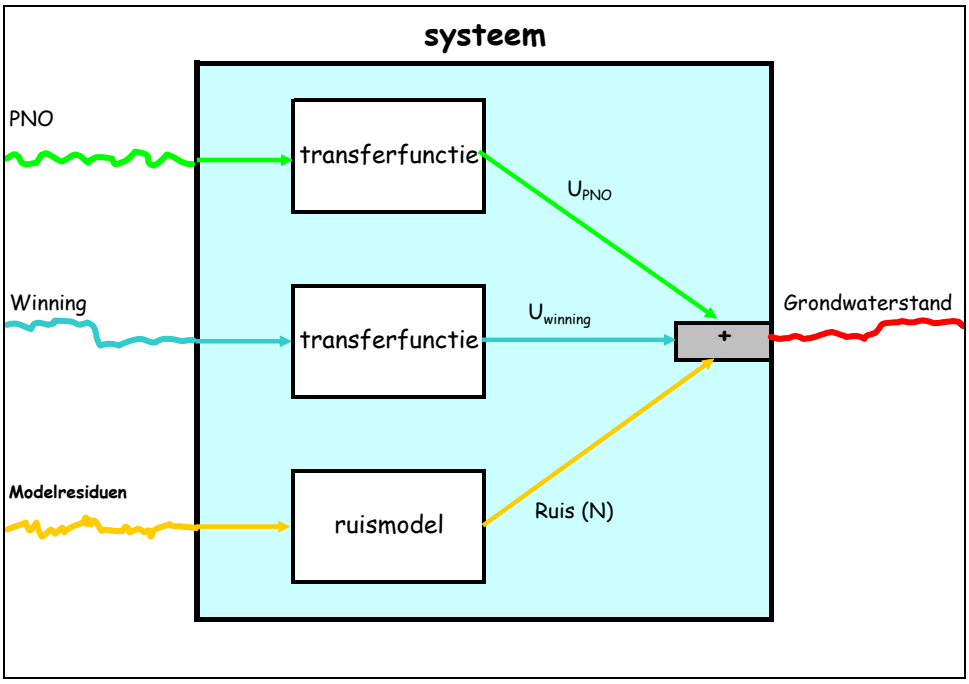
Transfer-ruismodelleren
Bij de transfer-ruismodellering wordt de te modelleren tijdreeks beschouwd als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem dat wordt aangedreven door meerdere invoerreeksen, waaronder ook witte ruis. Elke invoerreeks (X_i) levert hierbij volgens een afzonderlijke lineaire transferfunctie een component (U_i) van de uitvoerreeks (Y). De resterende ruis (N) vertegenwoordigt de component die wordt geleverd door alle dynamische invloedsfactoren die niet bij de modellering zijn betrokken. Deze ruis kan op zijn beurt worden weergegeven als de uitvoerreeks van een deelsysteem, dat volgens een Arima-model (in feite ook een transferfunctie) wordt aangedreven door witte ruis. De verschillende componenten geven door middel van lineaire superpositie de uiteindelijk waargenomen uitvoerreeks, volgens:

$$Y_t = U_{1t} + \ldots + U_{mt} + N_t \qquad 3$$

Figuur b1.1 toont het principe van het transfer-ruismodel, voor het geval een grondwaterstand wordt gemodelleerd als functie van het potentieel neerslagoverschot en een grondwaterwinning.

De kracht van het transfer-ruismodel is dat een groot aantal dynamische situaties beschreven kan worden met slechts een gering aantal modelparameters.

Figuur b1.1: Principe van het transfer-ruismodel van de grondwaterstand, hier met het potentieel neerslagoverschot en een winning als invoerreeksen.



Ontwikkelen van een Box-Jenkins model

Het ontwikkelen van een Box-Jenkins model is - net als bij de meeste modellen - een iteratief proces. Per ronde worden drie fasen doorlopen:

1) identificatie van de vorm het model;
2) schatting van de modelparameters en
3) verificatie van het model.

In het nu volgende beschrijven we de drie fasen afzonderlijk, met als toepassing de ontwikkeling van een transfer-ruismodel.

Identificeren van de modelvorm

Aan de hand van diagnostieken van de relaties tussen de uitvoerreeks en de invoerreeksen, bij voorkeur aangevuld met fysisch inzicht in deze relaties, wordt de vorm van het model gepostuleerd. De diagnostieken worden geleverd door de (steekproef) kruiscorrelatiefuncties van de uitvoerreeks en elke afzonderlijke invoerreeks. Zo'n functie geeft de kruiscorrelatiecoëfficiënt, een maat voor de samenhang tussen de waarde van de invoerreeks en de uitvoerreeks k tijdseenheden later, als functie van k (de 'lag'). Een kruiscorrelatie functie wordt vaak geplot weergegeven (het kruiscorrelogram), omdat dit de diagnose aanzienlijk vergemakkelijkt. Omdat het beeld van de relatie vertroebeld kan worden door de autocorrelaties binnen de reeksen, worden beide vóór het berekenen van de kruiscorrelatiefunctie door een filter gehaald, namelijk het inverse Arima-model voor de invoerreeks. Deze aanpak noemt men ook wel het 'witten'[Box and Jenkins, 1976].

In deze identificatiefase dient tevens de vorm van het ruismodel te worden geformuleerd. Hiervoor zijn verschillende benaderingen mogelijk. Als er met grote waarschijnlijkheid van kan worden uitgegaan dat alle relevante dynamische invloedsfactoren in het transfer-ruismodel zijn opgenomen, kan het ruismodel worden geformuleerd als een stationair model. Zo'n model beschrijft een tijdreeks die voldoet aan een bepaald statistisch evenwicht en in feite met een constante spreiding rond een constante waarde schommelt. Als er daarentegen (vermoedelijk) relevante dynamische invloedsfactoren ontbreken, kan het ruismodel in

eerste instantie worden geformuleerd als het Arima-model voor de uitvoerreeks. In alle gevallen zal de juistheid of onjuistheid van de formulering van het ruismodel blijken in de verificatiefase.

Schatten van de modelparameters
De parameters van het geïdentificeerde model worden geschat volgens een optimalisatieprocedure, waarbij de som van de kwadraten van de residuën - een functie van de modelparameters - wordt geminimaliseerd. Dit noemt men ook wel de kleinste kwadratenmethode.

Verifiëren van het model
In de verificatiefase wordt nagegaan of het model de tijdreeks adequaat beschrijft en of voldaan wordt aan alle vooronderstellingen die aan het model ten grondslag liggen (residuën afkomstig uit dezelfde normale kansverdeling, onafhankelijk van elkaar en zonder relatie met de afzonderlijke invoerreeksen). Hierbij wordt gebruik gemaakt van diagnostieken van de residuën, zoals een plot, een histogram en enkele (steekproef-)correlatiefuncties, alsmede de schatting van de variantie van de residuën, de statistische significantie van de modelparameters en de correlatiematrix van de parameterschatters. Bij een onbevredigende diagnose kan een betere modelvorm geformuleerd worden aan de hand van de geconstateerde discrepanties. Het ontwikkelproces vervolgt dan weer met de schatting van de modelparameters.

Betrouwbaarheidsinterval van een geschatte parameter
De schatting van de parameter van een transfer-ruismodel kan opgevat worden als een waarde van een schatter, een stochastische (of toevals-)variabele met een bepaalde kansverdeling. Een schatting gaat gepaard met een maat voor de spreiding van deze kansverdeling: de standaardafwijking (de wortel uit de variantie). De standaardafwijking van een schatter wordt ook wel als standaardfout aangeduid. Als voldaan wordt aan de vooronderstellingen die ten grondslag liggen aan het transfer-ruismodel, heeft een schatter een normale kansverdeling waarvan het gemiddelde overeenkomt met de echte waarde van de te schatten parameter. Aan de hand van de schatting en de standaardfout kan dan het interval worden aangegeven waarbinnen de echte waarde van de parameter zal liggen met een bepaalde betrouwbaarheid (meestal wordt hiervoor 95% genomen). Dit noemt men het (95%) betrouwbaarheidsinterval. Als dit interval de waarde 0 bevat, is de modelparameter statistisch niet significant.

Formuleren van een transfer-ruismodel
De Box-Jenkins formulering van de dynamische relatie tussen een invoerreeks en een uitvoerreeks van een systeem is afgeleid van de algemene weergave van een discreet lineair dynamisch systeem met een lineaire differentie vergelijking. Voor een systeem met één invoerreeks geldt bijvoorbeeld de volgende differentievergelijking:

$$(1 + C_1\Delta + \ldots + C_r\Delta^r)Z_t = g(1 + D_1\Delta + \ldots + D_s\Delta^s)X_t \qquad 4$$

met Z de afwijking van de uitvoerreeks ten opzichte van zijn gemiddelde, X de afwijking van de invoerreeks ten opzichte van zijn gemiddelde, t de discrete tijdsindex, $C_1 \ldots C_r$ en $D_1 \ldots D_s$ modelparameters, ∇ de differentie-operator ($\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}$) en g de evenwichtsrelatie tussen Z en X (Engels: 'steady-state gain'). De evenwichtsrelatie is een belangrijke karakteristiek van een dynamische relatie. Het is in feite de waarde die de uitvoerreeks aan zal nemen als de invoerreeks continu op de waarde +1 wordt gehouden. Of, in het geval van de modellering van de grondwaterstand aan de hand van een grondwaterwinning, de stationaire verlaging van de grondwaterstand bij een eenheid van die grondwaterwinning.

De oplossing van bovenstaande differentievergelijking kan worden uitgeschreven als:

$$Z_t = \sum_{u=0}^{\infty} \nu_u \cdot X_{t-u}$$

$$= \nu_0 X_t + \nu_1 X_{t-1} + \nu_2 X_{t-2} + \ldots \qquad 5$$

$$= (\nu_0 + \nu_1 B + \nu_2 B^2 + \ldots) X_t$$

met ν_0, ν_1, ν_2... de impuls-respons gewichten (die samen de discrete impuls-respons functie vormen) en B de backshift-operator ($BX_t=X_{t-1}$, let wel: B is geen modelparameter, maar slechts een operator die dient om de notatie te vereenvoudigen!). Deze impuls-respons functie vertegenwoordigt de dynamica van het systeem en beschrijft de reactie van de uitvoerreeks Z op een eenheidspuls in de invoerreeks X. En als X bestaat uit een opeenvolging van verschillende pulsen, wordt Z beschreven als de som van door X geschaalde impuls-respons gewichten.

In Box-Jenkins notatie wordt een differentievergelijking met één invoerreeks uitgeschreven als:

$$(1 - \delta_1 B - \ldots - \delta_r B^r) Z_t = (\omega_0 - \omega_1 B - \ldots - \omega_s B^s) X_t \qquad 6$$

met $\delta_1 \ldots \delta_r$ de autoregressieve parameters, $\omega_0 \ldots \omega_s$ de moving-average parameters en B de backshift-operator (hier gebruikt als substituut voor ∇, aangezien $B=1-\nabla$). Dit noemt men de transferfunctie van de orde (r,s).
In nóg compactere vorm wordt dit ook wel als volgt uitgeschreven:

$$Z_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} X_t \qquad 7$$

met $\omega(B)$ de moving-average operator voor X, volgens:

$$\omega(B) X_t = \omega_0 X_t - \omega_1 X_{t-1} - \ldots - \omega_s X_{t-s} \qquad 8$$

en $\delta(B)$ de autoregressieve operator, die inwerkt op Z, volgens:

$$\delta(B) Z_t = Z_t - \delta_1 Z_{t-1} - \ldots - \delta_r Z_{t-r} \qquad 9$$

Het Box-Jenkins transfer-ruismodel is een model om een tijdreeks te beschrijven als een som van transferfuncties van de relevante dynamische invloedsfactoren, aangevuld met een ruisterm. In deze zin vormt het een discreet lineair dynamisch stochastisch model. In compacte vorm kan het transfer-ruismodel als volgt worden uitgeschreven:

$$Z_t = \frac{\omega 1(B)}{\delta 1(B)} X_{1t} + \ldots + \frac{\omega m(B)}{\delta m(B)} X m_t + N_t \qquad 10$$

met $X_1 \ldots X_m$ de dynamische invloedsfactoren en N de ruis.

De tijdreeks van de ruis vertegenwoordigt de invloed van alle invloedsfactoren die niet in het model zijn opgenomen. Over het algemeen bevat zo'n reeks nog regelmatigheden die beschreven kunnen worden met een univariaat model (ook wel Arima-model genaamd).

Het univariate model
Een univariaat model beschrijft een variabele als lineaire functie van voorgaande waarden van deze variabele en het modelresidu. De algemene vorm van een univariaat model is:

$$\phi(B)\Phi(B^S)(\nabla^d \nabla_S^D Z_t^\lambda - c) = \theta(B)\Theta(B^S)a_t \qquad 11$$

met Z de variabele, a het modelresidu, t de tijdsindex, ∇ de differentie operator ($\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}$), d het aantal differenties, S de seizoensperiode (met dagelijkse waarnemingen en een weekcyclus is deze bijvoorbeeld 7), ∇_S de seizoensdifferentie-operator ($\nabla_S Z_t = N_t - N_{t-S}$), D het aantal seizoensdifferenties, λ de transformatieparameter (λ=1 als Z normaal verdeeld is) en c een constante.

Verder bevat deze formulering de volgende operatoren:
- $\phi(B)$ de autoregressieve operator, volgens:

$$\phi(B)Z_t = Z_t - \phi_1 Z_{t-1} - \ldots - \phi_p N_{t-p} \qquad 12$$

met $\phi_1 \ldots \phi_p$ de autoregressieve parameters;

- $\Phi(B^S)$ de autoregressieve seizoensoperator, volgens:

$$\Phi(B^S)Z_t = Z_t - \Phi_1 Z_{t-S} - \ldots - \Phi_P N_{t-P \bullet S} \qquad 13$$

met $\Phi_1 \ldots \Phi_P$ de autoregressieve seizoenparameters;

- $\theta(B)$ de moving-average operator, volgens:

$$\theta(B)a_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \ldots - \theta_q a_{t-q} \qquad 14$$

met $\theta_1 \ldots \theta_q$ de moving-average parameters;

- en $\Theta(B^S)$ de moving-average seizoensoperator, volgens:

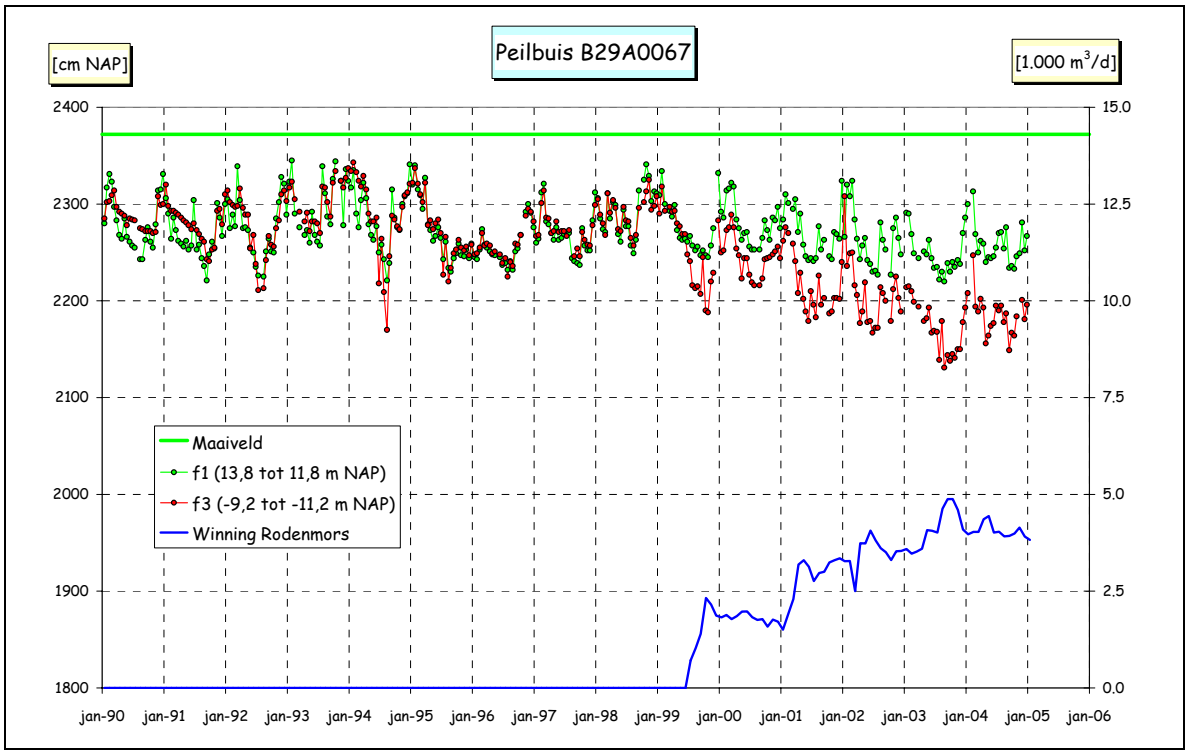
$$\Theta(B^S)a_t = a_t - \Theta_1 a_{t-S} - \ldots - \Theta_Q a_{t-Q \bullet S} \qquad 15$$

