2002-30_waterhuishouding-loofbosaanplant

stowa

ichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer

De waterhuishouding van een loofbosaanplant in de droogmakerij De Purmer

Resultaten van onderzoek gedurende de periode 1990-2000

2002 30

staatsbosbeheer

ALTERRA
RESEARCH INSTITUUT VOOR DE GROENE RUIMTE

stowa

Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer

De waterhuishouding van een loofbosaanplant in de droogmakerij De Purmer

Resultaten van onderzoek gedurende de periode 1990-2000

Arthur van Schendelstraat 816
Postbus 8090, 3503 RB Utrecht
Telefoon: 030 - 232 11 99
Fax: 030 - 232 17 66
E-mail: stowa@stowa.nl
http://www.stowa.nl

2002 30

Publicaties en het publicatie-overzicht
van de STOWA kunt u uitsluitend bestellen bij:
Hageman Fulfilment
Postbus 1110
3300 CC Zwijndrecht
Telefoon: 078 - 629 33 32
fax: 078 - 610 42 87
E-mail: info@hageman.nl
o.v.v. ISBN- of bestelnummer
en een duidelijk afleveradres.

ISBN 90-5773-184-3

REFERAAT

Hamaker, Ph., C.P. Beets, E.J. Moors en A.J. Dolman, 2002. *De waterhuishouding van een loofbosaanplant in de droogmakerij De Purmer.* Utrecht, STOWA, 190 blz.; 91 fig.; 13 tab; 19 ref.

In het kader van het beleid van de rijksoverheid tot het vergroten van de houtproductie en het bevorderen van de mogelijkheden voor openluchtrecreatie is in 1989 300 ha loofbos (populier, es, eik, beuk) aangeplant in de droogmakerij De Purmer. Bij het aanplanten van het bos is op initiatief van Staatsbosbeheer een proefgebied van 66 ha ingericht om onderzoek te doen naar de waterhuishouding van de bosaanplant (aan te duiden als '20^{e} eeuwse vochtige landbouwgrond-bebossing') en de veranderingen die optreden tijdens de ontwikkeling tot een volwassen bos-opstand. Het onderzoek concentreerde zich op de neerslag-afvoerrelatie, op aspecten van inrichting en beheer (met name op de gevolgen van het verlanden van een deel van het sloten-stelsel door het achterwege blijven van slootonderhoud) en op de eisen die de aangeplante boomsoorten stellen aan de waterhuishouding. Dit rapport betreft resultaten van het onderzoek over de periode 1990 t/m 2000.

Trefwoorden: boshydrologie, neerslag-afvoerrelatie, bosaanplant, bosverdamping, slootonderhoud, bosbeheer

Colofon:

Utrecht, 2002

Uitgave:
STOWA, Utrecht

Tekst:
Ph. Hamaker (Alterra)
C.P. Beets (Staatsbosbeheer)
E.J. Moors (Alterra)
A.J. Dolman (Alterra)

Druk:
Kruyt Grafisch Advies Bureau

STOWA rapportnummer 2002-30

ISBN nummer 90.5773.184.3

Ten Geleide

In mei 1986 heeft de toenmalige Minister van Landbouw en Visserij de regeringsbeslissing van het Meerjarenplan Bosbouw aangeboden aan de Tweede Kamer der Staten-Generaal. Eén van de doelstellingen van het beleid was de uitbreiding van het bosareaal van het type '20e eeuwse vochtige landbouwgrond-bebossing', landelijk gezien en op de lange termijn met 3500 ha. Hierbij speelden zowel de wens tot het vergroten van de houtproductie als het bevorderen van de mogelijkheden tot openluchtrecreatie en het ontwikkelen van natuur- en landschappelijke waarden een rol. De aanplant van het Purmerbos in 1990, met een totale oppervlakte van ca. 300 ha, paste in dat beleid.

Staatsbosbeheer heeft indertijd besloten om gelijktijdig met de aanplant van het Purmerbos onderzoek te starten naar de waterhuishouding van genoemd bostype. Het ging daarbij met name om onderzoek naar de interactie tussen het zich ontwikkelende bos en de waterhuishouding. Daartoe is een oppervlakte van 66 ha (900 bij 700 m) binnen het Purmerboscomplex door het afdammen van sloten van de omgeving gescheiden en als proefgebied ingericht, onder meer door het installeren van een aparte bemaling. Dit rapport betreft de presentatie en evaluatie van gegevens die over de periode 1990-2000 zijn verzameld.

Verschillende mensen hebben zich indertijd ingezet om het onderzoek van de grond te krijgen. In dit verband moet allereerst Wim Zeeman, indertijd werkzaam bij Staatsbosbeheer, worden genoemd als initiatiefnemer. Ruud Steinvoorte en Eric Westerhof van waterschap de Waterlanden verzorgden de controle van de werking en het onderhoud van het gemaal en van de elektronica en software die t.b.v. het onderzoek is geïnstalleerd. Ab van Dorp en Piet Adams, beiden van Staatsbosbeheer, namen de tweewekelijkse opname van grond- en slootwaterstanden en het aflezen van de regenmeter voor hun rekening. Tevens hielpen zij bij de verschillende veldinventarisaties die in de loop van het onderzoek zijn uitgevoerd. De familie Straathof tenslotte verleende gastvrijheid aan de regenmeters die op hun, aan het proefgebied grenzende, weiland zijn opgesteld.

De uitwerking van de gegevens en de rapportage werd mede mogelijk dankzij de financiële bijdragen van het programma Waterbeheer van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, de provincies Noord- en Zuid-Holland en de STOWA.

Samenvatting

In mei 1986 is de regeringsbeslissing van het Meerjarenplan Bosbouw aangeboden aan de Tweede Kamer der Staten-Generaal. Eén van de doelstellingen van het beleid was de uitbreiding van het bosareaal van het type '20e eeuwse vochtige landbouwgrondbebossing'. Hierbij speelden zowel de wens tot het vergroten van de houtproductie als het bevorderen van de mogelijkheden tot openluchtrecreatie en het ontwikkelen van natuur- en landschappelijke waarden een rol. De aanplant van het Purmerbos (figuur 2.1) in de winterperiode 1989-1990, met een totale oppervlakte van ca. 300 ha, paste in dat beleid.

Staatsbosbeheer heeft indertijd besloten om gelijktijdig met het aanplanten van het Purmerbos onderzoek te starten om inzicht te krijgen in de volgende aspecten met betrekking tot de waterhuishouding van genoemd type bos:
- de neerslag-afvoerrelatie en de veranderingen die daarin optreden tijdens de periode waarin de bosaanplant zich ontwikkelt tot een volgroeide bosopstand;
- de gevolgen van het achterwege laten van het onderhoud van greppels en van een deel van de kavel- en perceelssloten voor de waterhuishouding;
- de eisen die verschillende boomsoorten (bosdoeltypen) stellen aan de waterhuishouding.

Het omzetten van grasland in bos leidt tot een toename van de interceptie(verdamping) en naar verwachting ook van het niveau van de totale verdamping. Daardoor treden verschuivingen in de waterbalans op: een grotere verdampingspost leidt tot een kleiner neerslagoverschot. Voor poldergebieden zou dat betekenen dat de belasting van polder- en boezemsystemen waarop het overtollige water wordt geloosd, afneemt. Een niet onbelangrijk aspect in dit verband betreft de aan boseigenaren op te leggen waterschapslasten.

In de uitgangssituatie, dat wil zeggen in de situatie van vóór het aanplanten van het bos, vindt de detailontwatering van het grasland in De Purmer in hoofdzaak plaats via greppels in de lengterichting van de percelen, op een onderlinge afstand van 10 à 15 m. De greppels monden uit in dwarssloten die weer uitkomen op kavelsloten, met een onderlinge afstand van 80 à 90 m (figuur 2.2). Vanaf het moment van aanplanten van bos is het greppelonderhoud en het jaarlijks schonen van een deel van het slotenstelsel geheel achterwege gebleven. Dat beïnvloedt de ontwatering en de afwatering van het gebied alsook de dynamiek van de waterberging en het grondwaterregiem. De vraag is aan de orde in hoeverre de groei en ontwikkeling van het bos door deze veranderingen nadelig wordt beïnvloed. Dit raakt direct aan het derde onderzoeksaspect: de eisen die de aangeplante boomsoorten stellen aan de waterhuishuishouding.

Met het oog op het onderzoek is binnen het Purmerboscomplex een proefgebied van 66 ha ingericht. Bij benadering tweederde deel van de oppervlakte van het proefgebied is ingeplant met populier (11 verschillende klonen: figuur 3.1). Daarnaast gaat het om zomereik (20%), es (10%), en beuk (5%).

Het proefgebied is hydrologisch geïsoleerd van de omgeving door het afdammen van sloten en voorzien van een eigen bemaling en waterinlaat (figuur 2.2). Het ingestelde streefpeil van 480 cm-NAP geeft een gemiddelde drooglegging van 70 cm (gerekend ten opzichte van de 'ruggen' halverwege tussen de greppels). Ter compensatie van het verlies aan openwaterberging in het niet onderhouden gedeelte van het slotenstelsel zijn de overige kavelsloten deels verbreed. Daarnaast zijn ook nieuwe brede dwarssloten gegraven. Vóór de aanleg van het bos was het percentage open water bij streefpeil 3,2%, wat normaal is voor graslandgebieden in de droogmakerijen van Noord-Holland. Door het deels verbreden van kavelsloten en het graven van nieuwe dwarssloten is het percentage open water toegenomen tot 4,4%, waarvan 2,0% in de wèl en 2,4% in de niet onderhouden sloten.

Vanaf medio 1990 is een meetprogramma uitgevoerd waarbij de volgende grootheden automatisch op uurbasis zijn vastgelegd: de neerslag, de afvoer via bemaling (in perioden met een neerslagoverschot), de toevoer via het inlaten van water (perioden met een verdampingsoverschot), de grondwaterstand nabij het gemaal en de openwaterstand bij het gemaal. Verder zijn in totaal 39 peilbuizen geplaatst waarin de stijghoogte van het grondwater op of omstreeks de 14^{e} en 28^{e} dag van elke maand is vastgesteld. Om de effecten van het achterwege blijven van het onderhoud van het desbetreffende gedeelte van het slotenstelsel te evalueren zijn op acht vaste lokaties openwaterstanden waargenomen, eveneens twee keer per maand.

Met het oog op het kwantificeren van de kwel is op een centrale lokatie binnen het proefgebied een pompproef uitgevoerd. Uit gemeten stijghoogten tijdens de proef is de weerstand van het afdekkend pakket afgeleid. Dit gaf problemen zodat het niet mogelijk was de kwel eenduidig en betrouwbaar vast te stellen. Daarom zijn twee waterbalansberekeningen voor het proefgebied voor de periode 1991 t/m 2000 uitgevoerd:

- een eerste berekening waarbij de neerslag, waterinlaat, kwel en afvoer uit de meetgegevens zijn afgeleid en de (bos)verdamping als sluitpost is berekend (als voorzien bij de opzet van het onderzoek);
- een tweede berekening waarbij de neerslag, waterinlaat en afvoer (gecorrigeerd voor randeffecten) uit de meetgegevens zijn afgeleid, waarbij de (bos)verdamping is berekend op basis van meetgegevens uit onderzoek dat elders bij een zelfde type bos is uitgevoerd en met de kwel als sluitpost.

Het resultaat van beide berekeningen, voor de gehele periode 1991 t/m 2000 (tien jaar), is opgenomen in tabel 1. De als sluitpost berekende bosverdamping van gemiddeld 776 mm per jaar volgens de eerste berekening ligt tenminste 150 mm boven het niveau van de verdamping van loofbos volgens literatuurgegevens en is daarom als resultaat niet acceptabel. De (bos)verdamping volgens de tweede berekening is gebaseerd op directe metingen boven de kruin van een populierenbos in de Flevopolder (Fleditebos nabij Zeewolde). Daarnaast is in de tweede berekening de afvoer via bemaling gecorrigeerd voor randeffecten die verband houden met verschillen in streefpeilen binnen en buiten het proefgebied.

Tabel 1 Resultaten van waterbalansberekeningen voor het Purmerbos proefgebied (66 ha), gemiddeld per kalenderjaar voor de periode 1991 t/m 2000

	Verdamping als balanssluitpost (mm per jaar)	Kwel als balanssluitpost (mm per jaar)
Neerslag	941	941
Inlaat	17	17
Kwel	176	88 (sluitpost)
Totaal (positieve posten)	1134	1046
Afvoer (bemaling)	-358	-411
Verdamping	-776 (sluitpost)	-635
Totaal (negatieve posten)	-1134	-1046

De als sluitpost berekende kwel van 88 mm per jaar stemt redelijk goed overeen met de kwel van 70 mm per jaar als gemiddelde voor de gehele Purmer volgens eerder onderzoek.

De volgende conclusies ten aanzien van veranderingen in de waterbalans die samenhangen met '20e eeuwse vochtige landbouwgrond-bebossingen' binnen droogmakerijen zijn gebaseerd op de tweede berekening, dat wil zeggen op de balansberekeningen met de kwel als sluitpost:

- het omzetten van grasland in bos leidt tot een toename van de verdamping met 100 à 150 mm gemiddeld op jaarbasis;
- het omzetten van grasland in bos leidt tot minimale veranderingen van de waterinlaat en de kwel zodat de toename van het verdampingsniveau direct is te vertalen in een vrijwel even grote afname van de afvoer via bemaling (en dus van de belasting van de desbetreffende polder- en boezemsystemen met overtollig water).

Naast waterbalansberekeningen voor de totale periode van onderzoek zijn ook berekeningen uitgevoerd voor de afzonderlijke jaren en voor zomer- en winterbalansperioden waarvan de begin- en einddatum is gebaseerd op hydrologische criteria (overgang van periode met waterinlaat naar periode met afvoer via bemaling en omgekeerd, met stijging van grondwaterstanden tot boven of daling tot beneden streefpeil)(figuren 7.2 t/m 7.10 in aanhangsel 4, tabel 7.2). De groei en ontwikkeling van de bosopstand, met een geleidelijke toename van het verdampingsniveau, blijkt in de resultaten van die detailberekeningen niet of nauwelijks tot uiting te komen (figuren 7.11 t/m 7.13). Een sluitende verklaring hiervoor is er niet. Vóór het planten van de bomen heeft een grondbewerking plaatsgevonden waardoor zich waarschijnlijk al snel een welige kruidlaag kon ontwikkelen: dat heeft wellicht direct al geleid tot een toename van het verdampingsniveau toen dat nog niet was toe te schrijven aan de groei en ontwikkeling van het bos.

De gevolgen van het deels achterwege blijven van het slootonderhoud blijkt duidelijk uit het verloop van de openwaterstanden in de wel en niet onderhouden sloten. In de wel onderhouden sloten verloopt de openwaterstand volgens een 'zaagtandpatroon' dat wordt bepaald door de ingestelde niveaus waarbij het gemaal aan- en afslaat (perioden met neerslagoverschot) resp. waarbij de inlaatklep wordt geopend en gesloten (perioden met verdampingsoverschot) (figuren 5.2, 6.2 en 6.3, aanhangsel 1). De stroming in de niet onderhouden sloten wordt beperkt, niet alleen door de geleidelijke ophoping van plantenresten (proces van verlanding) maar ook door het verstopt raken van de duikers die bij de gebiedsinrichting zijn gelegd. Daardoor liggen de openwaterstanden in de winterperioden meestal boven streefpeil en in de zomerperiode eronder. Vrijwel elke zomer zijn er perioden van enkele weken waarin de niet onderhouden sloten zelfs geheel droogvallen (figuren 8.1 en 8.2, tabel 8.1).

Blijkens de metingen in de peilbuizen zijn er binnen het proefgebied grote verschillen in het verloop van de grondwaterstand (figuren 8.3 en 8.4, tabel 8.2). Zo loopt de GHG uiteen van een minimum van 12 tot een maximum van 51 cm-maaiveld en de GLG van 73 cm tot 159 cm-maaiveld. In termen van grondwatertrappen komen binnen het gebied als uitersten Gt II en Gt VI voor. De GHG is gerelateerd aan verschillen in maaiveldshoogte binnen het proefgebied, de verschillen in de GLG daarentegen worden door een aantal factoren bepaald en zijn daardoor niet eenduidig te verklaren (figuur 8.5).

Omdat het onderzoek beperkt is gebleven tot het met bos ingeplante proefgebied is een directe op meetgegevens gebaseerde vergelijking met blijvend grasland in De Purmer niet mogelijk. Toch zijn op basis van de waterbalansberekeningen en de waarnemingen van openwaterstanden en grondwaterstanden de volgende conclusies ten aanzien van de verschillen tussen het bos- en het graslandgebied te trekken:
- in de zomerperiode komen in het bosgebied ten opzichte van grasland drogere omstandigheden en diepere grondwaterstanden voor ten gevolge van het hogere verdampingsniveau;
- in de winterperiode komen in het bosgebied juist nattere omstandigheden en hogere grondwaterstanden voor ten gevolge van de beperkte ontwatering en afwatering die samenhangt met het achterwege blijven van greppelonderhoud en het onderhoud van een deel van het slotenstelsel;
- de omstandigheden in het bosgebied zijn dus te karakteriseren als meer extreem, zowel naar de droge als naar de natte kant;

- de sterke uitdroging van het bodemprofiel en de daarmee samenhangende daling van de grondwaterstand leidt tot extra beschikbare bergingscapaciteit in het najaar, dat wil zeggen in de periode september-december wanneer er sprake is van een neerslagoverschot;
- de extra bergingscapaciteit leidt tot een afname van de kans op wateroverlast in termen van af te voeren hoeveelheden overtollig water en/of waterstanden boven streefpeil;
- het achterwege blijven van greppel- en slootonderhoud heeft tot gevolg dat de afvoer van het neerslagoverschot (via bemaling) in perioden met veel regen gespreid over een langere periode plaatsvindt als gevolg van de tijdelijke berging van een deel van het overschot in die greppels en sloten;
- de spreiding van de afvoer van het neerslagoverschot over een langere periode leidt tot een spreiding van de belasting van het desbetreffende polder- en boezemsysteem.

Een duidelijk voorbeeld van het effect van de extra beschikbare bergingscapaciteit betreft de situatie in september 1994: bij een neerslag van 200 mm gedurende de eerste 20 dagen van die maand is toen in Noord-Holland benoorden het Noordzeekanaal grote wateroverlast en schade voor de landbouw opgetreden. In het Purmerbos proefgebied was er echter weinig aan de hand: van die 200 mm neerslag is maar 40 mm afgevoerd en de resterende 160 mm in het gebied geborgen, voor het overgrote deel in het bodemprofiel (figuur 8.11 in aanhangsel 5).

Blijkens opnamen uitgevoerd in 1992, 1995 en 1997 was de groei en ontwikkeling van de populieren (metingen bij drie klonen), van de zomereik en van de es 'goed' tot 'zeer goed': bij vergelijking met gestandaardiseerde opbrengsttabellen voor Nederlandse omstandigheden valt de groei in de hoogste of op één na hoogste klasse. Op de beide percelen met beuk verliep de groei en ontwikkeling minder voorspoedig: na het inplanten onder zeer natte omstandigheden in de winterperiode 1989-1990 zijn alle jonge boompjes afgestorven. Na herinplanten in de winterperiode 1990-1991 kwam de groei in de daarop volgende jaren langzaam op gang maar in augustus 1999 bleek dat in één van die percelen alsnog sterfte van de boompjes plaatsvond, na een warme en droge periode van enkele weken. Wellicht was dit mede te wijten aan de extreem natte omstandigheden in het voorafgaande jaar.

Aanvankelijk bestond ook de vrees dat de moerige laag op 40 tot 60 cm diepte in het bodemprofiel de beworteling van de bomen zou beperken waardoor windworp een probleem zou kunnen worden. Tot nu toe echter is het omwaaien van bomen niet voorgekomen. Wèl is in 1999 geconstateerd dat in de beide percelen die zijn beplant met populier var. Schoorldam (zuidelijke punt van het proefgebied: zie figuur 3.1) een groot aantal bomen is scheefgewaaid. Het is dus de vraag of de zware en stugge kleibovengrond ook op den duur voldoende stevigheid zal bieden om het omwaaien van bomen bij permanent hoge grondwaterstanden in de winterperioden te voorkomen.

Wat de inrichting en het beheer betreft is voorzichtigheid bij het trekken van conclusies geboden. Immers, met het oog op het onderzoek is het proefgebied door het afdammen van sloten hydrologisch van haar omgeving gescheiden en van een eigen bemaling voorzien (figuur 2.2). Het verbreden van kavelsloten en het graven van nieuwe dwarssloten is mede ingegeven door de noodzaak de afwatering naar dat gemaal goed te doen plaatsvinden. Als het gebied niet als proefgebied voor het doen van onderzoek zou zijn ingericht en niet van een eigen gemaal zou zijn voorzien, dan zou de afwatering ook na het aanplanten van bos blijvend via de kavelsloten hebben kunnen plaatsvinden, in de richting van de Middentocht van De Purmer.
De volgende conclusies zijn op die situatie van toepassing:
- het achterwege laten van het onderhoud van een deel van de kavel- en perceelssloten is een verantwoorde manier om de beheerkosten te drukken;
- het verbreden van kavelsloten en het graven van nieuwe perceelssloten ter compensatie van het achterwege blijven van onderhoud van een deel van het slotenstelsel is onnodig;

- op de kosten van slootonderhoud kan verder bezuinigd worden door het schonen van de te onderhouden kavel- en dwarssloten niet jaarlijks maar om het andere jaar te doen plaatsvinden.

Er hebben zich met zekere regelmaat situaties voorgedaan, ook in extreem natte perioden, waarbij het gemaal tijdelijk uitviel doordat de toevoer van water stagneerde als gevolg van de vegetatie in de sloten en/of ophoping van plantenresten voor het krooshek. Die situaties zijn te zien als een onvoorziene, onbedoelde maalstop. Uit een gedetailleerde analyse (figuren 8.9 t/m 8.17 in aanhangsel 5) blijkt dat het uitvallen van het gemaal geen serieus probleem is. Hierop voortbordurend is geconcludeerd dat het vanuit bosbouwkundig oogpunt gezien verantwoord is om in perioden met extreem veel neerslag in het winterhalfjaar tijdelijk bewust een maalstop in te stellen als daardoor schade door wateroverlast elders kan worden beperkt of voorkomen.

Als het bos te zijner tijd wordt gekapt om het gebied daarna opnieuw met bos in te planten moet worden overwogen de niet onderhouden sloten uit te baggeren en opnieuw op profiel te brengen en ook de duikers te schonen, om zodoende de oorspronkelijke afwateringstoestand te herstellen.

De STOWA in het kort

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. In 2002 waren dat alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen, de provincies en het Rijk (i.c. het Rijksinstituut voor Zoetwaterbeheer en de Dienst Weg- en Waterbouw).

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van behoefte-inventarisaties bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n vijf miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: +31 (0)30-2321199.
Ons adres luidt: STOWA, Postbus 8090, 3503 RB Utrecht.
Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl.

Inhoud

Colofon
Ten Geleide
Samenvatting
De STOWA in het kort

1 Inleiding ... 1

1.1 Achtergronden ... 1
1.2 Doelstellingen ... 1
1.3 Opzet en uitvoering van het onderzoek ... 2
1.4 Beperkingen ... 3
1.5 Leeswijzer ... 3

2 Beschrijving van het proefgebied ... 5

2.1 Ligging en globale inrichting ... 5
2.2 Karakterisering van de waterhuishouding ... 6
2.2.1 Maaiveldshoogten ... 6
2.2.2 Streefpeilen ... 8
2.2.3 Ontwatering en afwatering ... 8
2.2.4 Bemaling en waterinlaat ... 11
2.3 Bodemkundige aspecten ... 12
2.3.1 Karakterisering volgens de bodemkaart 1:50 000 ... 12
2.3.2 Bodemgeschiktheid voor bosbouw ... 12

3 Bosaanplant en ontwikkeling ... 15

4 Opzet en uitvoering meetprogramma hydrologie ... 19

4.1 Geautomatiseerde metingen ... 19
4.2 Handmatige metingen ... 20
4.2.1 Regenmeters ... 20
4.2.2 Peilbuizen ... 20
4.2.3 Piketten ... 21
4.3 Geohydrologisch onderzoek ... 22
4.3.1 Doorlatenheidsbepaling Beemster klei ... 23
4.3.2 Pompproef in het eerste watervoerend pakket ... 23
4.3.3 Pompproef binnen het afdekkend pakket ... 23
4.3.4 Resultaten ... 24

5 Bewerking van de neerslag-, afvoer- en inlaatgegevens 25

5.1 Controle en voorbewerkingen 25
5.2 Aanvullingen en correcties 25
5.2.1 Neerslag 26
5.2.2 Afvoer via bemaling 27
5.2.3 Toevoer via inlaat 27
5.2.4 Waterstanden 30

6 Resultaten: neerslag, afvoer, inlaat, kwel en bosverdamping 31

6.1 Neerslag, afvoer en inlaat 31
6.1.1 Neerslag bij het Purmerbos proefgebied 31
6.1.2 Neerslag voor de KNMI-stations Edam en Purmerend 31
6.1.3 Waterinlaat en afvoer 34
6.1.4 Neerslag, waterinlaat en afvoer: presentatie van resultaten 34
6.2 Kwel 38
6.3 Bosverdamping 40

7 Waterbalansen 43

7.1 Waterbalansvergelijking 43
7.2 Balansperioden op basis van hydrologische criteria 43
7.3 Waterbalansberekeningen: resultaten en evaluatie 44
7.3.1 Resultaten 44
7.3.2 Evaluatie 48
7.4 Correctie van de afvoer en de kwel 50
7.4.1 Afvoer via bemaling 50
7.4.2 Kwel 51
7.5 Herberekening en slotevaluatie van de waterbalansen 51

8 Waterhuishoudings- en waterbeheeraspecten 57

8.1 Verloop van openwaterstanden in wel en niet onderhouden sloten 57
8.2 Verloop van grondwaterstanden 61
8.3 Analyse van de neerslag- en afvoergegevens 66
8.3.1 K-daagse afvoersommen 66
8.3.2 Relatie tussen grondwaterstanden en afvoer via bemaling 72
8.4 Analyse van situaties met verhoogde openwaterstanden 75
8.4.1 Periode oktober-december 1990 (figuur 8.9) 76
8.4.2 Periode december 1992-januari 1993 (figuur 8.10) 76
8.4.3 September 1994 (figuur 8.11) 76
8.4.4 Periode oktober-november 1994 (figuur 8.12) 77
8.4.5 Periode december 1996-februari 1997 (figuur 8.13) 78
8.4.6 Periode september 1998 (figuur 8.14) 78
8.4.7 Periode oktober-november 1998 (figuur 8.15) 79
8.4.8 Periode oktober-december 1999 (figuur 8.16) 79
8.4.9 Periode november 2000 (figuur 8.17) 80
8.4.10 Evaluatie perioden met verhoogde waterstanden 80

9 Slotevaluatie 85

9.1 Gevolgen van de bosaanplant op de wateraan- en afvoerbehoefte 85
9.2 Gevolgen van de gebiedsinrichting en het beheer op de waterhuishouding 85
9.3 Groei en ontwikkeling van de bosaanplant 86
9.4 Effecten op de waterhuishouding bij extreme neerslaghoeveelheden 87
9.5 Tijdelijke berging van water in polderbosgebied 88
9.6 Gebiedsinrichting en beheer 88
9.7 Aanbevelingen ten aanzien van vervolgonderzoek 89

Literatuur 93

Niet gepubliceerde bronnen 94

Aanhangsel 1
Neerslag-, waterafvoer-, waterinlaat- en waterstandsgegevens 95

Aanhangsel 2
Bosverdamping 139

Aanhangsel 3
Correctie van de afvoer via bemaling voor randeffecten 149

Aanhangsel 4
Waterbalansposten 1991-2000
(figuren 7.2 t/m 7.10) 153

Aanhangsel 5
Karakterisering waterhuishouding in extreem natte perioden
(figuren 8.9 t/m 8.17) 163

1 Inleiding

1.1 Achtergronden

In het vergaderjaar 1985-1986 van de Tweede Kamer der Staten-Generaal is het Meerjarenplan Bosbouw (Ministerie van Landbouw en Visserij, 1986) aan de orde geweest. Volgens dat plan was het beleid van de rijksoverheid gericht op uitbreiding van het bosareaal in vooral het westen van het land. Dit zou neerkomen op het omzetten van agrarisch gebied in bosgebied op klei- en veengronden.

Toentertijd was de kennis met betrekking tot de hydrologie van bosgebieden beperkt, zeker voor wat betreft loofbos in laaggelegen en daardoor relatief natte poldergebieden. Het onderzoek naar de waterhuishouding van het Purmerbos moet tegen deze achtergrond worden gezien.

Het initiatief tot het doen van onderzoek is indertijd, in 1989, genomen door Staatsbosbeheer. Daartoe werd contact gelegd met onder meer Waterschap de Waterlanden (belast met het waterbeheer van De Purmer) en met de onderzoeksinstellingen het Staringcentrum en het Bosbouwproefstation. Het initiatief resulteerde in het formuleren van doelstellingen en een concreet plan voor de opzet en uitvoering van veldonderzoek en mogelijke bijdragen van de beide genoemde onderzoeksinstellingen.

1.2 Doelstellingen

Volgens het voorstel van augustus 1989 (Beets, 1989) zou het onderzoek zich moeten richten op:
- de neerslag-afvoerrelatie en de veranderingen die daarin optreden tijdens de periode waarin de bosaanplant zich ontwikkelt tot een volgroeide bosopstand;
- aspecten met betrekking tot de gebiedsinrichting en het beheer, in het bijzonder de gevolgen van het achterwege laten van het onderhoud van greppels en van een deel van de kavel- en perceelssloten voor de waterhuishouding;
- de eisen die verschillende boomsoorten (bosdoeltypen) stellen aan de waterhuishouding.

Het omzetten van grasland in bos leidt tot een toename van de interceptie(verdamping) en naar verwachting ook van het niveau van de totale verdamping. Daardoor treden verschuivingen in de waterbalans op: een grotere verdampingspost leidt tot een kleiner neerslagoverschot. Voor een poldergebied betekent dat een beperking van de belasting van het oppervlaktewatersysteem binnen het gebied zelf, en daarnaast tot een beperking van de belasting van het boezemsysteem waarop het overtollige water uiteindelijk wordt geloosd. Met andere woorden: bij het omzetten van grasland in bos verandert de neerslag-afvoerrelatie.

De ontwatering en afwatering van graslandgebieden in droogmakerijen als De Purmer vindt plaats via greppels, perceelssloten, kavelsloten en brede tochtsloten. Na het aanplanten van het bos blijft het greppelonderhoud geheel achterwege. Om de beheerkosten te beperken is besloten om óók het jaarlijks opschonen van een deel (de helft) van de perceels- en kavelsloten te laten vervallen. Ter compensatie van het hiermee samenhangende verlies aan waterbergend vermogen zijn de te handhaven sloten deels verbreed. Dit om te voldoen aan de eis van het waterschap dat het verlies aan waterbergend vermogen in de niet langer te onderhouden sloten voor 80% wordt gecompenseerd.

De verminderende werking van de greppels en de geleidelijke verlanding van de desbetreffende sloten beïnvloedt zowel de ontwatering en afwatering als de dynamiek van de waterberging. Ook het grondwaterregiem zal veranderen: in de winterperiode zijn hogere grondwaterstanden te verwachten, in de zomer daarentegen juist diepere grondwaterstanden als gevolg van het hogere niveau van de (bos)verdamping. Dit raakt direct het derde onderzoeksaspect: de eisen die de aangeplante boomsoorten stellen aan de waterhuishuishouding.

Wat het beheer betreft is met name ook het kostenaspect van belang. Daarbij moet onderscheid gemaakt worden tussen enerzijds de belangen en verantwoordelijkheden van de bosbeheerder (in dit geval Staatbosbeheer) en anderzijds die van de waterbeheerder, dat wil zeggen het waterschap. De bosbeheerder is verantwoordelijk voor het slootonderhoud en draagt de kosten die dat met zich meebrengt. Het waterschap is verantwoordelijk voor de afwatering. Dat laatste is mede van belang in relatie tot de problematiek van de toedeling van waterschapslasten; immers hoe lager de kosten van een adequate afwatering van het bosgebied voor het waterschap, hoe lager de lasten die het waterschap moet doorberekenen aan de bosbeheerder.

Tenslotte is het belangrijk er op te wijzen dat indertijd de houtproductie, en dus het realiseren van de daartoe vereiste waterhuishoudkundige randvoorwaarden, voorop stonden en dat de aspecten van recreatie, natuur en landschap daaraan ondergeschikt waren.

1.3 Opzet en uitvoering van het onderzoek

Het Purmerbos als geheel heeft een oppervlakte van zo'n 300 ha. Met het oog op het uit te voeren onderzoek is bij de aanleg van het bos in de periode 1989-1990 een deeloppervlakte van 66 ha als proefgebied ingericht. Het proefgebied (900 bij 720 m groot) is daartoe hydrologisch gescheiden van haar omgeving door het afdammen van sloten en toegerust met een eigen gemaaltje. Het bos is aangeplant in het najaar van 1989 en het meetprogramma met betrekking tot verschillende aspecten van de waterhuishouding is uitgevoerd vanaf medio 1990.

De duur van het onderzoek is in het oorspronkelijke onderzoeksvoorstel in het midden gelaten. De ontwikkeling van de bosaanplant en het verlanden van het *niet* onderhouden gedeelte van het slotenstelsel zijn geleidelijk verlopende processen. De verwachting was dat op den duur een nieuwe evenwichtssituatie zou ontstaan, op het moment dat zich een bos met gesloten kruin zou hebben gevormd. Op voorhand was niet te voorspellen hoeveel tijd daarmee gemoeid zou zijn.

Het eigenlijke veldonderzoek is grotendeels uitgevoerd door Staatsbosbeheer. Het betrof de controle op het goed functioneren van de registratie-apparatuur, het uitvoeren van de handmatige metingen, de controle en voorbewerking van de ruwe gegevens en de jaarlijkse voortgangsrapportage. Metingen met betrekking tot de groei en ontwikkeling van verschillende aangeplante boomsoorten zijn uitgevoerd door Staatsbosbeheer, in 1992, 1995 en 1997.

Aanvankelijk was het de bedoeling om naast het veldonderzoek ook een simulatiemodel uit te werken en daarmee berekeningen uit te voeren om de waargenomen effecten met betrekking tot de groei en ontwikkeling van het bos en het verlanden van sloten beter te kunnen interpreteren. Bij het uitwerken van de veelheid aan meetgegevens rees twijfel aan de noodzaak van een modelmatige benadering om de doelstellingen van het onderzoek te realiseren. Daarom is de beschikbare tijd uiteindelijk geheel besteed aan het in detail uitwerken en interpreteren van de meetgegevens, zonder aanvullend modelonderzoek.

1.4 Beperkingen

Het onderzoek kent enkele beperkingen en voor de duidelijkheid worden die op voorhand aangegeven:

- er heeft geen parallel onderzoek plaatsgevonden voor grasland in De Purmer zodat geen directe op meetgegevens gebaseerde conclusies ten aanzien van de gevolgen van het aanplanten van bos en het aangepaste beheer zijn te trekken;
- het hydrologisch isoleren door het afdammen van sloten en het installeren van een eigen gemaaltje heeft tot gevolg dat de afwatering volgens een ander patroon verloopt dan in de sitiatie van vóór de inrichting als proefgebied;
- de begrenzing van het proefgebied is zodanig dat binnen die grens *acht* kavelstroken liggen maar slechts *zeven* kavelsloten (figuur 2.2): de situatie is daarmee afwijkend van die voor het graslandgebied van De Purmer waar het aantal kavelstroken en kavelsloten aan elkaar gelijk is;
- het streefpeil voor het proefgebied wijkt af van het streefpeil erbuiten.

Het is van belang deze vier punten bij het lezen van het rapport steeds voor ogen te houden. Uiteraard wordt hierop in het vervolg bij herhaling teruggekomen.

1.5 Leeswijzer

Dit rapport betreft het onderzoek en de resultaten daarvan over de periode vanaf medio 1990 t/m het jaar 2000 en beslaat dus een periode van globaal 10 jaar. Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van het proefgebied. De nadruk ligt daarbij op de waterhuishoudkundige en bodemkundige karakterisering. Hoofdstuk 3 gaat over het aanplanten en de ontwikkeling van het bos en hoofdstuk 4 over de opzet en uitvoering van het meetprogramma met betrekking tot de hydrologie. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op het controleren en bewerken van de ruwe gegevens die vervolgens in hoofdstuk 6 zijn gebruikt om de *neerslag*, de *afvoer* van overtollig water via bemaling en de *inlaat* van water in perioden met een tekort te berekenen, op dagbasis. Daarnaast wordt ingegaan op het kwantificeren van de *kwel* en de *(bos)verdamping*.

Hoofdstuk 7 betreft waterbalansberekeningen voor de periode 1991 t/m 2000. Berekeningen zijn uitgevoerd voor zowel de kalenderjaren 1991 t/m 2000 als voor balansperioden die op hydrologische criteria zijn gebaseerd. Op basis van de resultaten volgt een kritische evaluatie van de balansposten, resulterend in een correctie van de afvoer- en de kwelpost. Daarna zijn de balansen opnieuw berekend en geëvalueerd.

In hoofdstuk 8 wordt ingegaan op waterhuishoudkundige aspecten die samenhangen met de bosaanplant, de gebiedsinrichting en het beheer, met een gedetailleerde analyse van k-daagse afvoer- en neerslagsommen en van perioden met duidelijk verhoogde openwaterstanden ten gevolge van veel neerslag of van andere oorzaken. In hoofdstuk 9 tenslotte volgt een evaluatie van het onderzoek als geheel, waarbij ook wordt ingegaan op de vraag in hoeverre de resultaten aan de oorspronkelijke doelstellingen beantwoorden en welke conclusies kunnen worden getrokken.

Tenslotte wordt opgemerkt dat de figuren van de hoofdstukken 7 en 8 deels niet in de tekst maar in aanhangsels zijn opgenomen. Het gaat om de figuren 7.2 t/m 7.10 in aanhangsel 4 en de figuren 8.9 t/m 8.17 in aanhangsel 5.

2 Beschrijving van het proefgebied

2.1 Ligging en globale inrichting

De Purmer is één van de grotere droogmakerijen in Noord-Holland. Vóór de stadsuitbreiding van Purmerend en de aanleg van het boscomplex werd vrijwel de totale oppervlakte van de droogmakerij ingenomen door grasland. Op de kaart van figuur 2.1 is de ligging van het Purmerboscomplex aangegeven. De oppervlakte buiten het stedelijk gebied en het bosgebied is nog steeds grotendeels als grasland in gebruik. Het eigenlijke onderzoek heeft betrekking op de aangegeven rechthoekige deeloppervlakte binnen het boscomplex, met een oppervlakte van bij benadering 66 ha (900 bij 720 m). Deze deeloppervlakte is verder aangeduid als het proefgebied.