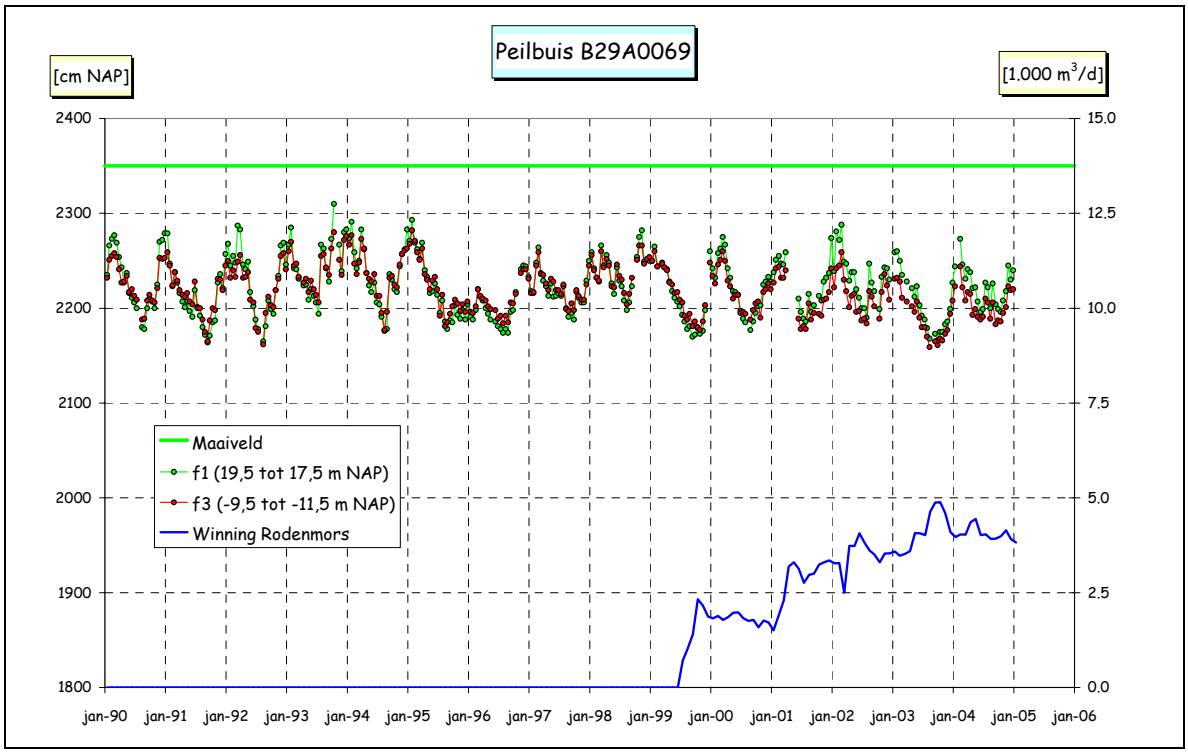
met $\Theta_1 \ldots \Theta_Q$ de moving-average seizoenparameters.

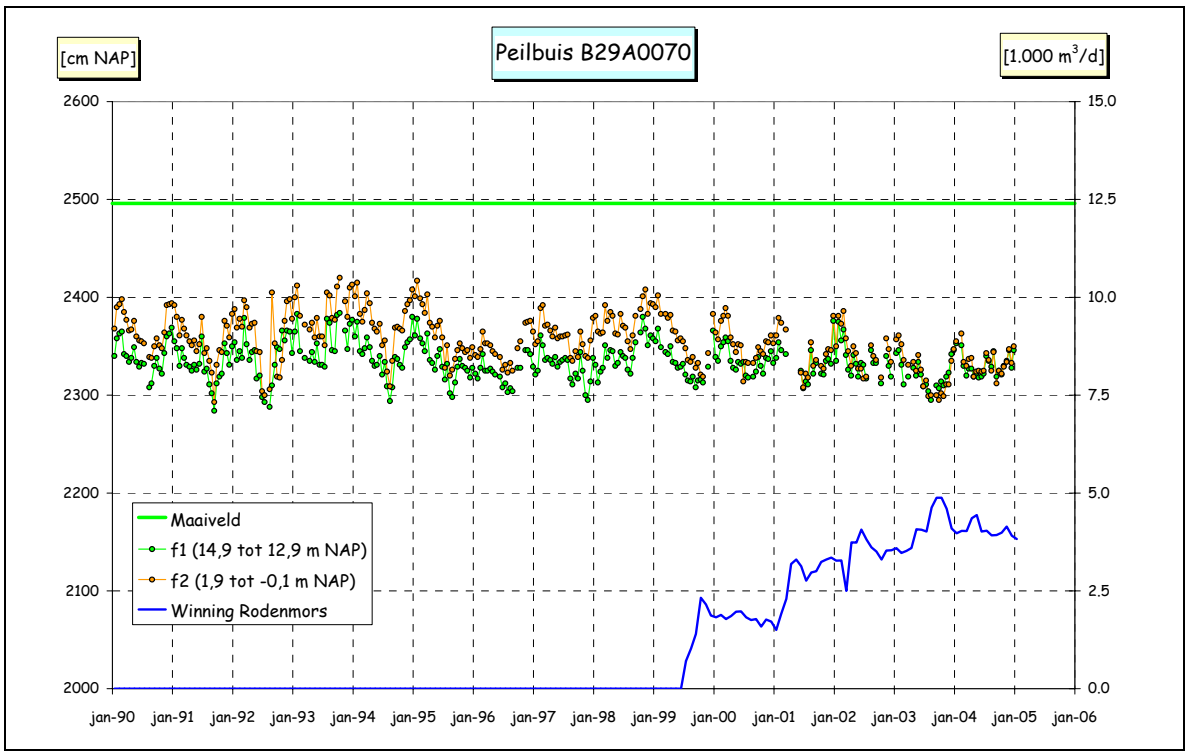
Bijlage 2: Algemene gegevens peilfilters en meetreeksen

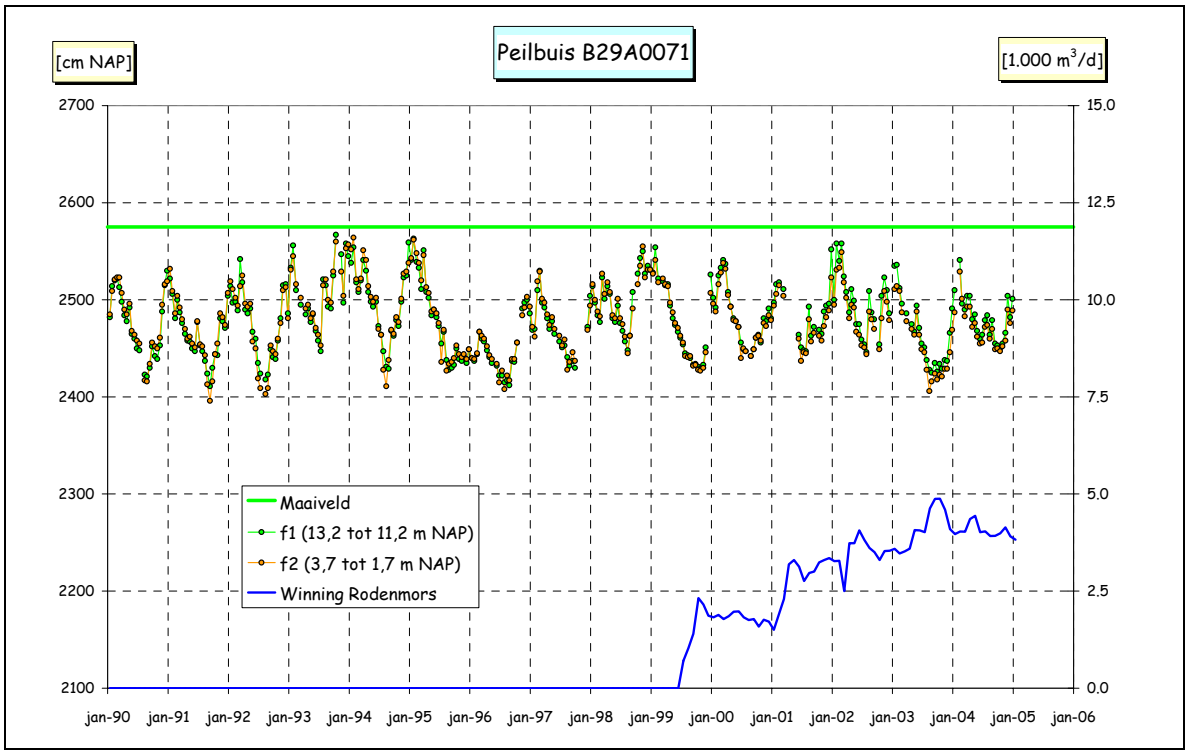
Peilbuis	Filtnr	Oude code	X-coord [km]	Y-coord [km]	Maaiveld [cm NAP]	Bkf [cm NAP]	Okf [cm NAP]	Afstand [km]
B29A0067	1	29AP0067	267.540	490.670	2372	1380	1180	0.54
	3	29AP0067	267.540	490.670	2372	-920	-1120	
B29A0069	1	29AP0069	266.140	490.130	2350	1950	1750	1.23
	3	29AP0069	266.140	490.130	2350	-950	-1150	
B29A0070	1	29AP0070	267.140	489.150	2496	1490	1290	1.04
	2	29AP0070	267.140	489.150	2496	190	-10	
B29A0071	1	29AP0071	268.760	489.670	2575	1320	1120	1.47
	2	29AP0071	268.760	489.670	2575	370	170	
B29A0072	1	29AP0072	268.120	488.210	2599	2294	2194	2.09
	5	29AP0072	268.120	488.210	2599	-2206	-2406	
B29A0073	1	29AP0073	266.560	491.450	2328	1923	1823	1.53
	6	29AP0073	266.560	491.450	2328	-4077	-4177	
B29A0080	1	29AP0080	268.040	490.215	2514	2060	1860	0.67
	2	29AP0080	268.040	490.215	2514	-1090	-1290	
B29A0081	1	29AP0081	267.772	489.525	2511	2215	2015	0.75
	3	29AP0081	267.772	489.525	2511	-995	-1195	
B29A0082	1	29AP0082	268.325	489.100	2600	2200	2000	1.42
	3	29AP0082	268.325	489.100	2600	-1500	-1700	
B29A0083	1	29AP0083	268.400	490.045	2523	2075	1875	1.03
B29A0084	1	29AP0084	268.140	489.655	2570	2220	2020	0.92
B29A0085	1	29AP0085	266.960	490.085	2285	1885	1685	0.42
	2	29AP0085	266.960	490.085	2285	985	785	
B29A0158	1	29AL0041	269.750	488.200	2892	2695	2595	3.08
B29A0159	1	29AL9001	268.170	491.105	2452	2150	2050	1.24
B29A0160	1	29AL9002	268.005	490.625	2455	2155	2055	0.79
B29A0161	1	29AL9003	267.125	490.650	2279	2020	1920	0.55
B29A0162	1	29AL9004	268.745	490.300	2593	2240	2140	1.38
B29A0163	1	29AL9005	267.615	489.945	2488	2155	2055	0.32
B29A0164	1	29AL9006	267.015	489.730	2334	2110	2010	0.56

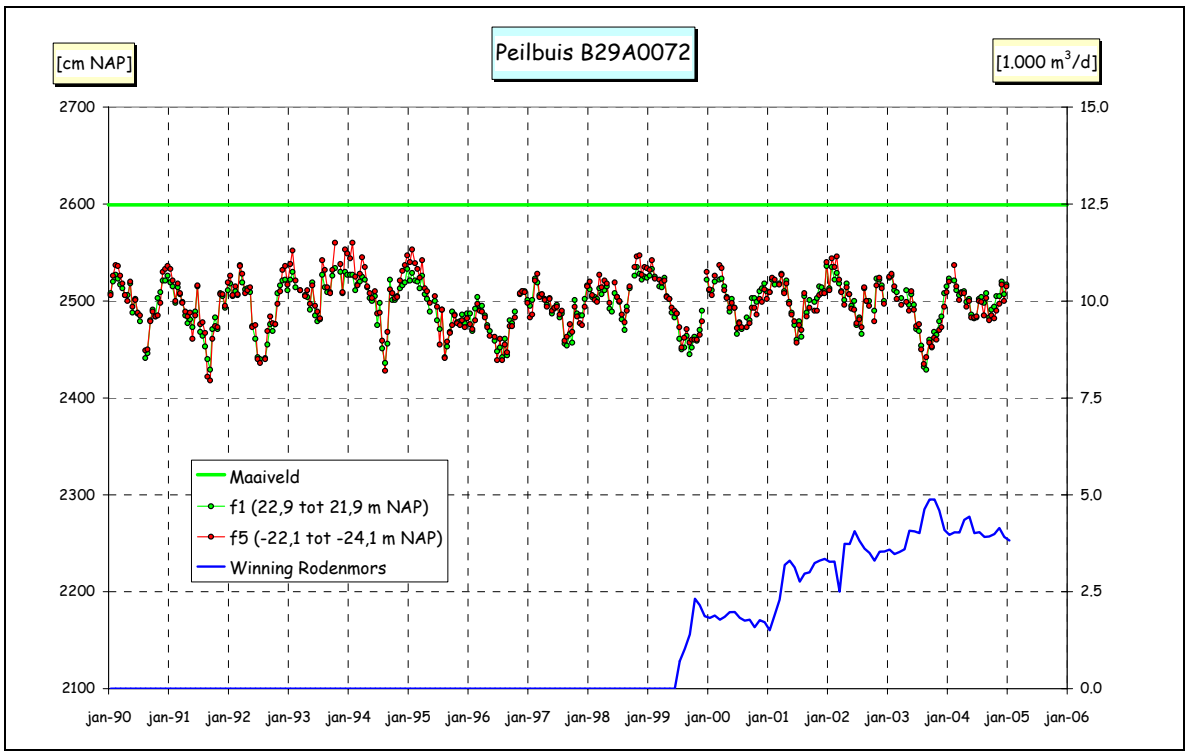
Bijlage 3: Grafieken grondwaterstandsreeksen

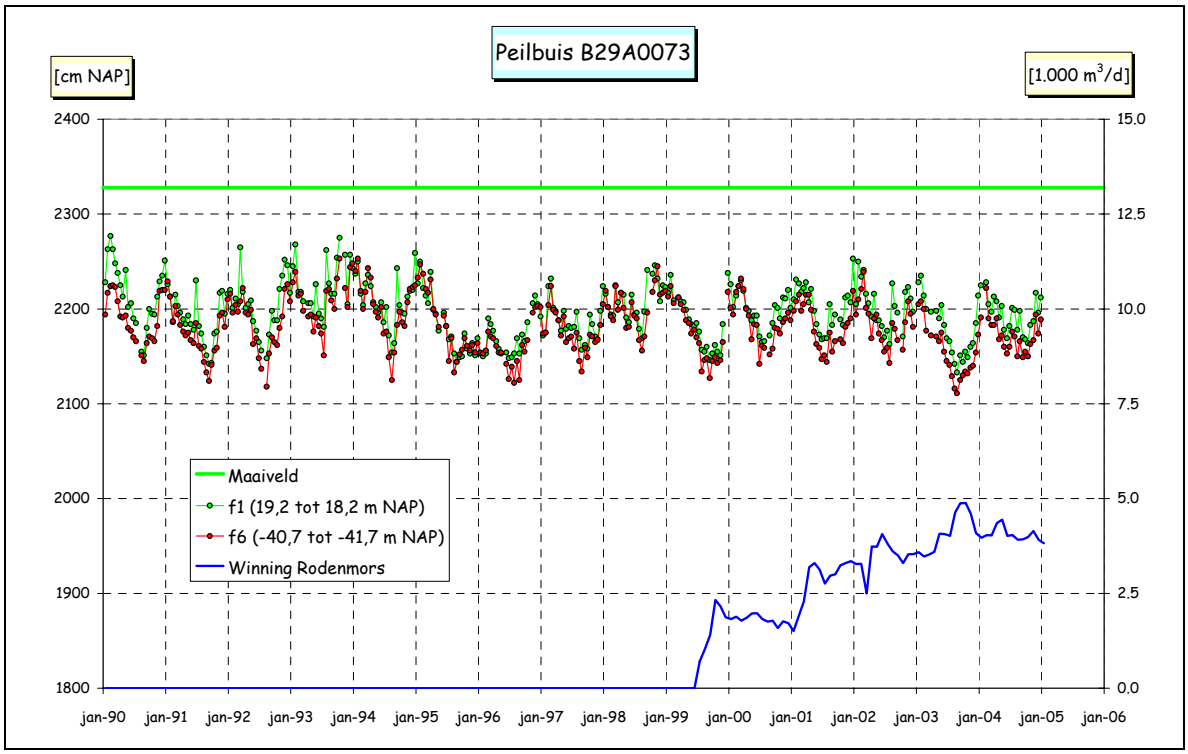


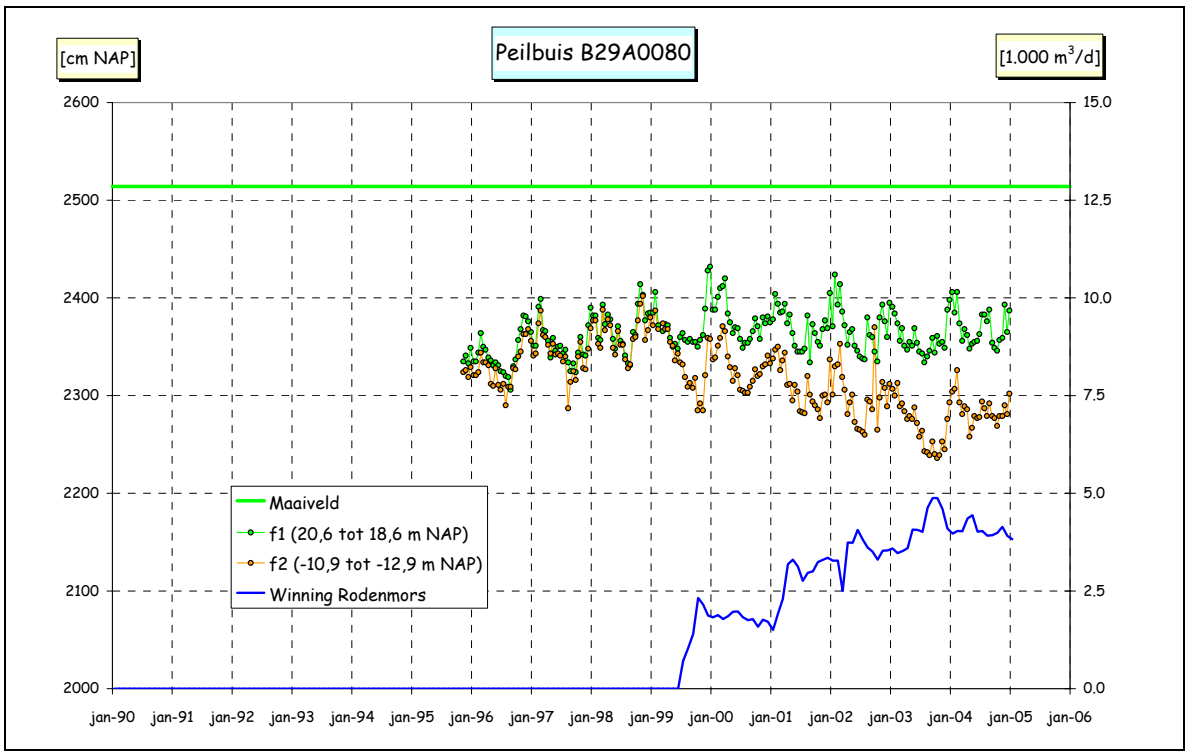


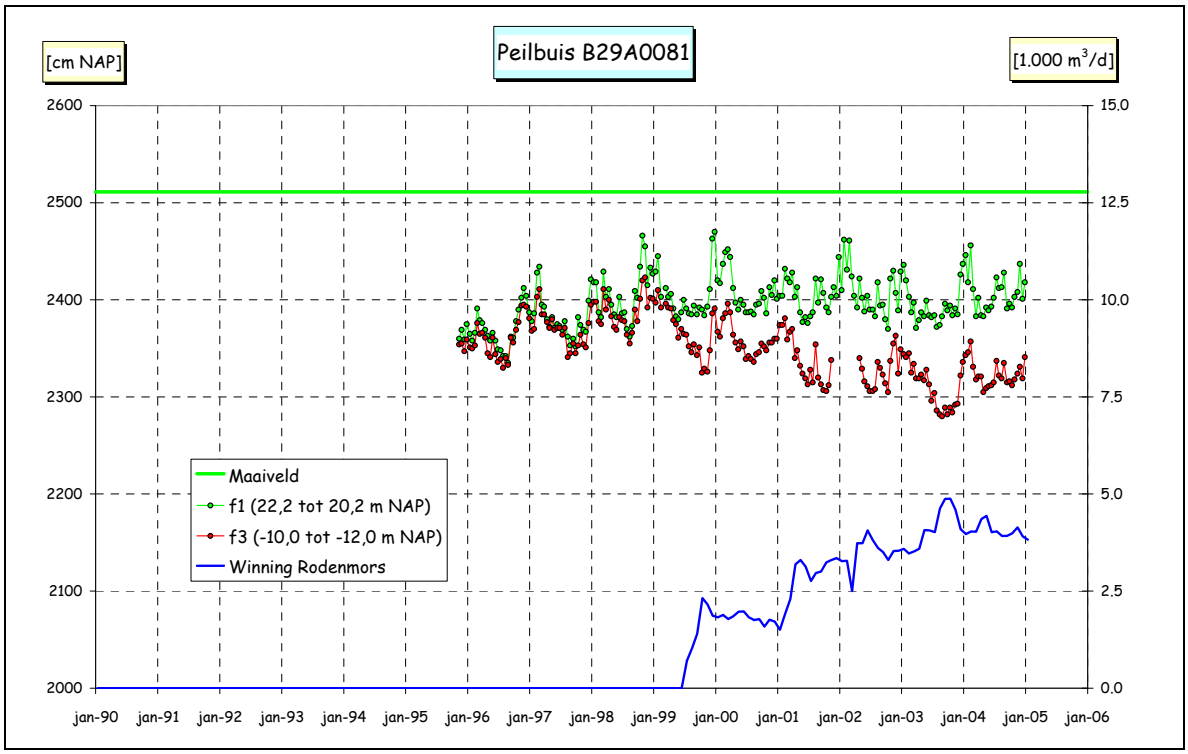

Peilbuis B29A0070
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
jan-90
jan-91
jan-92
jan-93
jan-94
jan-95
jan-96
jan-97
jan-98
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05
jan-06
Maaiveld
f1 (14,9 tot 12,9 m NAP)
f2 (1,9 tot -0,1 m NAP)
Winning Rodenmors

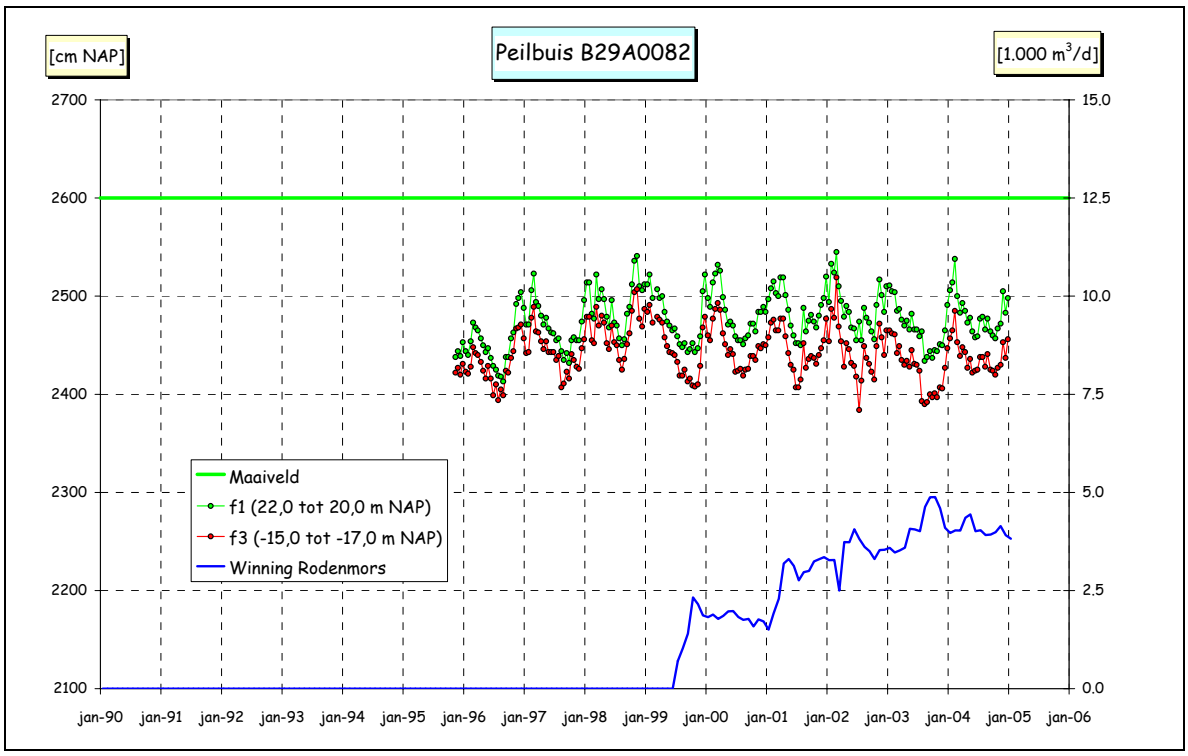

Peilbuis B29A0071
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2700
2600
2500
2400
2300
2200
2100
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
jan-90
jan-91
jan-92
jan-93
jan-94
jan-95
jan-96
jan-97
jan-98
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05
jan-06
Maaiveld
f1 (13,2 tot 11,2 m NAP)
f2 (3,7 tot 1,7 m NAP)
Winning Rodenmors

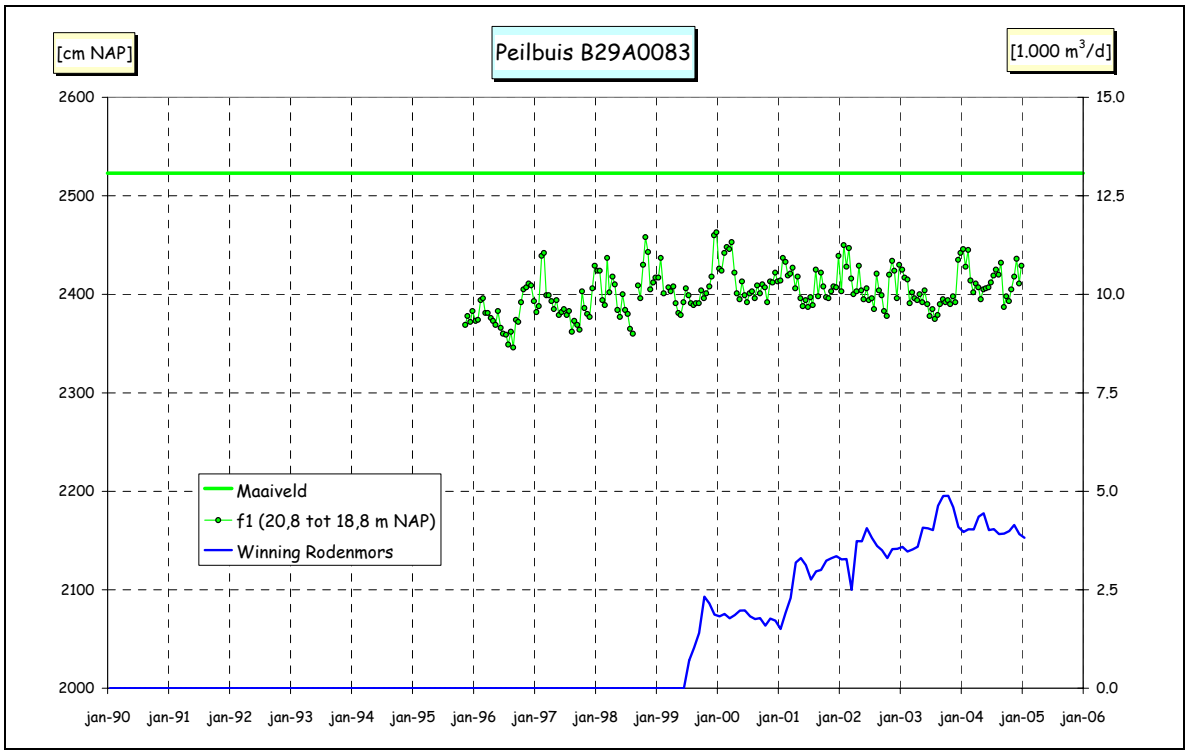

Peilbuis B29A0072
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2700
2600
2500
2400
2300
2200
2100
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
Maaiveld
f1 (22,9 tot 21,9 m NAP)
f5 (-22,1 tot -24,1 m NAP)
Winning Rodenmors
jan-90 jan-91 jan-92 jan-93 jan-94 jan-95 jan-96 jan-97 jan-98 jan-99 jan-00 jan-01 jan-02 jan-03 jan-04 jan-05 jan-06

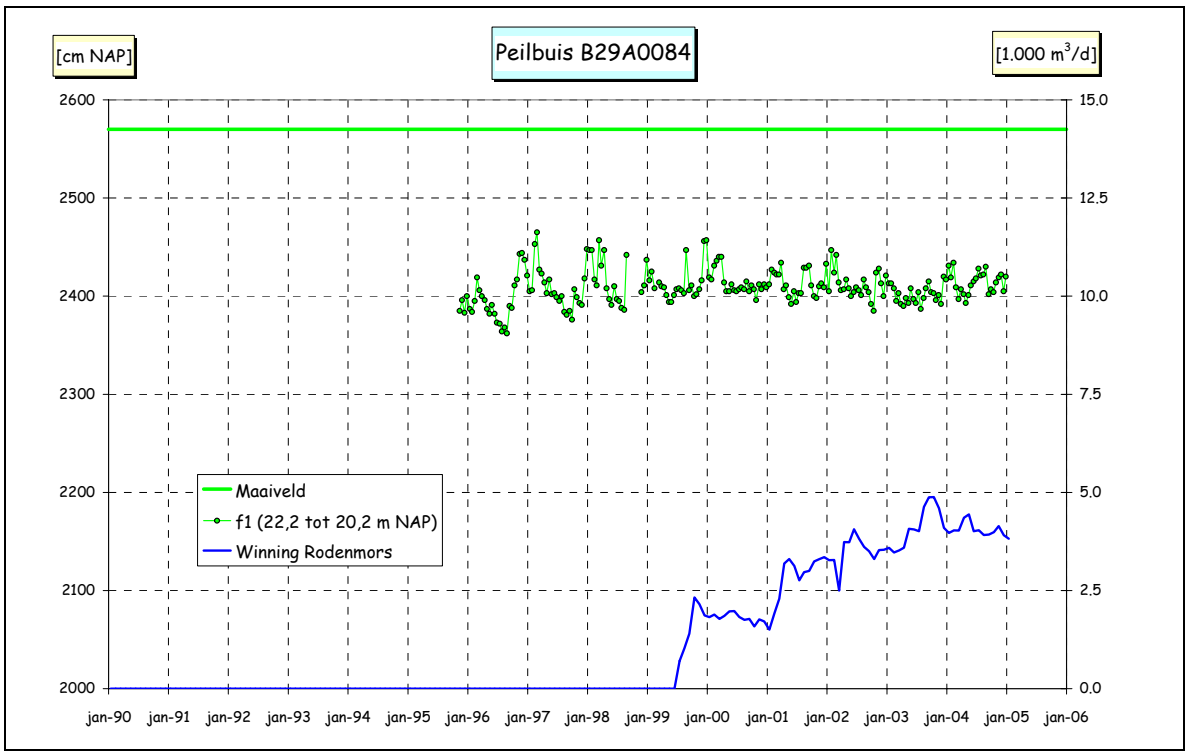

Peilbuis B29A0073
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2400
2300
2200
2100
2000
1900
1800
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
Maaiveld
f1 (19,2 tot 18,2 m NAP)
f6 (-40,7 tot -41,7 m NAP)
Winning Rodenmors
jan-90 jan-91 jan-92 jan-93 jan-94 jan-95 jan-96 jan-97 jan-98 jan-99 jan-00 jan-01 jan-02 jan-03 jan-04 jan-05 jan-06