Figuur 2.1 Ligging van het proefgebied binnen de droogmakerij De Purmer

De kaart van figuur 2.2 geeft meer informatie over de inrichting van het proefgebied. Met het oog op het kwantificeren van de waterhuishouding is het gebied voor zover mogelijk hydrologisch geïsoleerd van de omgeving door het afdammen van sloten, door het apart bemalen en door het treffen van voorzieningen om de waterinlaat voor peilhandhaving in droge perioden te meten. De wateraf- en aanvoer vindt plaats via het gemaal aan de noordwestgrens van het gebied, naar resp. vanuit de sloot langs de Westerweg.

Binnen het proefgebied liggen in totaal zeven sloten in de lengterichting (noordwest-zuidoost, verder aangeduid als nw-zo), op een onderlinge afstand van ca. 90 m. Deze sloten in de lengterichting zijn met elkaar verbonden via een aantal dwarssloten. De sloten langs de beide nw-zo lopende grenzen van het gebied evenals de sloot langs de Westerweg en de middentocht aan de zo-zijde vallen buiten het proefgebied. De detailontwatering vindt plaats via greppels. Het aantal greppels tussen twee sloten in de lengterichting is zes of zeven. Bij een slootafstand van 90 m geeft dat een greppelafstand uiteenlopend van ca. 11 tot 13 m.

Bij de inrichting van het gebied zijn enkele fiets- en wandelpaden aangelegd (niet aangegeven in figuur 2.2). De paden liggen op een enigszins verhoogd niveau en blijven daardoor ook in perioden met hoge waterstanden in het winterhalfjaar bruikbaar. Met het oog op de afwatering zijn bij kruisingen van sloten met fiets- wandel- en schouwpaden in totaal 24 duikers gelegd.

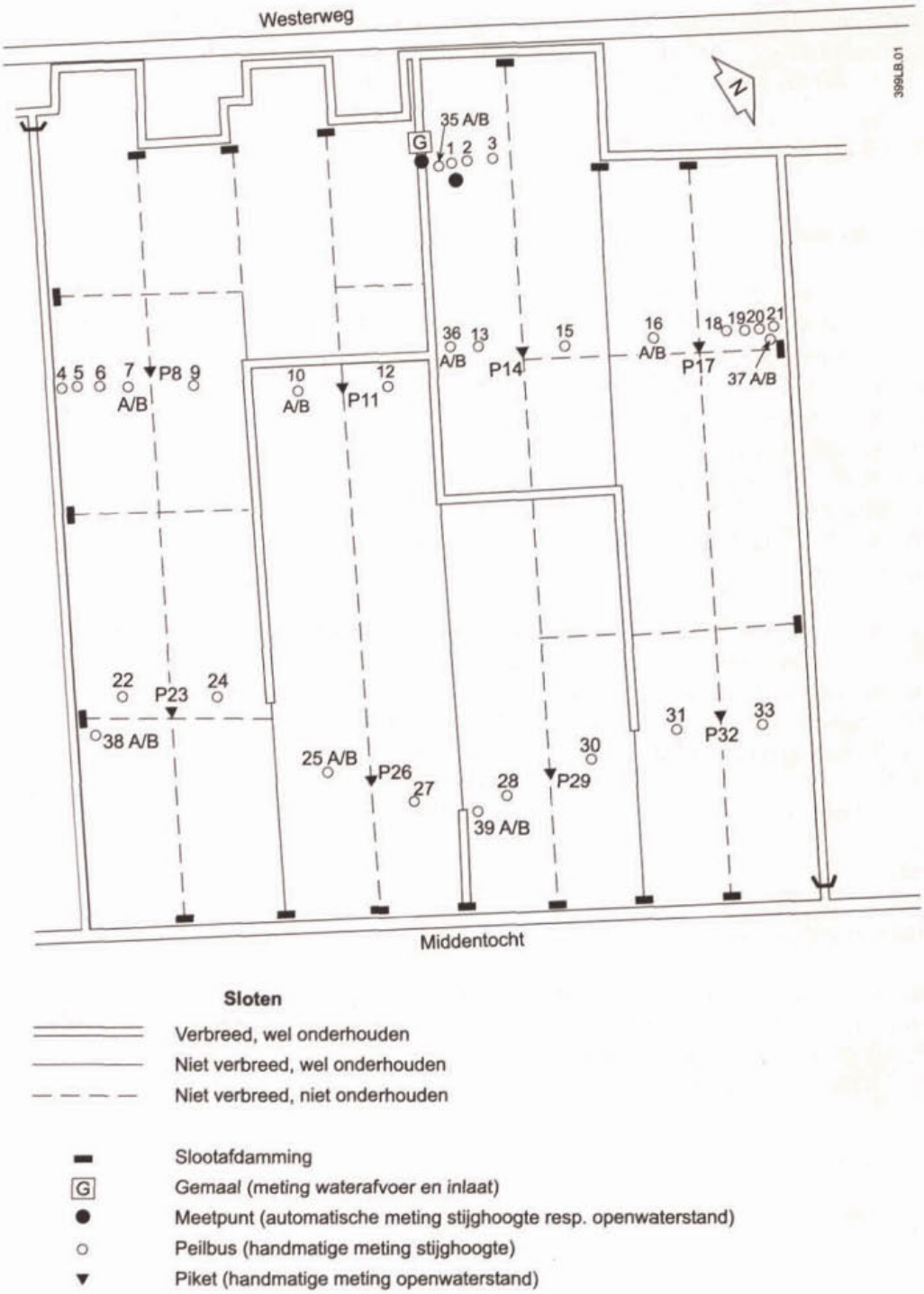
Verder is met het oog op het bepalen van de kwel een aantal peilbuizen geplaatst om stijghoogten van het ondiepe en diepere grondwater te meten. Hierop wordt later in meer detail ingegaan.

2.2 Karakterisering van de waterhuishouding

2.2.1 Maaiveldshoogten

Bij het plaatsen van de peilbuizen zijn metingen uitgevoerd om naast de filterdiepte ook de maaiveldshoogte ter plaatse vast te leggen. Het is van belang hierbij op te merken dat alle buizen midden tussen twee greppels zijn geplaatst, dus op de 'ruggen'. Op basis van de situatie ter plaatse van de 25 peilbuizen (nummers 1 t/m 33 in figuur 2.2) is de maaiveldshoogte binnen het proefgebied als volgt te karakteriseren:

- gemiddelde hoogte 412 cm-NAP;
- standaardafwijking 10 cm;
- hoogste punt 390 cm-NAP (buis 31);
- laagste punt 430 cm-NAP (buis 6).



Figuur 2.2 Inrichting van het Purmerbos proefgebied

Volgens deze gegevens zijn de hoogteverschillen beperkt. Uit de hoogtemetingen is echter geen compleet beeld in de vorm van een hoogtekaart af te leiden. Daarvoor is het aantal metingen en de verdeling over de oppervlakte van het proefgebied ontoereikend. Uit de gegevens blijkt wel dat het maaiveld in de linker helft van het proefgebied volgens figuur 2.2 lager ligt dan in de rechter helft:

- gemiddelde voor de buizen 4,5,6,7,9,10,12,22,24,25,27 422 cm-NAP;
- gemiddelde voor de buizen 1,2,3,13,15,16,18,19,20,21,28,30,31,33 406 cm-NAP.

Bij een aantal buizen is het greppelprofiel opgemeten. De gegevens zijn verwerkt in figuur 2.3. De greppeldiepte ten opzichte van de ruggen (referentieniveau) ligt in de orde van 15 tot 25 cm. Figuur 2.3d betreft het gemiddelde profiel voor de elf greppels waarvan de gegevens zijn verwerkt in figuur 2.3a, b en c. Volgens de figuur is de gemiddelde greppeldiepte 15 à 20 cm en de gemiddelde greppelbreedte 2 à 3 m, bij een greppelafstand van 11 à 13 m.

2.2.2 Streefpeilen

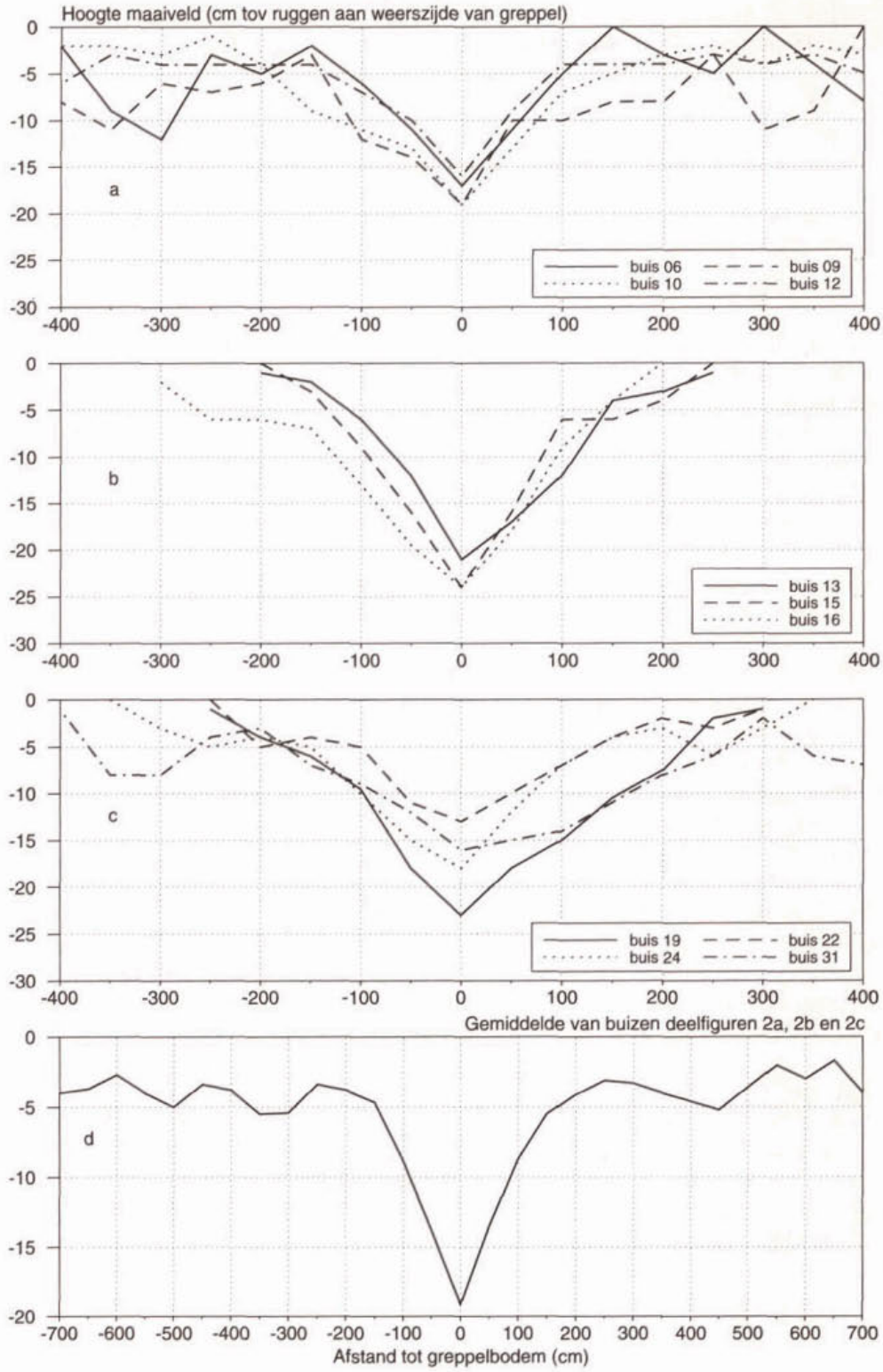
In de periode voorafgaand aan het onderzoek was het streefpeil voor het desbetreffende deel van De Purmer 455 cm-NAP voor de zomerperiode en 460 cm-NAP voor de winterperiode. Na het inrichten van het proefgebied is een vast streefpeil van 480 cm-NAP ingesteld en gehandhaafd. Aanvankelijk was het proefgebied dus een gebied met onderbemaling. Later is het peilbesluit voor het aangrenzende gebied binnen De Purmer herzien en dat heeft geleid tot de volgende gedifferentieerde aanpassing van de streefpeilen langs de randen van het proefgebied:

- de sloot langs de Westerweg en de sloot langs de no-grens met een streefpeil van 460 cm-NAP (betreft de randsloot rechts in figuur 2.2);
- de middentocht en de sloot langs de zw-grens met een streefpeil van 505 cm-NAP (betreft de randsloot links in figuur 2.2).

Het hogere streefpeil in de beide eerstgenoemde sloten houdt verband met het beschermen van de funderingen van de bebouwing langs de Westerweg en met de wateraanvoerfunctie voor peilhandhaving en doorspoeling. De peilverlaging van ca. 50 cm elders is doorgevoerd om de ontwatering ten behoeve van de landbouw te verbeteren. Deze aangepaste streefpeilen zijn in augustus 1993 doorgevoerd en hebben geleid tot een situatie waarbij het streefpeil voor het proefgebied (480 cm-NAP) ligt tussen dat van enerzijds het wateraanvoersysteem (460 cm-NAP) en anderzijds het waterafvoersysteem (505 cm-NAP) van dit deel van de Purmer.

2.2.3 Ontwatering en afwatering

De ontwatering vindt plaats via greppels en sloten. Wat de greppels betreft valt op te merken dat na aanleg van het boscomplex geen onderhoud meer heeft plaatsgevonden. In het voorjaar van 1999, dus ca. 10 jaar na aanleg van het bos, is geconstateerd dat er in grote delen van het proefgebied water in de greppels stond.



Figuur 2.3 Greppelprofielen afgeleid uit metingen nabij een aantal peilbuizen (figuur 2.2) in het Purmerbos proefgebied

Het is aannemelijk dat dit thans gedurende het winterhalfjaar vrijwel permanent het geval is. In vergelijking met de vroegere (grasland)situatie is de detailontwatering via greppels dus duidelijk minder goed verzorgd. Daar komt nog bij dat het aanleggen van de (enigszins verhoogd liggende) fiets- en wandelpaden en het verbreden van dwarssloten (zie later) op verschillende plaatsen heeft geleid tot het afdammen van greppels. Bij enkele percelen, die samen bij benadering 20% van de totale oppervlakte van het proefgebied beslaan, is dat zelfs aan beide greppeluiteinden het geval waardoor de afwatering van die greppels geheel is geblokkeerd. Het is niet bekend in hoeverre de verminderde ontwatering naar en afwatering via de greppels zich geleidelijk heeft ontwikkeld gedurende de afgelopen periode van tien jaar, of in feite direct al vanaf 1990 een factor van betekenis is geweest.

Op de kaart van figuur 2.2 zijn alle kavelsloten (sloten in de lengterichting) en perceelssloten (sloten in de dwarsrichting waardoor de kavelsloten met elkaar worden verbonden) aangegeven. Bij het uitwerken van de plannen tot aanleg van het bos is indertijd besloten om het onderhoud te beperken tot een deel van de sloten. Het onderscheid tussen *wel* en *niet* onderhouden sloten is in figuur 2.2 aangegeven. Om het veronderstelde verlies aan waterberging als gevolg van het achterwege blijven van slootonderhoud te compenseren is een gedeelte van de *wel* te onderhouden kavelsloten verbreed (verdubbeling van de breedte). Daarnaast zijn centraal binnen het proefgebied twee nieuwe brede dwarssloten gegraven. Met het oog op het onderhoud hebben de brede sloten een schouwpad langs beide zijden. De niet verbrede gedeelten van de *wel* onderhouden sloten hebben slechts een schouwpad langs één zijde.

In oktober 1999 zijn de slootlengten en breedten in detail opgemeten. Enkele weken tevoren was het gemaal uitgeschakeld. Zodoende was de openwaterstand ten tijde van de veldopname 20 cm boven streefpeil, zowel in de *wel* onderhouden als in de *niet* onderhouden sloten. Hieruit bleek dat de *niet* onderhouden sloten nog steeds deel uitmaken van het openwatersysteem van het proefgebied en dus ook nog steeds een rol spelen als het gaat om de ontwatering, de afwatering en de waterberging. In hoofdstuk 8 wordt nader ingegaan op het functioneren van de *niet* onderhouden sloten.

Tabel 2.1 geeft de kengetallen voor het oppervlaktewatersysteem binnen het proefgebied. Alle getallen zijn rechtstreeks of via extrapolatie uit de metingen van oktober 1999 afgeleid. Bij het extrapoleren van de situatie waarbij de metingen plaatsvonden (openwaterstand van 460 cm-NAP, dus 20 cm boven streefpeil) naar de situatie bij streefpeil (openwaterstand van 480 cm-NAP) is voor alle sloten uitgegaan van een talud van 1:2.

De totale lengte aan sloten is bijna 7000 m waarvan 27% *wel* en 73% *niet* onderhouden. In de (grasland)situatie van vóór 1990 was er 3,2% open water wat normaal is voor niet gedraineerde graslandgebieden in de droogmakerijen van Noord-Holland. Het deels achterwege blijven van slootonderhoud na het aanplanten van het bos, zou betekenen dat de effectieve oppervlakte aan open water op den duur, dat wil zeggen bij het geheel verlanden van de *niet* langer te onderhouden sloten, met bij benadering de helft zou worden gereduceerd.

Tabel 2.1 Kengetallen voor het openwatersysteem binnen het Purmerbos proefgebied

Situatie van vóór het aanplanten van het Purmerbos, bij gebruik van het gebied als grasland, bij een openwaterstand van 480 cm-NAP			
	wèl onderhouden	niet onderhouden	totaal
Slootlengte (m)	6615	---	6615
Wateroppervlakte (m^2)	20975	---	20975
Breedte (m)	3,15	---	3,15
Open water (%)	3,2	---	3,2
Situatie na het aanplanten van het Purmerbos, bij deels achterwege blijven van onderhoud van kavelsloten, zonder compensatie *, bij een openwaterstand van 480 cm-NAP			
	wèl onderhouden	niet onderhouden	totaal
Slootlengte (m)	3472	3143	6615
Wateroppervlakte (m^2)	10153	10822	20975
Breedte (m)	2,9	3,4	3,15
Open water (%)	1,55	1,65	3,2
Situatie na het aanplanten van hetPurmerbos, bij deels achterwege blijven van onderhoud van kavelssloten, met compensatie *, bij een openwaterstand van 480 cm-NAP			
	wèl onderhouden	niet onderhouden	totaal
Slootlengte (m)	1910	5060	6970
Wateroppervlakte (m^2)	12880	15590	28470
Breedte (m)	6,7	3,1	4,1
Open water (%)	1,95	2,35	4,3

* *zonder* compensatie houdt in dat bestaande sloten *niet* zijn verbreed en dat geen nieuwe perceelssloten zijn gegraven, *met* compensatie houdt in dat de te onderhouden kavelsloten deels zijn verbreed en dat *wel* nieuwe perceelssloten zijn gegraven (figuur 2.2)

Door het deels verbreden van kavelsloten en het graven van nieuwe brede perceelssloten ontstaat een situatie waarbij het totale percentage open water uitkomt op 4,3% waarvan 2,35% in *wel* en 1,95% in *niet* te onderhouden sloten. Bij het vergelijken van de graslandsituatie met de bossituatie blijkt dus:

- dat het percentage open water is toenenomen van 3,2% naar 4,3% als de *niet* onderhouden sloten wel worden meegerekend;
- dat het percentage open water is afgenomen van 3,2% naar 1,95% als de *niet* onderhouden sloten niet worden meergerekend.

Uit deze percentages blijkt dat het al dan niet (blijvend) functioneren van de *niet* onderhouden sloten bepaalt hoe de bergingscapaciteit van het slotenstelsel als geheel in de 'bossituatie' zich verhoudt tot die in de 'graslandsituatie'.

2.2.4 Bemaling en waterinlaat

Ter handhaving van het streefpeil van 480 cm-NAP wordt het proefgebied apart bemalen. Het aanslag- en afslagniveau van de pomp zijn ingesteld op 475 cm-NAP resp. 485 cm-NAP. De bemalingscapaciteit ligt in de orde van 350 m^3 per uur wat neerkomt op ca. 13 mm per etmaal (mm/d).

In perioden met een verdamping groter dan de neerslag (verdampingsoverschot) zal de openwaterstand in het gebied de neiging hebben te dalen als gevolg van directe verdamping (vanuit het open water en via de slootvegetatie) en infiltratie vanuit de sloten naar de bodem.
In díe situatie wordt automatisch water ingelaten vanuit de aanvoersloot langs de Westerweg. Dit gebeurt door het openen van een klep in de aanvoerbuis die in het gemaal is ingebouwd. De klep gaat open als de waterstand bij het gemaal is gedaald tot 490 cm-NAP en blijft dan geopend tot de waterstand weer is gestegen tot 480 cm-NAP.

2.3 Bodemkundige aspecten

2.3.1 Karakterisering volgens de bodemkaart 1:50 000

Het proefgebied ligt op de grens van twee kaartbladen van de bodemkaart van Nederland, schaal 1:50 000 (Stichting voor Bodemkartering, 1965 en 1987):
- kaartblad 25 Oost (Amsterdam), uitgave 1965;
- kaartblad 19 Oost (Alkmaar)/20 West (Lelystad), uitgave 1987.

Volgens kaartblad 25 Oost gaat het ter plaatse om legenda-eenheid pMn86C*w* met Gt III (kalkarme leek-/woudeerdgrond, grondwatertrap III), volgens kaartblad 19 Oost/20 West om legenda-eenheid Mo80C*w*, met Gt II (kalkarme nesvaaggrond, grondwatertrap II). Wat de punten van overeenkomst betreft geldt het volgende. Code M wijst op een zeekleigrond, code 8 duidt op een kleibovengrond (>25% lutum), code C betekent dat het profiel kalkarm is en code *w* geeft aan dat er een moerige tussenlaag is, beginnend tussen 40 en 80 cm en met een dikte van tenminste 15 cm. De punten van verschil zijn als volgt te interpreteren. Code o (in Mo) wijst op een *on*gerijpte ondergrond, code n (in Mn) op een profiel met hydromorfe kenmerken in de vorm van roestvlekken binnen 50 cm. Wat de profielopbouw betreft impliceert code 0 (in 80) dat die niet nader is gespecificeerd terwijl code 6 (in 86) inhoudt dat er onder de kleibovengrond een laag zware klei (>35% lutum) voorkomt die tenminste 15 cm dik is en rust op een lichtere en kalkrijke ondergrond. Tenslotte is er nog het verschil in grondwatertrap (volgens de indeling die tot omstreeks 1990 van toepassing was bij het vervaardigen van de bodemkaart 1:50 000: ten Cate *et al.*, 1995). Voor zowel Gt II als III is de GHG<40 cm-mv, Gt II impliceert een GLG van 50-80 cm-mv en Gt III van 80-120 cm-mv.

Volledigheidshalve volgt hier nog een globale beschrijving ontleend aan de toelichtende rapporten bij de kaartbladen 19 Oost/20 West resp. 25 Oost:
'Nesvaaggronden zijn ontstaan op plaatsen waar een veenpakket is geërodeerd en waar klei is afgezet. Deze klei is, beginnend ondieper dan 80 cm, ongerijpt, slap en gereduceerd. Binnendijks liggen deze gronden in De Purmer. Ze zijn hier kalkloos en de ongerijpte ondergrond binnen 80 cm is een gevolg van de beperkte ontwatering. De bovengrond is in het algemeen donkerder van kleur. Vrijwel overal komt, beginnend tussen 40 en 80 cm diepte, een 15 à 40 cm dikke veentussenlaag (toevoeging *w*) voor.'

'Leek-/woudeerdgronden in de droogmakerijen zijn overwegend gronden die tot meer dan 50 cm diepte uit homogene, zware klei bestaan en daarbij tot ca. 50 cm zijn ontkalkt (of die een kleibovengrond hebben met daaronder een tussenlaag van zware klei). In De Purmer wordt tussen 40 en 80 cm diepte een dunne veenlaag aangetroffen.'

2.3.2 Bodemgeschiktheid voor bosbouw

In de toelichting bij kaartblad 19 Oost/20 West en in de toelichting met algemene begrippen en indelingen (Steur en Heijink, 1983) wordt ook aandacht besteed aan de bodemgeschiktheid voor bosbouw. De beoordeling van de geschiktheid gebeurde tegen de achtergrond van de meervoudige functie van het bos en de daaruit voortvloeiende doelstelling van de bosbouw. Uitgangspunt daarbij was toen dat het bos beter aan de meervoudige doelstelling beantwoordt, naarmate het sneller tot volle wasdom komt en de boomsoortensamenstelling gevarieerder is.

De toentertijd gehanteerde indeling in geschiktheidsklassen voor bosbouw berust op de *boomgroei* en het *assortiment boomsoorten*. Voor de classificatie worden zeven van de in de bosbouw in Nederland veel voorkomende boomsoorten gebruikt: populier, zomereik, beuk, grove den, douglasspar, Japanse lariks en fijnspar. Met deze zogenoemde gidsboomsoorten kon in voldoende mate onderscheid worden gemaakt tussen gronden die als meer of minder geschikt

voor de bosbouw zijn te beschouwen. Daarbij werd onderscheid gemaakt tussen 'goede', 'normale' en 'slechte' groei van deze boomsoorten in termen van de jaarlijkese houtaanwas in m^3/ha. De inpassing van de kaarteenheden in de geschiktheidsklassen gebeurt met behulp van de beoordelingsfactoren *ontwateringstoestand, vochtleverend vermogen, voedingstoestand* en *zuurgraad*. De volgende drie hoofdklassen van geschiktheid voor bosbouw worden onderscheiden:

- hoofdklasse I: gronden met ruime mogelijkheden voor bosbouw, gronden met een goede groei van tenminste drie van de gidsboomsoorten;
- hoofdklasse II: gronden met beperkte mogelijkheden voor bosbouw, goede groei van ten hoogste twee gidsboomsoorten of normale groei van tenminste drie gidsboomsoorten;
- hoofdklasse III: gronden met weinig mogelijkheden voor bosbouw, normale groei van ten hoogste twee gidsboomsoorten.

Zowel kaarteenheid Mo80Cw/Gt II als kaarteenheid pMn86Cw/Gt III worden in dit systeem ingedeeld in hoofdklasse II (gronden met beperkte mogelijkheden), subklasse 3: géén gidsboomsoorten met goede groei, 3 à 4 gidsboomsoorten met normale groei. De belangrijkste beperkende factor is de ontwateringstoestand. Zo blijkt dat alle kaarteenheden met Gt II of III zijn gerekend tot hoofdklasse II, subklasse 3, ongeacht de andere bodemkundige eigenschappen.

Zoals aangegeven in par. 2.2.2 is bij het inrichten van het proefgebied een peilverlaging doorgevoerd. Op zichzelf zou dat leiden tot een betere ontwatering en daardoor tot gunstigere omstandigheden voor bosbouw. Als de Gt verschuift van II of III naar Gt II* resp. III* (inhoudende dat GHG's <40 cm-mv verschuiven naar GHG's tussen 25 en 40 cm-mv) komen deze kaarteenheden terecht in hoofdklasse I (gronden met ruime mogelijkheden), subklasse 3 (goede groei van drie gidsboomsoorten). Hieruit blijkt nogmaals dat de geschiktheidsklasse voor bosbouw geheel bepaald wordt door de ontwateringstoestand in termen van de Gt.

Voorafgaand aan de aanleg van het Purmerbos is door studenten van de VU een aanvullend bodemkundig veldonderzoek uitgevoerd (Bijlsma *et al.*, 1992). Aanleiding daartoe was in eerste instantie de aanwezigheid van de moerige tussenlaag (code *w* in de kaarteenheden Mo80C*w* en pMn86C*w*). Deze laag zou plaatselijk sterk verkit zijn en daardoor mogelijk gevolgen hebben voor de waterhuishouding en de bewortelingsdiepte van het aan te planten bos.

De volgende gegevens zijn aan het rapport van Bijlsma *et al.* (1992) ontleend. Voor het proefgebied was de lithologie vrij monotoon: een ca. 40 cm dikke bruinkleurige zware kleilaag, gevolgd door een ca. 25 cm dikke moerige laag met daaronder een zware grijs-bruine klei die naar onderen grijzer en zandiger wordt en overgaat in grijze klei met zandlaagjes. Deze ongerijpte grijze klei met zandlaagjes is afgezet als een wadsequentie en wordt gerekend tot Calais III. In een latere periode, na sluiting van de kustlijn, heeft zich laagveen gevormd dat vermoedelijk enkele meters dik is geweest. Na het ontstaan van de Zuiderzee is De Purmer gevormd door erosie van het laagveen. De moerige laag is te zien als een restant van het laagveen waarop later vanuit de Zuiderzee zware klei is afgezet. Deze klei is tot de formatie van Duinkerken te rekenen en is afgezet in de periode tot de droogmaking van De Purmer in de zeventiende eeuw.

Op basis van hun onderzoek concluderen Bijlsma *et al.* (1992) als volgt ten aanzien van aspecten die met de aanplant en de ontwikkeling van bos te maken hebben:

- zolang het gaat om jonge bomen met een beperkte beworteling verdient het aanbeveling het streefpeil te handhaven op 460 cm-NAP (drooglegging van 45 à 50 cm) om droogteschade in de zomer te voorkomen;
- in verband met mogelijke inklinking van de moerige tussenlaag bij uitdroging is het niet aan te bevelen om de drooglegging in een later ontwikkelingsstadium van het bos door peilverlaging te vergroten tot beneden de ondergrens van die moerige laag, dat wil zeggen tot beneden 470 à 480 cm-NAP;

- gezien de stugheid van de klei-bovengrond is er geen reden tot bezorgheid ten aanzien van de gevoeligheid voor windworp vanwege de beperkte bewortelingsdiepte;
- de klei-bovengrond vertoont bij uitdroging sterke krimp en scheurvorming; door zwelling bij bevochtiging verdwijnen de scheuren en neemt de doorlatenheid sterk af; een diepe grondbewerking ter verschraling van de bovengrond, voorafgaand aan het planten van het bos zou overwogen kunnen worden maar lijkt weinig perspectief te bieden tenzij die bewerking zeer diep plaatsvindt, dat wil zeggen tot beneden de moerige tussenlaag.

De laatstgenoemde aanbeveling is inderdaad overgenomen: over het overgrote deel van de oppervlakte van het proefgebied heeft voorafgaand aan het inplanten een grondbewerking plaatsgevonden. Deze bewerking is echter minder diep uitgevoerd dan door de studenten bij het formuleren van hun aanbevelingen werd bedoeld. Uit nader onderzoek in het voorjaar van 1999 bleek de moerige tussenlaag overal binnen het proefgebied nog steeds intact te zijn. De bewerkingsdiepte is kennelijk onvoldoende geweest om het beoogde doel te bereiken en dat heeft ongetwijfeld te maken gehad met de zwaarte en stugheid van het bodemprofiel en wellicht ook met de omstandigheden waaronder de bewerking is uitgevoerd.

3 Bosaanplant en ontwikkeling

In mei 1986 heeft de toenmalige Minister van Landbouw en Visserij de regeringsbeslissing van het Meerjarenplan Bosbouw (Ministerie van Landbouw en Visserij, 1986) aangeboden aan de Tweede Kamer der Staten-Generaal. De regeringsbeslissing betreft de volgende doelstellingen van het beleid van de rijksoverheid met betrekking tot bos en bosbouw:

- het duurzaam in stand houden en ontwikkelen van het bestaande bosareaal;
- het bevorderen van een zodanig gebruik en beheer dat de aan het bos toegekende functies blijvend en in het algemeen gelijktijdig op dezelfde plaats worden vervuld, waarbij het gaat om de functies openluchtrecreatie, het produceren en leveren van hout, het in stand houden en ontwikkelen van natuurwaarden en het leveren van een bijdrage aan de kwaliteit van het landschap;
- het uitbreiden van het bosareaal door of vanwege de overheid, het bevorderen van bosuitbreiding door particulieren en het bevorderen van de aanplant van snelgroeiend productiebos.

Het desbetreffende rapport geeft een overzicht van de samenstelling van het toen bestaande bosareaal van in totaal 335 000 ha, met een verdeling van dat areaal over 13 zogenoemde bostypen op basis van historisch-geografische criteria. Op de lange termijn, dat wil zeggen in de periode tot 2050, zou het totale bosareaal uitgebreid moeten worden met 16 000 ha, dus tot een totaal van 351 000 ha. Eén van die 13 bostypen wordt omschreven als '20e eeuwse vochtige landbouwgrondbebossing', toen met een totale oppervlakte van 9500 ha en op de lange termijn uit te breiden met 6500 ha.

Het Purmerbos is van het type '20e eeuwse vochtige landbouwgrondbebossing' en de aanplant was dus in lijn met de beoogde uitbreiding van het areaal. Binnen genoemd bostype worden in totaal 15 bosdoeltypen onderscheiden op basis van verschillen in samenstellings- en structuurkenmerken, het beheer, de inrichting en de bedrijfsvoering. Die 15 bosdoeltypen worden weer ingedeeld in drie groepen: *veelzijdige bosdoeltypen*, *natuurbehoud-bosdoeltypen* en *korte omloop-bosdoeltypen*. Kenmerkende soorten, al dan niet in combinatie met elkaar, voor de desbetreffende bosdoeltypen zijn eik, berk, es, els, wilg en populier.

Figuur 3.1 betreft de beplanting van het proefgebied met verschillende boomsoorten.
Bij benadering tweederde deel van de oppervlakte is ingeplant met populier. Daarnaast gaat het om es (ca. 10%), zomereik (ca. 20%) en beuk (ca. 5%). Plaatselijk zijn andere boomsoorten op bescheiden schaal bijgemengd: veldiep, zoete kers, zwarte els, haagbeuk, linde en esdoorn.
Het aanplanten heeft plaatsgevonden in de wintermaanden van 1989. Voor zover mogelijk is machinaal geplant. Waar dat vanwege de natte omstandigheden niet mogelijk bleek te zijn, is handmatig gewerkt.

Populiersoorten

Overigen

Euramerikaanse populieren

AA Spijk
AB Florence Biondi
AC Robusta
AD Flevo
AF Agathe F

Balsem populier

CA Barn

Zwarte populieren

BA Vereecken
BB Ankum
BD Brandaris
BE Schoorldam

Overige boomsoorten

DC Eik
EB Es
FA Beuk

Figuur 3.1 Beplanting van het Purmerbos proefgebied met verschillende boomsoorten

In 1992, 1995 en 1997 zijn hoogtemetingen verricht aan zowel de vier hoofdboomsoorten als aan de bijgemengde soorten. De groei van de vier hoofdboomsoorten (populier, eik, es, beuk) en van zwarte els is getoetst aan de hand van bestaande opbrengsttabellen die van toepassing zijn op de omstandigheden in Nederland. Het resultaat van deze vergelijking was als volgt:

- de groei van genoemde boomsoorten binnen het proefgebied is 'goed' tot 'zeer goed': bij vergelijking met de opbrengsttabellen valt de groei in de hoogste of één na hoogste klasse;
- groeistoornissen zijn nagenoeg geheel uitgebleven;
- het scheefgroeien of afbreken van bomen of boomgroepen is tot het moment van de laatste veldopname in 1997 uitgebleven;
- alléén enkele Euroamerikaanse populiercultivars zijn door een bladziekte aangetast.

Voor verdere details wordt verwezen naar Szabo (1998).

In het voorjaar en de zomerperiode van 1999 zijn enkele aanvullende waarnemingen gedaan (door Beets, Hamaker):

- welige ondergroei van grassen, brandnetels, berenklauw, fluitenkruid in het voorjaar, vóór het bos in blad komt;
- duidelijk scheve stand van bomen in de beide percelen met populier Schoorldam in de zuidpunt van het proefgebied (zie figuur 3.1: percelen BE); deze beide percelen zijn *niet* bewerkt voorafgaande aan het inplanten van de boompjes; voorts is in de winter van 1998-1999 geconstateerd dat de afwatering, die daar via bermsloten langs een fietspad en vervolgens door kleine duikers naar kavelsloten moet plaatsvinden, stagneerde door verstopping van genoemde kleine duikers;
- bij verwijderen van enkele goudiepen nabij het gemaal was goed te zien dat de dikkere boomwortels de neiging hebben zich op betrekkelijk geringe diepte en in ieder geval *boven* de moerige tussenlaag in horizontale richting te verspreiden;
- plaatselijk sterfte van beukenboompjes in één van de beide met die boomsoort ingeplante percelen in augustus 1999, na een zeer warme en droge periode van enkele weken; dit betreft een plek waar, door een combinatie van een relatief lage ligging en stagnatie van de water-afvoer door verstopping van greppels, 's winters langdurig inundatie en plas-drassituaties voorkomen.

4 Opzet en uitvoering meetprogramma hydrologie

Met het oog op het kwantificeren van de waterbalans van het proefgebied is bij aanvang van het onderzoek in 1990 een meetprogramma uitgewerkt. In dit hoofdstuk volgen nadere gegevens over de opzet en uitvoering. Er is onderscheid te maken tussen automatische metingen en periodiek uitgevoerde handmatige metingen.

Naast het vaste meetprogramma is in de periode 1994/1995 een apart geohydrologisch onderzoek uitgevoerd, speciaal gericht op het bepalen van de weerstand van het afdekkend pakket. Die weerstand is in sterke mate bepalend voor de kwelintensiteit.

4.1 Geautomatiseerde metingen

De geautomatiseerde metingen hebben betrekking op:
- de neerslag;
- de afvoer van water via bemaling;
- de toevoer via het inlaten van water;
- de grondwaterstand;
- de openwaterstand.

De neerslag wordt gemeten met een kantelbakregenmeter (tipping bucket) die is geplaatst in het open weidegebied dat grenst aan het proefgebied, op ca. 100 m afstand van de bosrand. Deze regenmeter wordt verder aangeduid als de SBB-regenmeter. De positie van de regenmeter is 2 m boven maaiveld. De waterafvoer en toevoer worden gemeten met electromagnetische debietmeters. De afvoer (via bemaling) en toevoer van water (openen van inlaatklep) worden beide gestuurd door de openwaterstand binnen het proefgebied, ter plaatse van het gemaal. De grondwaterstand en de openwaterstand worden gemeten met drukopnemers. De peilbuis voor het meten van de grondwaterstand is geplaatst nabij het gemaal, tussen de peilbuizen 1 en 2 in figuur 2.2. Het meetpunt voor de openwaterstand ligt direct bij het gemaal.

De desbetreffende meetinstrumenten zijn via kabels met een centrale registratie-eenheid verbonden. De neerslag, waterafvoer, watertoevoer en de waterstanden worden in principe elk uur geregistreerd en bovendien op elk tijdstip waarop de toestand van het gemaal of van de inlaatklep verandert (toestandsveranderingen betreffen het aan- en afslaan van het gemaal en het openen en sluiten van de inlaatklep).

De neerslag wordt berekend op basis van het aantal kantelingen van het kantelbakje. Via het instellen van de juiste waarde van de omrekeningsfactor voor de desbetreffende regenmeter wordt de neerslag direct geregistreerd in mm (cumulatief). Het signaal van de debietmeters wordt, eveneens via het instellen van de juiste waarden van omrekeningsfactoren, omgezet en geregistreerd in m^3 water (cumulatief). In aanvulling daarop wordt ook de cumulatieve duur van bemaling resp. van opening van de inlaatklep geregistreerd (cumulatief, in uren).
De waterstanden tenslotte worden uit de drukmetingen afgeleid en geregistreerd in cm ten opzichte van NAP.