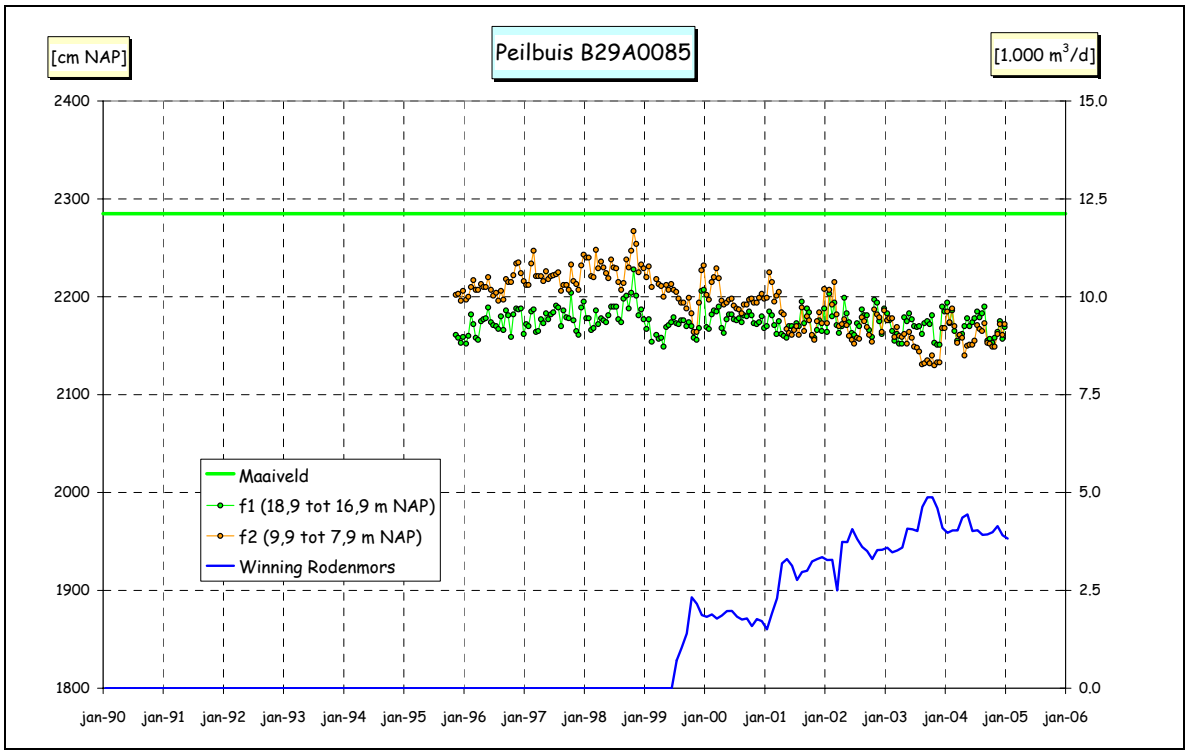

Peilbuis B29A0080
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
jan-90
jan-91
jan-92
jan-93
jan-94
jan-95
jan-96
jan-97
jan-98
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05
jan-06
Maaiveld
f1 (20,6 tot 18,6 m NAP)
f2 (-10,9 tot -12,9 m NAP)
Winning Rodenmors

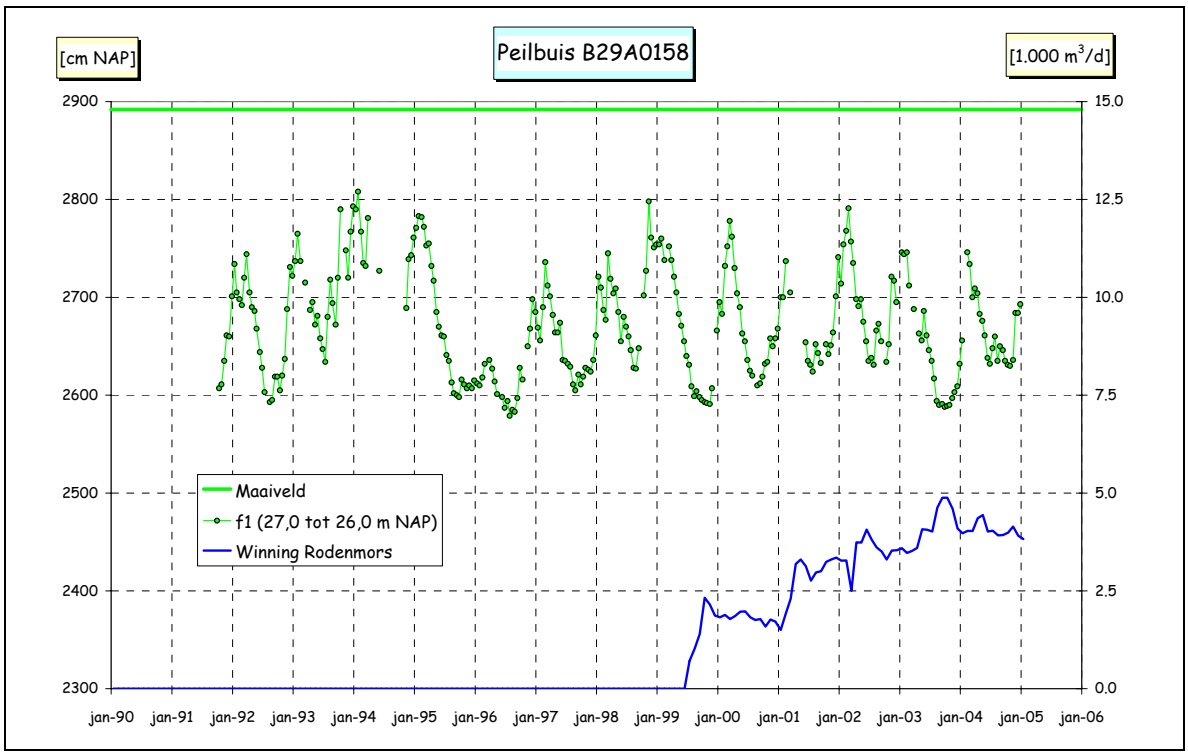

Peilbuis B29A0081
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
jan-90
jan-91
jan-92
jan-93
jan-94
jan-95
jan-96
jan-97
jan-98
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05
jan-06
Maaiveld
f1 (22,2 tot 20,2 m NAP)
f3 (-10,0 tot -12,0 m NAP)
Winning Rodenmors

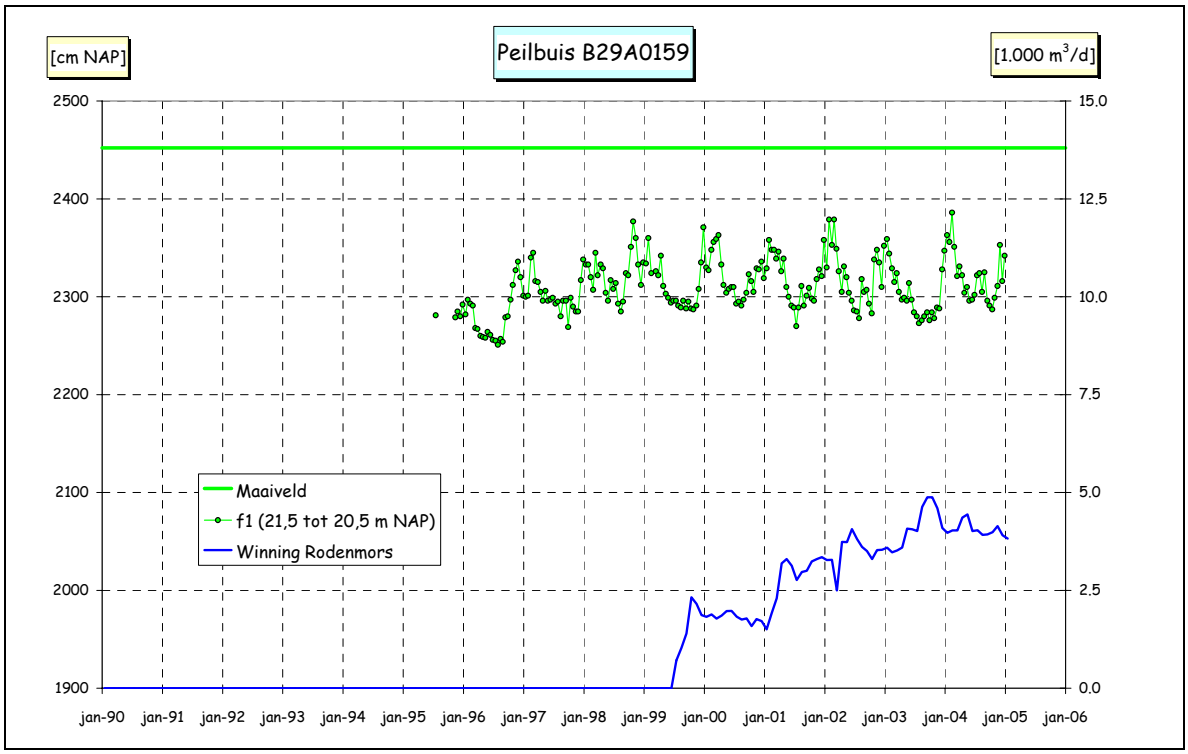

Peilbuis B29A0082
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2700
2600
2500
2400
2300
2200
2100
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
jan-90
jan-91
jan-92
jan-93
jan-94
jan-95
jan-96
jan-97
jan-98
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05
jan-06
Maaiveld
f1 (22,0 tot 20,0 m NAP)
f3 (-15,0 tot -17,0 m NAP)
Winning Rodenmors

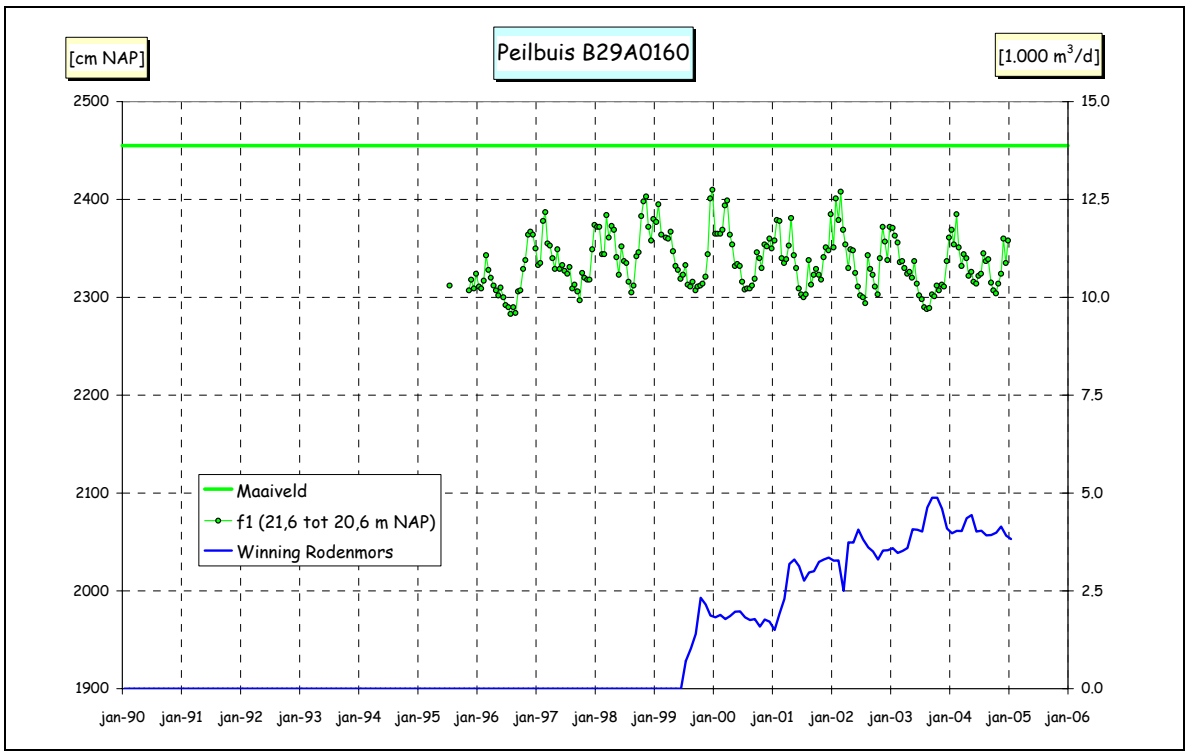

Peilbuis B29A0083
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
jan-90
jan-91
jan-92
jan-93
jan-94
jan-95
jan-96
jan-97
jan-98
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05
jan-06
Maaiveld
f1 (20,8 tot 18,8 m NAP)
Winning Rodenmors

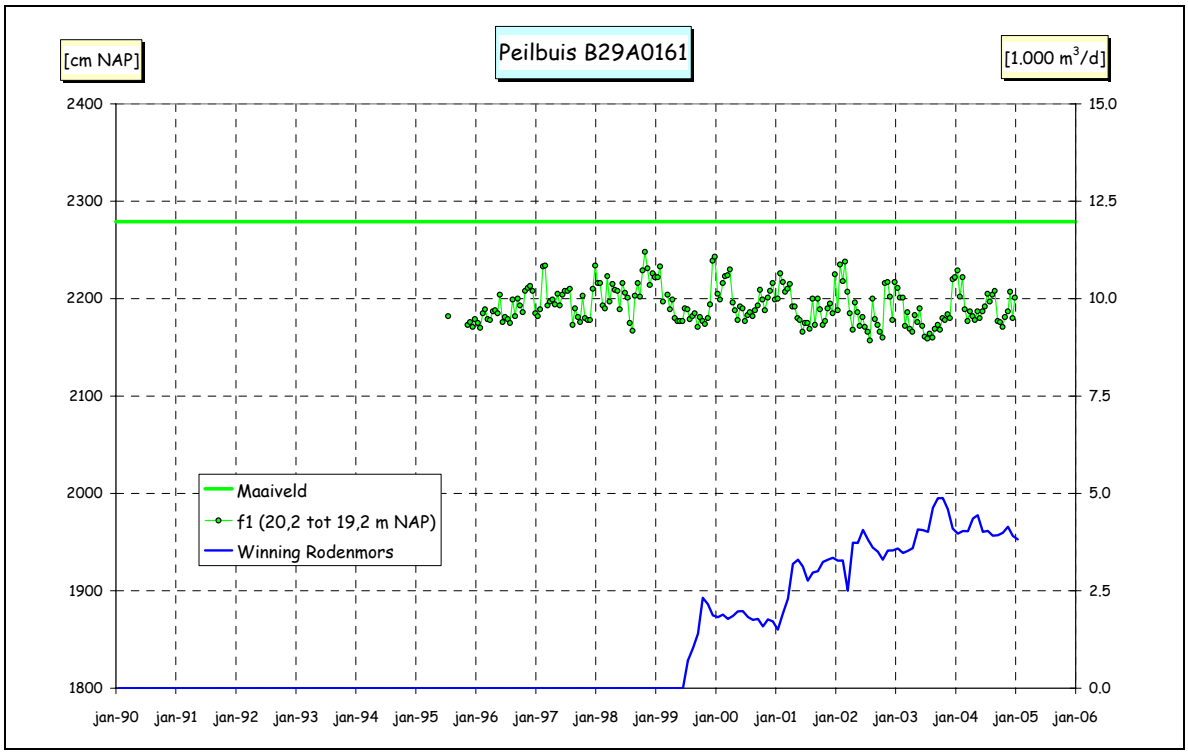

[cm NAP]
Peilbuis B29A0084
[1.000 m3/d]
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
Maaiveld
f1 (22,2 tot 20,2 m NAP)
Winning Rodenmors
jan-90 jan-91 jan-92 jan-93 jan-94 jan-95 jan-96 jan-97 jan-98 jan-99 jan-00 jan-01 jan-02 jan-03 jan-04 jan-05 jan-06

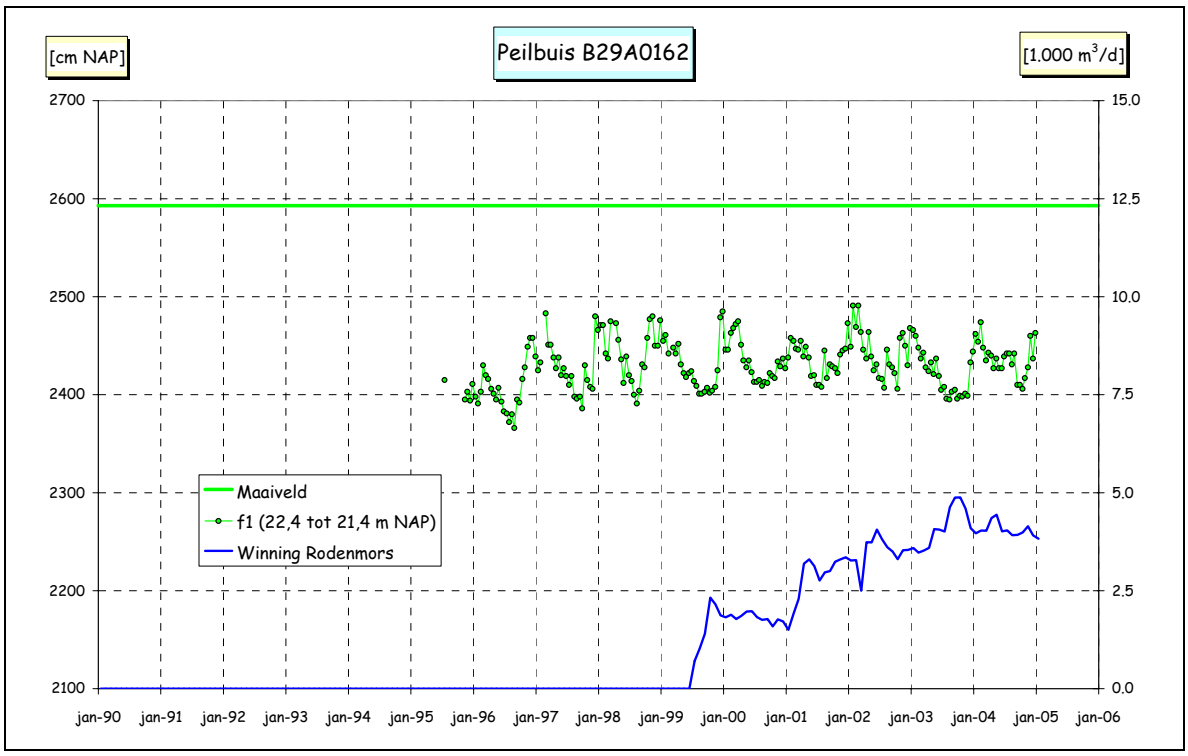

[cm NAP]
Peilbuis B29A0085
[1.000 m3/d]
2400
2300
2200
2100
2000
1900
1800
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
Maaiveld
f1 (18,9 tot 16,9 m NAP)
f2 (9,9 tot 7,9 m NAP)
Winning Rodenmors
jan-90 jan-91 jan-92 jan-93 jan-94 jan-95 jan-96 jan-97 jan-98 jan-99 jan-00 jan-01 jan-02 jan-03 jan-04 jan-05 jan-06