4.2 Handmatige metingen

4.2.1 Regenmeters

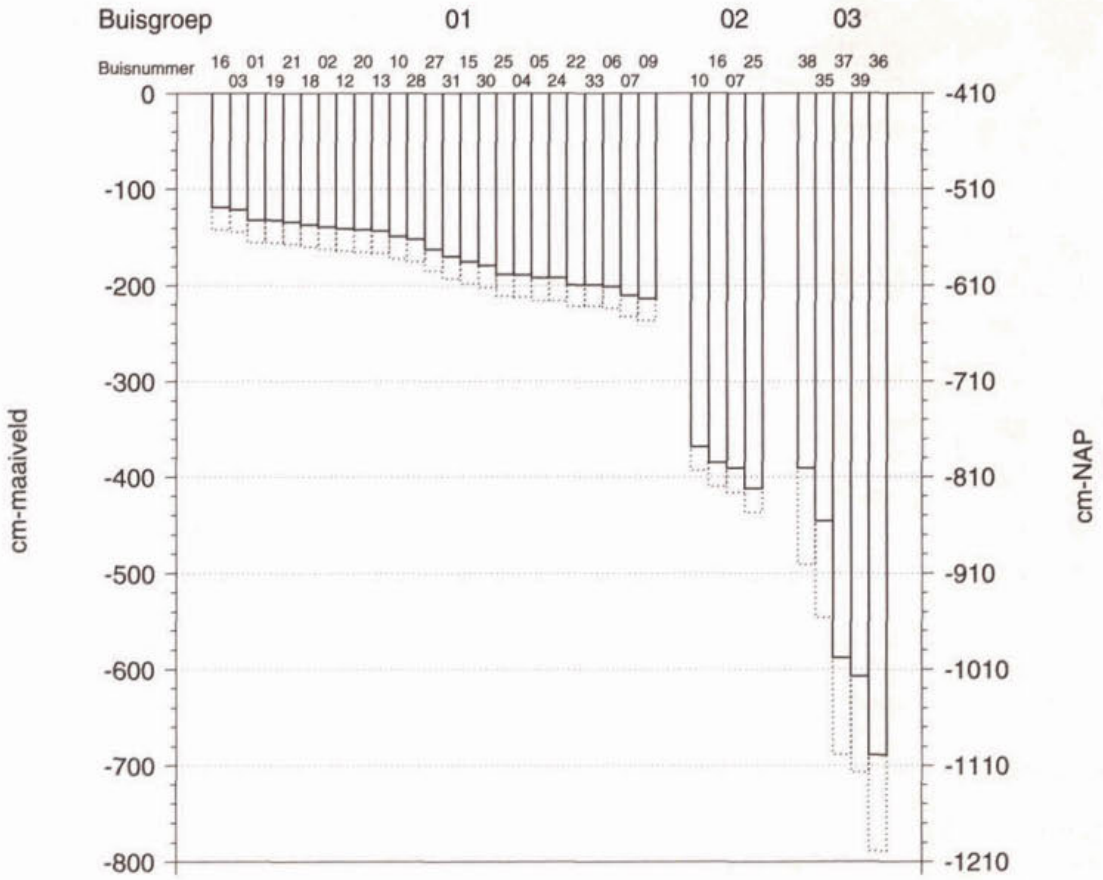
Ter controle van de automatische kantelbakregenmeter is op dezelfde lokatie ook een standaard KNMI handregenmeter geplaatst, eveneens op 2 m boven maaiveld. De opgevangen hoeveelheden neerslag worden met tussenperiodes van minimaal enkele dagen tot maximaal drie weken afgetapt.

Tijdens de periode van onderzoek zijn regelmatig controles uitgevoerd door het vergelijken van neerslaghoeveelheden volgens de kantelbakregenmeter en de handregenmeter met neerslaggegevens van het KNMI voor de stations Edam en Purmerend. Daarbij bleken met name de neerslaghoeveelheden volgens de kantelbakregenmeter soms sterk afwijkend te zijn.
Die afwijkingen betroffen niet zozeer de verdeling van de neerslag op uurbasis als wel de totalen voor de onderscheiden deelperioden. Daarom is ter controle in juni 1997 een tweede registrerende kantelbakregenmeter geplaatst, op dezelfde lokatie in het graslandgebied buiten het boscompex, midden boven een sloot en bij benadering op maaiveldshoogte. Deze regenmeter wordt verder aangeduid als de SC-DLO-regenmeter.

4.2.2 Peilbuizen

Bij de inrichting van het proefgebied zijn in totaal 39 peilbuizen geplaatst, als aangegeven in figuur 2.2. Elke buis is te karakteriseren op basis van de lokatie binnen het proefgebied, de afstand tot de dichtstbijzijnde sloot, de filterdiepte en de filterlengte. Om enige systematiek in het geheel te brengen zijn de buizen op basis van de filterdiepte ingedeeld in vier groepen, verder aangeduid als groep 01, 02, 03 en 04. Figuur 4.1 betreft de filterdiepten en lengten van de buizen die tot de eerste drie groepen zijn gerekend. Daarnaast is figuur 4.2 uitgewerkt om de filterdiepte van de vier groepen te relateren aan de geohydrologische situatie.

Bij het installeren van de buizen zijn de maaiveldshoogten ingemeten. Het gemiddelde daarvan is 412 cm-NAP (par. 2.2.1). Via figuur 4.1 is dan voor elke buis de filterdiepte ten opzichte van die gemiddelde maaiveldshoogte af te lezen. Zo is vast te stellen bij welke stijghoogte of grondwaterstand in de zomerperiode de buizen van groep 01 droog komen te staan. Buis 16A bijvoorbeeld, als buis met de minst diep geplaatste filter, zal droogvallen bij een stijghoogte van 555 cm-NAP, dat wil zeggen bij een grondwaterstand van 140 à 145 cm-mv (=555 - 412).

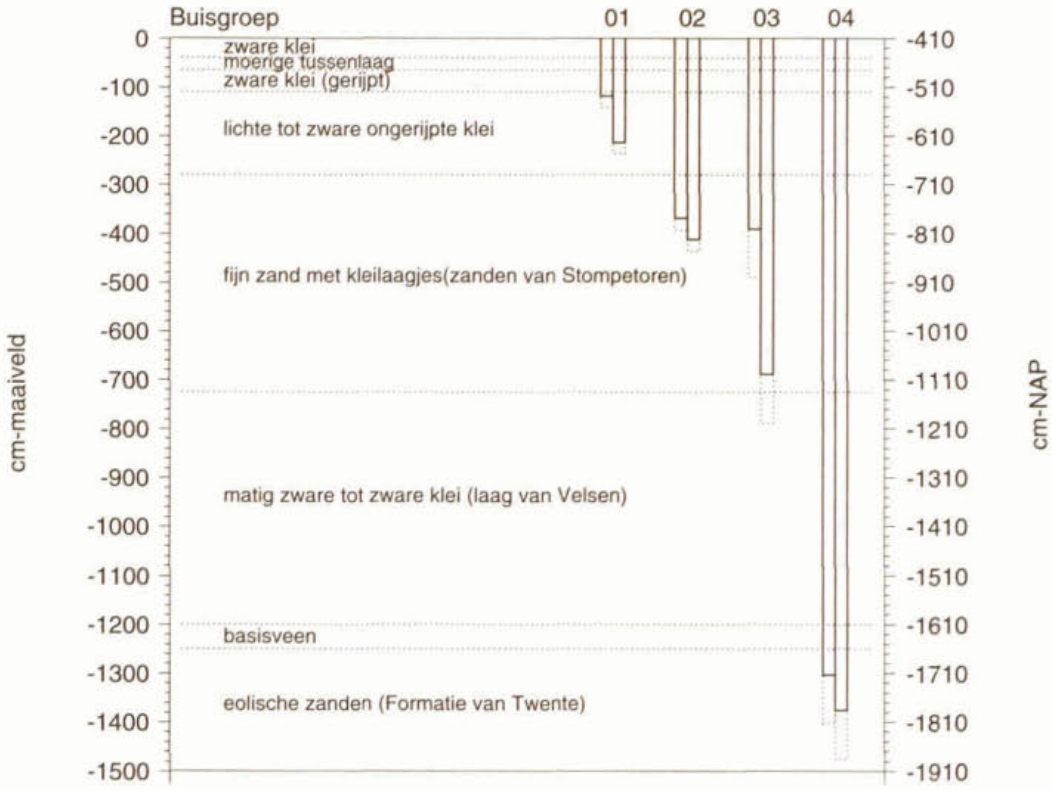


Figuur 4.1 Groepering van peilbuizen op basis van de filterdiepte in het afdekkend pakket (zie ook figuur 4.2)

Alle peilbuizen worden steeds op of omstreeks de 14e en 28e dag van de maand afgelezen. De waarnemingen voor de buizen van de groepen 01 en 02 lopen vanaf juni 1990. De buizen van de groepen 03 en 04 zijn later geplaatst en pas waargenomen vanaf september 1991.

4.2.3 Piketten

Om de effecten van het achterwege blijven van het onderhouden en het geleidelijk verlanden van de desbetreffende kavelsloten te evalueren zijn op acht vaste lokaties openwaterstanden waargenomen, eveneens steeds op of omstreeks de 14e en 28e dag van de maand. De piketten in figuur 2.2 geven die lokaties aan. Elke piket is geplaatst bij één van de duikers die in het kader van de inrichting van het proefgebied zijn gelegd. De hoogte van de bovenkant van de duikers ten opzichte van NAP is ingemeten zodat de waargenomen openwaterstanden ten opzichte van die bovenkant



Figuur 4.2 Stratificatie van het afdekkend pakket en het bovenste gedeelte van het eerste watervoerend pakket, met de positie van de hoogst en diepst geplaatste filters voor vier groepen van peilbuizen (zie ook figuur 4.1)

kunnen worden herleid tot openwaterstanden ten opzichte van NAP. Waar dus verder in dit rapport sprake is van openwaterstanden ter plaatse van de piketten betreft het steeds metingen ten opzichte van de bovenkant van de desbetreffende duiker als vast referentiepunt die zijn herleid tot openwaterstanden ten opzichte van NAP. Deze waarnemingen hebben plaatsgevonden vanaf juni 1990.

4.3 Geohydrologisch onderzoek

Met het oog op het kwantificeren van de kwel in het proefgebied is in de periode 1994/1996 een apart geohydrologisch onderzoek uitgevoerd. Het onderzoek omvatte het volgende:

- bemonstering van het afdekkend pakket in de periode november-december 1994 ter bepaling van de verticale verzadigde waterdoorlatenheid;
- plaatsen van extra peilbuizen en uitvoeren van een ('diepe') pompproef in het eerste watervoerend pakket, in juni 1995;
- uitvoeren van een tweede ('ondiepe') pompproef in de zandige laag die deel uitmaakt van het afdekkend pakket, in januari 1996.

De uitvoering van het veldwerk, het laboratoriumonderzoek alsmede de uitwerking en interpretatie van de gegevens zijn in detail beschreven door Van der Gaast en Peerboom (1996). Daarom wordt hier met de hoofdpunten volstaan.

Ter verduidelijking wordt verwezen naar figuur 4.2 die is gebaseerd op boringen die in het kader van het onderhavige onderzoek zijn uitgevoerd, aangevuld met gegevens uit het eerdere onderzoek van Bijlsma *et al.* (1992). Het afdekkend pakket (Westland Formatie) omvat het basisveen (laagdikte ca. 0,5 m) en alle lagen daarboven. De vijf lagen vanaf maaiveld tot een diepte van 725 cm tezamen worden aangeduid als *Beemster afzetting*, de vier lagen tot een

diepte van 280 cm als *Beemster klei*. Volgens de figuur ligt de grens tussen de ongerijpte kleilaag en de zanden van Stompetoren op 280 cm-maaiveld. Dat betreft het gemiddelde voor de 20 lokaties waar boringen hebben plaatsgevonden. In werkelijkheid loopt de diepte van die grens binnen het proefgebied uiteen van minimaal 250 tot maximaal 300 cm-maaiveld (op 19 van de 20 lokaties, daarnaast één afwijkende situatie met de grens op 400 cm-maaiveld).

4.3.1 Doorlatenheidsbepaling Beemster klei

In totaal zijn binnen het proefgebied op de 20 lokaties in totaal 63 ongestoorde monsters gestoken. Het gaat om monsters met een lengte van 30 cm en een doorsnede van 5,7 cm. De monsterdiepte (midden van het monster in verticale richting) liep uiteen van minimaal 60 cm-mv tot maximaal 325 cm-mv. Blijkens figuur 4.2 ging het dus om bemonstering van de gerijpte zware kleilaag direct onder de moerige tussenlaag en van de ongerijpte lichte tot zware kleilaag daaronder.

In het laboratorium is aan alle monsters de verzadigde doorlatenheid bepaald. Op basis van de dikte van het kleipakket zijn vervolgens C-waarden berekend. Voor details met betrekking tot de toegepaste laboratorium- en rekentechnieken wordt verwezen naar Van der Gaast en Peerboom (1996).

De resultaten zijn als volgt samen te vatten:

– gemiddelde verzadigde doorlatendheid:	0,30 cm/d;
– gemiddelde dikte van de kleilaag:	300 cm;
– gemiddelde C-waarde (afgerond):	1000 d.

4.3.2 Pompproef in het eerste watervoerend pakket

De pompput voor de diepe pompproef in het eerste watervoerend pakket ligt centraal in het boscomplex. Het pompfilter is geplaatst op een diepte van 17,5 tot 32,5 m-NAP en ligt dus geheel in het eerste watervoerend pakket, vanaf net onder het basisveen en reikend tot bijna de grens met het onderliggende kleipakket van de Eem Formatie. Voor het bepalen van het verloop van stijghoogten is gebruik gemaakt van de peilbuizen 35A/B t/m 39A/B (buisgroepen 03 en 04: zie figuren 4.1 en 4.2). De afstand van deze buizen tot de pompput loopt uiteen van minimaal 65 m (buis 36A/B) tot maximaal 570 m (buis 38A/B). Daarnaast is gebruik gemaakt van drie extra peilbuizen, geplaatst op 4, 10 en 25 m afstand van de pompput. De duur van deze pompproef was ca. twee dagen.

4.3.3 Pompproef binnen het afdekkend pakket

De aangetroffen fijnzandige laag binnen het afdekkend pakket (figuur 4.2: zanden van Stompetoren) was aanleiding tot het aanvullend uitvoeren van de ondiepe pompproef. Het filter voor deze pompproef was geplaatst op een diepte van 9,0 tot 14,0 m-NAP. Voor de bepalen van stijghoogten tijdens die pompproef is alléén gebruik gemaakt van de peilbuizen op 4, 10 en 25 m afstand. De duur van deze pompproef bleef beperkt tot ca. vijf uren.

4.3.4 Resultaten

Verschillende methoden zijn toegepast om de meetgegevens te analyseren, dat wil zeggen te vertalen in kD- en C-waarden voor de desbetreffende gedeelten van het geologische profiel. De analyse van de gegevens voor de diepe pompproef leidde tot:

- kD-waarde voor het zandpakket (Formatie van Twente) 625 m^2/d;
- C-waarde voor het onderste gedeelte van het afdekkend pakket (basisveen en matig zware tot zware kleilaag van Velsen) 1750 d.

De analyse van de gegevens voor de ondiepe pomproef leidde tot:

- kD-waarde voor de laag opgebouwd uit fijn zand met kleilaagjes (zanden van Stompetoren) 5 m^2/d;
- C-waarde waarde voor het bovenste gedeelte van het afdekkend pakket (lagen *boven* de zanden van Stompetoren) 1000 d.

Op basis van bovenstaande gegevens is bij het berekenen van de kwel in eerste instantie uitgegaan van een totale weerstand voor het afdekkend pakket van 2750 d. Eerder onderzoek met betrekking tot de geohydrologie van De Purmer is uitgevoerd door de Werkgroep Noord-Holland (1982). Voor De Purmer als geheel is daarbij op basis van veldonderzoek en waterbalansberekeningen een C-waarde van 2500 à 5000 d afgeleid. De C-waarde van 2750 d ligt dus in ieder geval binnen dat traject.

Het is belangrijk voor ogen te houden dat de verkregen C-waarde sterk afhankelijk is van de methode die bij het analyseren van de meetgegevens wordt gebruikt. Bij het toepassen van de zogenoemde Walton-methode bijvoorbeeld komt de C-waarde voor het onderste gedeelte van het afdekkend pakket uit op 600 d als wordt uitgegaan van het verloop van de stijghoogte in de peilbuis die is geplaatst op een afstand van 25 m vanaf de pompput. Wordt daarentegen uitgegaan van de gegevens voor de peilbuis op 250 m afstand, dan wordt een C-waarde van 8000 d berekend.

5 Bewerking van de neerslag-, afvoer- en inlaatgegevens

De automatische registratie van gegevens als besproken in par. 4.1 heeft betrekking op de volgende grootheden:
- de neerslag;
- de afvoer van water via bemaling;
- de toevoer via het inlaten van water;
- de grondwaterstand;
- de openwaterstand.

In dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan het controleren van de gegevens en het doorvoeren van correcties. Die aandacht blijft beperkt tot de hoofdzaken. Voor details wordt verwezen naar Beets (1999).

5.1 Controle en voorbewerkingen

De gegevens zijn in eerste instantie vastgelegd in bestanden per maand en vervolgens gekoppeld tot bestanden op jaarbasis. Dit resulteerde voor de periode 1990 t/m 2000 dus in elf bestanden. Als tweede stap zijn deze basisbestanden gecontroleerd en opgeschoond. De controle betrof het nagaan of de tijdsregistraties steeds monotoon toenemend verlopen. Noodzakelijke correcties ten aanzien van dit aspect zijn met de hand doorgevoerd. Het betrof het elimineren van alle registraties die niet op de hele uren vallen: het gaat daarbij dus om het weglaten van alle registraties die met een toestandsverandering van het gemaal of de inlaatklep te maken hebben. Tevens zijn de cumulatieve neerslag, afvoer en inlaat herleid tot hoeveelheden op uurbasis. Als eindresultaat van deze eerste fase zijn elf bestanden met gegevens op uurbasis verkregen. Deze basisbestanden omvatten in principe 8760 regels (365 x 24), afgezien van die voor 1990 (dataregistratie begonnen in de maand mei) en die voor de schrikkeljaren (1992 , 1996 en 2000).

5.2 Aanvullingen en correcties

In de basisbestanden bleken voor bepaalde periodes gegevens te ontbreken of evident onjuist te zijn. Dat betrof met name de neerslagregistraties volgens de SBB-meter. Op basis van het vergelijken met gegevens van de handregenmeter en van de KNMI-stations Edam en Purmerend zijn correctiefactoren voor de gegevens volgens de SBB-meter afgeleid. Correctiefactoren voor de electromagnetische debietmeters zijn bepaald aan de hand van periodiek uitgevoerde ijkingen.

Voor elk jaar is een apart correctiebestand uitgewerkt waarin ontbrekende gegevens en door te voeren correctiefactoren zijn opgenomen. Deze correctiebestanden zijn eveneens uitgewerkt op uurbasis: elke regel in het basisbestand voor een gegeven jaar heeft dus een corresponderende regel in het bijbehorende correctiebestand. In de volgende paragrafen wordt een en ander nader uitgewerkt.

5.2.1 Neerslag

Bij het bewerken van de neerslaggegevens zijn de volgende drie perioden onderscheiden:
- periode vanaf medio 1990 (aanvang onderzoek) tot 20 juni 1997;
- periode vanaf 21 juni 1997 t/m 31 december 1998;
- periode van geheel 1999 en 2000.

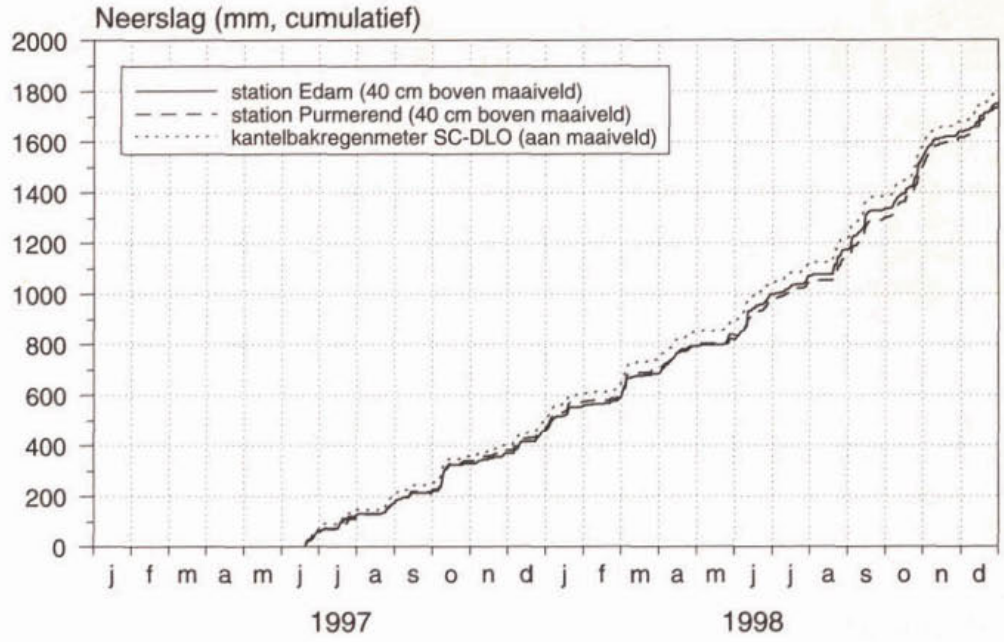
Voor elk van de drie perioden zijn gegevens beschikbaar voor de kantelbakregenmeter en de handregenmeter van SBB. Voor de tweede periode zijn daarnáást gegevens beschikbaar voor de kantelbakregenmeter van SC-DLO.

Bij het analyseren van de gegevens van de SBB-meters bleken periodiek hiaten in de meetreeksen voor te komen. Verder bleek de verhouding tussen de neerslag volgens enerzijds de kantelbakmeter en anderzijds de handmeter van periode tot periode sterk uiteen te lopen. Al met al deed dat twijfel rijzen aan de betrouwbaarheid van de neerslag volgens de kantelbakmeter. Daarom is voor een andere benadering gekozen om te komen tot een volledige tijdreeks voor zover het de neerslag op dagbasis betreft. Daarbij is uitgegaan van de volgende gegevens:
de neerslag volgens de kantelbakregenmeter van SC-DLO voor de periode vanaf 21 juni 1997 t/m 31 december 1998;
de neerslag op dagbasis van de KNMI-stations Edam en Purmerend voor de gehele periode vanaf medio 1990 t/m 2000.

Als eerste stap zijn uit de uurgegevens van de SC-DLO-meter de dagtotalen berekend. Figuur 5.1 geeft het verloop van de cumulatieve neerslag voor de SC-DLO-meter en voor de beide KNMI-stations. De totalen voor de periode van anderhalf jaar zijn:
- KNMI-station Edam: 1749 mm;
- KNMI-station Purmerend: 1734 mm;
- SC-DLO-meter: 1790 mm.

Het verschil tussen de beide KNMI-stations is minimaal. Het quotiënt van de gemiddelde neerslagsom voor Edam en Purmerend en de neerslagsom voor de SC-DLO-meter is 1,027 (=1790/1741,5). De factor 1,027 kan te maken hebben met een verschil in plaatsingshoogte: 40 cm boven maaiveld voor de KNMI-meters tegenover op maaiveldshoogte voor de SC-DLO-meter.

Als tweede stap zijn alle gemiddelde dagneerslaghoeveelheden voor de KNMI-stations Edam en Purmerend voor de periode vanaf medio 1990 t/m 20 juni 1997 en voor de periode vanaf 1 januari 1999 met 1,027 vermenigvuldigd om te komen tot de gewenste complete reeks voor het proefgebied voor de gehele periode van onderzoek. De zo verkregen neerslagreeks is gebruikt in de waterbalans-berekeningen van hoofdstuk7. De gegevens van de SBB-kantelbakregenmeter zijn verder alléén gebruikt bij het analyseren van de kortdurende perioden met verhoogde openwaterstanden in hoofdstuk 8.



Figuur 5.1 Cumulatieve neerslag voor de KNMI-stations Edam en Purmerend en voor de SC-DLO regenmeter nabij het Purmerbos proefgebied

5.2.2 Afvoer via bemaling

Gedurende de gehele periode van onderzoek heeft de electromagnetische afvoerdebietmeting en de desbetreffende registratie van gegevens (m^3 water en tijdsduur in uren, beide cumulatief) vrijwel zonder onderbreking plaatsgevonden. Wèl hebben zich gedurende de zomermaanden regelmatig situaties voorgedaan waarbij het gemaal als gevolg van ophoping van plantenresten voor het krooshek continu aan- en afsloeg, met steeds minimale hoeveelheden uitgeslagen water. Dit wordt geïllustreerd door figuur 5.2: deelfiguur 5.2a toont een normaal verloop van de openwaterstand bij het gemaal tijdens een afvoerperiode, deelfiguur 5.2b het verloop bij sterk beperkte toestroming van water naar het gemaal. Er is aangenomen dat de geregistreerde hoeveelheden water ook onder die omstandigheden correct waren.

De debietmeter is gedurende de periode 1990-2000 enkele malen gecontroleerd met behulp van een geijkte ultrasone debietmeter. Op basis daarvan zijn de volgende correctiefactoren toegepast op de geregistreerede afvoeren:

- periode t/m juni 1992: 1,036;
- periode juli 1992 t/m december 1998: 0,994;
- periode januari 1999 t/m december 2000: 1,000.

De geregistreerde waterhoeveelheden op uurbasis zijn voor de desbetreffende perioden met deze factoren vermenigvuldigd.

5.2.3 Toevoer via inlaat

Gelijktijdig met de afvoermeter is óók de debietmeter voor de waterinlaat naar het proefgebied gecontroleerd. De volgende correctiefactoren zijn van toepassing op de geregistreerde toevoeren:

- periode t/m juni 1992: 1,072;
- periode juli 1992 t/m december 1998: 1,037;
- periode januari 1999 t/m december 2000: 1,000.

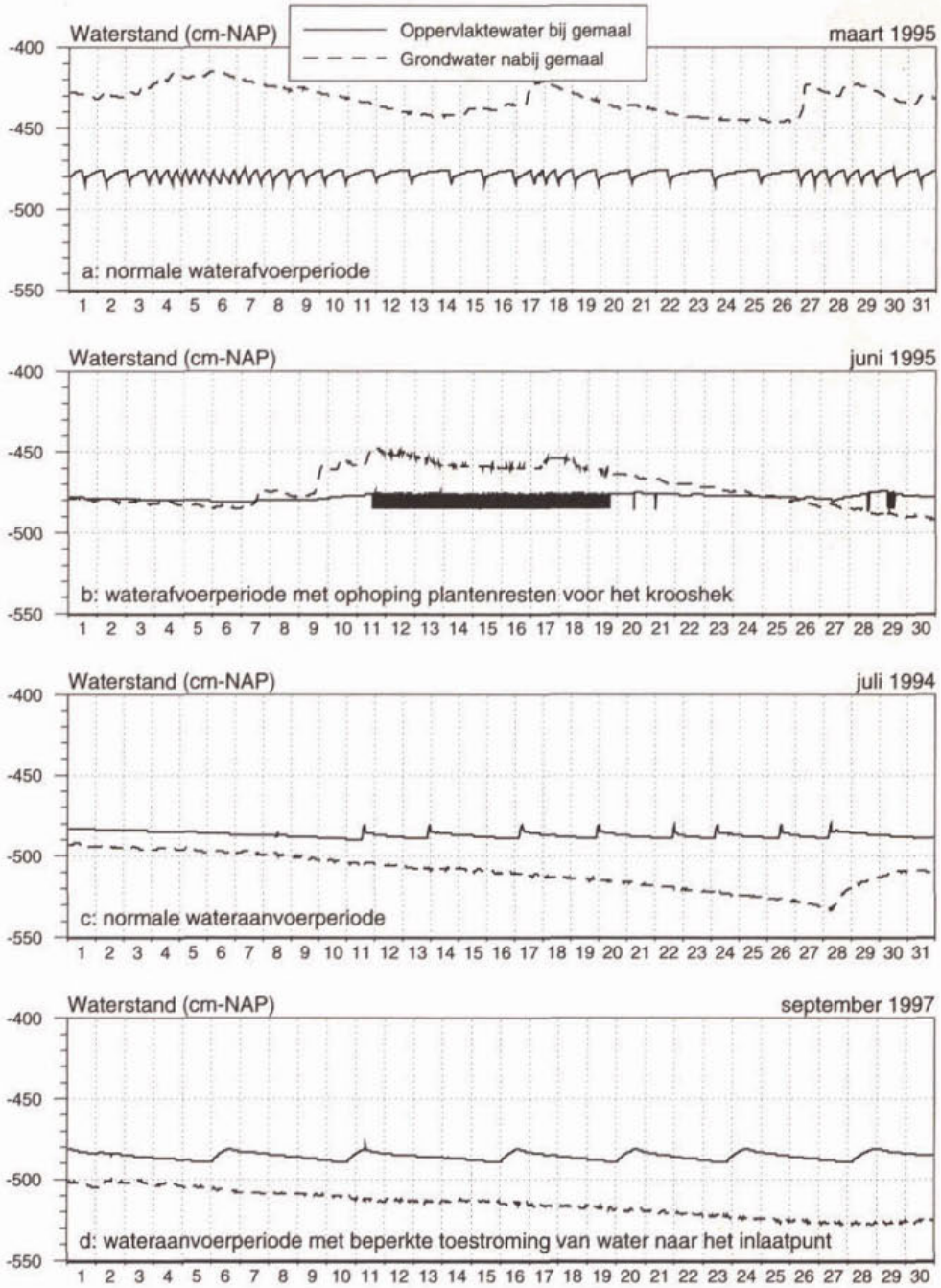
De geregistreerde waterhoeveelheden op uurbasis zijn voor de desbetreffende perioden met deze factoren vermenigvuldigd.

Als aanvullende controle zijn de registraties met betrekking tot het inlaten van water (in termen van m^3 en in uren) vergeleken met de registraties van het verloop van de openwaterstand bij het gemaal. In perioden met een verdampingsoverschot daalt de openwaterstand tot het niveau is bereikt waarbij de inlaatklep wordt geopend (490 cm-NAP). Het inlaten van water leidt vervolgens tot een stijging van de openwaterstand tot het niveau waarbij de klep weer wordt gesloten (480 cm-NAP). Met andere woorden: het openen van de toevoerklep moet steeds samen vallen met een beginnende stijging van de openwaterstand en het sluiten van klep met het afvlakken daarvan.

Bij het uitvoeren van de controle als zojuist beschreven bleken er in de zomermaanden vanaf 1997 periodes voor te komen waarin het verloop van de openwaterstand duidelijk aangaf dat inlaat van water plaatsvond, echter zonder ook in de registraties in termen van m^3 water tot uiting te komen. Deze discrepantie bleek samen te hangen met de beperkte toestroming van water naar het inlaatpunt als gevolg van de groei van planten in de korte toevoersloot vanaf de Westerweg naar het inlaatpunt bij het gemaal (figuur 2.2): het instroomdebiet bij het openen van de inlaatklep blijft daardoor beneden het minimum debiet dat noodzakelijk is om de electro-magnetische debietmeter correct te doen functioneren. Figuur 5.2c illustreert het verloop van de openwaterstand bij het inlaatpunt onder normale omstandigheden, figuur 5.2d bij beperkte toestroming van water.

Het gesignaleerde probleem is ondervangen door op basis van het geregistreerde verloop van de openwaterstand te corrigeren, dat wil zeggen aanvullend waterinlaatgegevens te introduceren. Hierbij is uitgegaan van het gegeven dat de inlaat van water in een normale* periode, tussen het moment van openen en sluiten van de inlaatklep, uitkomt op gemiddeld 750 m^3 water (openen van de klep gedurende 10 uur, met een inlaatdebiet van ca. 75 m^3 per uur). Op basis daarvan zijn aanvullend gegevens met betrekking tot ingelaten hoeveelheden water voor 1997 en 1998 ingevoerd. In april 1999 tenslotte is het minimaal noodzakelijke debiet voor een correcte werking van de electromagnetische debietmeter verlaagd van 80 naar 10 m^3 per uur waarmee het probleem van ontbrekende registratie van lage inlaatdebieten definitief is verholpen.

* onder een 'normale' periode wordt hier een periode verstaan waarin de toestroming van water naar en via het inlaatpunt onbelemmerd kan plaatsvinden



Figuur 5.2 Illustratie van het verloop van de openwaterstand bij het gemaal in afvoersituaties onder normale omstandigheden (a) en bij ophoping van plantenresten voor het krooshek (b), en in wateraanvoersituaties onder normale omstandigheden (c) en bij beperkte toestroming naar het inlaatpunt (d)

5.2.4 Waterstanden

De drukopnemers waarmee de openwaterstand ter plaatse van het gemaal resp. de grondwaterstand nabij het gemaal worden gemeten zijn met regelmatige tussenpozen gecontroleerd en zo nodig bijgesteld. De geconstateerde afwijkingen waren zodanig klein dat het doorvoeren van correcties achterwege is gelaten.

Er zijn vier perioden van langere duur geweest waarin de registratie van de grondwaterstand geheel is weggevallen:
- de periode vanaf eind januari tot medio augustus 1996;
- een periode van twee weken in juni 1997;
- de periode vanaf medio juli tot eind september 1998;
- de periode vanaf eind februari tot eind maart 1999.

De storingen hadden te maken met een defecte drukopnemer (eerste drie perioden) of kabelbreuk (laatste periode). De metingen en registraties van de openwaterstand bij het gemaal hebben zonder onderbrekingen plaatsgevonden.

6 Resultaten: neerslag, afvoer, inlaat, kwel en bosverdamping

Dit hoofdstuk betreft het uitwerken van de meetgegevens met betrekking tot de neerslag, de waterinlaat, de kwel en de afvoer tot hoeveelheden water per dag en per kalenderjaar. Daarnaast wordt aandacht besteed aan de bosverdamping. Omdat in het kader van dit onderzoek geen metingen zijn gedaan met betrekking tot de verdamping, is daartoe uitgegaan van resultaten van onderzoek dat elders is uitgevoerd.

Met het oog op de later uit te voeren waterbalansberekeningen wordt ook ingegaan op de betrouwbaarheid van de verkregen gegevens.

6.1 Neerslag, afvoer en inlaat

6.1.1 Neerslag bij het Purmerbos proefgebied

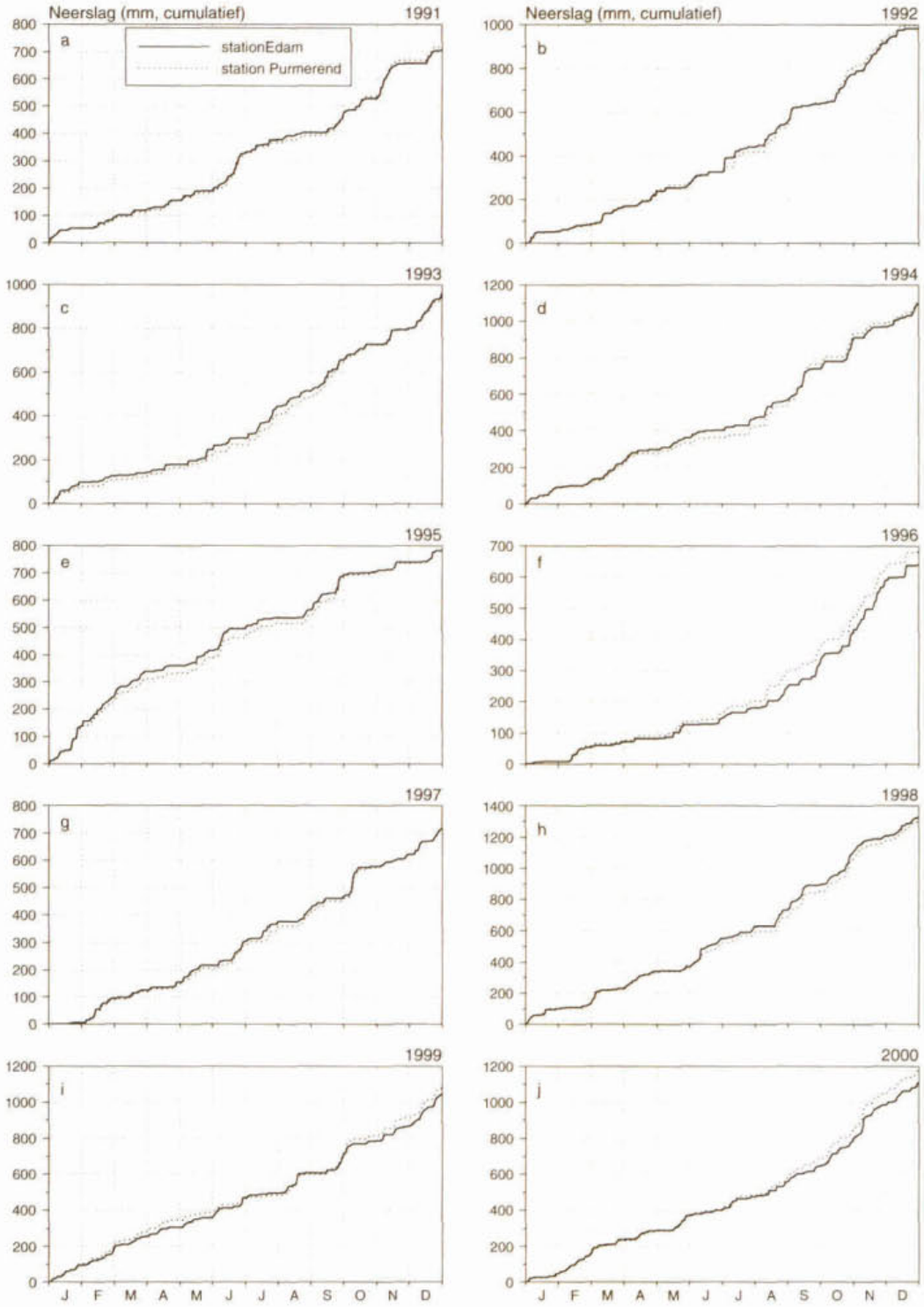
Neerslaggegevens op uurbasis zijn verkregen met kantelbakregenmeters. Vanwege hiaten in de meetreeksen, storingen en het gebruik van verschillende regenmeters was het noodzakelijk de geregistreerde gegevens op te schonen en aan te vullen om te komen tot een continue reeks van uurgegevens voor de gehele periode 1991 t/m 2000.

In par. 5.2.1 zijn de controles en correcties met betrekking tot de uurwaarnemingen besproken. Alle door te voeren correcties en aanvullingen zijn opgenomen in een apart bestand voor elk van de afzonderlijke jaren. De correcties zijn doorgevoerd door de basisbestanden en de bestanden met correctiegegevens met elkaar te combineren: dat komt neer op het bij elkaar optellen of het met elkaar vermenigvuldigen van kolommen uit de beide bestanden. Als resultaat is voor elk jaar een bestand verkregen met gecorrigeerde neerslaggegevens op uurbasis. Door optellen zijn daaruit tevens neerslagreeksen op dagbasis verkregen.

De zo verkregen neerslaggegevens op basis van metingen bij het proefgebied zijn verder alléén gebruikt bij het analyseren van specifieke neerslaggebeurtenissen in hoofdstuk 8 en voor het uitwerken van de reeks figuren met betrekking tot het verloop van de neerslag, waterinlaat en afvoer van aanhangsel 1.

6.1.2 Neerslag voor de KNMI-stations Edam en Purmerend

In par. 5.2.1 is aangegeven dat bij de waterbalansberekeningen wordt uitgegaan van de neerslaggegevens voor de KNMI-stations Edam en Purmerend, vermenigvuldigd met 1,027 om te corrigeren voor de positie van de regenmeters op 40 cm boven maaiveld.



Figuur 6.1 Cumulatieve neerslag voor de KNMI-stations Edam en Purmerend

Tabel 6.1 Neerslag voor de KNMI-stations Edam en Purmerend, waterinlaat, kwel en waterafvoer voor het Purmerbos proefgebied voor de kalenderjaren 1991 t/m 2000

Jaar	Neerslag			Waterinlaat	Kwel	Waterafvoer
	Edam	Purmerend	Gemiddeld			
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1991	688	701	695	11	148	241
1992	957	971	964	16	158	380
1993	935	923	929	2	147	370
1994	1070	1078	1074	9	155	482
1995	762	762	762	32	189	262
1996	622	665	643	28	199	212
1997	697	693	695	23	201	174
1998	1288	1263	1275	6	178	577
1999	1018	1049	1033	26	195	404
2000	1078	1154	1116	20	196	478
Totaal	9115	9260	9187	172	1764	3579
Gemiddeld	911	926	919	17	176	358

In figuur 6.1 is het cumulatieve verloop van de neerslag voor beide stations voor de afzonderlijke jaren weergegeven. De jaartotalen zijn opgenomen in tabel 6.1.

Uit figuur 6.1 en tabel 6.1 blijkt dat het verschil in de neerslagsom tussen de beide KNMI-stations uiteenloopt van minder dan 0,5% in 1995 en 1997 tot maximaal 7% in 1996 en 2000. In sommige jaren geeft het ene en in andere jaren het andere station de hoogste neerslag. Het relatief grote verschil voor 1996 is voor een groot deel toe te schrijven aan de neerslag in augustus: in de periode van de 10^{e} t/m de 14^{e} van die maand valt er in Edam 19 mm en in Purmerend 43 mm neerslag. In het jaar 2000 lijkt er een meer systematische afwijking tussen beide stations te zijn over een periode van langere duur: het verschil in de neerslagsom neemt dan geleidelijk toe over de periode augustus t/m november.

Op basis van deze gegevens is geconcludeerd dat het gemiddelde van de neerslag voor de beide KNMI-stations een redelijk betrouwbare basis is voor het uitvoeren van waterbalansberekeningen voor het Purmerbos proefgebied, gelegen tussen Edam en Purmerend. Voor de jaarbalansen zal de werkelijke neerslag hooguit enkele procenten en meestal minder dan dat afwijken van de gemiddelde neerslag volgens tabel 6.1.

Eenzelfde vergelijking is gemaakt voor de neerslag over de winterperioden en de zomerperioden, dat wil zeggen de perioden oktober t/m maart resp. april t/m september. Voor de winterperioden lopen de verschillen weer uiteen van minder dan 0,5% tot maximaal 7%. Voor de zomerperioden daarentegen lopen de verschillen nu uiteen van minder dan 0,5% tot maximaal 10%. Bij het uitvoeren van balansberekeningen voor kortere balansperioden, bijvoorbeeld voor zomer en winterperioden, moet dus rekening worden gehouden met wat grotere afwijkingen.

6.1.3 Waterinlaat en afvoer

De noodzakelijke aanvullingen en correcties met betrekking tot de inlaat resp. afvoer van water zijn eveneens opgenomen in de in par. 6.1.1 genoemde correctiebestanden en doorgevoerd als dáár aangegeven. Als resultaat wordt voor elk jaar een complete reeks met waterinlaat- en afvoergegevens op uurbasis verkregen, uitgedrukt in m^3 per uur. Met het oog op het berekenen van waterbalansen zijn de gegevens op uurbasis gecumuleerd tot dagtotalen, uitgedrukt in mm/d. Voor het omrekenen van m^3 naar mm is uitgegaan van een oppervlakte van het proefgebied van 66 ha.

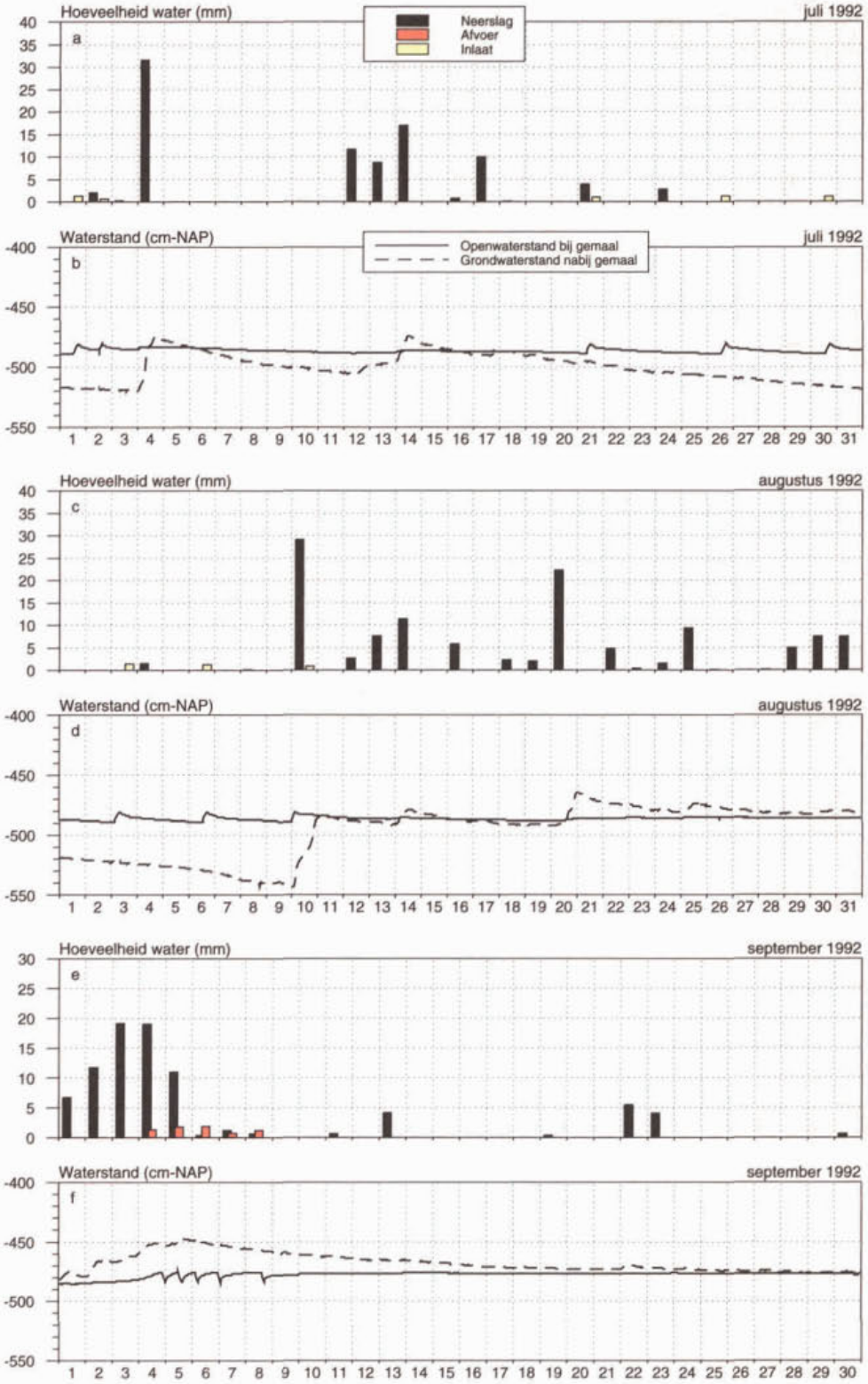
Wat de betrouwbaarheid van de inlaat- en afvoergegevens betreft valt op te merken dat de electromagnetische debietmeter vrijwel zonder haperingen heeft gefunctioneerd. De meetgegevens zijn gecorrigeerd op basis van ijkingen die om de paar jaar zijn uitgevoerd en aanleiding gaven tot correcties in de orde van hooguit enkele procenten. Voor de waterinlaat geldt dat het om zulke kleine waterhoeveelheden gaat dat zelfs een aanzienlijke fout in de meting nauwelijks gevolgen gevolgen heeft voor de waterbalansberekeningen.

Voor de waterafvoer is een aanvullende controleberekening uitgevoerd. Aan de hand van de geregistreerde draaitijden van het gemaal en de geregistreerde afvoer is voor elk van de jaren 1991 t/m 2000 de gewogen gemiddelde gemaalcapaciteit berekend. Het resultaat van die berekening is opgenomen in tabel 6.2. De gemiddelde gemaalcapaciteit voor de gehele periode van onderzoek is 12,7 mm/d en loopt voor de afzonderlijke jaren uiteen van minimaal 12,3 mm/d in 1994 tot maximaal 13,2 mm/d in 1999. Een gemaalcapaciteit van 12 à 13 mm/d is normaal voor poldergebieden in Noord-Holland. Een eenduidige verklaring van de verschillen van jaar tot jaar is er niet en is ook niet echt belangrijk. Met andere woorden: de capaciteitsberekening leidt tot een logisch resultaat en geeft geen aanleiding alsnog te twijfelen aan de betrouwbaarheid van de debietmetingen en dus aan de daaruit afgeleide waterafvoer voor het proefgebied.

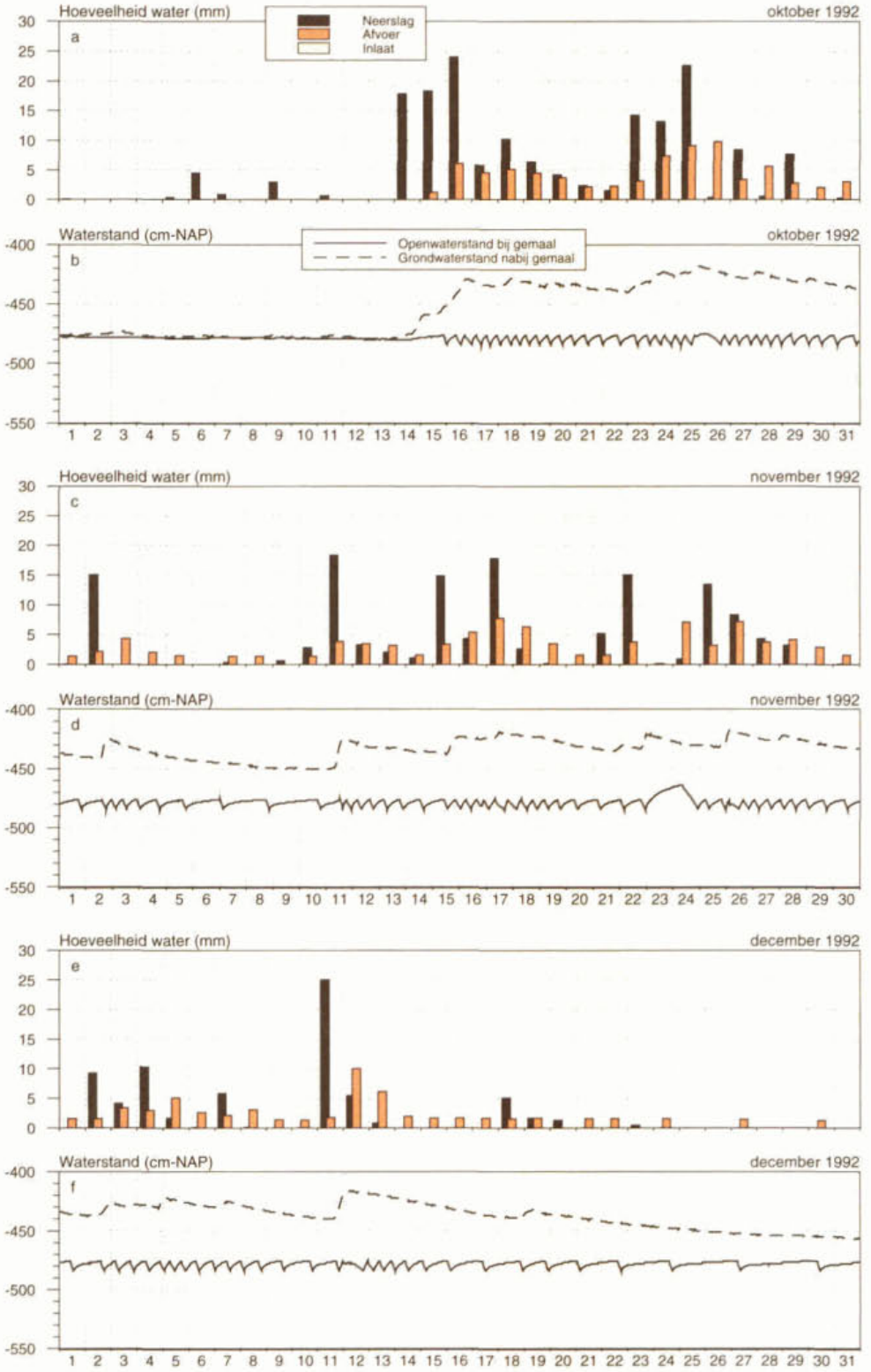
Voor wat betreft de waterinlaat en afvoer is naast de betrouwbaarheid van de eigenlijke metingen en de daaruit afgeleide waterhoeveelheden nog een ander aspect belangrijk. Dat betreft het optreden van randeffecten rondom het proefgebied als gevolg van een verschil in peilbeheer binnen het proefgebied en daarbuiten. Daardoor kan naast de inlaat en afvoer van water via het gemaal ook ongecontroleerde zijdelingse toevoer of afvoer van water hebben plaatsgevonden. In hoofdstuk 7 wordt hierop teruggekomen.

6.1.4 Neerslag, waterinlaat en afvoer: presentatie van resultaten

De resultaten zijn verwerkt in de vorm van histogrammen en gecombineerd met het verloop van de openwaterstand en de grondwaterstand tot een reeks van figuren voor opeenvolgende perioden van drie maanden. Als voorbeeld zijn de figuren 6.2 en 6.3 in de tekst opgenomen. Voor een juiste interpretatie van het verloop van de waterstanden wordt in herinnering gebracht dat de gemiddelde maaiveldshoogte ligt op een niveau van 412 cm-NAP.



Figuur 6.2 Neerslag, afvoer via bemaling en waterinlaat (a, c, e) en het verloop van de openwaterstand bij en de grondwaterstand nabij het gemaal (b, d, f), in de periode juli t/m september 1992 (periode met verdampingsoverschot en inlaat van water)



Figuur 6.3 Neerslag, afvoer via bemaling en waterinlaat (a, c, e) en het verloop van de openwaterstand bij en de grondwaterstand nabij het gemaal (b, d, f), in de periode oktober t/m november 1992 (periode met neerslagoverschot en afvoer, geen inlaat van water)

Tabel 6.2 Berekening van de gewogen gemiddelde gemaalcapaciteit voor de jaren 1991 t/m 2000, uit de geregistreerde draaitijd van het gemaal (in uren) en de met de electromagnetische debietmeter bepaalde afvoer (in m^3), op basis van een oppervlakte van het proefgebied van 66 ha

Jaar	Werking gemaal (uur)	Werking gemaal (d)	Afvoer (m^3 per jaar)	Afvoer (mm per jaar)	Gemaal-capaciteit (mm/d)	Correctie-factor (-----)	Gemaal-capaciteit (mm/d)
1991	448	18,67	153441	232	12,5	1,0357	12,9
1992	729	30,38	248399	376	12,4	1,0357	12,8
1993	730	30,42	245334	372	12,2	1,0148	12,4
1994	940	39,17	320145	485	12,4	0,9940	12,3
1995	490	20,42	173886	263	12,9	0,9940	12,8
1996	405	16,88	140709	213	12,6	0,9940	12,6
1997	328	13,67	115639	175	12,8	0,9940	12,7
1998	1080	45,00	383050	580	12,9	0,9940	12,8
1999	728	30,00	266920	404	13,3	0,9940	13,2
2000	886	36,92	322226	488	13,2	0,9940	13,1
Gewogen gemiddelde voor periode 1991 t/m 1999:					12,7		12,7

Figuur 6.2 betreft de periode juli t/m september 1992:
- in juli is er een (beperkt) verdampingsoverschot, géén waterafvoer via bemaling, wèl waterinlaat voor peilhandhaving (vijf keer openen van de inlaatklep, op 1, 2, 21, 26 en 30 juli);
- in augustus is er aanvankelijk een verdampingsoverschot en waterinlaat (op 3, 6 en 10 augustus), gevolgd door een periode met meer regen en stijging van de grondwaterstand tot een niveau dat dicht bij dat van de openwaterstand (streefpeil) komt te liggen;
- de neerslag van begin september leidt tot een verdere stijging van de grondwaterstand en tot afvoer van overtollig water via drainage waardoor het gemaal in werking komt (vijf keer in de periode van 4 t/m 8 september).

Figuur 6.3 betreft de periode oktober t/m december 1992:
- vanaf medio oktober komen de najaarsregens en daarmee de ontwatering en afwatering via bemaling goed op gang;
- de grondwaterstand ligt vanaf medio oktober steeds duidelijk boven de openwaterstand (streefpeil);
- op 23 en 24 november stijgt de openwaterstand tot boven het aanslagpeil maar het gemaal komt aanvankelijk niet in bedrijf: dat is een gevolg van beperkte toestroming van water naar het gemaal door ophoping van plantenresten voor het krooshek (een vaker voorkomend probleem, zie ook hoofdstuk 8).

De volledige reeks van figuren voor de periode 1990-2000, chronologisch gerangschikt per periode van drie maanden, is opgenomen als aanhangsel 1.

6.2 Kwel

De kwel K in mm/d wordt berekend via de relatie

$$K = 10 \cdot (H_{aquifer} - H_{freatisch})/C = \Delta H/C \qquad (6.1)$$

met
- $H_{aquifer}$ en $H_{freatisch}$ de stijghoogten in het eerste watervoerend pakket resp. van het freatisch (grond)water (cm-NAP);
- C de weerstand van het afdekkend pakket (d).

De grootheden $H_{aquifer}$ en $H_{freatisch}$ zijn berekend uit de waargenomen stijghoogten voor de buizen van groep 04 resp. groep 01 (figuren 4.1 en 4.2). Daartoe zijn de stijghoogten voor de zes buizen van groep 04 resp. de 25 buizen van groep 01 per waarnemingsdatum, dat wil zeggen voor de 14^e en 28^e van elke maand, gemiddeld. De stijghoogten voor alle tussenliggende dagen zijn berekend via lineaire interpolatie. Figuur 6.4a toont het verloop van de stijghoogten en van het stijghoogteverschil ΔH (voor de periode tot september 1991 ontbreken waarnemingen voor de stijghoogte voor het eerste watervoerend pakket: voor die periode is gerekend met een constant veronderstelde stijghoogte die is gebaseerd op de gegevens voor de periode daarná).

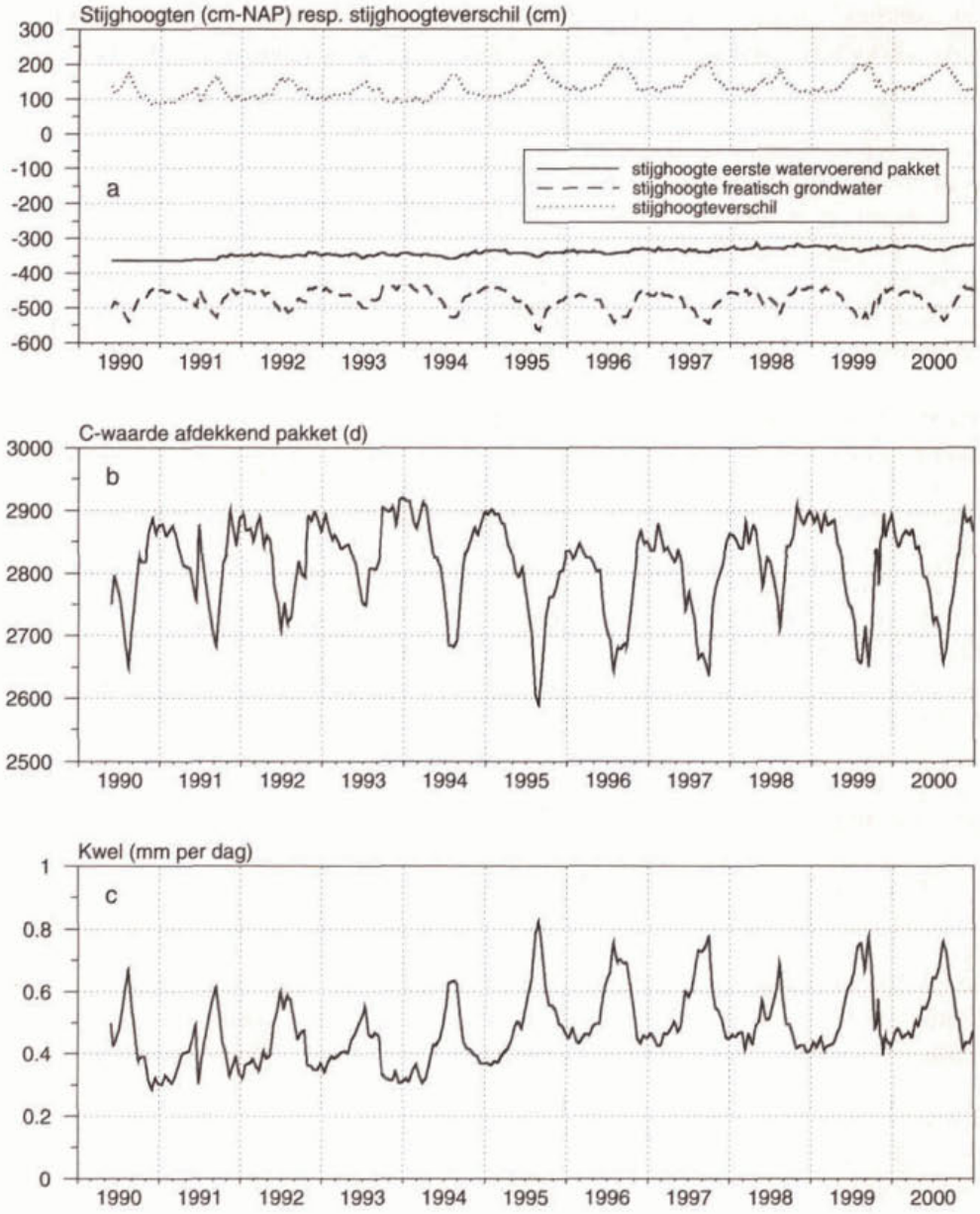
De C-waarde is berekend volgens de relatie

$$C = \{(Z_{aquifer} - H_{freatisch})/(Z_{aquifer} - Z_{maaiveld})\} \cdot C_{max} \qquad (6.2)$$

waarin
- $Z_{aquifer}$ = het niveau van de grens tussen het eerste watervoerend pakket en het afdekkend pakket (cm-NAP);
- $Z_{maaiveld}$ = het maaiveldniveau (cm-NAP);
- C_{max} = de maximale weerstand van het afdekkend pakket, in de situatie van verzadiging tot aan maaiveld.

Er is gerekend met de volgende parameterwaarden:
- $Z_{aquifer}$ = -1600 cm (figuur 4.2);
- $Z_{maaiveld}$ = -400 cm;
- C_{max} = 3000 d (zie par. 4.3).

Het verloop van de C-waarde is verwerkt in figuur 6.4b en weerspiegelt de veranderingen in de stijghoogte van met name het freatisch grondwater en daarmee van de dikte van dát deel van het afdekkend pakket dat weerstand biedt aan de verticaal gerichte kwelstroom. Het verloop van de kwel tenslotte als berekend met relatie (6.1) is weergegeven in figuur 6.4c.



Figuur 6.4 Verloop van de stijghoogten en het stijghoogteverschil (a), van de weerstand (C-waarde) van het afdekkend pakket (b) en van de kwel (c)

De resultaten van de berekeningen zijn als volgt samen te vatten:

- de kwel ligt op een niveau van gemiddeld 0,475 mm/d (173 mm/j) en is daarmee een significante post in de waterbalans van het proefgebied;
- $H_{aquifer}$ is niet of nauwelijks afhankelijk van de tijd van het jaar;
- $H_{freatisch}$ is wèl duidelijk tijdsafhankelijk als gevolg van het systematisch voorkomen van een verdampingsoverschot in het zomerhalfjaar en een neerslagoverschot in het winterhalfjaar;
- het verloop van de kwel wordt vooral bepaald door het verloop van $H_{freatisch}$, de invloed van de seizoensvariatie in de dikte van het weerstandsbiedende pakket is van ondergeschikte betekenis;
- de relatief kleine maar systematische toename van $H_{aquifer}$ over de gehele periode van onderzoek moet worden toegeschreven aan het dichten van gasbronnen in de droogmakerijen van Noord-Holland (Van der Gaast en Peerboom, 1996).

Wat de betrouwbaarheid van de berekende kwel betreft valt het volgende op te merken. De kwel is gebaseerd op gegevens die zijn verkregen uit een pompproef die speciaal is uitgevoerd om het proefgebied (geo)hydrologisch te karakteriseren. Bij het uitwerken van de gegevens bleek het resultaat in termen van de C-waarde van het afdekkend pakket sterk afhankelijk te zijn van de grootte van het gebied rondom de bron dat in de analyse werd betrokken en van de methode die wordt toegepast om de gegevens te interpreteren. Wat het eerstgenoemde aspect betreft neemt de C-waarde toe naarmate de analyse op een verder van de bron gelegen waarnemingsfilter is gebaseerd. Bij het toepassen van de zogenoemde Walton-methode bijvoorbeeld wordt een C-waarde van slechts 600 d afgeleid als wordt uitgegaan van de stijghoogtewaarnemingen voor de peilbuis op 25 m afstand van de bron. Als daarentegen wordt uitgegaan van de waarnemingen voor de peilbuis op 250 m afstand volgt een C-waarde van 8000 d.

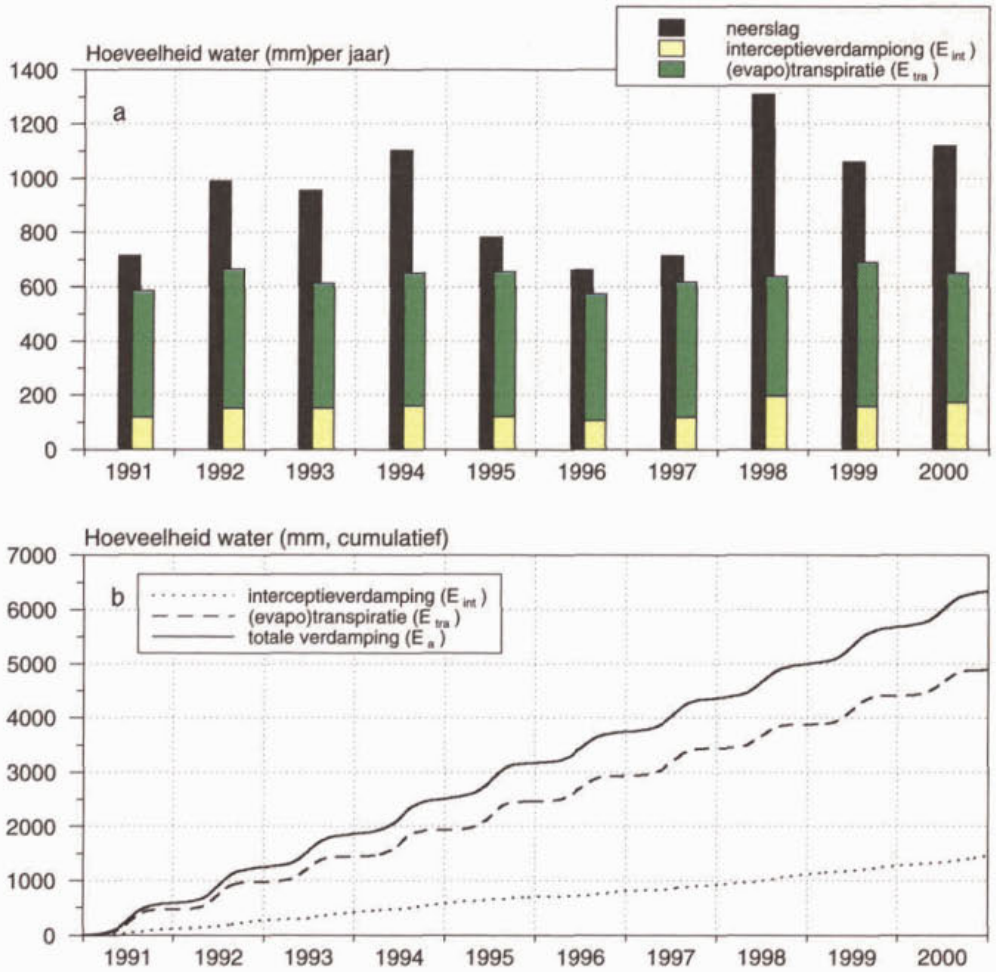
De verschillen zijn waarschijnlijk mede het gevolg van de relatief grote horizontale doorlatendheid van de zanden van Stompetoren (zie par 4.3.3) en van het contact tussen de diepere sloten buiten het proefgebied (middentocht van De Purmer) en het proefgebied zelf via deze doorlatende laag. Door deze hydrologische kortsluiting zijn uit de resultaten van de pompproef geen betrouwbare kwelgegevens voor uitsluitend het proefgebied af te leiden. Het is waarschijnlijk dat de berekende kwel aan de hoge kant is, en niet alleen afhankelijk is van de grondwaterstanden in het proefgebied, maar tevens van de waterstanden van de diepere sloten in het omliggende gebied. Bij gebrek aan meer betrouwbare gegevens zal toch in de balansberekeningen van hoofdstuk 7 in eerste instantie worden uitgegaan van de kwel volgens figuur 6.4c, neerkomend op een gemiddelde van 176 mm per jaar.

6.3 Bosverdamping

Er zijn in het Purmerbos proefgebied geen metingen gedaan met betrekking tot de bosverdamping. Zoals aangegeven in hoofdstuk 1 is het onderzoek zodanig opgezet dat verdamping zou zijn te berekenen als restpost van de waterbalans voor het proefgebied. In hoofdstuk 7 echter zal blijken dat de waterbalansberekeningen in eerste instantie niet tot aanvaardbare resultaten leidden. Daarom is voor een andere benadering gekozen waarbij de bosverdamping is afgeleid uit resultaten van eerder onderzoek bij loofbos in Nederland. Hiertoe is gebruik gemaakt van:

- een publicatie van Moors *et al.* (1996);
- onderzoek van Elbers *et al.* (1996) in het zogenoemde Fleditebos in Zuidelijk Flevoland (beplant met populier over 76% van de oppervlakte en verder met es, eik, esdoorn).

Uiteindelijk zijn de verdampingsberekeningen gebaseerd op relaties die zijn afgeleid uit de resultaten van het onderzoek in het Fleditebos. In dat onderzoek zijn de bostranspiratie en de interceptieverdamping direct gemeten. Het toepassen van de desbetreffende relaties leidt tot berekening van de transpiratie en interceptieverdamping op dagbasis, uitgaande van de globale straling, temperatuur en neerslag. Voor de details wordt verwezen naar aanhangsel 2.



Figuur 6.5 Neerslag (gemiddelde van de KNMI-stations Edam en Purmerend) en verdampingsgegevens voor de locatie Purmerbos (berekend op basis van onderzoek in het Fleditebos), per kalenderjaar (a) en cumulatief (b)

Figuur 6.5 heeft betrekking op resultaten van de berekeningen. Uit de figuur blijkt het volgende:
- de interceptieverdamping (E_{int}) is gecorreleerd met de neerslag en loopt uiteen van ca. 100 mm in 1996 tot bijna 200 mm in 1998;
- de bostranspiratie (E_{tra}) loopt uiteen van 440 mm in 1998 tot 530 mm in 1995, waarbij de verschillen goeddeels zijn te verklaren uit verschillen in globale straling;
- de gemiddelde totale verdamping (E_a)* is 635 mm per jaar, met een minimum van 575 mm in 1996 en een maximum van 690 mm in 1999.

Het is van belang voor ogen te houden dat de interceptie- en transpiratiegegevens betrekking hebben op een bos met gesloten kruin, dus anders dan in het proefgebied waar het gaat om een bos dat zich in de periode vanaf 1990 geleidelijk heeft ontwikkeld. Gezien de gunstige bodemkundige omstandigheden in het Fleditebos voor wat betreft het vochtleverend vermogen van het bodemprofiel in perioden met een verdampingsoverschot, is het aannemelijk dat de berekende bosverdamping bij benadering gelijk is aan de *potentiële* bosverdamping, met andere woorden dat reductie van de verdamping ten gevolge van watertekort geen rol van betekenis heeft gespeeld.

* de bosverdamping E_a is in aanhangsel 2 aangeduid als E_{bos}

7 Waterbalansen

Dit hoofdstuk betreft berekeningen van waterbalansen voor het proefgebied. Een eerste berekening, op basis van de neerslag-, inlaat-, kwel- en afvoergegevens volgens hoofdstuk 6 en met de bosverdamping als sluitpost, leidt niet tot aanvaardbare resultaten. In een tweede berekening wordt daarom uitgegaan van de bosverdamping volgens par. 6.3 en wordt de kwel als sluitpost opgevat. Om een acceptabel resultaat te bereiken blijkt het noodzakelijk de kwel met ca. 50% te reduceren ten opzichte van het niveau volgens par. 6.2, van gemiddeld 176 mm per jaar tot 88 mm per jaar.

7.1 Waterbalansvergelijking

Voor een gegeven periode is de volgende waterbalansvergelijking voor het proefgebied van toepassing:

$$\Delta B = B(t_2) - B(t_1) = (N+I+K-A-E_a) \qquad (7.1)$$

met
- $B(t_2)$ en $B(t_1)$ als waterberging ten tijde t_2 en t_1 (einde resp. begin van de balansperiode);
- N = neerslag;
- I = waterinlaat;
- K = kwel;
- A = afvoer via bemaling;
- E_a = actuele (bos)verdamping.

De berging B heeft betrekking op het oppervlaktewater en het bodemwater, verder aangeduid als B_{ow} resp. B_{bw}. Voor poldergebieden geldt algemeen dat ΔB_{ow} relatief klein is omdat een vast streefpeil via bemaling resp. inlaat van water wordt nagestreefd. Dat is ook het geval voor het Purmerbos proefgebied, met een streefpeil van 480 cm-NAP. De balanspost B_{bw} daarentegen kan onder invloed van neerslag, verdamping, drainage en infiltratie in de loop van een balansperiode sterk veranderen In perioden met een verdampingsoverschot neemt B_{bw} af (uitdroging van de grond en daling van grondwaterstanden in de voorjaars- en zomerperiode).
In perioden met een neerslagoverschot daarentegen neemt B_{bw} toe (herbevochtiging van het bodemprofiel en stijgende grondwaterstanden in de nazomer en najaarsperiode).

Voor balansperioden van langere duur, bijvoorbeeld van één jaar of een aantal jaren, zal ΔB_{bw} beperkt zijn in verhouding tot de andere balansposten. In dat geval geldt dan dat $\Delta B_{ow} \approx 0$ en $\Delta B_{bw} \approx 0$, dus $\Delta B \approx 0$ zodat de balansvergelijking beperkt blijft tot

$$(N+I+K-A-E_a) = 0 \qquad (7.2)$$

7.2 Balansperioden op basis van hydrologische criteria

Relatie (7.2) is ook van toepassing op balansperioden met een duur van minder dan een jaar mits de begrenzing van die perioden verstandig is gekozen. Blijkens de figuren van aanhangsel 1 is binnen elk jaar een periode aan te geven waarin geen of slechts een minimale afvoer via bemaling plaatsvindt. Het gaat om perioden die, afhankelijk van met name de hoeveelheid neerslag en de neerslagverdeling, beginnen in april, mei of juni en duren tot in september, oktober of november (in 1995 zelfs tot in december). Deze perioden worden verder aangeduid

als *zomer*balansperioden. De preciese begin- en einddatum is vast te stellen aan de hand van de histogrammen met neerslag- en afvoergegevens per dag en de bijbehorende grafieken met het verloop van de grondwaterstand volgens aanhangsel 1. De zomerbalansperioden beginnen in het voorjaar, als de grondwaterstand duurzaam daalt tot onder het niveau van 460 cm-NAP en eindigen in het najaar met het weer op gang komen van de afvoer via bemaling, een stijgende grondwaterstand tot boven het niveau van 460 cm-NAP (het niveau van 460 cm-NAP ligt boven het aanslagpeil van het gemaal dat is ingesteld op 475 cm-NAP).

Het einde van een zomerbalansperiode is automatisch het begin van een winterbalansperiode. Elke winterbalansperiode loopt over de kalenderjaargrens dóór tot aan het begin van de volgende zomerbalansperiode. Een combinatie van een zomerbalansperiode met een aansluitende winterbalansperiode is te zien als een *hydrologisch* jaar. De lengte van een hydrologisch jaar wordt dus bepaald door het verloop van de afvoer via bemaling en van de grondwaterstand, en is van jaar tot jaar verschillend: soms korter dan 365 dagen, soms langer.

Het is redelijk aan te nemen dat de berging van water in het bodemprofiel en in het oppervlaktewatersysteem aan het begin en einde van zowel de zomer- als de winterbalansperioden bij benadering gelijk is. Samenvattend geldt dus:
- $\Delta B_{ow} \approx 0$ en $\Delta B_{bw} \approx 0$ voor de hydrologische jaarbalansperioden;
- $\Delta B_{ow} \approx 0$, $\Delta B_{bw} \approx 0$, met $A \approx 0$ en $I > 0$ voor de zomerbalansperioden;
- $\Delta B_{ow} \approx 0$, $\Delta B_{bw} \approx 0$, met $A > 0$ en $I = 0$ voor de winterbalansperioden.