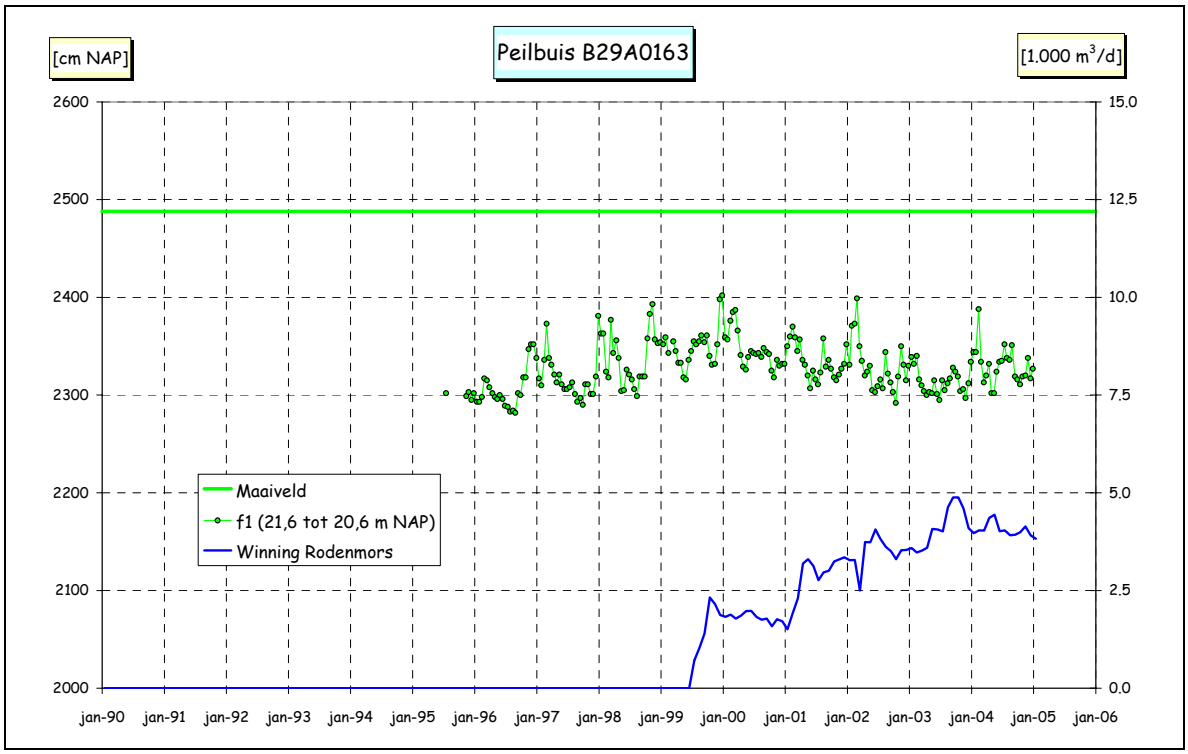

[cm NAP]
Peilbuis B29A0158
[1.000 m3/d]
2900
2800
2700
2600
2500
2400
2300
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
Maaiveld
f1 (27,0 tot 26,0 m NAP)
Winning Rodenmors
jan-90 jan-91 jan-92 jan-93 jan-94 jan-95 jan-96 jan-97 jan-98 jan-99 jan-00 jan-01 jan-02 jan-03 jan-04 jan-05 jan-06

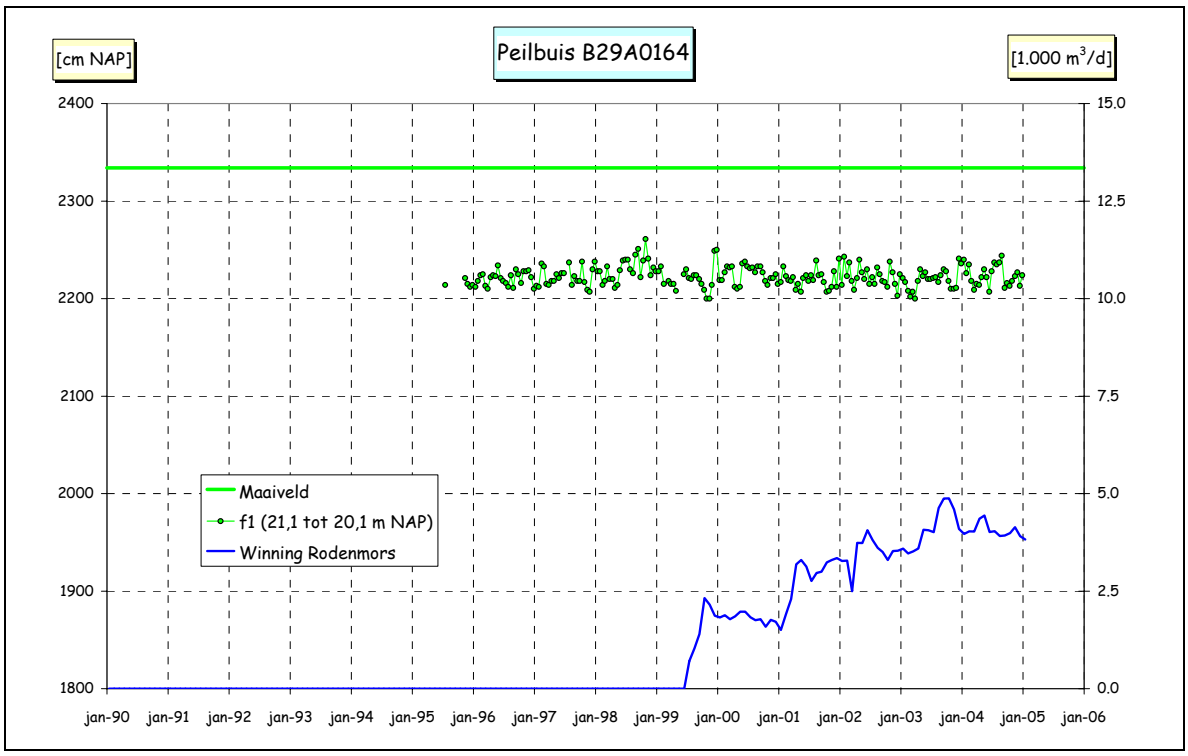

[cm NAP]
Peilbuis B29A0159
[1.000 m3/d]
2500
2400
2300
2200
2100
2000
1900
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
Maaiveld
f1 (21,5 tot 20,5 m NAP)
Winning Rodenmors
jan-90 jan-91 jan-92 jan-93 jan-94 jan-95 jan-96 jan-97 jan-98 jan-99 jan-00 jan-01 jan-02 jan-03 jan-04 jan-05 jan-06


Peilbuis B29A0160
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2500
2400
2300
2200
2100
2000
1900
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
jan-90 jan-91 jan-92 jan-93 jan-94 jan-95 jan-96 jan-97 jan-98 jan-99 jan-00 jan-01 jan-02 jan-03 jan-04 jan-05 jan-06
Maaiveld
f1 (21,6 tot 20,6 m NAP)
Winning Rodenmors


Peilbuis B29A0161
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2400
2300
2200
2100
2000
1900
1800
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
jan-90 jan-91 jan-92 jan-93 jan-94 jan-95 jan-96 jan-97 jan-98 jan-99 jan-00 jan-01 jan-02 jan-03 jan-04 jan-05 jan-06
Maaiveld
f1 (20,2 tot 19,2 m NAP)
Winning Rodenmors


Peilbuis B29A0162
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2700
2600
2500
2400
2300
2200
2100
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
Maaiveld
f1 (22,4 tot 21,4 m NAP)
Winning Rodenmors
jan-90
jan-91
jan-92
jan-93
jan-94
jan-95
jan-96
jan-97
jan-98
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05
jan-06


Peilbuis B29A0163
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
Maaiveld
f1 (21,6 tot 20,6 m NAP)
Winning Rodenmors
jan-90
jan-91
jan-92
jan-93
jan-94
jan-95
jan-96
jan-97
jan-98
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05
jan-06

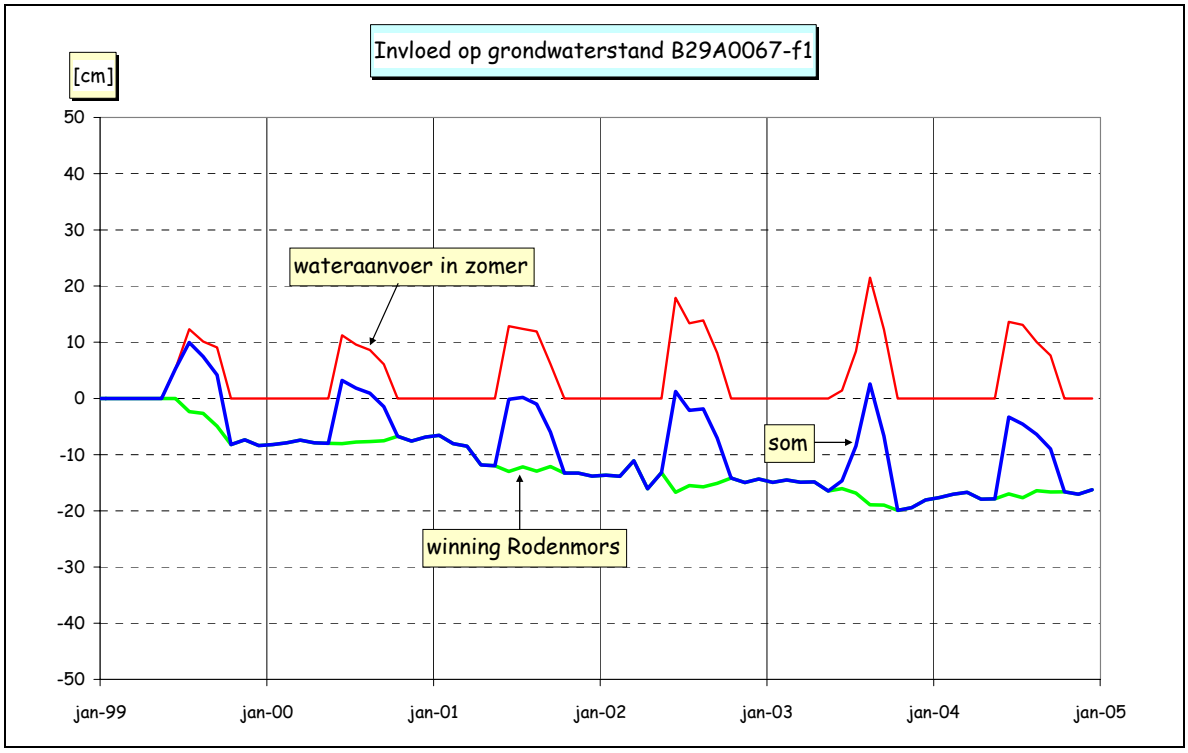

Peilbuis B29A0164
[cm NAP]
[1.000 m3/d]
2400
2300
2200
2100
2000
1900
1800
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
jan-90
jan-91
jan-92
jan-93
jan-94
jan-95
jan-96
jan-97
jan-98
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05
jan-06
Maaiveld
f1 (21,1 tot 20,1 m NAP)
Winning Rodenmors

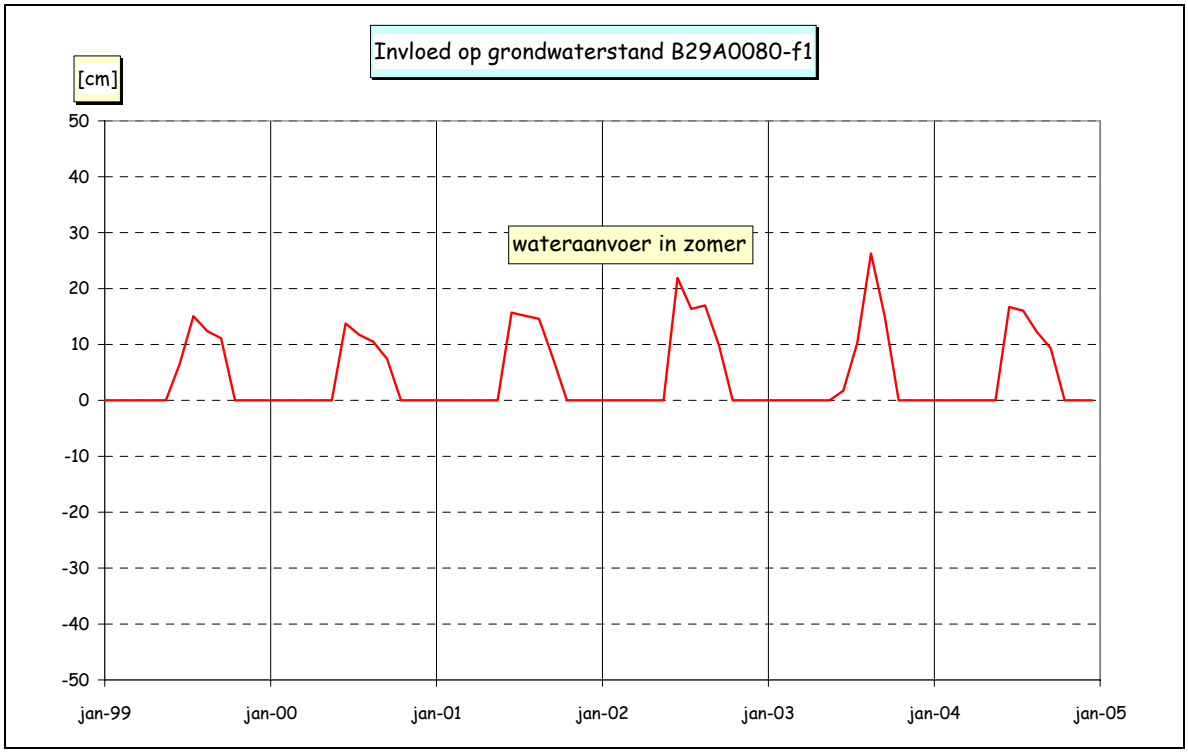
Bijlage 4: Ontwikkelde tijdreeksmodellen van de grondwaterstand

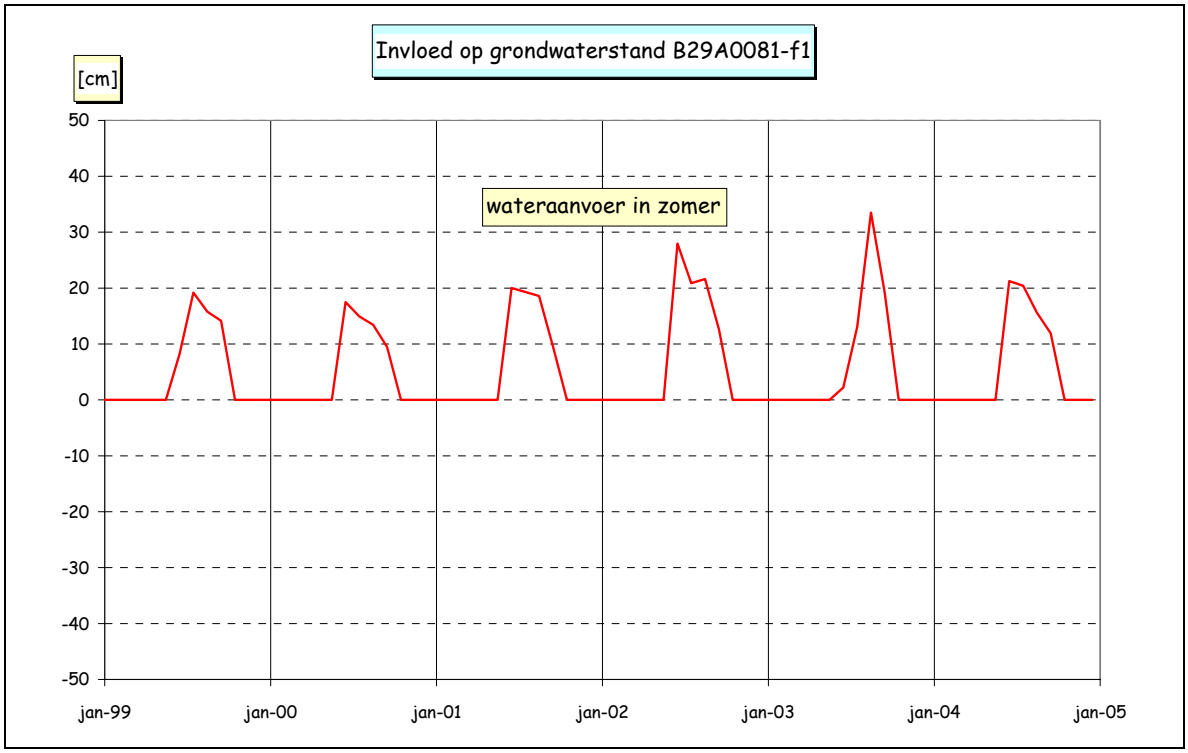
r: orde autoregressieve deel van transferfunctie (aantal delta's);
s: orde moving-average deel van transferfunctie (aantal omega's - 1);
Verand: geschatte evenwichtsrelatie (ook wel 'gain' genoemd);
St fout: standaardfout van geschatte evenwichtsrelatie (maat voor de schattingsprecisie);
Bijdr: percentage verklaarde variantie van de grondwaterstand; *p*: orde autoregressieve deel van ruismodel (aantal phi's);
d: aantal differenties in ruismodel;
q: orde moving-average deel van ruismodel (aantal theta's);
P, *D* en *Q*: als *p*, *d* en *q*, maar nu voor het seizoensdeel van het ruismodel;
c: constante van ruismodel;
modelfout Akaike: variantie van de modelresiduën, gecorrigeerd voor het aantal modelparameters (maat voor de pasvorm van het model).
De statistisch significante evenwichtsrelaties (95% betrouwbaarheid) zijn vet en gearceerd weergegeven.