Eén ander aspect met betrekking tot het begrenzen van de zomer- en winterbalansperioden moet hier nog genoemd worden. De zware kleigrond in het proefgebied vertoont duidelijke krimp- en zwelverschijnselen onder invloed van uitdroging resp. herbevochtiging. Het zwellen en krimpen is een geleidelijk verlopend, langdurig proces. De indruk bestaat dan ook dat de herbevochtiging van het bodemprofiel nog niet is afgerond op het moment dat de grondwaterstand is gestegen tot 460 cm-NAP en de afvoer via bemaling op gang komt (de criteria voor het afsluiten van de zomerbalansperioden). Dit zou gevolgen hebben voor de berging B_{bw} aan het begin en einde van de balansperioden:
- $\Delta B_{ow} \approx 0$ en $\Delta B_{bw} \approx 0$ voor de hydrologische jaarbalansperioden;
- $\Delta B_{ow} \approx 0$ maar $\Delta B_{bw} < 0$ voor de hydrologische zomerbalansperioden;
- $\Delta B_{ow} \approx 0$ maar $\Delta B_{bw} > 0$ voor de hydrologische winterbalansperioden.

Hier wordt volstaan met het signaleren van het verschijnsel zwel en krimp en het kwalitatief aangeven in welke richting de waterbalansen daardoor beïnvloed zouden kunnen worden. Het kwantificeren van de effecten zou een meer gedetailleerd onderzoek naar het krimp- en zwelgedrag van het bodemprofiel vereisen en dat is niet uitgevoerd.

7.3 Waterbalansberekeningen: resultaten en evaluatie

7.3.1 Resultaten

Het onderzoek is opgezet met de bedoeling de (bos)verdamping als restpost van de waterbalans vast te stellen. Uitgaande van relatie (7.2), dus van balansperioden waarvoor $\Delta B \approx 0$, geldt

$$R = N+I+K-A \ (=E_a\ ?) \qquad (7.3)$$

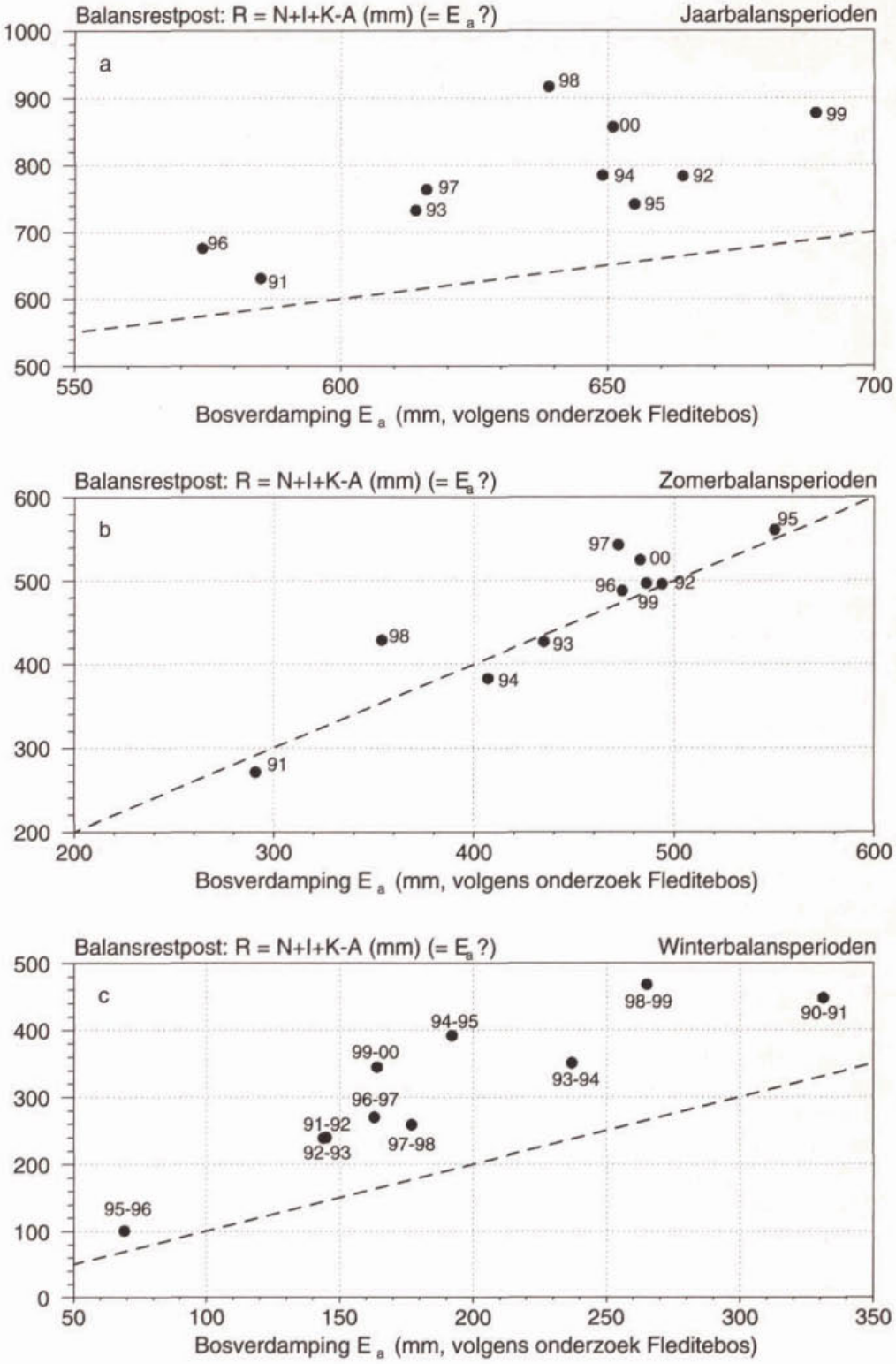
met R als restpost en N, I, K en A als uitgewerkt in hoofdstuk 6. Anders gezegd: de restpost R wordt berekend op basis van de neerslag-, inlaat-, kwel- en afvoergegevens waarbij de vraag aan de orde is in hoeverre R overeenkomt met de onafhankelijk berekende (bos)verdamping E_a. Balansberekeningen zijn uitgevoerd voor zowel de kalenderjaren 1991 t/m 2000 als voor de op hydrologische criteria gebaseerde balansperioden. Resultaten zijn opgenomen in tabel 7.1 en

verwerkt in figuur 7.1. De onderbroken lijnen in figuur 7.1 geven de relatie $R = E_a$, dat wil zeggen het niveau waarop de punten voor de balansperioden zouden moeten liggen bij sluitende waterbalansen.

De figuren 7.2 t/m 7.10 in aanhangsel 4 geven een gedetailleerd beeld van het (cumulatieve) verloop van de verschillende posten van de waterbalans tijdens de op hydrologische criteria gebaseerde balansperioden. De verticale onderbroken lijnen geven het begin en einde aan van de zomerbalansperiode en van de daarop aansluitende winterbalansperiode. Volledigheidshalve is ook het verloop van de grondwaterstand voor de peilbuis nabij het gemaal weergegeven. Uit de figuren blijkt dat de zomerbalansperioden meestal van kortere duur zijn dan de winterbalansperioden. De balansperiode 1995-1996 (figuur 7.6) vormt daarop een uitzondering. De schaal op de Y-as is aangepast aan de cumulatieve hoeveelheid water van de desbetreffende balanspost. Zo is bijvoorbeeld de schaalverdeling voor de inlaat van water heel anders dan die voor de neerslag. Verder komt duidelijk tot uiting dat inlaat van water alléén in de zomerbalansperioden voorkomt en dat de afvoer via bemaling vrijwel volledig tot de winterbalansperioden is beperkt. Meestal verlopen er enige weken, soms zelfs maanden, tussen het tijdstip waarop het inlaten van water stopt en het tijdstip waarop de afvoer op gang komt. De duur van die overgangsperiode is vooral afhankelijk van de verhouding tussen enerzijds de neerslag en anderzijds de (afnemende) verdamping.

Tabel 7.1. Waterbalansgegevens voor het Purmerbos proefgebied (66 ha), voor de gehele periode 1991 t/m 2000, voor de afzonderlijke kalenderjaren, voor de hydrologische jaarperioden en voor specifieke zomer- en winterbalansperioden; neerslag (N) is gemiddelde voor KNMI-stations Edam en Purmerend; kwel (K) berekend op basis van een variabele C-waarde: 2600 d < C < 2900 d; afvoer (A) niet gecorrigeerd voor randeffecten; (bos)verdamping (E_a) volgens relaties voor het Fleditebos (aanhangsel 2); restpost $R = N+I+K-A$

	Duur (d)	N (mm)	I (mm)	K (mm)	A (mm)	R (mm)	E_a (mm)	$R-E_a$ (mm)	R/E_a (--)
*Gehele periode									
01-01-1991 t/m 28-12-2000	3650	9408	172	1764	3579	7766	6336	1430	1,23
Gemiddeld per kalenderjaar	365	941	17	176	358	777	634	143	1,23
*Afzonderlijke *kalender*jaren									
01-01-1991 t/m 31-12-1991	365	713	11	148	241	632	585	47	1,08
01-01-1992 t/m 31-12-1992	366	990	16	158	380	784	664	120	1,18
01-01-1993 t/m 31-12-1993	365	954	2	147	370	734	614	120	1,20
01-01-1994 t/m 31-12-1994	365	1103	9	155	482	786	649	137	1,21
01-01-1995 t/m 31-12-1995	365	783	32	189	262	741	655	86	1,13
01-01-1996 t/m 31-12-1996	366	661	28	199	212	675	574	101	1,18
01-01-1997 t/m 31-12-1997	365	714	23	201	174	763	616	147	1,24
01-01-1998 t/m 31-12-1998	365	1310	6	178	577	917	639	278	1,44
01-01-1999 t/m 31-12-1999	365	1061	26	195	404	879	689	190	1,28
01-01-2000 t/m 28-12-2000	363	1119	20	196	478	856	651	205	1,31
*Hydrologische *jaar*balansper.									
04-07-1991 t/m 12-05-1992	314	640	11	129	269	512	435	77	1,18
13-05-1992 t/m 30-04-1993	353	902	16	155	339	734	638	96	1,15
01-05-1993 t/m 21-05-1994	386	1114	2	149	487	779	672	106	1,16
22-05-1994 t/m 24-04-1995	338	1119	9	151	504	775	600	175	1,29
25-04-1995 t/m 21-04-1996	363	523	32	196	88	663	619	43	1,07
22-04-1996 t/m 19-05-1997	393	774	28	212	256	758	637	121	1,19
20-05-1997 t/m 22-05-1998	368	857	23	202	280	802	649	153	1,24
23-05-1998 t/m 11-05-1999	354	1320	6	169	597	898	618	279	1,45
12-05-1999 t/m 01-05-2000	356	997	26	195	376	842	650	192	1,30
*Hydrologische *zomer*balansper.									
04-07-1991 t/m 04-11-1991	124	213	11	60	13	272	291	-19	0,93
13-05-1992 t/m 15-10-1992	156	407	16	81	8	495	494	1	1,00
01-05-1993 t/m 12-09-1993	135	363	2	64	2	428	435	-7	0,98
22-05-1994 t/m 14-09-1994	116	312	9	63	1	383	407	-24	0,94
25-04-1995 t/m 18-12-1995	238	396	31	139	5	561	550	11	1,02
22-04-1996 t/m 28-10-1996	190	342	28	118	0	488	474	14	1,03
20-05-1997 t/m 20-11-1997	185	403	23	117	0	543	472	71	1,15
23-05-1998 t/m 03-09-1998	104	380	6	59	16	429	354	75	1,21
12-05-1999 t/m 03-10-1999	145	375	26	96	0	497	486	11	1,02
02-05-2000 t/m 07-10-2000	159	405	20	101	1	525	483	42	1,09
*Hydrologische*winter*balansper.									
24-09-1990 t/m 03-07-1991	283	630	0	101	283	448	386	117	1,16
05-11-1991 t/m 12-05-1992	190	427	0	69	257	240	144	96	1,67
16-10-1992 t/m 30-04-1993	197	496	0	74	330	240	145	95	1,66
13-09-1993 t/m 21-05-1994	251	751	0	85	485	351	237	114	1,48
15-09-1994 t/m 24-04-1995	222	807	0	88	503	392	192	200	2,04
19-12-1995 t/m 21-04-1996	125	127	0	57	83	101	69	32	1,46
29-10-1996 t/m 19-05-1997	203	432	0	94	256	270	163	107	1,66
21-11-1997 t/m 22-05-1998	183	454	0	85	280	259	177	82	1,46
04-09-1998 t/m 11-05-1999	250	939	0	110	581	469	265	204	1,77
04-10-1999 t/m 01-05-2000	211	622	0	99	376	345	164	181	2,10



Figuur 7.1 Restpost R van de waterbalans in relatie tot de (bos)verdamping E_a voor a: de kalenderjaren 1991 t/m 2000, voor b: de zomerbalansperioden en voor c: de winterbalansperioden

In de deelfiguren 7.2f t/m 7.10f is het verloop van de verandering van de berging ΔB volgens relatie (7.1) cumulatief weergegeven, waarbij is uitgegaan van $\Delta B = 0$ aan het begin van elke zomerbalansperiode. De berekende waarden voor $(R-E_a)$ volgens tabel 7.1 zijn voor de zomerbalansperioden en voor de hydrologische jaarbalansperioden in de figuren 7.2f t/m 7.10f terug te vinden als de bergingsverandering ΔB op het tijdstip waarop de zomerbalansperiode overgaat in de winterbalansperiode resp. op het tijdstip waarop de winterbalansperiode afloopt.

7.3.2 Evaluatie

Sluitende waterbalansen voor de onderscheiden balansperioden zouden moeten voldoen aan de voorwaarden

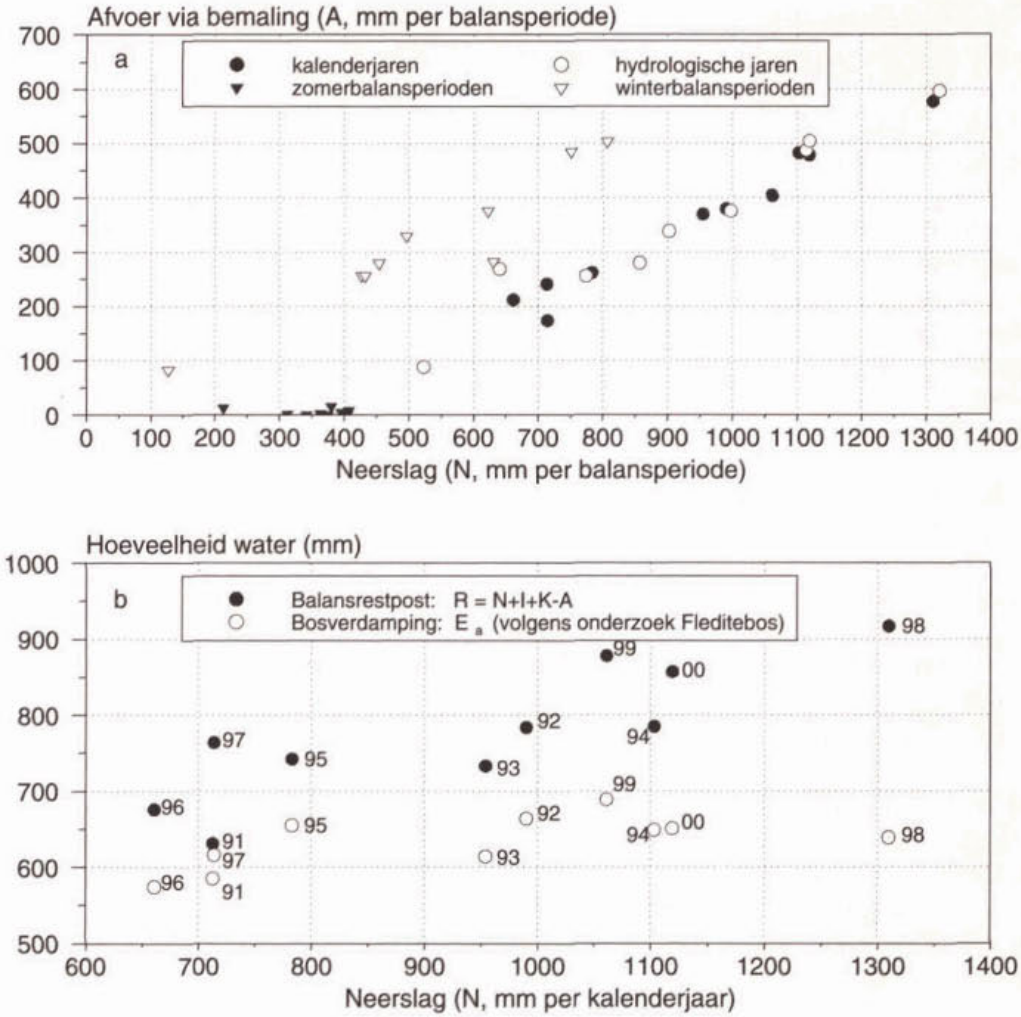
$(R-E_a) = 0$

en

$R/E_a = 1{,}00$

Blijkens figuur 7.1 en tabel 7.1 wordt alléén voor de op hydrologische criteria gebaseerde zomerbalansperioden redelijk aan deze voorwaarden voldaan. Gemiddeld over alle zomerbalansperioden geldt $(R-E_a) = 17$ mm en $R/E_a = 1{,}04$. Voor alle jaarbalansperioden en voor alle winterbalansperioden geldt dat $(R-E_a)>0$ en $R/E_a>1{,}00$. Voor sommige perioden zijn de afwijkingen groot: voor het kalenderjaar 1998 bijvoorbeeld is een verschil tussen R en E_a berekend van 278 mm en is R bijna anderhalf keer zo groot als E_a. Voor de hydrologische winterbalansperioden komen zelfs twee perioden voor met $R/E_a>2$.

In alle balansberekeningen heeft de verdampingspost E_a betrekking op een volgroeid bos. De berekening van de restpost R volgens relatie (7.3) daarentegen is gebaseerd op de meetgegevens voor het proefgebied en de daaruit afgeleide balansposten N, I, K en A, over een periode van tien jaar waarin een geleidelijke groei en ontwikkeling van een bosaanplant heeft plaatsgevonden. In de ligging van de punten in figuur 7.1 (of in de getallen volgens tabel 7.1 voor zover het de termen betreft waarin R voorkomt) is van die bosontwikkeling, met een systematische toename van het verdampingsniveau gedurende de periode 1991-2000, weinig terug te vinden. Wel valt op dat het punt voor de winterbalansperiode 1990-1991 uiterst rechts in figuur 7.1c ligt en het punt voor de daaropvolgende zomerbalansperiode van 1991 in figuur 7.1b uiterst links. Blijkens tabel 7.1 hangt dat samen met het late tijdstip waarop de zomerbalansperiode in 1991 volgens de criteria van par. 7.2 begint. Dat late tijdstip *kan* te maken hebben met de beperkte verdamping van de dan nog kleine boompjes maar ook met de neerslagverdeling. Uit figuur 6.1a blijkt dat juist 1991 gekarakteriseerd wordt door een hoeveelheid neerslag van meer dan 100 mm in juni. Blijkens figuur 7.2 begint mede daardoor de zomerbalansperiode voor 1991 pas in juli en dat is tenminste anderhalve maand later dan in de jaren daarná.



Figuur 7.11 Relatie tussen a: de afvoer A en de neerslag N voor balansperioden uit de periode 1991 t/m 2000 en tussen b: de restpost van de waterbalans resp. de (bos)verdamping en de neerslag, voor de kalenderjaren 1991 t/m 2000

Figuur 7.11 betreft een nadere analyse van relaties tussen de posten van de waterbalans. Geheel volgens verwachting is de afvoer A blijkens figuur 7.11a duidelijk positief gecorreleerd met de neerslag N. Dit geldt zowel voor de winterbalansperioden als de jaarbalansperioden, waarbij het niet uitmaakt of het gaat om de kalenderjaren of de hydrologische jaren. In figuur 7.11b is zowel de bosverdamping E_a als de restpost R uitgezet tegen de neerslag N, in dit geval alléén voor de kalenderjaren. Ook R lijkt positief gecorreleerd te zijn met N. Voor E_a is dat niet het geval: in dit verband wordt verwezen naar par. 6.3 en figuur 6.5. Veel neerslag leidt tot een grotere interceptieverdamping maar bij veel neerslag is de globale straling en dus de (bos)transpiratie lager. Beide effecten werken tegengesteld en compenseren elkaar zodat de totale (bos)verdamping niet of nauwelijks afhankelijk is van de neerslag.

Samenvattend wordt geconcludeerd dat:
- de restpost R in de waterbalansberekeningen niet in overeenstemming is met de onafhankelijk berekende bosverdamping E_a;
- de ontwikkeling van het bos, met een toename van het verdampingsniveau gedurende de periode vanaf de aanplant in 1990, niet of in ieder geval niet duidelijk in de onderzoeksresultaten tot uiting komt.

De gesignaleerde discrepantie tussen de restpost R en de onafhankelijk berekende bosverdamping E_a kan in principe het gevolg zijn van:
- het rekenen met te hoge neerslag- en/of waterinlaat- en/of kwelgegevens;
- het rekenen met een te lage afvoer via bemaling;
- het rekenen met een te lage bosverdamping.

De waterinlaat kan gevoeglijk buiten beschouwing blijven: blijkens tabel 7.1 is deze post van sterk ondergeschikt belang. Wat de neerslag betreft is er, zoals besproken in par. 6.1, geen aanleiding om zodanig grote afwijkingen te veronderstellen dat de discrepantie tussen R en E_a daarmee zou kunnen worden verklaard. Zo resteren randeffecten met betrekking tot de afvoer A en onzekerheden met betrekking tot de kwel K als aspecten waarop de aandacht zich dient te concentreren.

7.4 Correctie van de afvoer en de kwel

7.4.1 Afvoer via bemaling

Wat de afvoer A betreft zijn twee aspecten van belang:
- de betrouwbaarheid van de eigenlijke debietmetingen;
- het optreden van randeffecten rondom het proefgebied.

De betrouwbaarheid van de debietmetingen is al aan de orde geweest in par. 6.1.3 en hoeft niet in twijfel getrokken te worden. Daarom richt de aandacht zich op randeffecten, dat wil zeggen op het zijdelings wegstromen van water over de grenzen van het proefgebied, dus buiten het gemaal om. Een dergelijke lekkage heeft tot gevolg dat de *gemeten* afvoeren volgens tabel 7.1 lager zijn dan de afvoeren waarmee een sluitende de waterbalans voor het proefgebied zou worden berekend via relatie (7.2).

Zijdelingse wegstroming van water over de grenzen van het balansgebied is aan de orde als grondwaterstanden en/of openwaterstanden binnen het proefgebied systematisch afwijken van de waterstanden daarbuiten. Hogere grondwaterstanden binnen het proefgebied in perioden met afvoer zijn aannemelijk gezien de gebrekkige ontwatering en afwatering doordat geen greppel-onderhoud meer plaatsvindt en een deel van het slotenstelsel niet meer wordt onderhouden. Wat de openwaterstanden binnen en buiten het proefgebied betreft wordt verwezen naar par. 2.2.2: de herziening van het peilbeluit van 1993 betekende een verlaging van streefpeilen in De Purmer en kan daardoor randeffecten als hier bedoeld in de hand hebben gewerkt.

In aanhangsel 3 is een methode uitgewerkt om de afvoer voor randeffecten te corrigeren. Uitgangspunt daarbij is dat de buitenste strook van het proefgebied (figuur 2.2: strook ter breedte van 80 à 90 m tussen de buitenste kavelsloot *binnen* en de randsloot *buiten* het proef-gebied) deels op die randsloot ontwatert. Op basis van metingen van de grondwaterstand nabij het gemaal (automatische meting met drukopnemer, per uur, waaruit afgeleid een gemiddelde grondwaterstand per dag) en de streefpeilen in de randsloten wordt de breedte van de strook berekend, waarvan de ontwatering op de randsloten plaatsvindt. Uit die breedte volgt de op de randsloten ontwaterende oppervlakte O_s, uit te drukken in ha. Op basis daarvan is een gecorri-geerde afvoer A^* te berekenen volgens

$$A^* = A \bullet \{66 / (66 - O_s)\}$$

uitgaande van de oppervlakte van het proefgebied van 66 ha. De berekening van O_s en A^* wordt op dagbasis uitgevoerd, voor alle dagen met afvoer via bemaling, dat wil zeggen voor alle dagen waarvoor $A > 0$. Strikt genomen is de benadering van toepassing op de lange zijden van het proefgebied, dat wil zeggen op de beide randstroken evenwijdig aan de kavelstroken.

Er is aangenomen dat dezelfde benadering ook op de beide korte zijden van toepassing is. Voor verdere details wordt verwezen naar aanhangsel 3.

Het resultaat komt aan de orde in par. 7.5. Hier wordt volstaan met de opmerking dat, gezien over de gehele periode 1991 t/m 2000, het corrigeren voor randeffecten leidt tot een toename van de gemiddelde afvoer van 358 mm per jaar tot 409 mm per jaar. Dat komt neer op een correctie met bijna 15%.

Los van de randeffecten als hiervóór bedoeld, is ook een meer directe lekkage via de slootafdammingen, die bij de aanleg van het proefgebied zijn aangebracht, niet geheel uit te sluiten. Aan de buitenzijde van en rondom het gehele proefgebied ligt een grasstrook met een breedte van 3 à 4 m. De afdammingen maken deel uit van die grasstrook en hebben eenzelfde breedte. Het is dan ook niet aannemelijk dat lekkage via deze afdammingen een rol van betekenis speelt.

7.4.2 Kwel

In par. 6.2 is aangegeven dat de C-waarde van het afdekkend pakket en dus de kwel sterk afhankelijk is van de interpretatie van de stijghoogten die tijdens de pompproef zijn gemeten. Daardoor is de kwel een minder betrouwbare post in de waterbalans. In feite is dan ook niet de bosverdamping maar de kwel de meest onzekere post in de waterbalans. Daarom zijn, in afwijking van de oorspronkelijke gedachte bij het opzetten van het onderzoek, de waterbalansen opnieuw berekend, maar nu met de kwel als sluitpost. Om voor de gehele periode 1991 t/m 2000 tot een sluitende waterbalans te komen bleek het noodzakelijk de gemiddelde jaarlijkse kwel volgens tabel 7.1 te halveren, van 176 tot 88 mm. Dat betekent dus een verdubbeling van de C-waarde van het afdekkend pakket ten opzichte van de in par. 6.2 gegeven weerstand.

De tot gemiddeld 88 mm per jaar gereduceerde kwel ligt binnen het 95% betrouwbaarheids-interval van 30 tot 110 mm per jaar en nog boven de verwachtingswaarde van 70 mm per jaar voor De Purmer als geheel volgens het onderzoek van de Werkgroep Noord-Holland (1982). Deze werkgroep bepaalde de kwel aan de hand van balansberekeningen van het grond- en oppervlaktewater van de gehele Purmer. Een kwel van 88 mm per jaar voor het Purmerbos proefgebied is wat dat betreft aanvaardbaar, ook al ontbreken de mogelijkheden tot nadere onderbouwing.

7.5 Herberekening en slotevaluatie van de waterbalansen

Resultaten van de herberekende waterbalansen, met de aangepaste afvoer en kwel, zijn opgenomen in tabel 7.2 en verwerkt in figuur 7.12. Daarnaast wordt verwezen naar de figuren 7.2 t/m 7.10. Het effect van de correctie van A en de aanpassing van K komt bij het vergelijken van figuur 7.12 met figuur 7.1 duidelijk tot uiting. Voor de zomerbalansperioden heeft het corrigeren van de afvoer geen invloed zodat het verschuiven van de punten in figuur 7.12b ten opzichte van figuur 7.1b geheel is toe te schrijven aan het halveren van de kwel. Voor de winterperioden spelen zowel het halveren van de kwel als het corrigeren van de afvoer voor randeffecten een rol.

Het resultaat van de balansaanpassingen is als volgt samen te vatten:
- voor de jaarbalansen leiden de correctie van A en aanpassing van K tot een acceptabel resultaat, dat wil zeggen tot een balans waarin de restpost R en de verdamping E_a redelijk goed met elkaar overeenstemmen;
- voor de zomerbalansperioden heeft het aanpassen van de kwel tot gevolg dat R voor de meeste perioden kleiner wordt dan E_a;

- voor de winterbalansperioden leiden de correcties en aanpassingen tot een duidelijk meer bevredigend resultaat, maar blijft R voor de meeste balansprioden toch nog boven het niveau van E_a liggen;
- ook na de correcties en aanpassingen komt de bosontwikkeling met een geleidelijke toename van de bosverdamping niet tot uiting, althans zeker niet duidelijk.

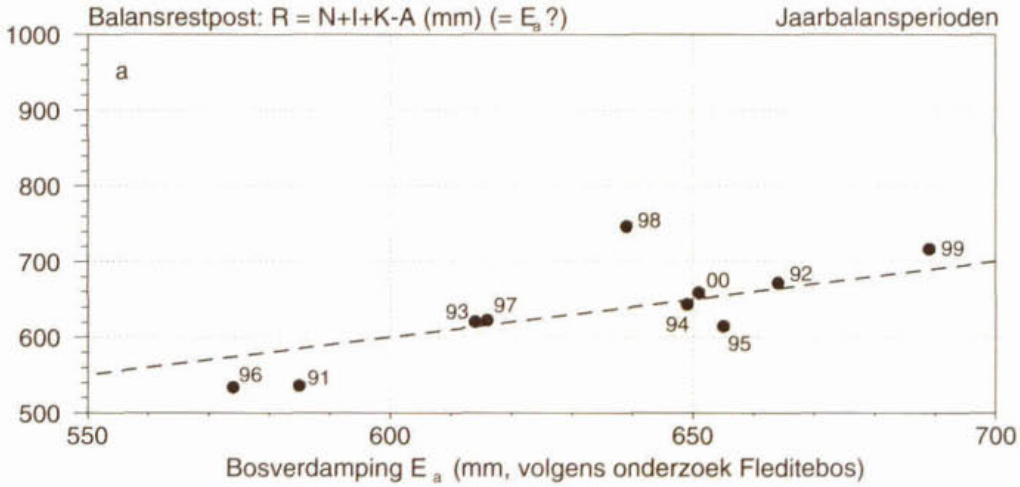
Het laatstgenoemde aspect is nog nader te bekijken aan de hand van figuur 7.13. Voor wat de afvoer en de kwel betreft gaat het om A en K na correctie. Deelfiguur 7.13a geeft een duidelijk beeld van de relatieve betekenis van de verschillende posten. Het cumulatieve verloop van dB (=ΔB) is in deelfiguur 7.13b apart weergegeven, met een aangepaste schaal op Y-as. Voor de periode 1991-2000 als geheel is de balans praktisch sluitend, dat wil zeggen dB ≈ 0 als gevolg van de correcties van A voor randeffecten en de aanpassing (halvering) van K. Verder staat vast dat het *werkelijke* verloop van B voor het proefgebied zodanig is dat dB ≈ 0 voor elk van de opeenvolgende kalenderjaren. Het *berekende* verloop van B gedurende de periode van 10 jaar voldoet niet aan die voorwaarde en is niet eenduidig te verklaren en al zeker niet uit alléén de groei en ontwikkeling van het bos, met een geleidelijke toename van de bosverdamping E_a.

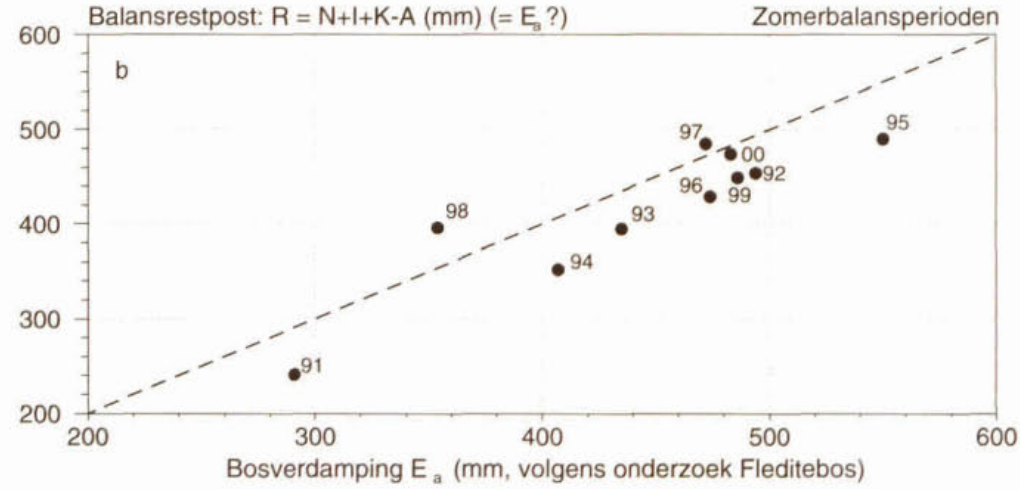
Als het verloop van dB voor de individuele kalenderjaren wordt bekeken, dan geldt:
dB < 0 voor 1991, 1995 en 1996;
dB ≈ 0 voor 1992, 1993, 1994, 1997 en 2000;
dB > 0 voor 1998 en 1999.

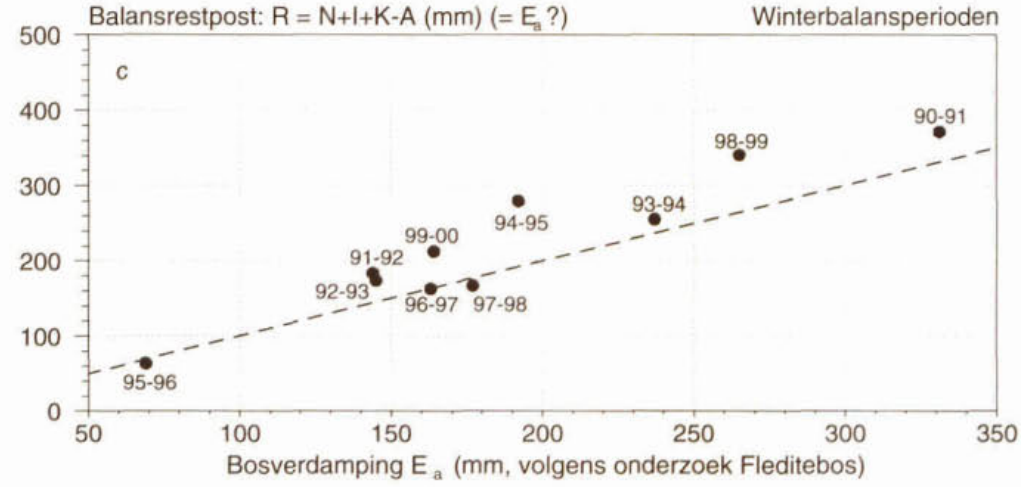
Als alléén een geleidelijke toename van de bosverdamping een rol zou spelen, dan zou met de groei en ontwikkeling van het bos voor de jaren vanaf het aanplanten in 1990 op jaarbasis aanvankelijk een negatieve waarde voor dB berekend worden, tot het moment waarop het verdampingsniveau niet verder toeneemt. Vanaf dat moment zou de berging B op de peildatum 1 januari van jaar tot jaar gelijk moeten blijven. Blijkens figuur 7.13b is dat niet het geval wat inhoudt dat andere factoren een rol moeten hebben gespeeld. Daarbij valt te denken aan het optreden van ziekten en plagen, en de invloed daarvan op het verdampingsniveau. Verder moet voor ogen gehouden worden dat de berekening van de verdamping is gebaseerd op de resultaten van onderzoek dat elders is uitgevoerd. Zodoende is onduidelijk in hoeverre de balansberekeningen zijn beïnvloed door verschillen tussen de potentiële en actuele verdamping in het Fleditebos resp. in het Purmerbos proefgebied.