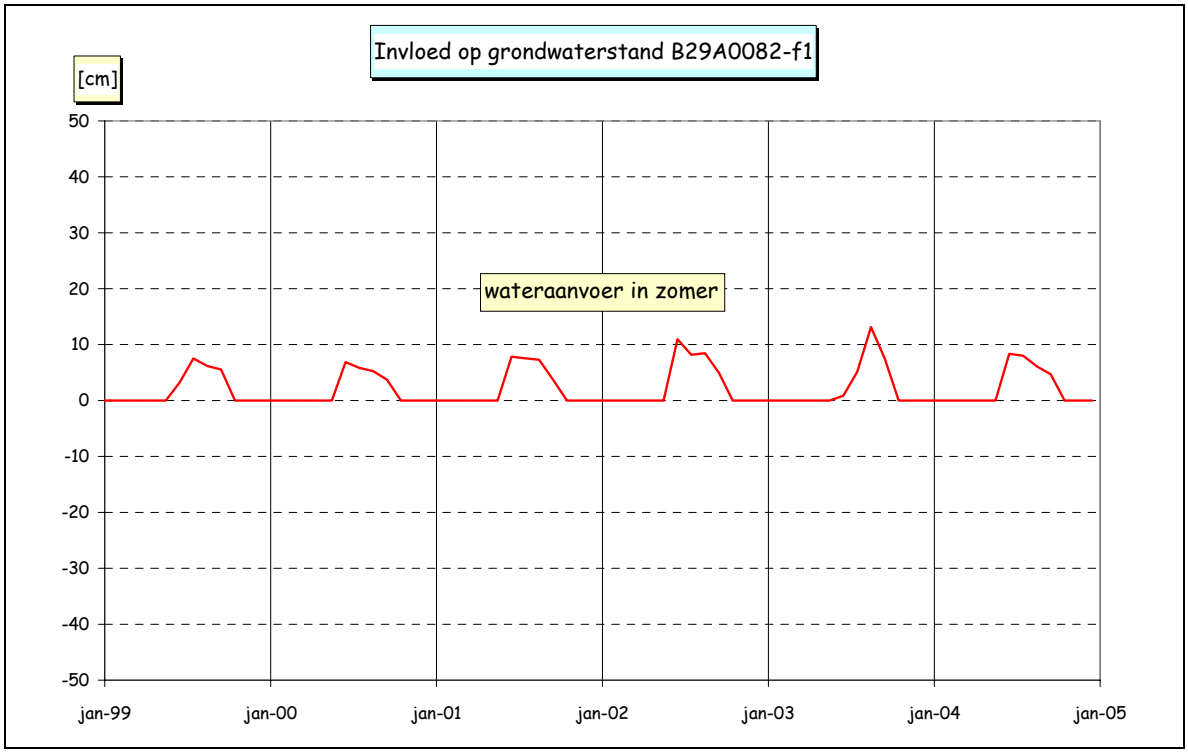
		PNO				Winning Rodenmors				Wateraanvoer zomer				Wateraanvoer winter				ruismodel				modelfout	
			Verand	St fout	Bijdr		Verand	St fout	Bijdr		Verand	St fout	Bijdr		Verand	St fout	Bijdr			c	Bijdr	Akaike	modelperiode
Peilbuis	Filt	r,s	[cm/(mm/d)]		[%]	r,s	[cm/(1.000 m^3/d)]		[%]	r,s	[cm/1.000 m^3/d]		[%]	r,s	[cm/1.000 m^3/d]		[%]	p,d,q	P,D,Q	[cm]	[%]	[cm^2]	[maand]
B29A0067	1	1,0	**22.6**	1.3	*76.1%*	0,2	**-4.2**	0.8	*5.8%*	0,0	**2.3**	0.7	*2.0%*	0,0	1.5	1.2	*0.3%*	1,0,0	0,0,0	2258.8	*15.9%*	132.1	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0067	3	1,0	**23.8**	2.1	*23.0%*	0,2	**-23.0**	1.1	*68.9%*	0,0	0.7	0.9	*0.1%*	0,0	0.2	1.3	*0.0%*	1,0,0	0,0,0	2262.3	*8.0%*	155.5	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0069	1	1,0	**32.2**	2.3	*84.0%*	0,2	1.2	0.9	*0.6%*									1,0,2	0,0,0	2195.7	*15.5%*	120.1	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0069	3	1,0	**22.9**	1.2	*79.6%*	0,2	**-4.3**	0.5	*8.6%*									1,0,0	0,0,0	2207.7	*11.8%*	66.8	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0070	1	1,0	**11.3**	1.0	*66.6%*	0,2	-0.9	0.6	*1.2%*									1,0,0	0,0,0	2328.5	*32.2%*	85.2	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0070	2	1,0	**18.6**	1.2	*63.3%*	0,2	**-6.7**	0.5	*22.0%*									1,0,0	0,0,0	2351.2	*14.6%*	81.0	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0071	1	1,0	**40.2**	2.6	*86.6%*	0,2	1.0	1.1	*0.3%*	0,0	0.4	0.9	*0.0%*	0,0	-0.6	1.3	*0.0%*	1,0,0	0,0,0	2447.4	*13.1%*	147.2	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0071	2	1,0	**40.1**	2.2	*88.9%*	0,2	0.2	0.9	*0.1%*	0,0	0.1	0.8	*0.0%*	0,0	0.0	1.2	*0.0%*	1,0,0	0,0,0	2449.0	*11.0%*	125.4	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0072	1	1,0	**20.2**	1.6	*80.5%*	0,2	1.2	0.8	*0.8%*									1,0,0	0,0,0	2481.2	*18.7%*	77.8	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0072	5	1,0	**26.9**	1.6	*87.6%*	0,2	1.0	0.6	*0.4%*									1,0,0	0,0,0	2477.0	*12.0%*	77.9	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0073	1	1,0	**22.0**	2.1	*71.5%*	0,2	-0.6	1.2	*0.3%*									1,0,0	0,0,0	2182.3	*28.3%*	158.9	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0073	6	1,0	**31.6**	1.7	*87.3%*	0,2	-2.2	1.2	*1.5%*									1,0,2	0,0,0	2162.3	*11.3%*	79.8	jan 1990 t/m dec 2004
B29A0080	1	1,0	**20.6**	1.8	*74.3%*	0,2	1.5	1.4	*1.4%*	0,0	**2.9**	0.7	*6.0%*	0,0	1.7	0.9	*0.8%*	1,0,1	0,0,0	2343.7	*17.6%*	93.9	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0080	2	1,0	**23.0**	2.5	*31.9%*	0,2	**-15.9**	1.0	*57.8%*	0,0	**1.8**	0.9	*1.1%*	0,0	-2.0	1.2	*0.5%*	1,0,0	0,0,0	2332.0	*8.8%*	132.4	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0081	1	1,0	**21.1**	1.6	*72.6%*	0,2	1.3	1.4	*0.8%*	0,0	**3.7**	0.7	*8.3%*	0,0	1.8	1.0	*0.8%*	1,0,1	0,0,0	2377.6	*17.4%*	102.3	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0081	3	1,0	**21.9**	1.7	*34.7%*	0,2	**-12.8**	0.7	*55.9%*	0,0	**2.0**	0.6	*2.0%*	0,0	0.6	0.8	*0.1%*	1,0,0	0,0,0	2357.1	*7.3%*	73.1	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0082	1	1,0	**36.1**	2.1	*87.2%*	0,2	**1.9**	0.8	*2.8%*	0,0	**1.5**	0.6	*1.1%*	0,0	0.1	0.9	*0.0%*	1,0,0	0,0,0	2446.8	*8.9%*	75.0	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0082	3	1,0	**32.0**	1.8	*88.5%*	0,2	**-2.3**	0.6	*2.5%*	0,0	1.0	0.6	*0.6%*	0,0	-0.1	0.8	*0.0%*	1,0,0	0,0,0	2426.4	*8.4%*	62.5	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0083	1	1,0	**16.6**	1.6	*67.6%*	0,2	1.8	1.4	*1.8%*	0,0	**2.8**	0.7	*6.6%*	0,0	**2.8**	0.9	*2.5%*	1,0,1	0,0,0	2388.0	*21.5%*	98.4	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0084	1	1,0	**14.0**	1.6	*55.6%*	0,2	-0.3	0.9	*0.6%*	0,0	**4.3**	0.8	*18.9%*	0,0	1.3	1.1	*0.7%*	1,0,0	0,0,0	2395.0	*24.3%*	108.7	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0085	1	0,0	**2.7**	0.6	*14.9%*	0,2	**-1.3**	0.6	*5.9%*									1,0,0	0,0,0	2178.7	*79.2%*	93.6	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0085	2	1,0	**8.7**	1.0	*15.6%*	0,2	**-13.5**	0.6	*75.5%*									1,0,0	0,0,0	2212.2	*8.9%*	58.9	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0158	1	0,14	**57.5**	5.6	*85.0%*	0,2	2.9	1.7	*1.1%*									1,0,1	0,0,0	2619.1	*13.9%*	331.7	okt 1991 t/m dec 2004
B29A0159	1	1,0	**28.4**	2.3	*82.4%*	0,2	1.3	1.1	*0.7%*	0,0	**2.0**	0.8	*2.1%*	0,0	0.2	1.0	*0.0%*	1,0,1	0,0,0	2286.8	*14.8%*	108.6	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0160	1	1,0	**29.8**	2.3	*86.0%*	0,2	-0.4	0.9	*0.2%*	0,0	1.2	0.8	*0.8%*	0,0	0.4	1.1	*0.0%*	1,0,0	0,0,0	2315.5	*13.0%*	117.6	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0161	1	1,0	**12.7**	1.5	*66.0%*	0,2	**-2.9**	0.9	*6.7%*	0,0	**1.7**	0.7	*3.2%*	0,0	1.3	1.0	*0.7%*	1,0,0	0,0,0	2186.4	*23.3%*	84.8	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0162	1	1,0	**27.2**	2.8	*78.1%*	0,2	2.0	1.1	*1.8%*	0,0	**2.3**	0.8	*3.3%*	0,0	1.2	1.1	*0.4%*	1,0,0	0,0,0	2405.4	*16.5%*	111.5	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0163	1	1,0	**21.9**	3.3	*50.0%*	0,2	-0.2	1.5	*2.7%*	0,0	**6.7**	1.1	*22.1%*	0,0	1.7	1.4	*0.5%*	1,0,0	0,0,0	2306.8	*24.8%*	189.2	nov 1995 t/m dec 2004
B29A0164	1	0,0	**4.1**	0.6	*32.6%*	0,2	0.9	1.1	*3.2%*									1,0,0	0,0,0	2217.9	*64.1%*	71.5	nov 1995 t/m dec 2004

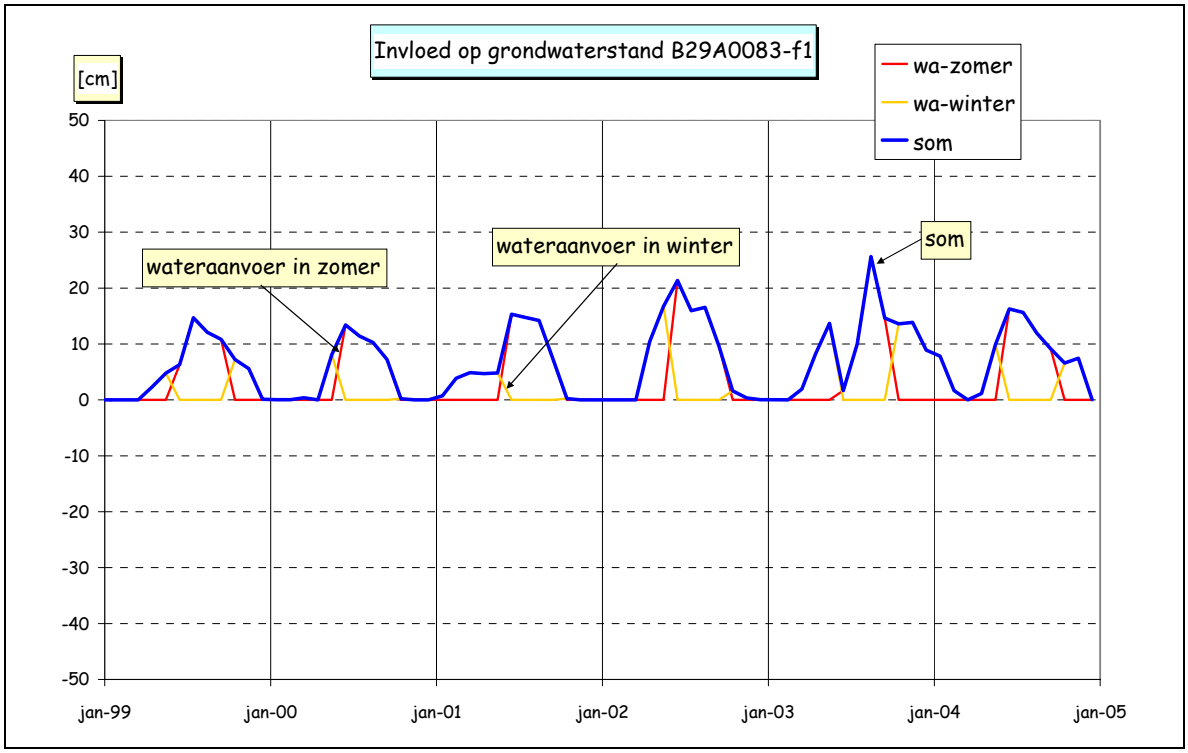
Bijlage 5: Grafieken invloed wateraanvoer op de grondwaterstand

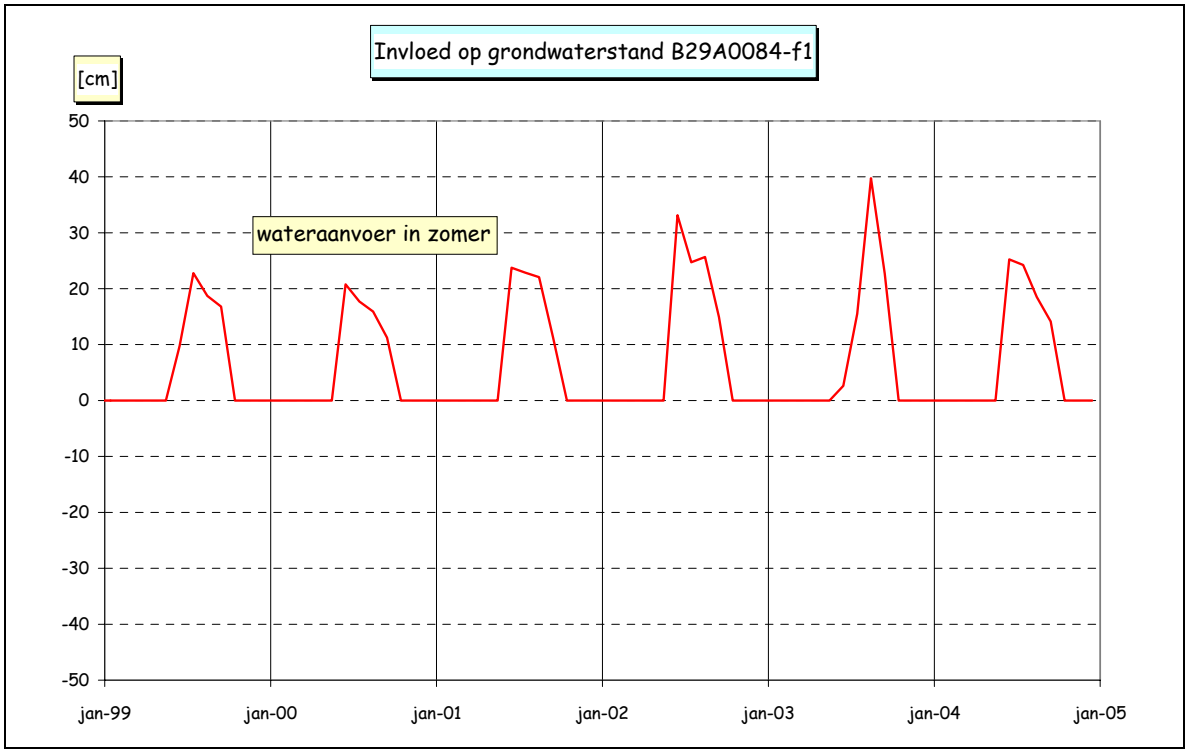


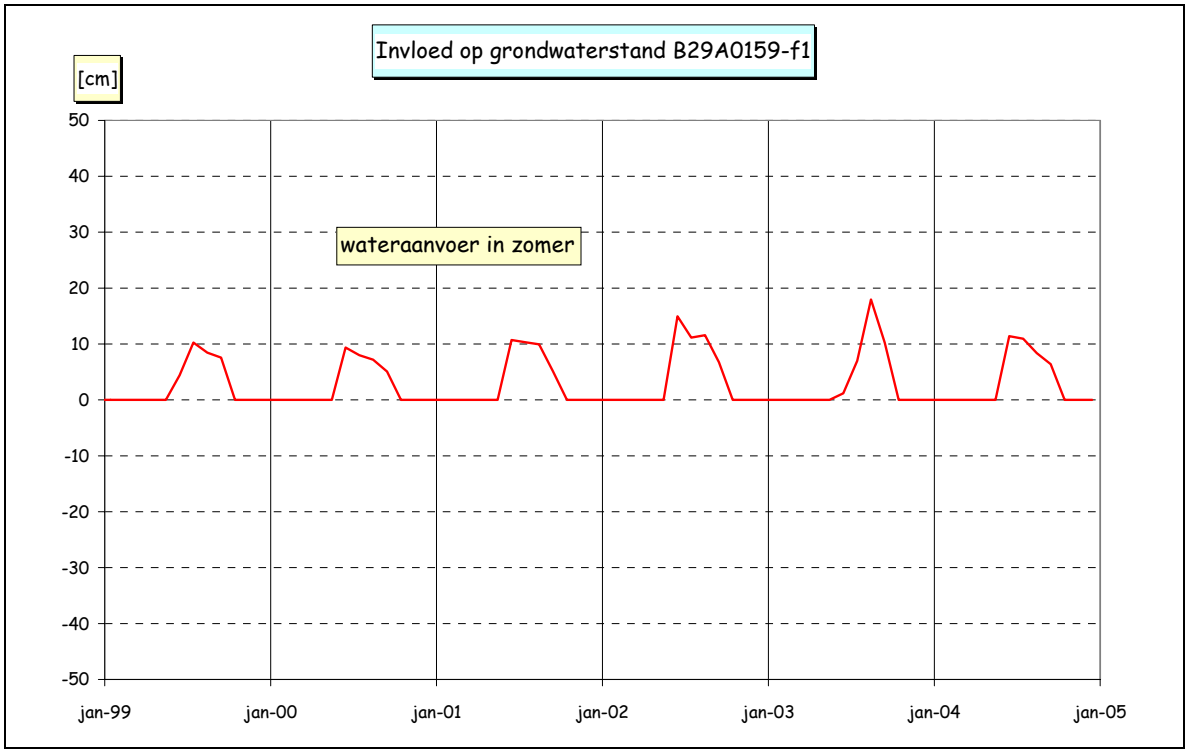


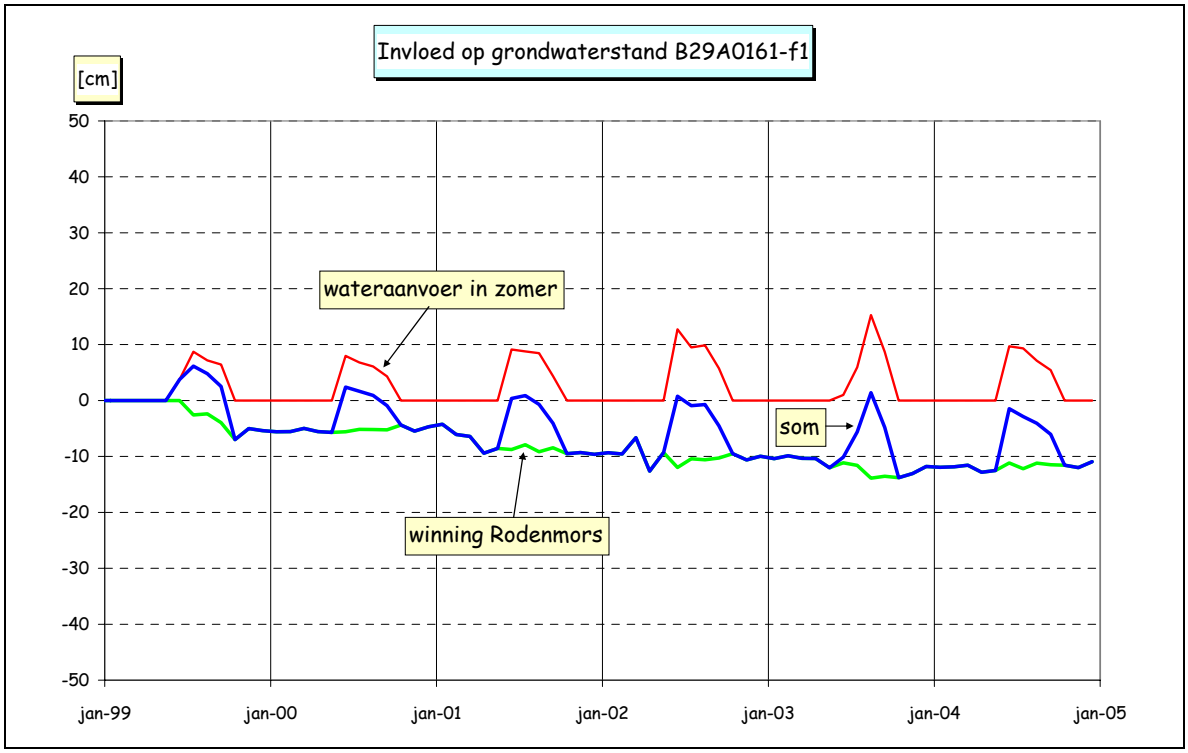

Invloed op grondwaterstand B29A0081-f1
[cm]
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
wateraanvoer in zomer
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05

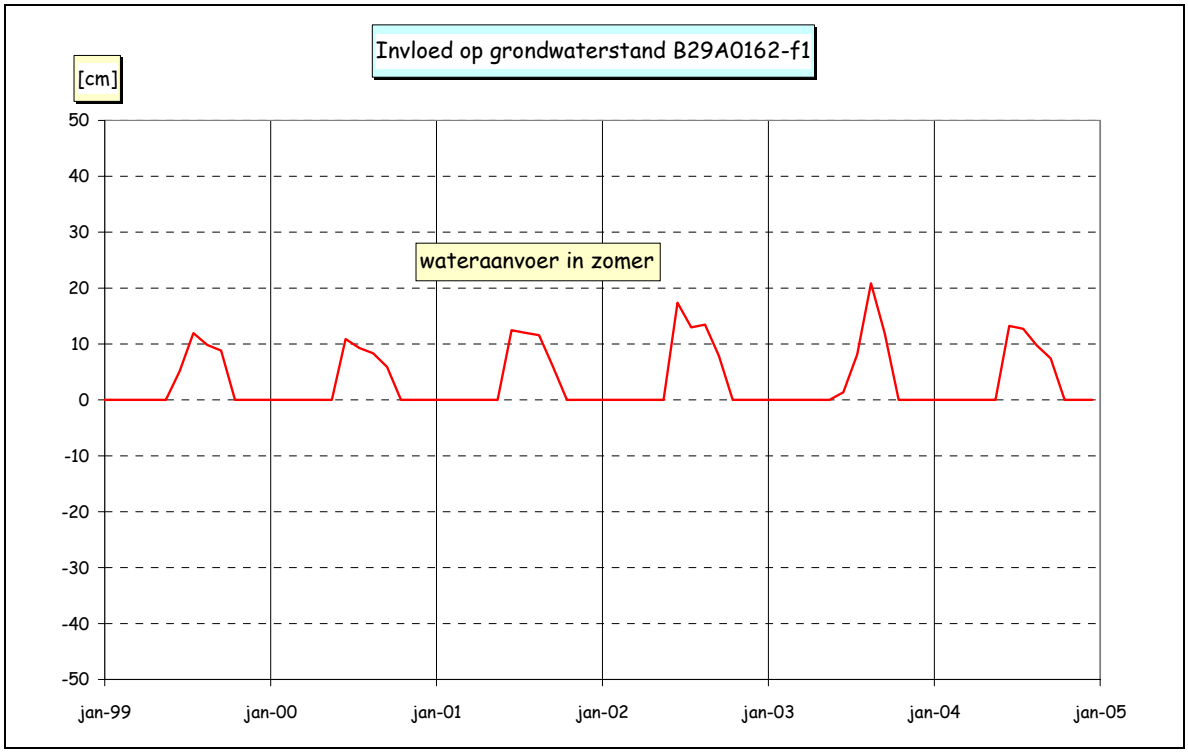

Invloed op grondwaterstand B29A0082-f1
[cm]
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
wateraanvoer in zomer
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05

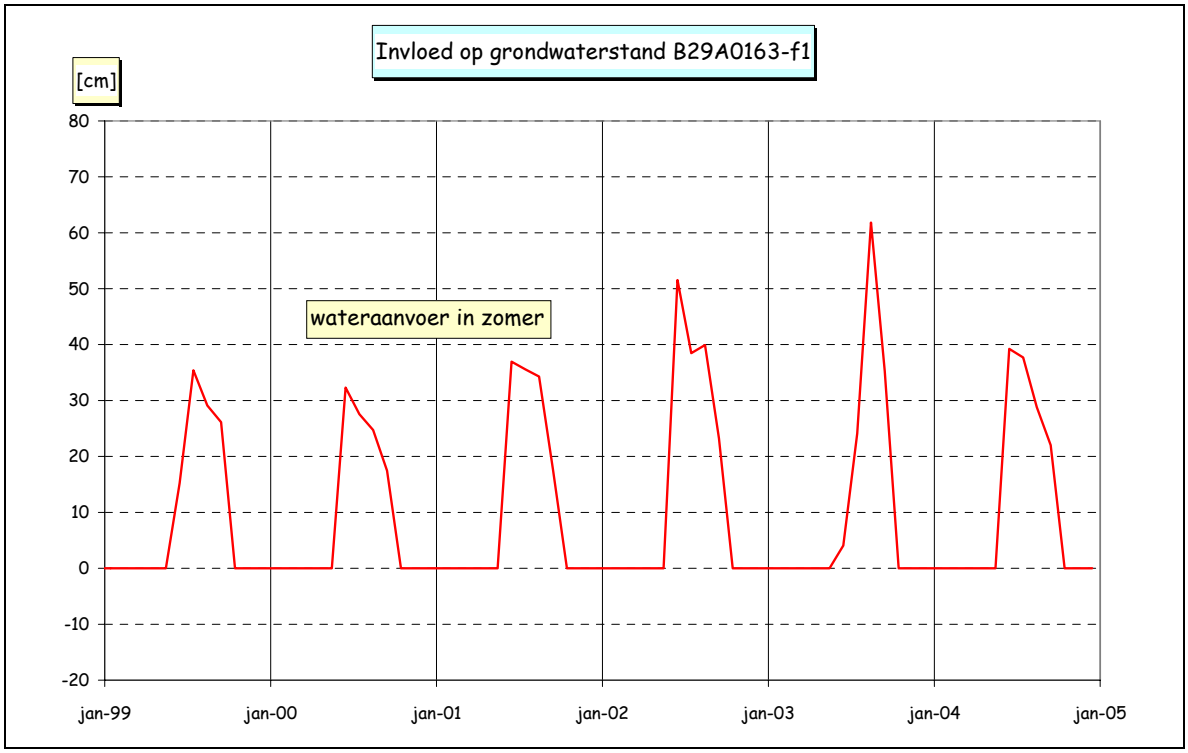

Invloed op grondwaterstand B29A0083-f1
[cm]
wa-zomer
wa-winter
som
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
wateraanvoer in zomer
wateraanvoer in winter
som
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05


Invloed op grondwaterstand B29A0084-f1
[cm]
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
wateraanvoer in zomer
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05

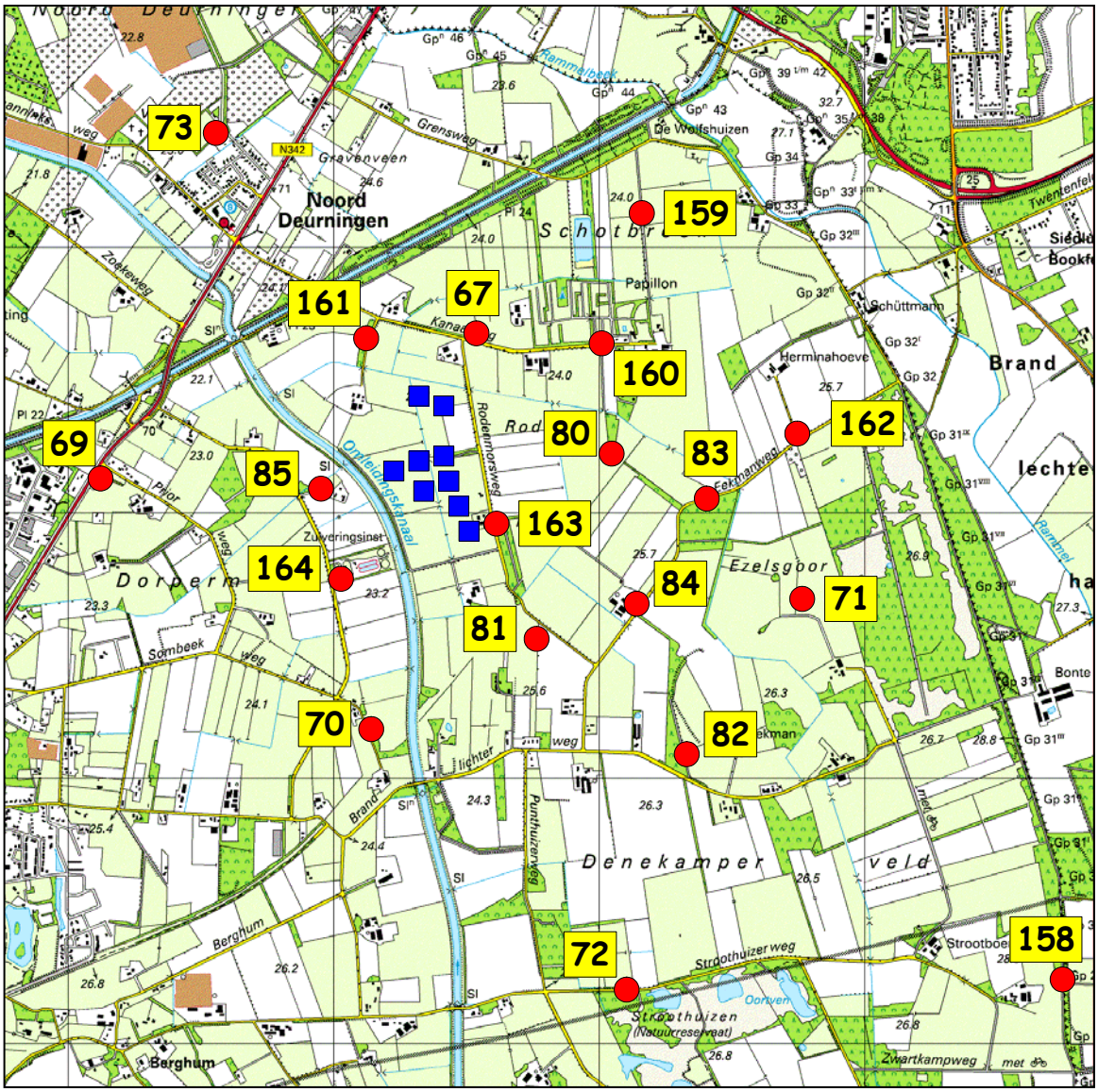

Invloed op grondwaterstand B29A0159-f1
[cm]
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
wateraanvoer in zomer
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05


Invloed op grondwaterstand B29A0161-f1
[cm]
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
wateraanvoer in zomer
som
winning Rodenmors
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05