Tabel 7.2 Waterbalansgegevens (ná correctie) voor het Purmerbos proefgebied (66 ha), voor de gehele periode 1991 t/m 2000, voor de afzonderlijke kalenderjaren, voor de hydrologische jaarperioden en voor specifieke zomer- en winterbalans-perioden; neerslag (N) is gemiddelde voor KNMI-stations Edam en Purmerend; kwel (K) berekend op basis van een variabele C-waarde: 5200 d < C < 5800 d; afvoer (A) gecorrigeerd voor randeffecten; (bos)verdamping (E_a) volgens relaties voor het Fleditebos (aanhangsel 2); restpost R = N+I+K-A

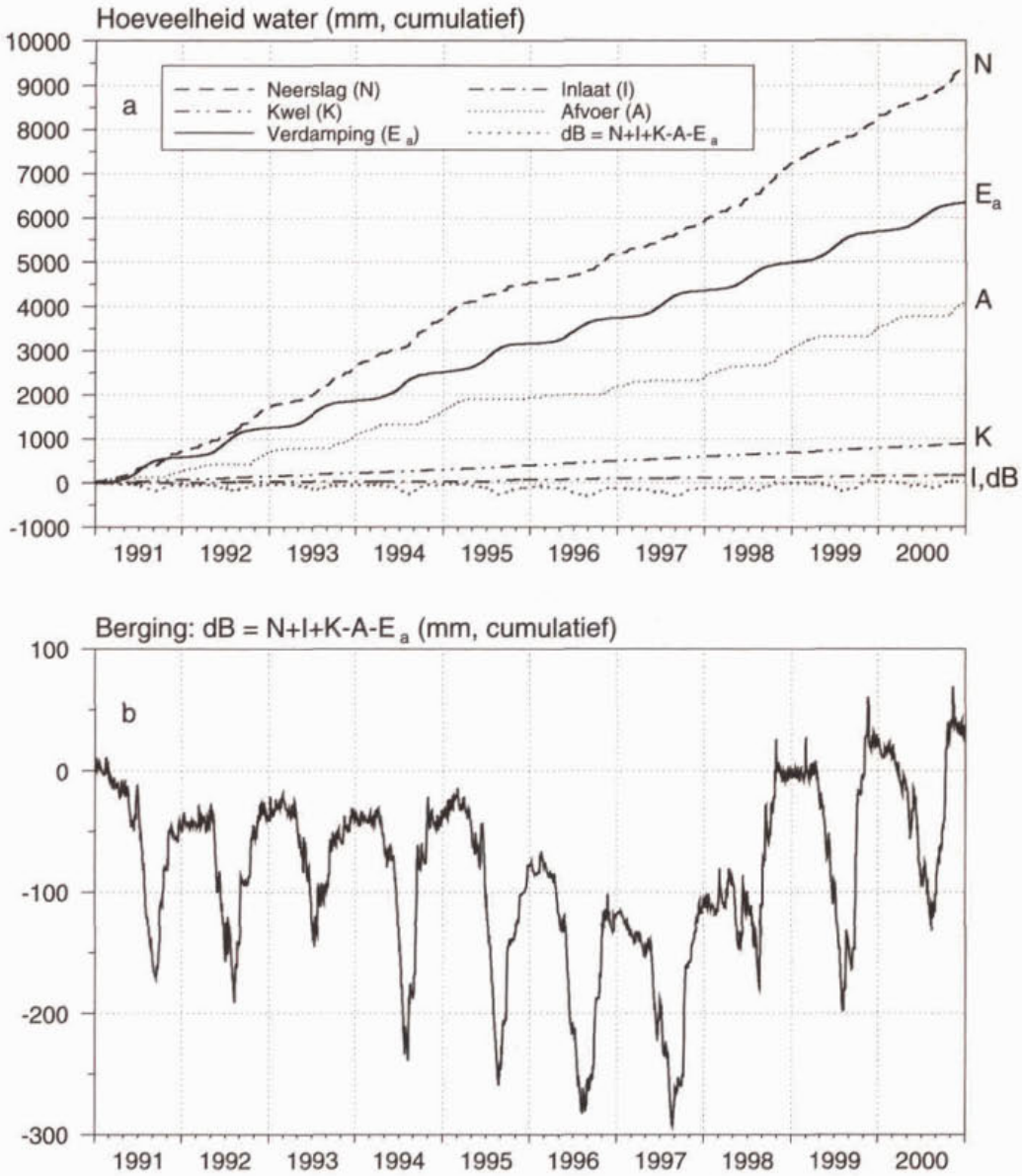
	Duur (d)	N (mm)	I (mm)	K (mm)	A (mm)	R (mm)	E_a (mm)	R-E_a (mm)	R/E_a (--)
*Gehele periode									
01-01-1991 t/m 28-12-2000	3650	9408	172	882	4093	6369	6336	34	1,01
Gemiddeld per kalenderjaar	365	941	17	88	409	637	634	3	1,01
*Afzonderlijke *kalender*jaren									
01-01-1991 t/m 31-12-1991	365	713	11	74	262	537	585	-48	0,92
01-01-1992 t/m 31-12-1992	366	990	16	79	413	671	664	7	1,01
01-01-1993 t/m 31-12-1993	365	954	2	73	408	622	614	8	1,01
01-01-1994 t/m 31-12-1994	365	1103	9	78	546	645	649	-4	0,99
01-01-1995 t/m 31-12-1995	365	783	32	94	294	614	655	-41	0,94
01-01-1996 t/m 31-12-1996	366	661	28	99	254	534	574	-40	0,93
01-01-1997 t/m 31-12-1997	365	714	23	100	214	623	616	7	1,01
01-01-1998 t/m 31-12-1998	365	1310	6	89	658	746	639	108	1,17
01-01-1999 t/m 31-12-1999	365	1061	26	97	467	718	689	29	1,04
01-01-2000 t/m 28-12-2000	363	1119	20	98	578	658	651	8	1,01
*Hydrologische *jaar*balansper.									
04-07-1991 t/m 12-05-1992	314	640	11	65	291	425	435	-10	0,98
13-05-1992 t/m 30-04-1993	353	902	16	77	369	627	638	-11	0,98
01-05-1993 t/m 21-05-1994	386	1114	2	74	539	652	672	-20	0,97
22-05-1994 t/m 24-04-1995	338	1119	9	76	573	630	600	31	1,05
25-04-1995 t/m 21-04-1996	363	523	32	98	97	555	619	-64	0,90
22-04-1996 t/m 19-05-1997	393	774	28	106	316	592	637	-45	0,93
20-05-1997 t/m 22-05-1998	368	857	23	101	330	651	649	3	1,00
23-05-1998 t/m 11-05-1999	354	1320	6	85	674	736	618	118	1,19
12-05-1999 t/m 01-05-2000	356	997	26	97	459	662	650	12	1,02
*Hydrologische *zomer*balansper.									
04-07-1991 t/m 04-11-1991	124	213	11	30	13	241	291	-50	0,83
13-05-1992 t/m 15-10-1992	156	407	16	40	9	454	494	-40	0,92
01-05-1993 t/m 12-09-1993	135	363	2	32	2	396	435	-39	0,91
22-05-1994 t/m 14-09-1994	116	312	9	32	1	351	407	-56	0,86
25-04-1995 t/m 18-12-1995	238	396	31	69	6	491	550	-59	0,89
22-04-1996 t/m 28-10-1996	190	342	28	59	0	429	474	-45	0,91
20-05-1997 t/m 20-11-1997	185	403	23	59	0	484	472	13	1,03
23-05-1998 t/m 03-09-1998	104	380	6	30	20	395	354	42	1,12
12-05-1999 t/m 03-10-1999	145	375	26	48	0	449	486	-37	0,92
02-05-2000 t/m 07-10-2000	159	405	20	50	1	474	483	-9	0,98
*Hydrologische *winter*balansper.									
24-09-1990 t/m 03-07-1991	283	630	0	51	309	371	331	40	1,12
05-11-1991 t/m 12-05-1992	190	427	0	35	278	184	144	40	1,28
16-10-1992 t/m 30-04-1993	197	496	0	37	359	173	145	29	1,20
13-09-1993 t/m 21-05-1994	251	751	0	42	537	256	237	19	1,08
15-09-1994 t/m 24-04-1995	222	807	0	44	571	279	192	87	1,45
19-12-1995 t/m 21-04-1996	125	127	0	29	92	64	69	-6	0,92
29-10-1996 t/m 19-05-1997	203	432	0	47	316	163	163	0	1,00
21-11-1997 t/m 22-05-1998	183	454	0	43	330	167	177	-10	0,94
04-09-1998 t/m 11-05-1999	250	939	0	55	653	341	265	76	1,29
04-10-1999 t/m 01-05-2000	211	622	0	50	459	213	164	49	1,30







Figuur 7.12 Restpost R van de waterbalans in relatie tot de (bos)verdamping E_a, ná correctie van de afvoer A en de kwel K, voor a: de kalenderjaren uit de periode 1991 t/m 2000, voor b: de zomerbalansperioden en voor c: de winterbalansperioden



Figuur 7.13 Cumulatieve neerslag (N), waterinlaat (I), kwel (K), afvoer (A), verdamping (E_a) en verandering in waterberging (dB = N+I+K-A-E_a), na correctie van kwel en afvoer

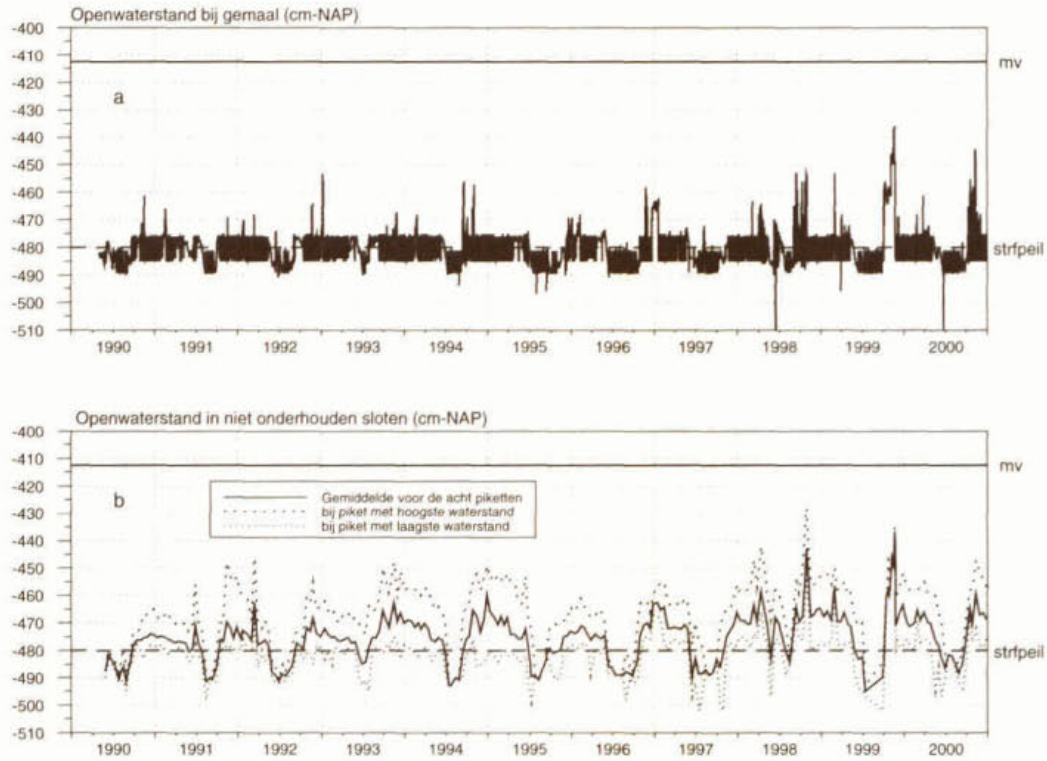
Eén van de doelstellingen van het onderzoek was om vast te stellen in hoeverre de neerslag-afvoerrelatie verandert bij het omzetten van grasland in bos in poldergebieden. Deze vraag kan nu deels beantwoord worden. Volgens de balansberekeningen is de gemiddelde bosverdamping per jaar 635 mm. Dit niveau ligt 100 tot 150 mm boven dat voor grasland. De inlaat van water voor peilhandhaving in de zomerperiode is een onbelangrijke post in de waterbalans. Wat díe balanspost betreft heeft het omzetten van grasland in bos dus ook geen invloed van betekenis. Ook de verandering van de kwelpost zal beperkt zijn. Tegenover diepere grondwaterstanden en dus een toename van de kwel in de zomerperiode staan hogere grondwaterstanden met een beperking van de kwel in de winterperiode. Een verhoging van het verdampingsniveau bij het omzetten van grasland in bos zal dan ook leiden tot een bij benadering even grote verlaging van de hoeveelheden overtollige neerslag die via bemaling moet worden afgevoerd.

8 Waterhuishoudings- en waterbeheeraspecten

In dit hoofdstuk komen aspecten met betrekking tot de waterhuishouding en het waterbeheer aan de orde:
- het verloop van openwaterstanden in par. 8.1;
- het verloop van grondwaterstanden in par. 8.2;
- de afvoer via bemaling in relatie tot de neerslag en tot het verloop van de grondwaterstand in par. 8.3;
- de samenhang tussen de neerslag, de afvoer via bemaling en het verloop van grond- en openwaterstanden in perioden met veel neerslag resp. in vorstperioden in par. 8.4.

8.1 Verloop van openwaterstanden in wel en niet onderhouden sloten

Metingen van openwaterstanden vinden plaats bij het gemaal (automatische registratie, elk uur: par. 4.1) en ter plaatse van acht piketten in de *niet* onderhouden sloten (figuur 2.2, waarneming met de hand op of omstreeks de 14e en 28e van elke maand: par. 4.2.3). Figuur 8.1a geeft het verloop van de openwaterstand bij het gemaal. Omdat in figuur 8.1a alle uurwaarnemingen zijn verwerkt gaan de details verloren maar zijn juist wèl de grote lijnen voor de gehele periode 1990-2000 te herkennen:
- het streefpeil is 480 cm-NAP, bij een gemiddeld niveau van het maaiveld van 412 cm-NAP;
- in perioden met afvoer (perioden met een neerslagoverschot) fluctueert de openwaterstand normaliter tussen 475 cm-NAP en 485 cm-NAP, zijnde de niveaus waarbij het gemaal aan- en afslaat;
- in perioden met inlaat van water voor peilhandhaving (perioden met een verdampingsoverschot) fluctueert de openwaterstand tussen 488 cm-NAP en 482 cm-NAP, zijnde de niveaus waarbij de inlaatklep wordt geopend resp. gesloten;
- in het verloop komen in de periode t/m 1998 en in het jaar 2000 enkele uitschieters naar boven voor, met openwaterstanden tot maximaal 30 à 35 cm boven streefpeil; het gaat om korte perioden met duidelijk verhoogde waterstanden die het gevolg zijn van extreem natte of anderszins bijzondere omstandigheden: in par. 8.4 volgt een gedetailleerde analyse;
- ook in het najaar van 1999 komt een periode met verhoogde waterstanden voor maar dat heeft te maken met het bewust tijdelijk uitschakelen van het gemaal;
- de uitschieters naar beneden in het derde kwartaal van 1995, in het tweede kwartaal van 1998, in het eerste kwartaal van 1999 en in het tweede kwartaal van 2000 hebben niet te maken met werkelijk opgetreden waterstanden maar met storingen in de metingen met de drukopnemer.



Figuur 8.1 Verloop van de openwaterstand bij het gemaal en bij de piketten in de niet onderhouden sloten (figuur 2.2)

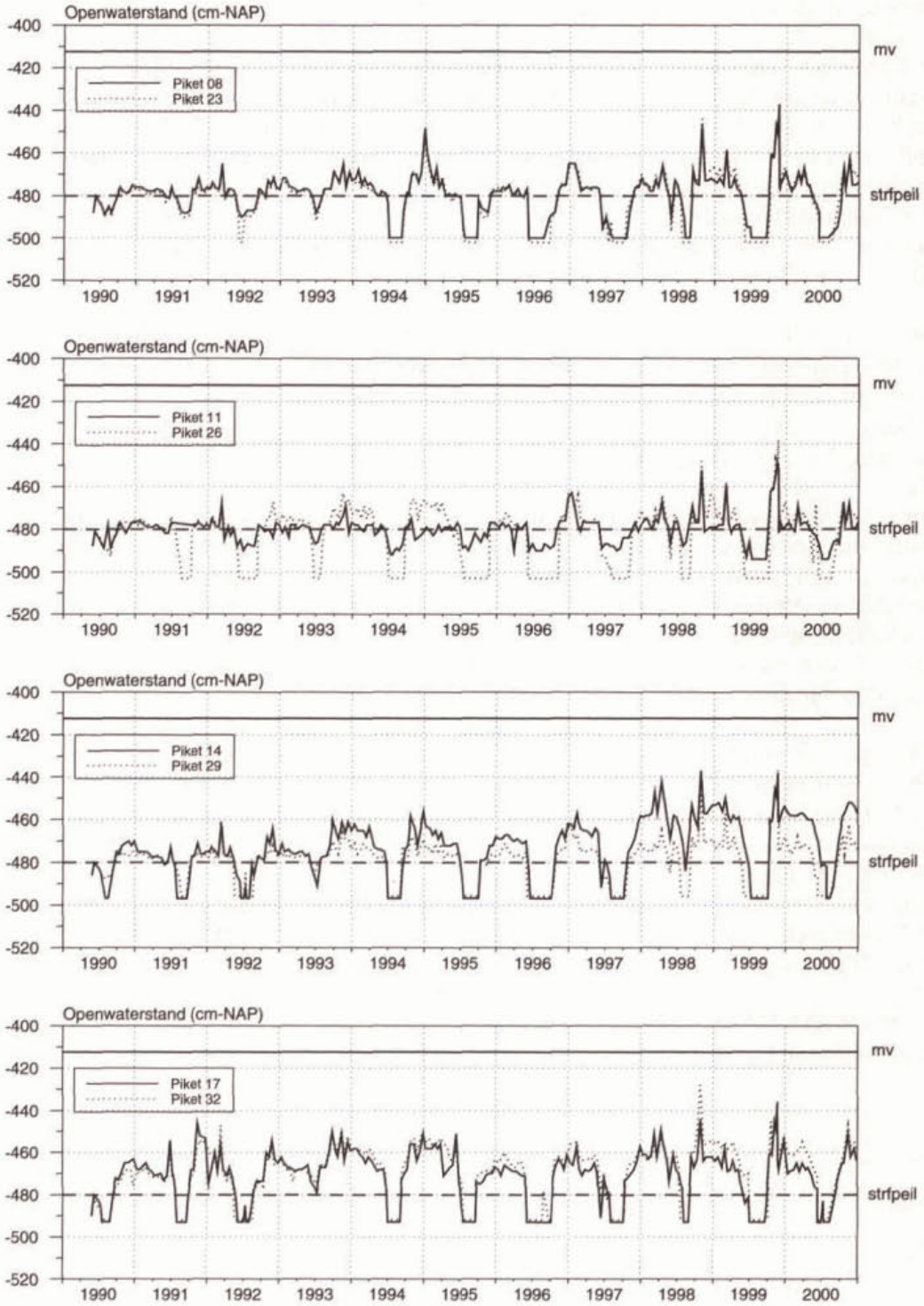
Verdere waarnemingen van openwaterstanden in de onderhouden watergangen zijn er niet. Gezien het jaarlijks uitgevoerde onderhoud is het aannemelijk dat het verloop in grote lijnen overeenkomt met het patroon volgens figuur 8.1a, afgezien van gradiënten die samenhangen met de stroming van water wanneer bemaling plaatsvindt.

Het verloop van de openwaterstanden in de *niet* onderhouden sloten is voor de afzonderlijke piketten verwerkt in figuur 8.2, waarbij steeds de gegevens van de twee piketten, die in één en dezelfde *niet* onderhouden sloot zijn geplaatst, in dezelfde deelfiguur zijn verwerkt (zie ook figuur 2.2). Figuur 8.1b geeft die openwaterstanden in gecomprimeerde vorm weer: in de figuur is naast het verloop van de gemiddelde openwaterstand voor de acht piketten óók het verloop van de extremen weergegeven. Het gaat dan om de twee piketten waar op de peildatums de hoogste resp. laagste openwaterstand zijn waargenomen.

Figuur 8.1b en figuur 8.2 illustreren voor zover het de *niet* onderhouden sloten betreft de volgende aspecten:

- de seizoensinvloed op het verloop van de openwaterstanden is evident; in de herfst-winterperiode liggen de openwaterstanden systematisch boven streefpeil, in de zomerperioden er onder;
- het verloop van de openwaterstanden in de herfst-winterperiode wordt bepaald door de hoeveelheden neerslag en de neerslagverdeling; daardoor is het verloop onregelmatig en ook van jaar tot jaar verschillend;
- voor een juiste interpretatie van het verloop van de waterstanden in het zomerhalfjaar moet voor ogen worden gehouden dat elk jaar periodes zijn voorgekomen waarin de *niet* onderhouden sloten droog vallen en waarvoor dus waarnemingen ontbreken; voor die periodes verloopt de openwaterstand in figuur 8.2 horizontaal, op een niveau dat samenvalt met dat van de onderzijde van de duiker waarnaast de desbetreffende piket is geplaatst;

- uit het verloop van de openwaterstanden in de zomerperiode blijkt dat de *niet* onderhouden sloten ter plaatse van de piketten 14, 17, 26, 29 en 32 vanaf 1991 elk jaar of vrijwel elk jaar gedurende kortere of langere tijd zijn droogvallen;
- ter plaatse van de piketten 08 en 23 komen pas vanaf 1994 perioden voor waarin de desbetreffende sloot droogvalt en bij piket 11 pas vanaf 1999.



Figuur 8.2 Verloop van de openwaterstand bij de piketten in de niet onderhouden sloten (figuur 2.2)

Het verloop van de waterstanden in de *niet* onderhouden sloten wordt uiteraard beïnvloed door de extra stomingsweerstand als gevolg van de slootvegetatie en de geleidelijke ophoping van plantenresten op de slootbodem en het sloottalud. Daarnaast spelen ook de duikers die bij de inrichting van het proefgebied zijn gelegd een rol. In september 1999 zijn de acht duikers (diameter 40 cm) bij de piketten geïnspecteerd. Daarbij bleek dat ze deels met grond waren gevuld. Gedeeltelijke verstopping van duikers verklaart zowel het droogvallen van sloten in de zomerperiode als de verhoogde waterstanden in de winterperiode.

Tabel 8.1 geeft een volledig overzicht van het droogvallen van de *niet* onderhouden sloten, uitgewerkt als het quotiënt van het aantal waarnemingsdatums per jaar waarbij de sloot droog stond en het totale aantal waarnemingsdatums (maandelijks op of omstreeks de 14^{e} en de 28^{e}, dus in principe 24 waarnemingen per jaar). Figuur 8.2 en tabel 8.1 laten zien dat er enige samenhang is tussen de afstand van de piketten tot het waterinlaatpunt en het droogvallen van de sloten. Gemiddeld over de gehele periode 1991-2000 staan de sloten bij piketten 23, 26, 29 en 32 (de vier verst van het inlaatpunt liggende piketten) langer droog dan bij de overige vier piketten.

Een geleidelijk verloop van het verlanden van sloten en het verstopt raken van duikers over de periode 1990-2000 zou in figuur 8.2 tot uiting moeten komen in:
- een toename van de duur van de zomerperiode waarin de sloot droog staat;
- een toename van de duur van de winterperiode met waterstanden boven streefpeil, met bovendien grotere afwijkingen ten opzichte van streefpeil.

In figuur 8.2 zijn deze tendensen voor sommige piketten (08, 23) wel enigszins zichtbaar maar voor andere piketten niet of nauwelijks (17, 32). Daarbij moet voor ogen gehouden worden dat de afwijkingen van streefpeil niet alleen bepaald worden door het verlanden van sloten en het verstopt raken van duikers, maar ook door de hoeveelheden neerslag en de verdeling daarvan. In dit verband wordt verwezen naar tabel 7.2: met name de laatste drie jaren worden gekenmerkt door hoeveelheden neerslag die duidelijk boven het gemiddelde niveau voor de gehele periode 1991 t/m 2000 liggen.

Uit het voorgaande wordt geconcludeerd dat de *niet* onderhouden sloten nog steeds een rol spelen bij de ontwatering, de afwatering en het bergen van water in perioden met een neerslag-overschot. Het gedeeltelijk verstopt raken van de duikers heeft wel tot gevolg dat de ontwatering naar en de afwatering via die sloten vertraagd verloopt. In perioden met een verdampings-overschot en dalende grondwaterstanden vindt infiltratie plaats. Daardoor dalen openwater-standen en komt de inlaat van water op gang. In die situatie is het dichtgroeien van sloten en het gedeeltelijk verstopt raken van duikers een beperkende factor. De desbetreffende sloten vallen dan op den duur droog waardoor de infiltratie vanuit die sloten wegvalt.

Het inlaten van water blijft dan beperkt tot wat nodig is voor peilhandhaving in het *wel* onderhouden gedeelte van het slotenstelsel.

Tabel 8.1 Quotiënt van het aantal waarnemingsdatums waarop de niet onderhouden sloten ter plaatse van de desbetreffende piketten droog stonden en het maximum aantal waarnemingen (in principe 24 per jaar, in 1990 echter maar 15), voor de jaren 1990 t/m 2000

Jaar	Piketnummer (zie figuur 2.2 voor de locatie van de piketten)								
	08	11	14	17	23	26	29	32	Gemidd.
	Quotiënt van aantal waarnemingen bij droge sloot en maximale aantal waarnemingen								
1990	0,00	0,00	0,17	0,13	0,00	0,00	0,00	0,13	0,04
1991	0,00	0,27	0,14	0,18	0,00	0,14	0,09	0,14	0,12
1992	0,00	0,00	0,08	0,17	0,04	0,25	0,21	0,25	0,12
1993	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,02
1994	0,17	0,00	0,17	0,17	0,17	0,21	0,17	0,17	0,15
1995	0,17	0,00	0,21	0,17	0,17	0,33	0,21	0,17	0,18
1996	0,21	0,00	0,29	0,33	0,29	0,42	0,33	0,25	0,27
1997	0,17	0,00	0,17	0,17	0,17	0,21	0,17	0,17	0,15
1998	0,08	0,04	0,04	0,08	0,12	0,12	0,12	0,12	0,09
1999	0,11	0,17	0,21	0,21	0,29	0,33	0,33	0,25	0,25
2000	0,21	0,12	0,04	0,17	0,29	0,33	0,29	0,25	0,21
Gemidd.	0,11	0,06	0,13	0,16	0,15	0,24	0,19	0,18	0,16

Voor het proefgebied als geheel leidt het gedeeltelijk achterwege blijven van slootonderhoud voor de zomerperiode tot een beperking van de waterinlaat, tot een sterkere uitdroging van het bodemprofiel en tot diepere grondwaterstanden. Voor de winterperioden zijn juist nattere omstandigheden te verwachten, vooral in termen van hogere grondwaterstanden. Dat laatste wordt verder in de hand gewerkt doordat ook greppelonderhoud geheel achterwege blijft.

8.2 Verloop van grondwaterstanden

Metingen van grondwaterstanden vinden plaats nabij het gemaal (met druknemer, elk uur automatische registratie: par. 4.1) en ter plaatse van de peilbuizen die in figuur 2.2 zijn aangegeven (waarneming op of omstreeks de 14^{e} en 28^{e} van elke maand: par. 4.2.3). De aandacht blijft hier beperkt tot de waarnemingen voor de peilbuizen van groep 01, dat wil zeggen tot de 25 peilbuizen met een filter op 140 tot 240 cm-maaiveld (figuren 4.1 en 4.2).

Aan de hand van de volledige reeks van waargenomen grondwaterstanden is voor elke buis de gemiddeld hoogste (GHG) en laagste (GLG) grondwaterstand berekend. Het resultaat is opgenomen in tabel 8.2, met rangschikking van de buizen volgens verschillende criteria.

De codes voor de grondwatertrappen komen overeen met de indeling volgens de zogenoemde standaardpuntencode (Ten Cate *et al.* ,1995).

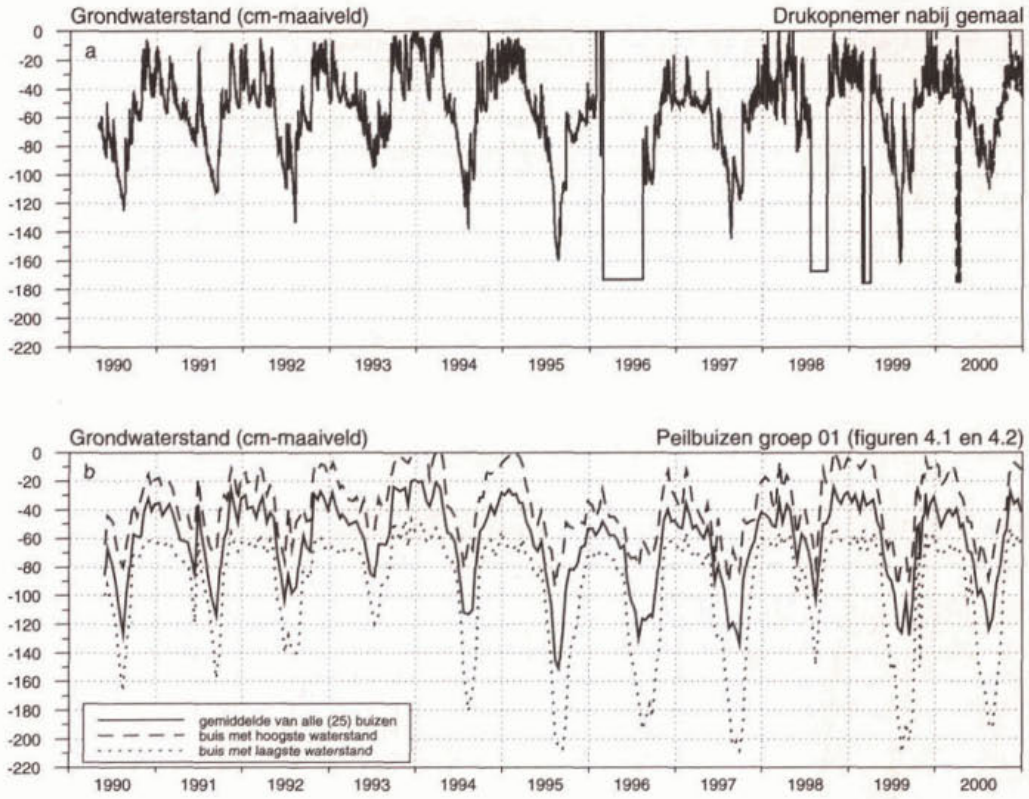
Tabel 8.2 Gemiddeld hoogste (GHG) en laagste (GLG) grondwaterstand en corresponderende grondwatertrap (Gt) voor de 25 peilbuizen van groep 01 (figuren 2.2, 4.1 en 4.2), gesorteerd op buisnummer (links), op GHG (midden) en op GLG (rechts)

Buis	GHG (cm-maaiveld)	GLG	Gt	Buis	GHG (cm-maaiveld)	GLG	Gt	Buis	GHG (cm-maaiveld)	GLG	Gt
01	21,4	105,2	IIIa	06	12,1	101,7	IIIa	21	24,0	72,8	IIa
02	16,9	101,5	IIIa	22	12,7	121,9	Va	20	22,6	83,5	IIIa
03	44,2	110,7	IVu	24	16,8	134,5	Va	33	18,4	85,5	IIIa
04	31,0	98,0	IIIb	02	16,9	101,5	IIIa	04	31,0	98,0	IIIb
05	23,5	103,7	IIIa	07A	18,4	110,0	IIIa	19	33,8	98,5	IIIb
06	12,1	101,7	IIIa	33	18,4	85,5	IIIa	02	16,9	101,5	IIIa
07A	18,4	110,0	IIIa	09	18,9	108,5	IIIa	06	12,1	101,7	IIIa
09	18,9	108,5	IIIa	10A	19,5	119,5	IIIa	30	40,1	103,3	IVu
10A	19,5	119,5	IIIa	13	21,2	112,0	IIIa	05	23,5	103,7	IIIa
12	26,3	123,8	Vb	01	21,4	105,2	IIIa	31	48,4	104,9	IVu
13	21,2	112,0	IIIa	20	22,6	83,5	IIIa	01	21,4	105,2	IIIa
15	51,4	124,5	VI	05	23,5	103,7	IIIa	18	37,7	107,3	IIIb
16A	51,0	130,3	VI	21	24,0	72,8	IIa	09	18,9	108,5	IIIa
18	37,7	107,3	IIIb	12	26,3	123,8	Vb	07A	18,4	110,0	IIIa
19	33,8	98,5	IIIb	04	31,0	98,0	IIIb	03	44,2	110,7	IVu
20	22,6	83,5	IIIa	27	33,4	137,0	Vb	13	21,2	112,0	IIIa
21	24,0	72,8	IIa	19	33,8	98,5	IIIb	28	42,8	115,9	IVu
22	12,7	121,9	Va	25A	37,4	158,7	Vb	10A	19,5	119,5	IIIa
24	16,8	134,5	Va	18	37,7	107,3	IIIb	22	12,7	121,9	Va
25A	37,4	158,7	Vb	30	40,1	103,3	IVu	12	26,3	123,8	Vb
27	33,4	137,0	Vb	28	42,8	115,9	IVu	15	51,4	124,5	VI
28	42,8	115,9	IVu	03	44,2	110,7	IVu	16A	51,0	130,3	VI
30	40,1	103,3	IVu	31	48,4	104,9	IVu	24	16,8	134,5	Va
31	48,4	104,9	IVu	16A	51,0	130,3	VI	27	33,4	137,0	Vb
33	18,4	85,5	IIIa	15	51,4	124,5	VI	25A	37,4	158,7	Vb
Gem	28,9	110,9	IIIb	(gemiddelde voor alle buizen)							
Druk	17	124	Va	(buis met drukopnemer nabij gemaal)							

Figuur 8.3a geeft het verloop van de grondwaterstand nabij het gemaal. Omdat alle uurwaarnemingen in de figuur zijn verwerkt komt de dynamiek van het verloop goed tot uiting. Figuur 8.3b heeft betrekking op de peilbuizen. Naast het verloop van het gemiddelde voor de 25 buizen zijn óók de hoogste en laagste waterstanden in de figuur verwerkt. Het gaat daarbij evenals bij de piketten om de hoogste en laagste waterstand per waarnemingsdatum waarbij geldt dat die uitersten niet steeds op dezelfde buizen betrekking hebben. Zo zijn er in de periode vanaf 1990 t/m 2000 in totaal 255 waarnemingsdatums geweest. De hoogste grondwaterstand is daarbij als volgt waargenomen:

- 64 keer in buis 22;
- 59 keer in buis 21;
- 30 keer in buis 20;
- 26 keer in buis 33;
- 23 keer in buis 06;
- 20 keer in buis 09;

en verder in buis 02 (11 keer), buis 10A (8), buis 24 (5), buis 13 (4) en in de buizen 01, 12, 27, 28 en 30 (1). In totaal hebben zo 15 van de 25 buizen tot het verloop van de hoogste grondwaterstand bijgedragen.



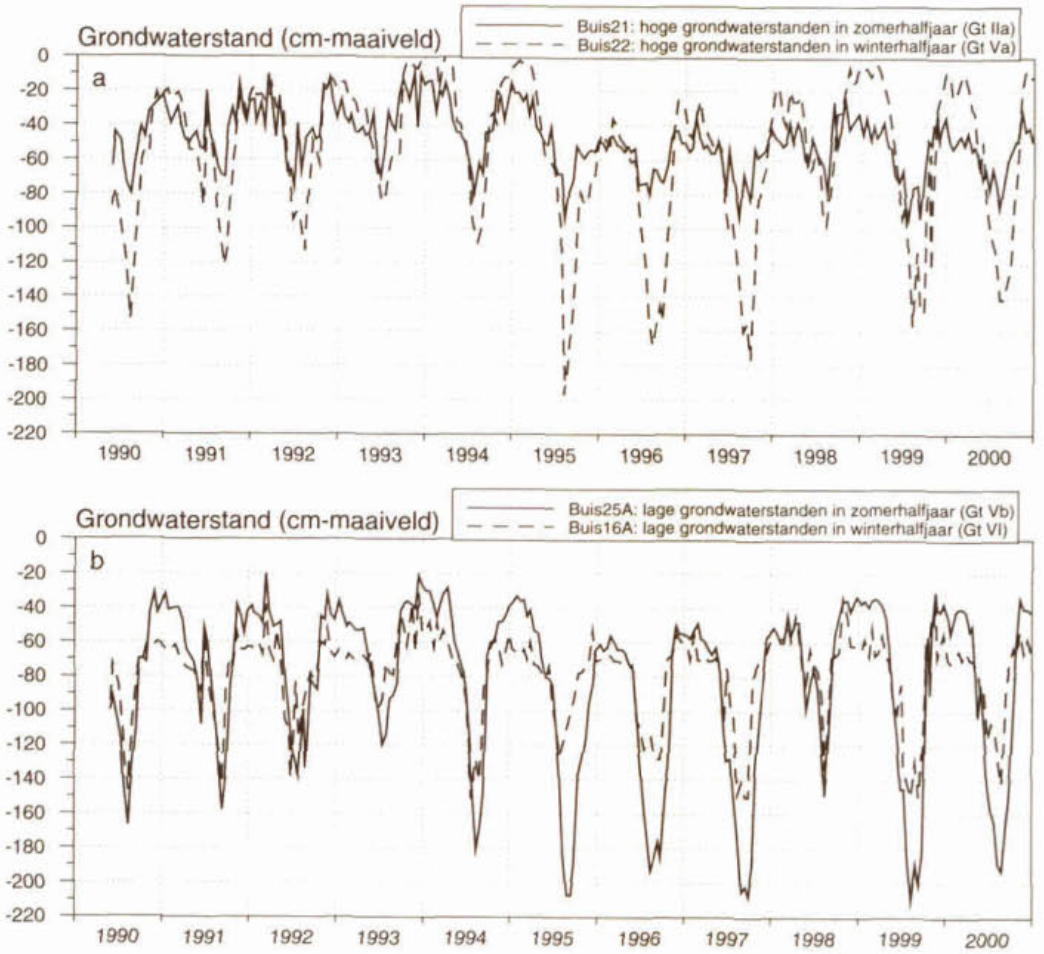
Figuur 8.3 Verloop van de grondwaterstand nabij het gemaal en voor de peilbuizen van groep 01

Een zelfde telling voor de laagste grondwaterstand geeft als resultaat:
- 102 keer in buis 16A;
- 74 keer in buis 25A;
- 22 keer in buis 15;
- 14 keer in buis 31;
- 14 keer in buis 04;

en verder in buis 10A (10 keer), buis 28 (5), buis 30 (4), buizen 3 en 12 (2) en de buizen 01, 05, 22, 24, 27 en 33 (1). Hier gaat het om bijdragen van 16 van de 25 buizen.

Samenvattend blijkt dat de hoogste waterstand meestal is waargenomen in de buizen 21 en 22 die beide blijkens figuur 2.2 tegen de buitenrand van het proefgebied staan, maar aan tegenovergestelde zijden. De laagste waterstand heeft meestal betrekking op de buizen 16A en buis 25A, beide met een meer centrale positie binnen het proefgebied.

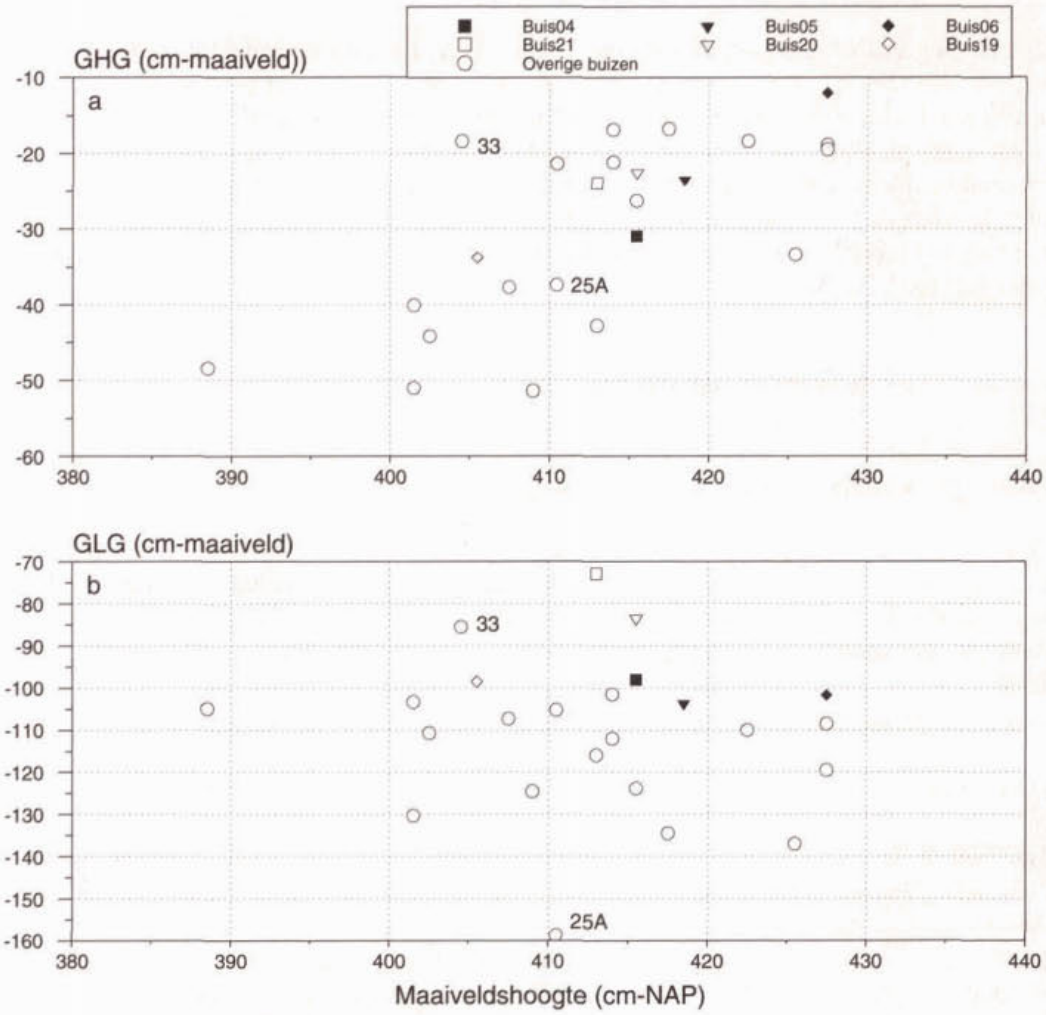
In figuur 8.4 is de volledige reeks waarnemingen voor deze vier buizen verwerkt. Uit figuur 8.4a blijkt dat de hoge grondwaterstanden voor buis 21 betrekking hebben op de zomerperioden en voor buis 22 juist op de winterperioden. Zo komt de grondwatertrap voor buis 21 uit op Gt IIa (GHG<25 cm-mv, 50<GLG<80 cm-mv) en voor buis 22 op Gt Va (GHG<25 cm-mv, GLG>120 cm-mv). Evenzo blijkt uit figuur 8.4b dat de lage grondwaterstanden voor buis 25A betrekking hebben op de zomerperiode maar voor buis 16A juist op de winterperiode. Dit leidt tot Gt Vb (25<GHG<40 cm-mv, GLG>120 cm-mv) voor buis 25A en tot Gt VI (40<GHG<80 cm-mv, GLG>120 cm-mv) voor buis 16A.