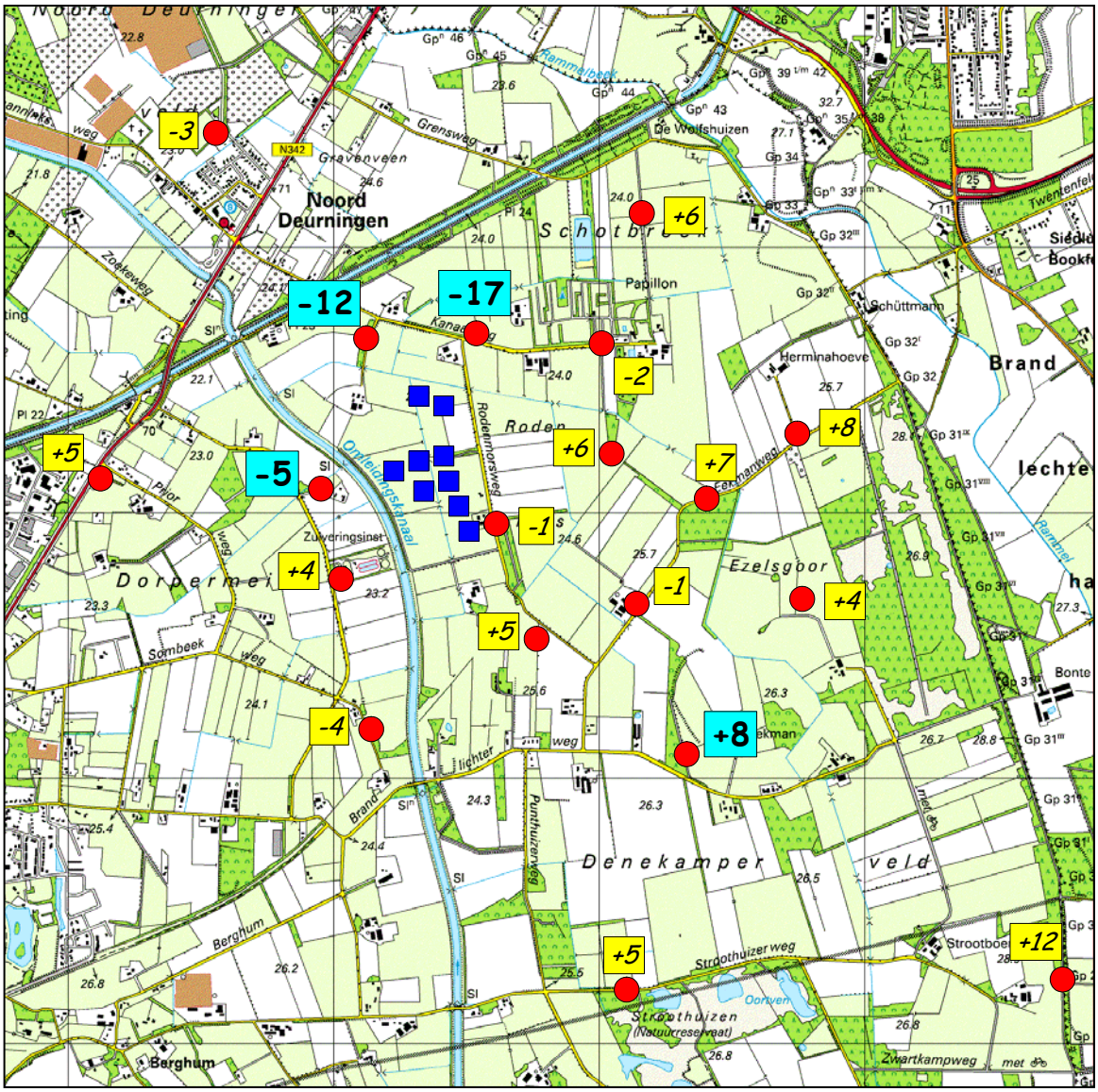

Invloed op grondwaterstand B29A0162-f1
[cm]
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
wateraanvoer in zomer
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05


Invloed op grondwaterstand B29A0163-f1
[cm]
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
wateraanvoer in zomer
jan-99
jan-00
jan-01
jan-02
jan-03
jan-04
jan-05

Kaart 1 – Locaties peilbuizen en pompputten winning Rodenmors



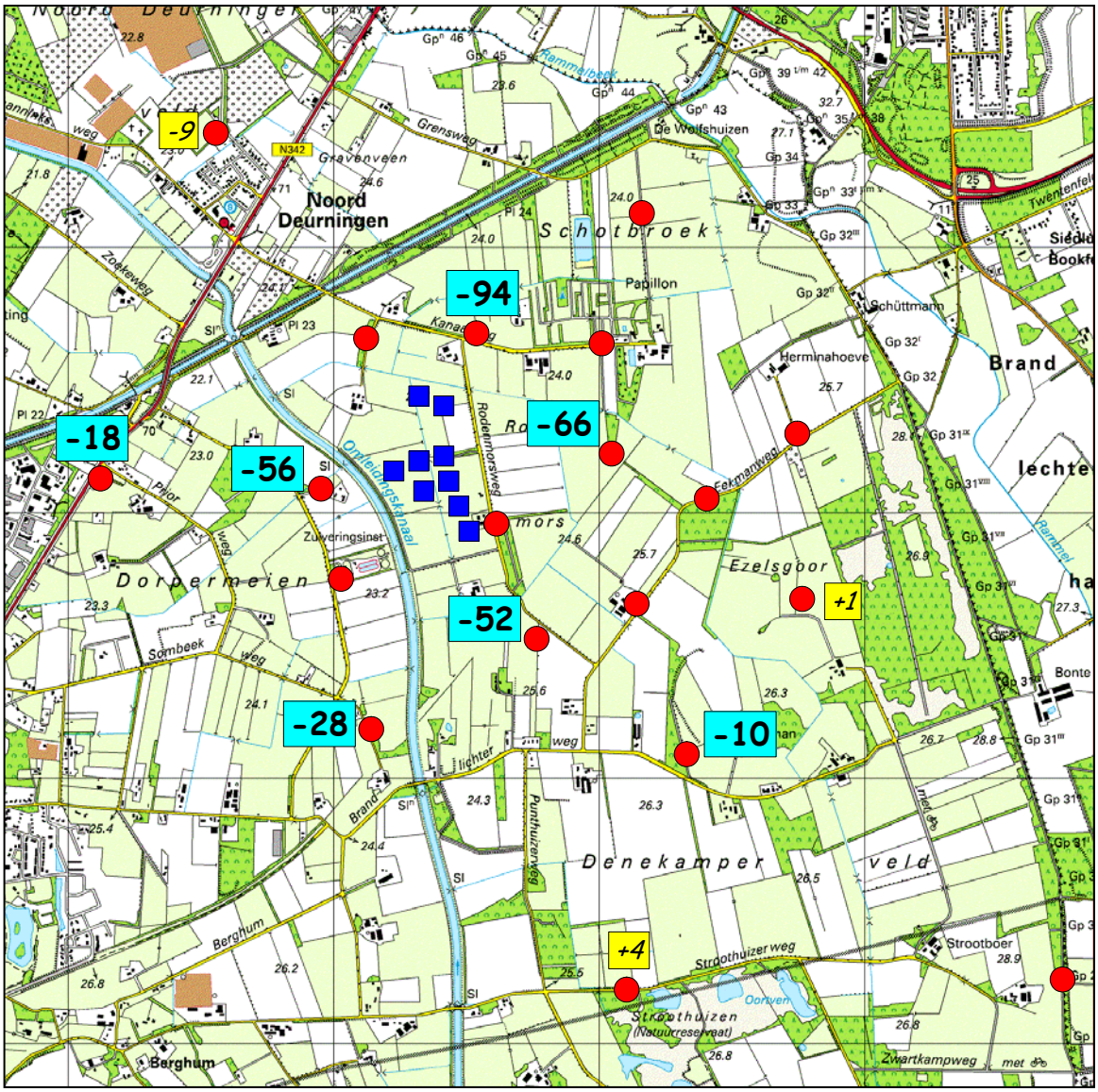
Kaart 2: Invloed winning Rodenmors op grondwaterstand 1e wvp



Toelichting

De statistisch significante invloeden zijn vermeld met vette grote letters in de blauwe vakjes. De overige vermelde invloeden zijn niet statistisch significant.
Alle geschatte invloeden zijn uitgedrukt als cm verandering van de grondwaterstand door een winning Rodenmors van 1,5 miljoen m^3/jaar.

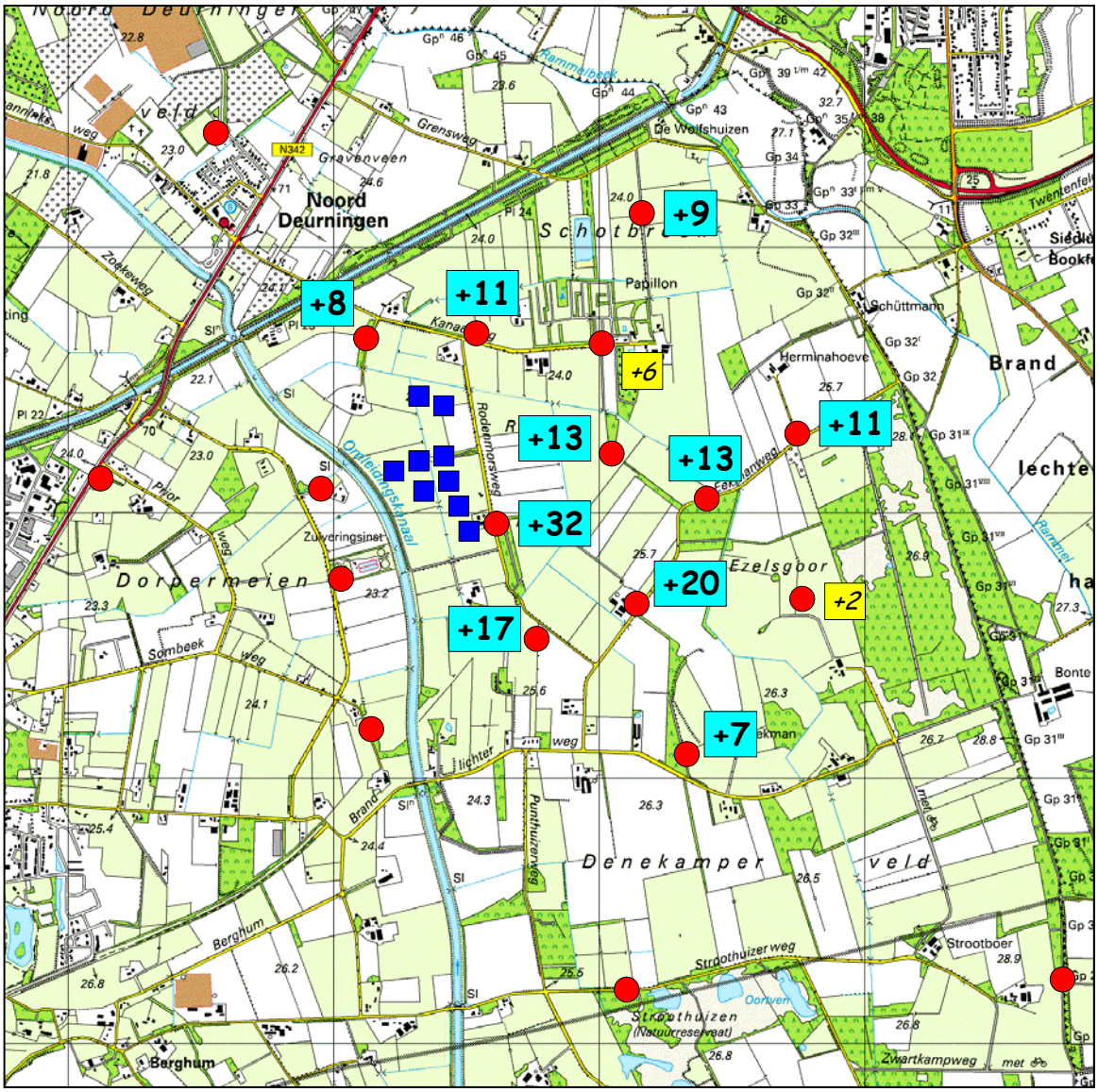
Kaart 3: Invloed winning Rodenmors op stijghoogte 2e wvp



Toelichting

De statistisch significante invloeden zijn vermeld met vette grote letters in de blauwe vakjes. De overige vermelde invloeden zijn niet statistisch significant.
Alle geschatte invloeden zijn uitgedrukt als cm verandering van de stijghoogte door een winning Rodenmors van 1,5 miljoen m^3/jaar.

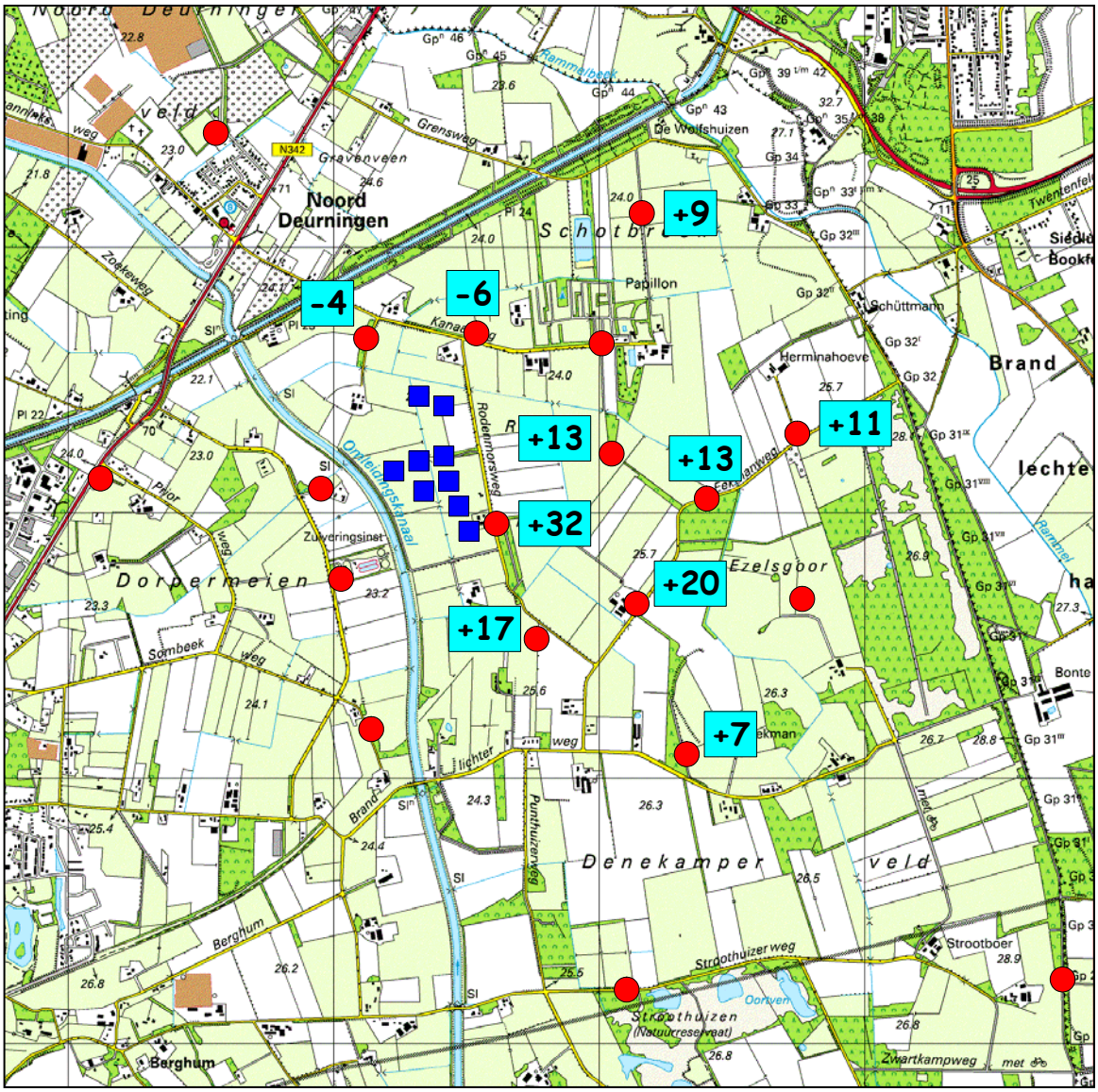
Kaart 4: Invloed wateraanvoer in zomer op grondwaterstand 1e wvp



Toelichting

De statistisch significante invloeden zijn vermeld met vette grote letters in de blauwe vakjes. De overige vermelde invloeden zijn niet statistisch significant.
Alle geschatte invloeden zijn uitgedrukt als cm gemiddelde verandering door de wateraanvoer in de zomers van 2003 en 2004 (dit zijn de jaren dat de winning Rodenmors maximaal was, namelijk 1,5 miljoen m^3/jaar). Het betreft in al deze gevallen verhogingen van de grondwaterstand door de zomerse wateraanvoer.

Kaart 5: Netto-invloed op grondwaterstand 1e wvp in zomer



Toelichting

Alleen voor díe gevallen waarin de winning Rodenmors en/of de wateraanvoer in de zomer een statistisch significante invloed heeft op de grondwaterstand in het 1e watervoerende pakket, is de geschatte netto-invloed vermeld. Deze invloed is uitgedrukt als cm gemiddelde verandering door de combinatie van de winning Rodenmors en de wateraanvoer in de zomers van 2003 en 2004.