Figuur 8.4 Verloop van de grondwaterstand voor de peilbuizen 21 en 22 met hoge grondwaterstanden (a) en voor de peilbuizen 25A en 16A met lage grondwaterstanden (b)

Tabel 8.2 bevestigt dat de hydrologische omstandigheden binnen het proefgebied behoorlijk uiteenlopen. Het grondwaterregiem wordt door een aantal factoren beïnvloed:

- de drooglegging, dat wil zeggen de maaiveldshoogte in relatie tot het streefpeil;
- de ontwateringstoestand (afstand van buizen tot sloten, functioneren van greppels);
- de infiltratieweerstand;
- de kwel en verdamping.



Figuur 8.5 Relatie tussen de maaiveldshoogte en de GHG (a) resp. de GLG (b) voor de 25 grondwaterstandsbuizen behorend tot groep 01 (figuur 2.2, figuur 4.1)

De verschillen in maaiveldshoogte binnen het proefgebied zijn weliswaar beperkt tot minder dan 30 cm (par. 2.2.1) maar daarmee toch duidelijk van invloed op met name de GHG's, zoals blijkt uit figuur 8.5a. De buizen 04, 05 en 06 en de buizen 21, 20 en 19 hebben een afwijkende positie ten opzichte van de dichtstbijzijnde sloot en daarom zijn de GHG's en GLG's voor deze buizen in figuur 8.5 apart aangegeven. Die aparte positie komt met name tot uiting in de GLG's voor de buizen 21 en 20. Blijkens figuur 2.2 staan deze twee buizen tegen de no-grens van het proefgebied, nabij de randsloot met een streefpeil van 460 cm-NAP (tegenover het streefpeil van 480 cm-NAP *binnen* het proefgebied). Zowel de beperkte afstand tot de randsloot als het hogere niveau van het streefpeil in die sloot leiden tot een naar verhouding grote infiltratie waardoor het dalen van de grondwaterstand in het zomerhalfjaar wordt beperkt. De buizen 04 en 05 hebben een vergelijkbare positie als het gaat om de afstand tot de andere randsloot, in dit geval met een streefpeil van 505 cm-NAP. De infiltratie vanuit die randsloot blijft daardoor beperkt waardoor de grondwaterstanden in het zomerhalfjaar sterker dalen.

Voor de overige buizen met uitzondering van de buizen 25A en 33 liggen de GLG's tussen 100 en 140 cm-mv. De onderlinge verschillen moeten samenhangen met verschillen in infiltratieweerstanden, verdampingsniveaus en kwelintensiteiten.

Tot slot wordt nogmaals benadrukt dat de peilbuizen, enkele uitzonderingen daargelaten, halverwege tussen twee greppels staan. De grondwaterstanden voor de peilbuizen, gemeten ten opzichte van maaiveld, geven dan ook geen goed beeld van de 'gemiddelde' situatie binnen het proefgebied. Lage plekken binnen het proefgebied kennen in de winter lange perioden met een plas-drassituatie, elders staat regelmatig water in de greppels als gevolg van de beperkte afwatering. Dat laatste hangt samen met het achterwege blijven van greppelonderhoud en het blokkeren van de greppeluiteinden als gevolg van het uitgraven (verbreden) van een deel van het slotenstelsel (par. 2.2.3).

8.3 Analyse van de neerslag- en afvoergegevens

8.3.1 K-daagse afvoersommen

Deze paragraaf betreft een analyse van de afvoer via het gemaal, in samenhang met de neerslag. Het gaat om de volgende gegevens op dagbasis over de gehele periode 1991 t/m 2000:
- de afvoer als gemeten met de electromagnetische debietmeter, zonder correcties voor randeffecten;
- het gemiddelde van de neerslag volgens de KNMI-stations Edam en Purmerend.

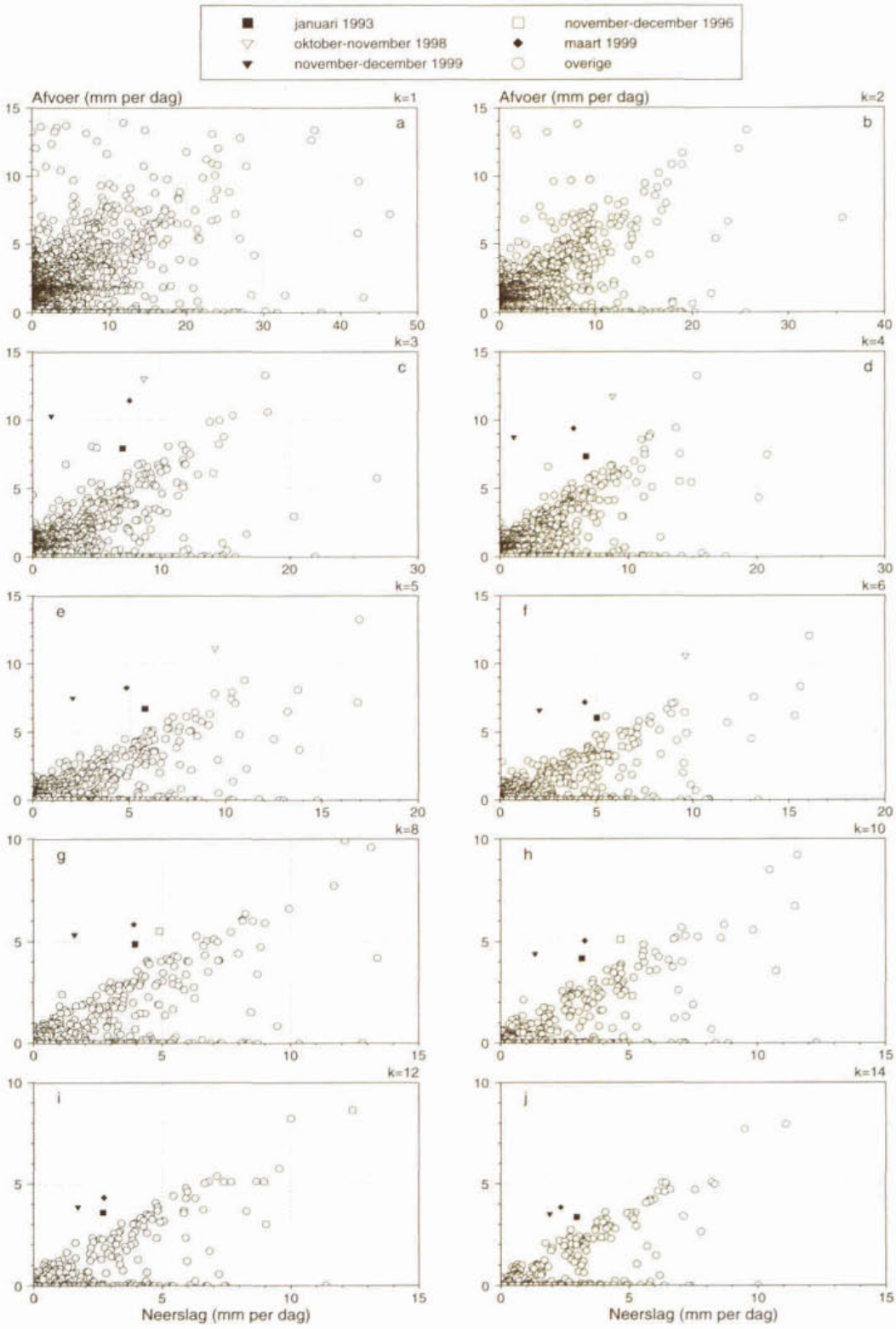
In eerste instantie is hierbij uitgegaan van de niet gecorrigeerde afvoergegevens.

De analyse betreft de zogenoemde k-daagse afvoer- en neerslagsommen en is uitgevoerd voor k = 1, 2, 3,…,14. De procedure is hier beschreven voor de vierdaagse perioden, dus voor k = 4, en omvat de volgende stappen:
- het berekenen van een doorlopende reeks van vierdaagse afvoer- en neerslagsommen over de gehele periode 1991 t/m 2000, gevolgd door het berekenen van de gemiddelden op dagbasis (voor k = 4 betreft de eerste som dus de periode van 1 t/m 4 januari 1991, de tweede som de periode van 2 t/m 5 januari 1991 en de laatste som die van 28 t/m 31 december 2000);
- het sorteren van de reeks van vierdaagse sommen op basis van de afvoersommen, waarbij de neerslagsommen en data in het sorteren meelopen: het resultaat van deze bewerking is opgenomen in de drie linker kolommen van tabel 8.3 (betreft het begin van de totale reeks, met de hoogste afvoersommen);
- het elimineren van regels die betrekking hebben op overlappingen in de gesorteerde afvoerreeks, op basis van het vergelijken van datums: het resultaat is opgenomen in de drie rechter kolommen van tabel 8.3.

Tabel 8.3 Voorbeeld van de analyse van afvoer- en neerslagsommem voor het Purmerbos proefgebied over de periode 1991 t/m 2000, in dit geval voor vierdaagdse perioden; afvoer en neerslag zijn gemiddelden per dag voor elke vierdaagse periode

Gesorteerd op afvoer		
Datum	Afvoer (mm/d)	Neerslag (mm/d)
13-11-00	13,28	13,97
12-11-00	13,26	22,30
02-11-98	11,76	9,82
11-11-00	11,42	25,09
01-11-98	11,33	7,70
14-11-00	11,15	3,07
03-11-98	10,43	9,58
31-10-98	10,23	10,56
02-11-94	9,41	12,52
06-03-99	9,37	1,93
01-11-94	9,17	14,90
04-11-98	8,98	9,92
28-12-99	8,94	8,88
25-11-99	8,76	2,06
30-12-94	8,74	14,25
31-10-94	8,64	15,99
05-03-99	8,60	5,67
09-03-98	8,55	10,84
27-12-99	8,55	12,52
08-03-98	8,50	13,25
10-11-00	8,41	24,92
15-11-00	8,40	2,79
26-11-99	8,36	1,34
07-03-99	8,20	2,27
03-11-94	8,16	3,58
30-10-98	8,03	16,76
14-12-99	7,81	12,89
29-12-94	7,77	15,18
10-03-98	7,75	4,59
24-11-99	7,74	0,95
21-11-90	7,69	6,41
15-12-99	7,63	7,47
18-09-98	7,50	4,79
27-10-92	7,46	10,80
28-10-98	7,43	15,29
07-03-98	7,42	14,19
31-12-94	7,41	6,51
26-10-92	7,38	12,19
12-01-93	7,33	6,51
30-10-94	7,31	16,06
29-10-98	7,16	14,84
05-11-98	7,12	9,23
26-12-99	7,06	12,13
11-01-93	7,03	6,38
28-10-92	7,00	7,76
16-12-98	6,96	6,26
29-12-99	6,91	6,76
20-11-90	6,76	11,61

Gesorteerd op afvoer, periode-overlappeningen verwijderd		
Datum	Afvoer (mm/d)	Neerslag (mm/d)
13-11-00	13,28	13,97
02-11-98	11,76	9,82
02-11-94	9,41	12,52
06-03-99	9,37	1,93
28-12-99	8,94	8,88
25-11-99	8,76	2,06
30-12-94	8,74	14,25
09-03-98	8,55	10,84
14-12-99	7,81	12,89
18-09-98	7,50	4,79
27-10-92	7,46	10,80
28-10-98	7,43	15,29
12-01-93	7,33	6,51
16-12-98	6,96	6,26



Figuur 8.6 Relatie tussen de k-daagse neerslag- en afvoersommen voor het Purmerbos proefgebied, uitgewerkt voor de periode 1991 t/m 2000

De eerste datum in de gesorteerde reeks betreft 13 november 2000. Daar het hier vierdaagse sommen betreft houdt het elimineren van overlappingen in dat de regels met gegevens voor zowel 10, 11 en 12 november als die voor 14, 15 en 16 november 2000 worden geëlimineerd. De volgende datum die wel weer meedoet is 2 november 1998, waarna de regels met gegevens voor 30 en 31 oktober en die voor 1, 3, 4 en 5 november 1998 worden geëlimineerd, enz.

Zoals eerder aangegeven is de procedure uitgevoerd voor k = 1, 2, ...,14. Voor k=1 komt dat neer op een analyse van de afvoer- en neerslaggegevens per dag voor de gehele periode van 1991 t/m 2000: overlappingen spelen dan geen rol en het desbetreffende eindresultaat omvat in totaal 3653 regels (tien keer 365 dagen plus drie extra dagen vanwege de schrikkeljaren 1992, 1996 en 2000).

Resultaten zijn verwerkt in figuur 8.6. voor k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12 en 14 dagen. Bij het vergelijken van de deelfiguren blijkt het volgende:
- de correlatie tussen afvoer- en neerslagsommen neemt toe naarmate de duur van de periode langer is;
- voor elke periodeduur komt een aanzijnlijk aantal situaties voor met neerslag van betekenis maar zonder afvoer: het gaat dan om situaties in het zomerhalfjaar waarbij alle neerslag in het bodemprofiel kan worden geborgen;
- voor de perioden van kortere duur komen veel situaties voor met afvoer van betekenis zonder of bij maar een minimale neerslag: dat heeft te maken met het ontwaterings- en afwateringsproces, er toe leidend dat de afvoer op de neerslag achterloopt;
- naarmate de periodeduur toeneemt tekent zich een 'plafond' af, gevormd door een denkbeldige rechte lijn onder een hellingshoek van iets minder dan 45^0; het snijpunt van die lijn met de Y-as komt dichter bij de oorsprong te liggen naarmate k toeneemt.

Het meest extreme voorbeeld van een situatie met veel neerslag maar zonder enige afvoer betreft de gemiddelde neerslag van 10 mm per dag voor k = 14 (figuur 8.6j) Het gaat dus om 140 mm neerslag in twee weken, zonder dat dit tot afvoer leidt. Het betreft de 14-daagse periode eindigend op 6 oktober 1999: deze situatie heeft te maken met het bewust buiten werking stellen van het gemaal en is dus een abnormale situatie waarop in par. 8.4.8 wordt teruggekomen.

Andere minder extreme situaties voor k = 14 met naar verhouding veel neerslag en geen afvoer hebben zich voorgedaan in de eerste helft van oktober 1997 (periode van 1 t/m 14 oktober 1997, met een neerslag van gemiddeld 7,4 mm per dag, dus 103 mm totaal) en in de tweede en derde week van augustus 1999 (periode eindigend op 21 augustus 1999, met een gemiddelde neerslag van 7,3 mm per dag, dus 102 mm totaal). Blijkens aanhangsel 1 ging het hierbij om situaties waarin alle neerslag in het aanvankelijk sterk uitgedroogde bodemprofiel is geborgen en waarin een duidelijke stijging van de grondwaterstand gedurende de desbetreffende veertiendaagse periode plaatsvond.

Opvallend in figuur 8.6 zijn verder de enkele punten die boven het niveau van het eerder-genoemde 'plafond' liggen. Voor $k \geq 5$ gaat het om drie tot vijf punten die steeds op dezelfde perioden betrekking blijken te hebben:
- perioden vallend in januari 1993;
- periode vallend in november-december 1996;
- periode vallend in oktober-november 1998;
- periode vallend in maart 1999;
- periode vallend in november-december 1999.

Voor deze perioden gelden de volgende bijzonderheden:

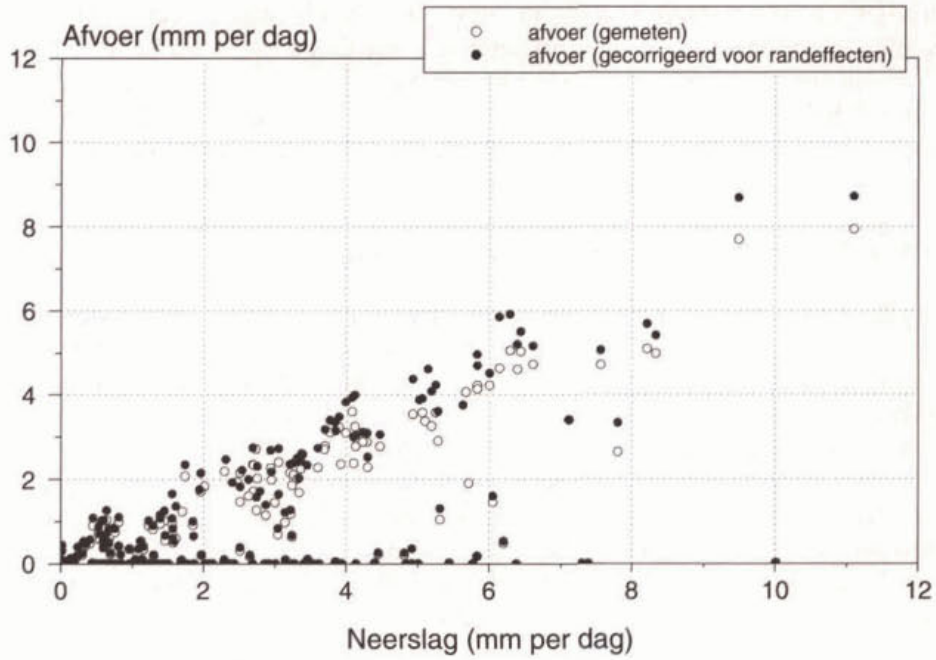
- januari 1993: het gaat om k-daagse perioden die beginnen op 8 januari, bij invallende dooi aan het einde van een vorstperiode waarin het gemaal was uitgeschakeld zodat een achterstand in bemaling was ontstaan (zie verder par. 8.4.2);
- november-december 1996: het gaat om k-daagse perioden beginnend op 25 november, waarbij op de voorafgaande twee dagen ca. 25 mm regen was gevallen maar het gemaal uitviel door verontreiniging van het krooshek;
- oktober-november 1998: het gaat om k-daagse perioden beginnend op 30 oktober, nadat op 28 oktober 45 mm neerslag was gevallen, met een duidelijke stijging van openwaterstanden tot boven streefpeil (zie verder par. 8.4.7);
- maart 1999: het gaat om k-daagse perioden beginnend op 3 maart; in de periode van 1 t/m 3 maart is in totaal 45 mm neerslag gevallen, maar het gemaal is pas op 3 maart in bedrijf gekomen na eerder te zijn uitgevallen, mogelijk ten gevolge van krooshekverontreiniging (zekerheid daarover is er niet omdat de apparatuur voor het registreren van waterstanden tijdelijk defect was);
- november-december 1999: het gaat om k-daagse perioden beginnend op 22 november; op die dag eindigt een periode van anderhalve maand waarin het gemaal bewust buiten bedrijf was gesteld en waarin dientengevolge de openwaterstand binnen het proefgebied was gestegen tot ca. 40 cm boven streefpeil (zie verder par. 8.4.8).

Uit bovenstaande korte karakterisering van de perioden blijkt dat het bijna steeds niet normale omstandigheden betrof: verontreiniging van het krooshek, vorst of het bewust buiten bedrijf stellen van het gemaal. Onder normale omstandigheden liggen de afvoersommen dus allemaal op of onder het 'plafond'-niveau.

Dan resteert nog de vraag naar de betekenis van het 'plafond' in de neerslag-afvoerrelatie. Om daar nader licht op te werpen is het noodzakelijk ook de wel voor randeffecten gecorrigeerde afvoersommen erbij te betrekken. In figuur 8.7 zijn de 14-daagse neerslag- en afvoersommen verwerkt, zowel voor de niet als voor de wel gecorrigeerde afvoersommen (voor de niet gecorrigeerde afvoersommen gaat het om dezelfde punten als in figuur 8.6j).

Uit de ligging van de punten voor de gecorrigeerde afvoersommen blijkt dat het 'plafond' 14-daagse perioden betreft waarin de neerslag- en afvoersommen bij benadering aan elkaar gelijk zijn. In termen van de waterbalans van het proefgebied betreft het perioden zonder inlaat van water (I = 0), waarvoor de balansvergelijking (relatie 7.1 in par. 7.1) geschreven kan worden als:

$$(N-A) = \Delta B-K+E_a \approx 0 \qquad (8.1)$$



Figuur 8.7 Relatie tussen de 14-daagse neerslag- en afvoersommen voor het Purmerbos proefgebied, uitgewerkt voor de periode 1991 t/m 2000, voor de gemeten afvoer resp. de gemeten afvoer na correctie voor randeffecten

Voor punten op het 'plafond'-niveau geldt dus dat de verandering in berging (ΔB), de kwel (K) en de verdamping (E_a) elkaar bij benadering in evenwicht houden. Omdat het om 14-daagse balansen gaat voor perioden met afvoer (dat wil zeggen om 14-daagse perioden in de najaars- of wintermaanden) zal de verandering van de berging van water in het bodemprofiel beperkt zijn, dus $\Delta B \approx 0$. Ook de verdamping (E_a) is in die maanden beperkt. In termen van de waterbalans is de interpretatie van het 'plafond'-niveau dus dat het om 14-daagse periodes gaat met een beperkte verandering in de waterberging en met weinig verdamping die in dezelfde orde van grootte ligt als de kwel. Deze interpretatie van het 'plafond'-niveau wordt ondersteund door de eerdere opmerkingen met betrekking tot de enkele afwijkende punten boven dat niveau: daarbij bleek dat in de desbetreffende perioden juist wel sprake was van een significante afname van de waterberging (dus $\Delta B < 0$).
De ligging van de punten beneden het 'plafond'-niveau is niet op eenzelfde éénduidige manier te interpreteren. Het gaat om perioden waarvoor de balansposten ΔB en E_a een grotere rol spelen maar verdergaande conclusies ten aanzien van de verhouding tussen de bergingsverandering (die primair op het bodemprofiel betrekking zal hebben) en de verdamping zijn daaraan niet te verbinden.

In aanvulling op de analyse van de relatie tussen neerslag- en afvoersommen is een telling uitgevoerd met betrekking tot het optreden van afvoersommen binnen bepaalde grenzen.
De telling heeft betrekking op alle afvoersommen die in figuur 8.6 zijn verwerkt, plus nog de afvoersommen voor k-waarden die niet in die figuur zijn verwerkt. Het resultaat is opgenomen in tabel 8.4. Gezien de gemaalcapaciteit geldt dat het gemaal continu of vrijwel continu in werking is bij een gemiddelde afvoer van 12 mm per dag of meer. Uit de tabel blijkt dan bijvoorbeeld dat er in de gehele periode 1991 t/m 2000 niet meer dan 16 ééndaagse perioden zijn voorgekomen waarin het gemaal continu heeft gedraaid, vijf tweedaagse periodes, twee driedaagse periodes, en één vierdaagse, één vijfdaagse en één zesdaagse periode.

Het uitwerken en tellen van afvoersommen zoals hier uitgevoerd zou in principe een goed bruikbare manier zijn om op basis van gemeten afvoeren te komen tot uitspraken over de gevolgen van het aanplanten van (loof)bos op grasland (of van andere ingrepen) in laaggelegen poldergebieden voor de belasting van polder- of boezemsystemen. Daartoe zouden dan wel vergelijkbare afvoergegevens, in dit geval dus voor het graslandgebied, noodzakelijk zijn.

8.3.2 Relatie tussen grondwaterstanden en afvoer via bemaling

In de voorgaande paragraaf is gekeken naar de afvoer in relatie tot de neerslag. De transformatie van neerslag in af te voeren hoeveelheden water verloopt via de processen van infiltratie/ oppervlakte-afstroming, van stroming via de onverzadigde zone naar het freatisch grondwater, van stroming via de verzadigde zone naar greppels en sloten en tenslotte van stroming via de sloten richting gemaal. Deze paragraaf betreft de samenhang tussen het verloop van de grondwaterstand en de afvoer via bemaling, dat wil zeggen het laatste deel van de keten van processen waarin de transformatie van neerslag tot afvoer plaatsvindt. Omdat dan dus voorbijgegaan wordt aan de eerste twee stappen (dat wil zeggen de infiltratie/afstroming en de stroming via de onverzadigde zone) is een meer eenduidige relatie tussen grondwaterstanden en afvoeren te verwachten dan tussen de neerslag en de afvoer het geval was.

Figuur 8.8 betreft de relaties tussen de grondwaterstand en de afvoer via bemaling, op dagbasis. De grondwaterstand betreft de metingen met de drukopnemer in de peilbuis nabij het gemaal, waarbij uit de waarnemingen op uurbasis de daggemiddelden zijn afgeleid. De verwerkte gegevens betreffen de maanden september t/m april. Het aantal punten in elke deelfiguur komt overeen met het aantal dagen waarop in die perioden van acht maanden daadwerkelijk afvoer heeft plaatsgevonden.

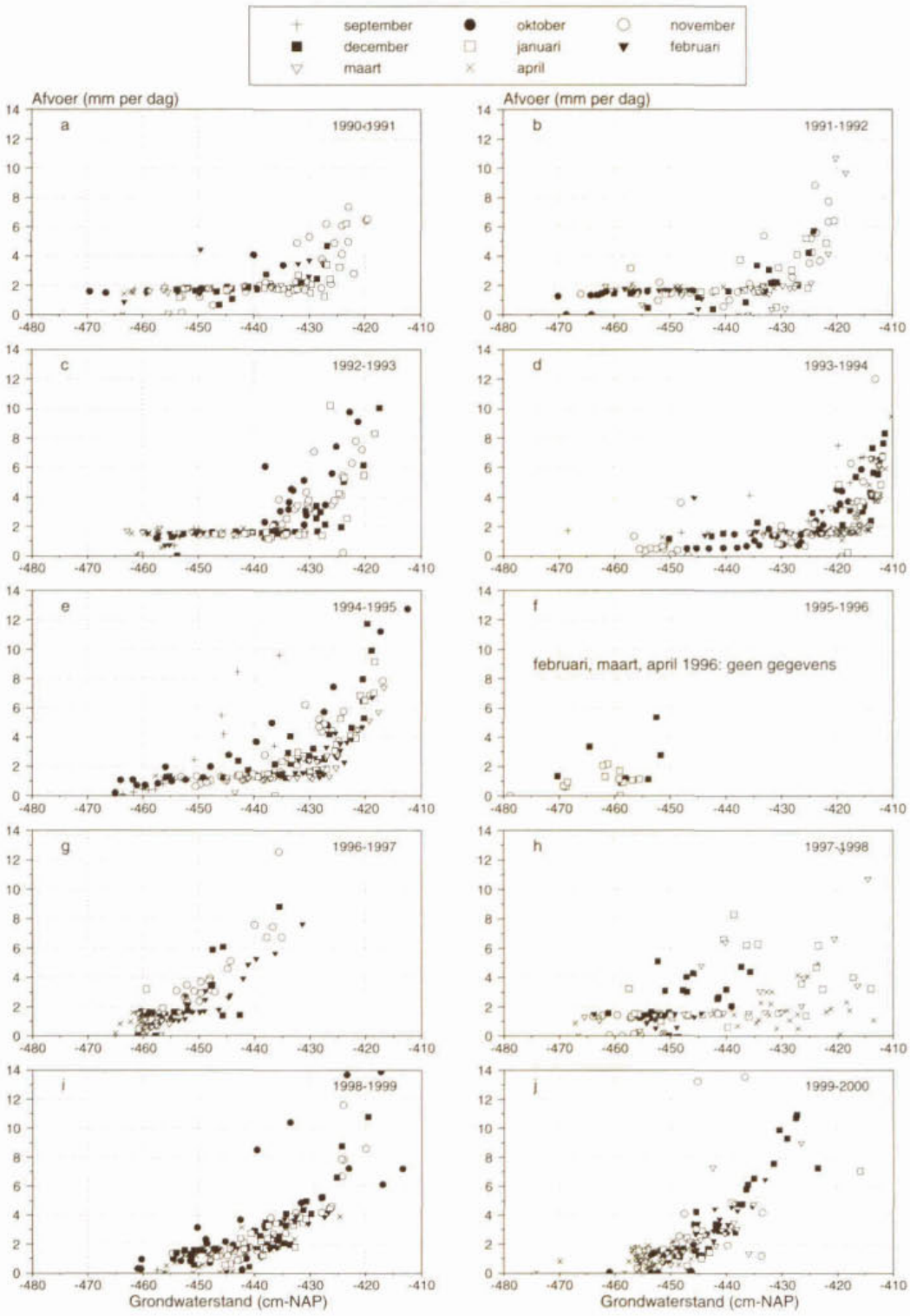
De figuur illustreert dat het aantal dagen met afvoer van jaar tot jaar sterk uiteen loopt. Zo blijft bijvoorbeeld het aantal dagen in de periode september 1995 t/m maart 1996 beperkt tot 58, met een totale afvoer van niet meer dan 83 mm (figuur 8.8f is misleidend omdat de drukopnemer tijdelijk defect was waardoor de punten voor de desbetreffende periode van drie maanden ontbreken). Daartegenover staat als andere uiterste de periode 1998-1999 met 211 dagen en een afvoer van 576 mm. Deze verschillen zijn direct terug te voeren tot verschillen in neerslag.

De relatie tussen de afvoer en de grondwaterstand is niet eenduidig. Dit komt bijvoorbeeld duidelijk tot uiting bij het vergelijken van de ligging van de punten in deelfiguur 8.8d en 8.8g. Voor de periode november t/m februari 1993-1994 is de totale afvoer 252 mm en vindt plaats op 90 dagen. Voor de periode 1996-1997 gaat het om 219 mm en 84 dagen. Voor de eerstgenoemde periode is het gemiddelde 2,8 mm per dag, voor de andere periode 2,6 mm. Wat het aantal dagen en de afvoer betreft zijn deze beide periodes dus niet zo erg verschillend. Anderzijds blijkt de afvoer in 1993-1994 bij duidelijk hogere grondwaterstanden te hebben plaatsgevonden dan in 1996-1997. In de eerstgenoemde periode was de gemiddelde grondwaterstand op de 90 dagen met afvoer 425 cm-NAP, in de laatsgenoemde periode 451 cm-NAP.

Tabel 8.4 Frekwentie (aantal keer) van voorkomen van k-daagse afvoeren via bemaling gedurende de periode 1991 t/m 2000; afvoeren (mm/d) betreffen het gemiddelde per dag voor de k-daagse perioden (k = 1, 2, ..., 14)

	Afvoeren als gemeten met electromagnetische debietmeter													
	Duur van de periode (dagen)													
Afvoer mm/d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
17-18	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16-17	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
15-16	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
14-15	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
13-14	10	4	2	1	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--
12-13	6	1	--	--	--	1	--	--	--	--	--	--	--	--
11-12	3	2	1	1	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--
10-11	8	3	3	--	--	1	1	--	--	--	--	--	--	--
9-10	9	6	2	2	--	--	1	2	2	1	1	--	--	--
8-9	13	4	5	4	3	1	--	--	--	1	1	2	2	--
7-8	27	12	5	5	6	4	2	1	1	--	--	--	--	2
6-7	40	24	18	9	6	8	6	5	1	1	1	1	0	0
5-6	45	21	16	16	13	8	10	8	9	10	7	9	3	3
4-5	85	38	29	24	15	15	16	17	13	9	9	10	10	9
3-4	143	57	37	34	33	30	24	16	18	19	20	17	17	14
2-3	158	112	68	48	43	38	31	28	30	29	24	24	22	26
1-2	638	202	149	103	82	63	43	47	39	30	28	28	29	20
0-1	303	321	216	186	141	124	120	106	92	84	79	65	68	68
0	2165	901	563	392	312	244	202	171	150	131	118	108	89	79
	3653	1708	1114	825	656	537	456	401	355	315	288	264	240	221
	totaal aantal (elkaar niet overlappende) perioden													

	Afvoeren na correctie voor randeffecten													
	Duur van de periode (dagen)													
Afvoer mm/d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
17-18	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
16-17	1	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
15-16	2	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
14-15	6	2	2	1	1	--	--	--	--	--	--	--	--	--
13-14	4	1	--	--	--	1	--	--	--	--	--	--	--	--
12-13	6	3	1	1	1	--	1	--	--	--	--	--	--	--
11-12	7	2	3	--	--	1	--	1	--	--	--	--	--	--
10-11	13	4	3	2	--	--	1	1	2	1	--	--	--	--
9-10	10	7	1	4	3	1	--	--	--	1	2	2	2	--
8-9	22	12	7	3	4	3	1	1	1	--	--	--	--	2
7-8	38	20	13	7	5	4	5	2	1	1	--	--	--	--
6-7	37	16	20	15	9	8	7	6	7	3	4	3	1	--
5-6	56	28	21	22	16	15	11	12	7	10	9	8	9	8
4-5	108	52	28	22	23	17	15	13	19	14	13	11	8	8
3-4	128	61	42	39	35	32	31	31	23	18	17	18	21	20
2-3	225	118	70	51	35	34	29	25	22	28	22	22	21	20
1-2	566	188	161	94	85	60	50	43	38	31	30	29	26	25
0-1	258	290	180	171	128	117	103	94	85	77	75	64	63	60
0	2165	901	562	392	312	244	202	171	150	132	117	107	89	78
	3653	1707	1114	824	657	537	456	400	355	316	289	264	240	221
	totaal aantal (elkaar niet overlappende) perioden													



Figuur 8.8 Relatie tussen de afvoer via bemaling (niet gecorrigeerd voor randeffecten) en de gemiddelde grondwaterstand op dagbasis, voor alle dagen met afvoer in de maanden september t/m april over de periode 1990-2000

Er is geen duidelijke verklaring voor de verschillen van jaar tot jaar in de afvoer-grondwaterstandsrelaties volgens figuur 8.8. Als de gehele periode vanaf 1990 wordt beschouwd is er geen duidelijke trend te onderkennen die bijvoorbeeld wijst op een geleidelijke verandering van drainageweerstanden. Voor een gegeven jaar is de spreiding van de punten deels te verklaren uit verontreiniging van het krooshek bij het gemaal. Als dat het geval is kan het gemaal tijdelijk uitvallen en is er dus ook geen relatie tussen grondwaterstand en afvoer.

Tenslotte moet ook voor ogen gehouden worden dat de grondwaterstandsgegevens betrekking hebben op één meetpunt nabij het gemaal. De afvoer daarentegen is een grootheid die betrekking heeft op de totale oppervlakte van het proefgebied (66 ha).

8.4 Analyse van situaties met verhoogde openwaterstanden

Een belangrijke vraag betreft de invloed van de bosaanleg en het beheer van het gebied op de waterhuishouding in meer extreem natte en droge situaties. Met het oog daarop is op basis van figuur 8.1a een negental periodes geselecteerd waarin duidelijk verhoogde openwaterstanden ten opzichte van streefpeil zijn voorgekomen. Deze negen periodes vallen in de jaren 1990, 1992-1993, 1994 (2x), 1996-1997, 1998 (2x), 1999 en 2000. De begin- en einddatum van de periodes zijn aan de hand van de grafieken van aanhangsel 1 bepaald.

Een nadere uitwerking voor de afzonderlijk periodes volgt in par. 8.4.1 t/m 8.4.9. De gegevens met betrekking tot het verloop van de waterstanden, de neerslag en de afvoer zijn voor elk van deze periodes op dezelfde manier verwerkt in de figuren 8.9 t/m 8.17. Deze figuren zijn opgenomen in aanhangsel 5 en als volgt opgebouwd uit vier deelfiguren:
a: de neerslag per uur (kantelbakregenmeter nabij het proefgebied, gecorrigeerd voor hoogtepositie van de meter);
b: de afvoer via bemaling per uur, *niet* gecorrigeerd voor randeffecten;
c: de cumulatieve neerslag en afvoer, volgens enerzijds de uurwaarnemingen en anderzijds de daggegevens van de KNMI-stations Edam en Purmerend;
d: het verloop van de openwaterstand bij het gemaal en de grondwaterstand nabij het gemaal, alsmede de waterstanden die betrekking hebben op de piketten in de *niet* onderhouden sloten.

Volgens tabel 6.2 is de gemaalcapaciteit 12 à 13 mm per dag. Als het gemaal dus gedurende een vol uur in bedrijf is zou dat moeten resulteren in een afvoer van 0,50 à 0,55 mm. Dat wordt over het algemeen bevestigd door de figuren 8.9b t/m 8.15b en figuur 8.17b. De gegevens voor de piketten in de figuren 8.9d t/m 8.15d en figuur 8.17d betreffen de waarnemingen op of omstreeks de 14e en 28e van de maand. Net als in figuur 8.1b zijn voor elke waarnemingsdatum alléén het gemiddelde van alle acht waargenomen waterstanden en de hoogste en laagste waterstand weergegeven (resp. als stip, vierkantje en driehoekje).

De situatie in het najaar van 1999 is afwijkend van die in de overige periodes omdat het gemaal toen bewust gedurende een periode van anderhalve maand buiten bedrijf is gesteld. Verder zijn toen aanvullende metingen gedaan van de waterstanden in de *niet* onderhouden sloten.

8.4.1 Periode oktober-december 1990 (figuur 8.9)

Over deze natte periode valt het volgende op te merken:
- de samenhang tussen het verloop van de neerslag, de afvoer via bemaling en de openwater- en grondwaterstanden is duidelijk;
- de neerslag van ca. 25 mm op 17 november leidt tot een stijging van zowel de grondwaterstand als de openwaterstand;
- het gemaal slaat echter pas tegen middernacht aan, nadat de openwaterstand is gestegen tot ca. 460 cm-NAP, dus tot ca. 15 cm boven het aanslagpeil;
- het is niet duidelijk waarom het gemaal aanvankelijk buiten werking bleef: krooshekverontreiniging is in dit geval geen plausibele verklaring gezien het nachtelijke tijdstip waarop het gemaal weer in bedrijf is gekomen
- op 18 november valt er niet veel regen meer, het gemaal blijft de gehele dag in bedrijf, de grondwaterstand daalt: zo wordt in de nacht van de 18^{e} op de 19^{e} de openwaterstand weer tot streefpeilniveau teruggebracht;
- de afvoer via bemaling voor de periode als geheel blijft achter bij de neerslag.

Conclusie: deze periode is te karakteriseren als een normale natte periode, zonder extreme neerslagintensiteiten en openwaterstanden.

8.4.2 Periode december 1992-januari 1993 (figuur 8.10)

Voor deze periode valt het volgende op te merken:
- de periode van 28 december tot 5 januari was een vorstperiode: er viel geen neerslag en het vroor elke nacht, met minimum temperaturen tot –10°C;
- op 5 januari begon het te regenen bij invallende dooi;
- de neerslag had een stijging van grondwaterstanden en openwaterstanden tot gevolg maar het gemaal trad vooralsnog niet in werking (buiten werking gesteld vanwege ijs in de sloten);
- op 7 januari regent het niet meer, de grondwaterstand stabiliseert zich maar de openwaterstand blijft verder stijgen als gevolg van ontwatering;
- in de loop van 8 januari treedt het gemaal in werking en blijft dan gedurende meer dan 24 uur continu in bedrijf om de achterstand in te halen;
- ook voor deze periode geldt dat de totale afvoer achterblijft bij de totale neerslag.

Conclusie: voor deze periode geldt dat het tijdelijk oplopen van de openwaterstand geheel is toe te schrijven aan het buiten werking zijn van het gemaal op het moment dat er, na een vorstperiode, bij invallende dooi neerslag van betekenis valt.

8.4.3 September 1994 (figuur 8.11)

De maand september 1994 en in het bijzonder de neerslag van ca. 100 mm in de periode van de 15^{e} t/m de 17^{e} is berucht in Noord-Holland benoorden het Noordzee Kanaal en heeft daar tot grote wateroverlast geleid. Kenmerkende aspecten zijn de volgende:
- tot begin september was het droog in het Purmerbos, met een grondwaterstand op een niveau van 525 cm-NAP, dat wil zeggen 50 cm beneden het openwaterstreefpeil (blijkens aanhangsel 1 vond op 30 augustus nog inlaat van water plaats);
- de droge uitgangssituatie had tot gevolg dat de neerslag van 75 mm in de eerste helft van september volledig in het bodemprofiel geborgen kon worden;
- als gevolg van de neerslag in de periode beginnend op de 14^{e} stijgt de grondwaterstand en komt de ontwatering op gang;
- de bemaling verloopt echter niet optimaal: zowel het verloop van de bemaling volgens figuur 8.11b als van de openwaterstand volgens figuur 8.11d duiden er op dat het gemaal met

extreem korte intervallen voortdurend is aan- en afgeslagen (pendelen), naar moet worden aangenomen als gevolg van belemmering in de toestroming van water (weerstand in de watergangen ten gevolge van de slootvegetatie en/of ophoping van plantenresten voor het krooshek);
- op de 17e stopt de bemaling zelfs volledig (uitschakeling via thermische beveiliging) en begint de openwaterstand op te lopen;
- op de 18e loopt de openwaterstand verder op maar minder snel doordat er geen regen van betekenis meer valt;
- op de 19e komt het gemaal weer in bedrijf (naar wordt aangenomen door ingrijpen van de waterbeheerder: vrijmaken krooshek) waarna de achterstand in bemaling in een periode van 24 uur wordt weggewerkt;
- gedurende de rest van de periode doen de problemen bij de bemaling (ophoping van plantenresten voor het krooshek en pendelen van het gemaal) zich opnieuw voor maar dat heeft geen verhoogde openwaterstanden tot gevolg omdat er geen neerslag van betekenis meer valt;
- er is een groot verschil tussen de totale neerslag (ca. 200 mm) en de totale afvoer (minder dan 50 mm): zowel de droge uitgangssituatie als de rol die de bosverdamping in september nog speelt zijn hier debet aan.

Conclusie: de verhoogde openwaterstanden in deze periode zijn geheel toe te schrijven aan het tijdelijk uitvallen van het gemaal.

8.4.4 Periode oktober-november 1994 (figuur 8.12)

Ook deze periode heeft in Noord-Holland tot wateroverlast geleid. Kenmerkend is dat de neerslag van in totaal 125 mm gespreid over een periode van 10 dagen (22 t/m 31 oktober) plaats vindt, waarbij die regenperiode wordt voorafgegaan door een periode van 16 dagen (waarvan alleen de laatste twee in de figuur meegenomen) en wordt gevolgd door een periode van 9 dagen vrijwel zonder neerslag.

Uit figuur 8.12 blijkt het volgende:
- op 26 oktober doet zich het al eerder beschreven probleem voor: continu aan- en afslaan van het gemaal (pendelen als gevolg van beperkte toestroming van water), gevolgd door een periode met een oplopende openwaterstand nadat het gemaal is uitgevallen, totdat het gemaal op de 27e weer in bedrijf komt waarna de normale toestand wordt hersteld;
- de intensieve neerslag op 30 en 31 oktober doet de grondwaterstand tot aan maaiveld stijgen waarbij de openwaterstand op de 31e bij continue bemaling toch ca. 20 cm oploopt tot 460 cm-NAP;
- op 1 november lijkt de normale toestand hersteld te gaan worden maar omstreeks het middaguur valt het gemaal uit hoewel het streefpeil nog niet is bereikt (figuur 8.12b en d);
- doordat het gemaal gedurende bijna 24 uur buiten bedrijf blijft stijgt de openwaterstand opnieuw tot iets boven 460 cm-NAP;
- omstreeks het middaguur van 2 november komt het gemaal weer in bedrijf waarna binnen 24 uur het streefpeil wordt bereikt, mede doordat het dan niet meer regent.

Conclusie: in deze periode zijn de verhoogde openwaterstanden deels toe te schrijven aan grote neerslagintensiteiten op momenten dat de grondwaterstand al sterk is opgelopen en deels aan het uitvallen van het gemaal.

8.4.5 Periode december 1996-februari 1997 (figuur 8.13)

In dit geval gaat het niet om een periode met veel regen maar om een vorstperiode. In de periode vanaf 21 december t/m 18 januari is er geen neerslag gevallen, is het gemaal niet in bedrijf geweest en heeft de openwaterstand continu zo'n 15 cm boven streefpeil gestaan. Blijkens de gegevens van weerstation Schiphol zijn in die periode van in totaal 29 dagen 18 ijsdagen voorgekomen, dat wil zeggen dagen waarop zowel de minimum als de maximum temperatuur beneden het vriespunt bleef. Bij het invallen van de dooi komt het gemaal weer in bedrijf. De toestand wordt echter pas weer geheel normaal tegen het einde van januari, als het ijs in de sloten niet langer een belemmering voor de toestroming van water naar het gemaal vormt.

Conclusie: de verhoogde openwaterstand is geheel toe te schrijven aan het buiten werking zijn van het gemaal vanwege het dichtvriezen van de sloten; het invallen van de dooi gaat in dit geval *niet* gepaard met neerslag van betekenis; het ijs in de sloten heeft tot gevolg dat de toestroming naar het gemaal belemmerd wordt zodat het een aantal dagen duurt voordat de normale situatie is hersteld.

8.4.6 Periode september 1998 (figuur 8.14)

Het najaar van 1998 was extreem nat. Voor de maand september is het volgende op te merken:
- de toestroming van water naar en de werking van het gemaal is gedurende de gehele maand problematisch geweest doordat het jaarlijkse opschonen van de sloten nog niet had plaatsgevonden;
- zowel op 3 als op 14 september is bijna 50 mm neerslag gevallen;
- de neerslag op 3 september leidt nauwelijks tot afvoer en is dus vrijwel volledig in het bodemprofiel geborgen (in dit geval geen bevestiging te vinden in het verloop van de grondwaterstand omdat de desbetreffende drukopnemer defect was);
- op de 14^{e} begint de openwaterstand 's avonds, onder invloed van de neerslag, snel te stijgen maar het gemaal treedt *niet* in werking;
- op de 15^{e} loopt de openwaterstand aanvankelijk nog verder op maar figuur 8.14d geeft geen uitsluitsel over de hoogst bereikte waterstand omdat het ingestelde meetbereik van de drukopnemer wordt overschreden;
- omstreeks het middaguur van de 15^{e} treedt het gemaal weer in werking waarna de openwaterstand snel daalt;
- de situatie met een oplopende openwaterstand bij het uitvallen van de bemaling herhaalt zich op de 16^{e} waarbij opnieuw het meetbereik van de drukopnemer wordt overschreden;
- omstreeks het middaguur van de 17^{e} wordt het gemaal weer ingeschakeld waarna ca. 36 uur continu bemaling plaatsvindt voordat het streefpeil weer is bereikt;
- de waarnemingen van de openwaterstanden bij de piketten op de 14^{e} duiden erop dat ook in de *niet* onderhouden sloten verhoogde waterstanden voorkwamen, waarbij voor ogen moet worden gehouden dat de waterstanden waarschijnlijk zijn opgenomen toen nog maar een deel van de totale neerslag van ca. 50 mm van die dag gevallen was;
- opvallend is dat van de totale neerslag van 150 à 160 mm niet meer dan 55 mm (één derde deel!) als afvoer wordt teruggevonden.

Conclusie: voor zover verhoogde openwaterstanden zijn voorgekomen zijn die geheel toe te schrijven aan het periodiek uitvallen van het gemaal.

8.4.7 Periode oktober-november 1998 (figuur 8.15)

De periode oktober-november in het algemeen en de situatie van eind oktober in het bijzonder heeft in Noord-Holland tot grote wateroverlast geleid. Dat komt ook in figuur 8.15 tot uiting:
- het oplopen van de openwaterstand op 24 en 25 oktober is weer toe te schrijven aan het uitvallen van het gemaal;
- op de 25^e komt het gemaal weer in bedrijf en op de 26^e is de normale toestand hersteld;
- de neerslag op 27 en 28 oktober (50 mm) leidt tot grondwaterstanden tot aan maaiveld, tot extreem hoge openwaterstanden in de *niet* onderhouden sloten en tot het oplopen van de openwaterstand bij het gemaal terwijl aanvankelijk, tot omstreeks het middaguur van de 28^e, continue bemaling plaatsvindt;
- omstreeks het middaguur van de 28^e stijgt de openwaterstand tot buiten het ingestelde meetbereik van de drukopnemer en ongeveer te zelfder tijd valt het gemaal uit;
- ca. 24 uur later, op de 29^e omstreeks het middaguur, komt het gemaal weer in bedrijf en draait dan gedurende meer dan drie dagen (ca. 80 uur) continu om de openwaterstand tot streefpeil terug te brengen; in die periode heeft een afvoer plaatsgevonden van 45 mm (80 draaiuren bij een gemaalcapaciteit van 0,55 mm per uur);
- ook in de periode vanaf 2 november blijft het regelmatig regenen, met hoge grondwaterstanden en, zoals blijkt uit de ligging van de punten op 16 november, duidelijk verhoogde openwaterstanden in sommige van de *niet* onderhouden sloten.

Conclusie: de situatie van eind oktober 1998 is voor wat betreft de openwaterstanden in het proefgebied de meest extreme situatie die zich in de periode vanaf 1990 heeft voorgedaan; de piek in het verloop van de openwaterstand is primair toe te schrijven aan het tijdelijk uitvallen van het gemaal op de 28^e.

8.4.8 Periode oktober-december 1999 (figuur 8.16)

Het bijzondere van deze periode van drie maanden is dat het gemaal uitgeschakeld was en bleef tot 22 november. De voorgeschiedenis is, onder verwijzing naar aanhangsel 1, als volgt te karakteriseren:
- in september werd aanvankelijk nog water ingelaten om het streefpeil te handhaven, voor de laatste keer op de 26^e, bij grondwaterstanden tussen 525 cm-NAP en 490 cm-NAP;
- in de derde decade van september heeft het vanaf de 22^e elke dag geregend, in totaal ca. 75 mm;
- onder invloed van de neerslag stijgt de grondwaterstand om op de 29^e boven het streefpeilniveau (480 cm-NAP) uit te komen.

Het vervolg wordt geïllustreerd door figuur 8.16:
- in de eerste decade van oktober blijft het regelmatig regenen, in totaal nogmaals 75 mm;
- de neerslag leidt tot het stijgen van de grondwaterstand, gevolgd door het oplopen van de openwaterstand;
- in de tweede decade van september regent het niet meer en komen de grondwaterstand en openwaterstand bij elkaar om samen geleidelijk ca. 8 cm te dalen in de periode tot de 22^e;
- de neerslag op 22, 23 en 25 oktober leidt weer tot een stijging van de waterstanden, gevolgd door de periode vanaf de 27^e tot 6 november waarin de grondwaterstand en de openwaterstand samenvallen en volkomen vlak verlopen;
- de neerslag op 6 en 7 november en later op 17, 18 en 19 november leidt tot verdere stijgingen van waterstanden;
- op 22 november, bij een openwaterstand van 435 cm-NAP, wordt het gemaal in werking gesteld, waarna de normale situatie in iets meer dan twee etmalen van continue bemaling wordt hersteld;

- de extreme grondwaterstanden op 28 en 29 november en later op 11 en 13 december zijn niet aan de neerslag op die dagen te relateren en waarschijnlijk toe te schrijven aan problemen met de drukopnemer;
- uit de waarnemingen op 14 en 28 oktober en op 7, 15 en 21 november blijkt dat de openwaterstanden in de *niet* onderhouden sloten overal gelijk zijn en ook precies samenvallen met de openwaterstand bij het gemaal.

Conclusies: de waargenomen openwaterstanden in de *niet* onderhouden sloten en bij het gemaal wijzen op een vlakke waterspiegel in het gehele openwatersysteem; dat bevestigt de eerder getrokken conclusie dat de *niet* onderhouden sloten nog volledig mee doen bij het (tijdelijk) bergen van (overtollig) water.

8.4.9 Periode november 2000 (figuur 8.17)

Deze periode wordt gekenmerkt door een neerslag van 100 mm over een periode van 60 uur, beginnend op 8 november. Wat dat betreft is de situatie vergelijkbaar met de periode van medio september 1994 volgens figuur 8.11. Ook toen is er zo'n 100 mm neerslag gedurende een periode van vergelijkbare duur gevallen. De voorafgaande periode was echter duidelijk verschillend. Blijkens figuur 8.11a viel er in 1994 in die voorafgaande periode wel neerslag van betekenis maar volgens figuur 8.11d bleef de openwaterstand op streefpeilniveau en liep de grondwaterstand nog niet sterk op. Volgens de figuren 8.11b en 8.11c vond dan ook nog geen afvoer via bemaling plaats. In 2000 daarentegen was de grondwaterstand in de week voorafgaande aan de periode met 100 mm neerslag al wel duidelijk verhoogd en vond ook regelmatig afvoer via bemaling plaats.

Als september 1994 en november 2000 met elkaar worden vergeleken, dan was dus de uitgangssituatie duidelijk anders en dat verklaart ook het verschil in het verloop van de openwaterstand en de bemaling tijdens de dagen met veel regen. In 1994 was er een verhoogde openwaterstand gedurende vier dagen (van 17 tot 21 september), deels ten gevolge van het uitvallen van het gemaal (krooshekverontreiniging). In 2000 was er een verhoogde waterstand gedurende vijf dagen waarbij het gemaal tijdens die vijf dagen continu op volle capaciteit heeft gedraaid, resulterend in een afvoer van 60 à 65 mm (5 maal 12 à 13).

Gezien over de gehele periode 1991-2000 is de periode van 8 tm 13 november 2000 de meest extreme situatie die zich heeft voorgedaan. Dit geldt met name voor de afvoer via bemaling. In het najaar van 1998 en 1999 zijn vergelijkbaar hoge openwaterstanden voorgekomen (figuren 8.14, 8.15, 8.16) maar in die situaties had dat te maken met het tijdelijk uitvallen (1998) resp. buiten bedrijf stellen (1999) van het gemaal.

8.4.10 Evaluatie perioden met verhoogde waterstanden

De analyse met betrekking tot de perioden met duidelijk verhoogde openwaterstanden is als volgt samen te vatten:
- in twee van de perioden (par. 8.4.2 en 8.4.5) was het gemaal buiten werking vanwege bevriezing van de sloten en zijn de verhoogde waterstanden geheel dààr aan toe te schrijven;
- in vier van de perioden (par. 8.4.3, 8.4.4, 8.4.6 en 8.4.7) zijn de verhoogde openwaterstanden in de hand gewerkt door het tijdelijk uitvallen van het gemaal ten gevolge van ophoping van vuil voor het krooshek;
- de hoge waterstanden in het najaar van 1999 (par. 8.4.8) hingen samen met het bewust buiten bedrijf stellen van het gemaal;
- de meest extreme 'natuurlijke' situatie (dat wil zeggen: situatie zonder vorst of uitval van het gemaal) heeft zich voorgedaan in november 2000 (par. 8.4.9), met openwaterstanden bij het

gemaal tot bijna 40 cm boven streefpeil; er viel toen 110 mm regen in vijf dagen, waarbij het gemaal continu in bedrijf bleef (afvoer van ca. 60 mm).

Samenvattend leidt de analyse van de perioden met verhoogde openwaterstanden tot de conclusie dat het proefgebied in de periode vanaf 1990 nooit echt blank is komen te staan als gevolg van beperkingen van de waterafvoer door bemaling, óók niet in september 1994 en oktober 1998, toen elders in Noord-Holland benoorden het Noordzeekanaal grote wateroverlast is opgetreden.Verklarende factoren voor de minder extreem natte omstandigheden in het proefgebied in vergelijking met de situatie elders in Noord-Holland zijn:
- de betrekkelijk kleine verschillen in maaiveldhoogte binnen het proefgebied, dus het ontbreken van duidelijk lage plekken die bij stijging van openwaterstanden snel blank komen te staan;
- het relatief grote percentage open water;
- het functioneren van het ontwaterings- en afwateringssysteem (greppels, wèl en niet onderhouden sloten);
- de begroeiïng van het proefgebied met bos (tegenover het grondgebruik elders als grasland of voor akkerbouw, tuinbouw en bollenteelt).

Deze aspecten worden hier afzondelijk nader uitgewerkt.

De drooglegging en de kleine verschillen in maaiveldshoogte (par. 2.2.1) zorgen ervoor dat het gebied pas bij stijgingen van openwaterstanden van meer dan 50 cm boven streefpeil op de laagste plekken echt blank komt te staan. Het stijgen van waterstanden met 40 cm of meer houdt wel in dat de greppels niet langer vrij kunnen afwateren op het slotenstelsel. De hogere ligging van de fiets- en wandelpaden houdt overigens in dat de 'bosgebruiker' geen hinder van de extreem natte situaties ondervindt.

In par. 2.2.3 is aangegeven dat het verbreden van een deel van de sloten in het proefgebied heeft geleid tot een toename van het percentage open water, van 3,2% naar 4,3% (tabel 2.1). Hierdoor is de bergingscapaciteit vergroot en blijven stijgingen van openwaterstanden onder extreme omstandigheden beperkt. Het achterwege blijven van greppel- en slootonderhoud heeft tot gevolg dat de ontwaterende en afwaterende functie van alle greppels en van een deel van de kavel- en perceelssloten in de periode vanaf 1990 is verminderd. In perioden met veel neerslag in het winterhalfjaar leidt dat tot extra tijdelijke berging in greppels en niet onderhouden sloten en daardoor tot het beperken van stijgingen van openwaterstanden in het wel onderhouden gedeelte van het slotenstelsel.

De omzetting van grasland in bos leidt tot een toename van het verdampingsniveau en beïnvloedt daarmee de grootte van het af te voeren neerslagoverschot en de periode waarover die afvoer plaatsvindt. In de balansberekeningen van hoofdstuk 7 is uitgegaan van een bosverdamping van gemiddeld 640 mm per jaar (volgens aanhangsel 2). Omdat naast het onderzoek in het proefgebied geen onderzoek heeft plaatsgevonden naar de waterhuishouding van grasland in De Purmer is een directe vergelijking van de bosverdamping met de verdamping voor grasland niet mogelijk. Daarom is gebruik gemaakt van gegevens die zijn ontleend aan het eerder genoemde onderzoek van de Werkgroep Noord-Holland (1982). In het kader van dat onderzoek is de gewogen gemiddelde verdamping voor de gehele droogmakerij De Purmer berekend, ervan uitgaande dat grasland 94% van de oppervlakte beslaat en open water de resterende 6% (Ryhiner en Wit, 1981). Zij leidden de potentiële verdamping van grasland af uit KNMI-cijfers voor de openwaterverdamping voor de stations de Kooy en Hoorn, waarbij werd gerekend met een vermenigvuldigings-factor van 0,8 voor de maanden mei t/m augustus en 0,7 voor de maanden september t/m april. Voor de periode 1968-1979 leidden die berekeningen tot een potentiële graslandverdamping van gemiddeld 550 mm per jaar. Volgens Ryhiner en Wit (1981) zou de actuele verdamping in de droge zomerperioden van 1971, 1975 en 1976 kunnen zijn achtergebleven bij de potentiële verdamping en daardoor zou ook het gemiddelde verdampingsniveau over een reeks van jaren lager zijn dan 550 mm.

Op basis van bovenstaande gegevens is voor grasland in De Purmer verder uitgegaan van een verdampingsniveau van gemiddeld 500 à 550 mm per jaar. Daarmee zou dan het niveau van de bosverdamping op jaarbasis gemiddeld 100 tot 150 mm boven dat van grasland liggen. Het verschil in verdamping heeft tot gevolg dat het bodemprofiel bij een begroeiïng met bos in het zomerhalfjaar sterker uitdroogt en dat de grondwaterstand verder daalt dan bij grasland onder overigens vergelijkbare omstandigheden (in het geval van het Purmerbos proefgebied wordt het uitdrogen van het bodemprofiel en het dalen van grondwaterstanden nog in de hand gewerkt doordat de helft van de oorspronkelijke kavelsloten niet meer wordt onderhouden en in de zomer droog komt te staan). De sterke uitdroging en diepe grondwaterstanden houden in dat er in het najaar, wanneer er weer sprake is van een neerslagoverschot, meer ruimte is om overtollige neerslag te bergen. Dit wordt fraai geïllustreerd door de situatie in september 1994 (figuur 8.11). De neerslag van 80 mm in de periode van 1 tot 14 september wordt volledig in het bodemprofiel geborgen. De neerslag van 100 mm in de periode van 14 tot 17 september heeft elders in Noord-Holland tot grote problemen geleid maar in het Purmerbos proefgebied was er weinig aan de hand. Uit figuur 8.11c blijkt dat ook die neerslag grotendeels in het gebied is geborgen. Van de totale neerslag van 200 mm in de hele maand september blijkt uiteindelijk niet meer dan 40 mm via bemaling tot afvoer te komen.

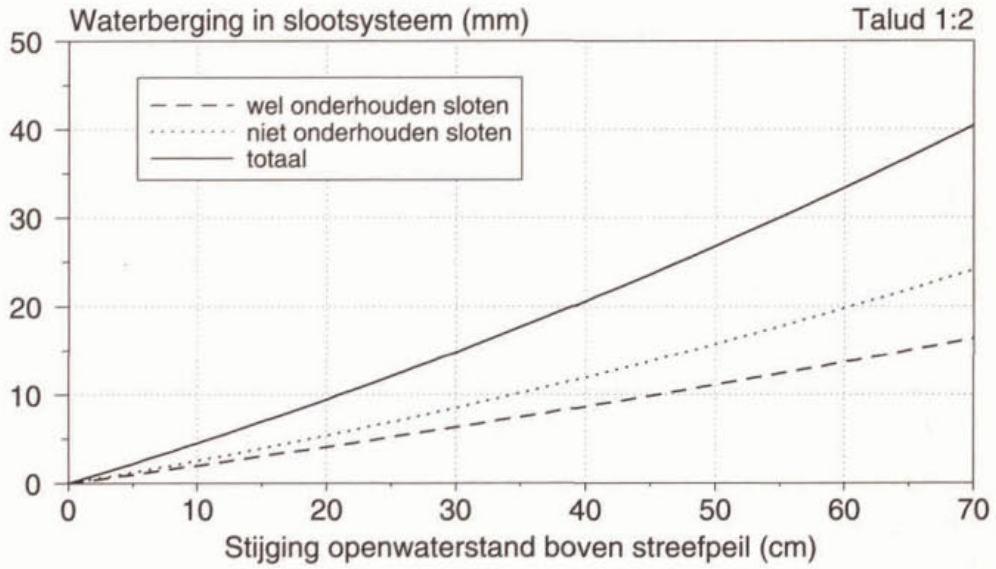
Het hogere verdampingniveau van bos betekent dus dat, over een reeks van jaren gezien, minder vaak extreme situaties zullen voorkomen maar óók dat op jaarbasis gezien minder water hoeft te worden afgevoerd dan bij grasland (of bouwland). Dit geldt in het bijzonder voor de periode september t/m oktober-november. Blijkens de ervaringen van de jaren negentig is dat juist de periode van het jaar waarin zich elders extreme situaties hebben voorgedaan. In termen van afvoer van overtollig water en van wateroverlast is de conclusie dan ook dat het aanplanten van bos in poldergebieden van Nederland de volgende gunstige effecten heeft:

- een reductie van de belasting van polder- en/of boezemsystemen met gemiddeld op jaarbasis 100 à 150 mm;
- een afname van de frequentie van situaties waarbij polder- en/of boezemsystemen extreem worden belast en inundaties optreden en/of maalstops moeten worden ingesteld.

Voor de periode 1991 t/m 2000 volgt uit tabel 7.2 dat de afname van de afvoer voor bosgebied ten opzichte van grasland met 100 à 150 mm gemiddeld per jaar, van 500 à 550 mm naar 400 mm, neerkomt op een reductie met 20% à 30%. Als echter in plaats van de periode 1991 t/m 2000 de periode van de laatste 30 jaar wordt beschouwd komen de getallen duidelijk anders te liggen. Voor station Edam was de gemiddelde neerslag over die dertigjarige periode bijna 800 mm. Als wordt uitgegaan van dezelfde inlaat-, kwel- en verdampingsgegevens, dan volgt uit de waterbalans voor bos een afvoer in de orde van 250 mm en voor grasland van 350 à 400 mm. Het aanplanten van bos zou in dat geval leiden tot een reductie van de afvoer met 30% à 40%.

Ter verdere illustratie is tabel 8.5 uitgewerkt, met resultaten van de balansberekeningen voor de deelperiodes volgens par. 8.4.1 t/m 8.4.9. Het gaat om balansberekeningen die zijn uitgevoerd als besproken in par. 7.4, dus met gecorrigeerde afvoer- en kwelgegevens. Uit de tabel blijkt dat de verandering van de berging ΔB, berekend als balansrestpost, voor de beide periodes die in september vallen (in 1994 en 1998), met waarden van 106 en 54 mm relatief groot is ten opzichte van de andere posten. Voor de twee periodes die pas laat in het jaar beginnen, in december 1992 resp. 1996, is de berekende ΔB met 2 en 7 mm minimaal. Dergelijke verschillen zijn terug te voeren op de herbevochtiging van het bodemprofiel in de nazomer- en herfstperiode. Hoe later in de nazomer-herfstperiode, des te verder die herbevochtiging heeft plaatsgevonden.

Een ander aspect dat aandacht verdient is de verdeling van ΔB over het oppervlaktewatersysteem (ΔB_{ow}) en het bodemprofiel plus greppelsysteem (ΔB_{bw}). De periode oktober t/m december 1999 (par. 8.4.8, figuur 8.16) waarin de bemaling tijdelijk was uitgeschakeld geeft de mogelijkheid tot nadere uitwerking.



Figuur 8.18 Waterbergingscapaciteit in het oppervlaktewatersysteem (sloten) binnen het Purmerbos proefgebied

Er is een viertal deelperiodes te onderkennen met neerslag van betekenis en stapsgewijze verandering van de openwaterstand:

- de deelperiode van 1 t/m 11 september, met een stijging van de waterstand van 480 cm-NAP naar 458 cm-NAP (stijging van 22 cm);
- de deelperiode van 5 t/m 11 november, met een stijging van 459 cm-NAP naar 448 cm-NAP (stijging van 11 cm);
- de periode van 16 t/m 21 november, met een stijging van 450 cm-NAP naar 437 cm-NAP (stijging van 13 cm);
- de deelperiode van 22 november t/m 1 december, met een daling van 437 cm-NAP naar 480 cm-NAP (daling van 43 cm).

Blijkens de balansberekeningen volgens tabel 8.5 neemt de berging in de eerste drie deelperioden toe en in de laatste deelperiode af, geheel in overeenstemming met de verwachting. Om de veranderingen in berging in het oppervlaktewatersysteem te schatten is figuur 8.18 uitgewerkt, gebruik makend van de kengetallen voor het oppervlaktewatersysteem volgens tabel 2.1. Aan de hand van de veranderingen van de openwaterstand volgens figuur 8.16 en de

relaties volgens figuur 8.18 zijn de ΔB_{ow}–waarden rechts onderaan in tabel 8.5 geschat. Uit de tabel blijkt dat de toename van de berging voor de eerste drie deelperiodes (68, 32 en 31 mm) maar voor een beperkt deel betrekking heeft op het oppervlaktewatersysteem, dat wil zeggen op een toename van de berging in de wel en niet onderhouden sloten. Met andere woorden: het gaat in die deelperiodes om een toename van de berging die grotendeels betrekking heeft op het bodemprofiel en de greppels.

Voor de vierde deelperiode, lopend vanaf het inschakelen van het gemaal op 22 november tot het einde van de maand, is de bergingsverandering negatief: de berging neemt dus af.
Die afname zou volgens de getallen in tabel 8.5 voor bij benadering de helft zijn toe te schrijven aan het oppervlaktewatersysteem en dus voor de andere helft aan de ontwatering van het bodemprofiel en het geheel of gedeeltelijk leeglopen van het greppelsysteem.

Tabel 8.5 Waterbalansgegevens voor het Purmerbos proefgebied (66 ha), voor kortdurende perioden met veel neerslag en verhoogde openwaterstanden; neerslag (N) als gemiddelde voor KNMI-stations Edam en Purmerend (etmaalgegevens); kwel (K) berekend op basis van een variabele C-waarde: 5200 d < C < 5800 d; afvoer (A) gecorrigeerd voor randeffecten; (bos)verdamping (E_a) volgens relaties voor het Fleditebos (aanhangsel 2); ΔB : waterberging binnen grenzen van proefgebied, berekend als balansrestpost ($\Delta B = N+I+K-A-E_a$), ΔB_{ow} : berging in oppervlaktewatersysteem (in wel en niet onderhouden sloten)

	Duur (d)	N (mm)	I (mm)	K (mm)	A (mm)	E_a (mm)	ΔB (mm)	ΔB_{ow} (mm)
26-10-1990 t/m 10-12-1990	46	185	0	7	137	30	25	
28-12-1992 t/m 18-01-1993	22	55	0	4	46	10	2	
01-09-1994 t/m 30-09-1994	30	204	1	8	47	60	106	
20-10-1994 t/m 10-11-1994	22	130	0	5	84	22	29	
18-12-1996 t/m 03-02-1997	48	44	0	11	37	11	7	
01-09-1998 t/m 30-09-1998	30	161	0	8	57	58	54	
15-10-1998 t/m 16-11-1998	33	233	0	7	172	37	31	
01-10-1999 t/m 31-12-1999	92	357	0	22	201	69	109	
01-11-2000 t/m 15-11-2000	15	130	0	3	118	18	-2	
Maandperioden								
01-10-1999 t/m 31-10-1999	31	100	0	8	0	28	80	
01-11-1999 t/m 30-11-1999	30	87	0	7	55	17	22	
01-12-1999 t/m 31-12-1999	31	171	0	7	146	25	7	
Specifieke perioden								
01-10-1999 t/m 11-10-1999	11	81	0	3	0	16	68	10,4
05-11-1999 t/m 11-11-1999	7	37	0	2	0	6	32	5,9
16-11-1999 t/m 21-11-1999	6	35	0	1	0	5	31	7,6
22-11-1999 t/m 01-12-1999	10	14	0	2	55	3	-42	-22,4

9 Slotevaluatie

In deze slotevaluatie zijn de belangrijkste aspecten en conclusies uit de voorafgaande hoofdstukken samengebracht, ingedeeld in een aantal thema's. In de afzonderlijke paragrafen ligt het accent steeds op één van die thema's.

9.1 Gevolgen van de bosaanplant op de wateraan- en afvoerbehoefte

De gevolgen van het aanplanten van bos op de wateraanvoerbehoefte (zomerperiode) en de belasting van polder- en boezemsystemen door afvoer van overtollige neerslag (winterperiode) zijn als volgt puntsgewijze samen te vatten:

- het aanplanten van loofbos op grasland in poldergebieden leidt tot een toename van de verdamping van 500 à 550 tot 650 mm per jaar, dat wil zeggen een toename met 100 à 150 mm gemiddeld op jaarbasis;
- de toename van de verdamping leidt tot diepere grondwaterstanden, tot een toename van de infiltratie en dus een toename van de behoefte aan water voor het handhaven van het streefpeil in het zomerhalfjaar; in het Purmerbos proefgebied is het laatstgenoemde effect klein, enerzijds door de hoge infiltratieweerstanden en anderzijds doordat de watertoevoer naar een deel van het slotenstelsel niet optimaal kan plaatsvinden (zie ook par. 9.6);
- het hogere niveau van de bosverdamping leidt tot een afname van de afvoer van overtollige neerslag in het winterhalfjaar, en daarmee tot een afname van de belasting van het desbetreffende polder- en boezemsysteem, eveneens met 100 à 150 mm gemiddeld op jaarbasis;
- gemiddeld over de periode 1991-2000 komt de afvoer op jaarbasis uit op 400 mm, met uitersten van 215 mm in 1997 en 660 mm in 1998;
- piekafvoeren worden bepaald door de capaciteit van het gemaal: 12 à 13 mm per dag;
- de afname van de afvoer op jaarbasis leidt tot een toename van de herhalingstijd van af te voeren hoeveelheden water over k-daagse perioden; dit effect is echter niet nader te kwantificeren op basis van de resultaten van het uitgevoerde onderzoek omdat het meetprogramma zich beperkte tot het met bos ingeplante proefgebied.

Afgaande op de groei en ontwikkeling van het bos zou een geleidelijke toename van het verdampingsniveau in de periode vanaf 1990 zijn te verwachten. In de resultaten van de waterbalansberekeningen en in de verdere gegevens met betrekking tot de veranderingen van de waterhuishouding van het proefgebied is van een geleidelijke ontwikkeling echter weinig terug te vinden: Dat is niet eenduidig te verklaren. Naar wordt aangenomen heeft de grondbewerking voorafgaande aan het aanplanten van het bos de ontwikkeling van een welige kruidlaag in het proefgebied in de hand gewerkt. Dat zou dan direct al geleid hebben tot een toename van het verdampingsniveau ten opzichte van de graslandsituatie van daarvóór. Met de groei en ontwikkeling van het bos zal de rol van die kruidlaag bij de verdamping geleidelijk kleiner zijn geworden en als het ware door het bos zijn overgenomen

9.2 Gevolgen van de gebiedsinrichting en het beheer op de waterhuishouding

In het kader van de inrichting van het bosgebied zijn kavel- en perceelssloten deels verbreed en is een aantal duikers gelegd, mede om het gebied toegankelijk te maken voor recreanten (fietsers en wandelaars). Daarnaast werd het streefpeil verlaagd (par. 2.2.2). Wat het beheer betreft is onderhoud van een deel van het slotenstelsel vanaf 1990 geheel achterwege gebleven. Het komt er op neer dat van de totale lengte aan kavel- en perceelssloten vanaf het moment van aanplanten van het bos in 1989 nog maar éénderde deel jaarlijks wordt geschoond.

Greppelonderhoud is zelfs geheel achterwege gebleven. Deze inrichtings- en beheersaspecten werken als volgt door in de waterhuishouding van het gebied:

- het percentage open water vóór aanleg van het bos was 3,2%;
- door het gedeeltelijk verbreden van sloten is het percentage open water toegenomen tot 4,3%, waarvan 1,95% in de *wèl* en 2,35% in de *niet* onderhouden sloten;
- via het inlaten van water in de zomerperiode en het afvoeren van overtollig water in de winterperiode is het streefpeil in het wèl onderhouden gedeelte van het slotensysteem goed gehandhaafd, afgezien van enkele korte periodes met extreme neerslaghoeveelheden en bij het uitvallen van het gemaal ten gevolge van ophoping van plantenresten voor het krooshek of bij het dichtvriezen van het slotenstelsel;
- het verloop van openwaterstanden in de *niet* onderhouden sloten wordt duidelijk beïnvloed door de vegetatie en de ophoping van plantenresten in die sloten en door het gedeeltelijk verstopt raken van de duikers die bij de inrichting van het gebied zijn gelegd;
- in de zomerperioden leiden de slootvegetatie en het gedeeltelijk verstopt raken van duikers tot een daling van openwaterstanden en op den duur tot het droogvallen van de *niet* onderhouden sloten: mede daardoor blijft de inlaat van water in het zomerhalfjaar beperkt tot gemiddeld 20 mm op jaarbasis;
- in de winterperioden leidt de ophoping van plantenresten en het gedeeltelijk verstopt raken van de duikers juist tot openwaterstanden boven streefpeil;
- de effecten van het achterwege blijven van het onderhoud van sloten en duikers zijn direct vanaf het begin van het onderzoek in 1990 merkbaar geweest;
- gezien over de gehele periode 1990 t/m 2000 wijst het verloop van de openwaterstanden voor sommige piketten op een geleidelijk voorschrijdend proces van verlanding van sloten en/of verstopping van duikers, voor andere piketten echter is dat minder duidelijk en lijkt er na 1991 weinig meer te veranderen;
- gezien over de gehele periode 1990 t/m 2000 is geen duidelijke trend in het verloop van grondwaterstanden in de winterperioden te herkennen, die zou wijzen op een geleidelijke vermindering van de werking van het greppelsysteem;
- de laagste grondwaterstanden in de zomerperioden worden bepaald door de verhouding tussen neerslag en verdamping en liggen daardoor van jaar tot jaar op een ander niveau;
- door het gebrekkig functioneren van het greppelsysteem is de bij de aanleg van het bos doorgevoerde streefpeilverlaging weinig effectief bij het voorkómen van hog grondwaterstanden in de winterperioden.

9.3 Groei en ontwikkeling van de bosaanplant

De volgende punten hebben betrekking op de geschiktheid van het proefgebied voor bosbouw en de feitelijk waargenomen groei en ontwikkeling van het bos:

- volgens de toelichting bij de meest recente bodemkaart 1:50 000 (veldopname afgesloten in 1983) zou de kleigrond in het proefgebied beperkte mogelijkheden voor bosbouw hebben, met de ontwateringstoestand als belangrijkste beperkende factor (indertijd voor het gehele proefgebied gekarteerd als Gt II, dat wil zeggen GHG<40 cm-mv, GLG van 50-80 cm-mv);
- uit metingen van grondwaterstanden gedurende de periode 1991 t/m 2000 en interpretatie van de metingen in termen van de zogenoemde standaardpuntencode (Ten Cate *et al.* ,1995) blijkt de grondwatertsand voor maar één van de 25 peilbuizen aan de criteria van Gt II te voldoen: het gaat om buis 21 die blijkens figuur 2.2 dicht bij één van de randsloten is geplaatst waarin een hoger streefpeil wordt gehandhaafd;
- voor de overige buizen gaat het om Gt IIIa (tien buizen), Gt IIIb (drie buizen), Gt IVu (vier buizen), Gt Va en Vb (samen vijf buizen) en Gt VI (twee buizen), waarbij er, volgens de toelichting bij de bodemkaart 1:50 000 van 1983, ter plaatse van de peilbuizen met Gt IIIb en hoger 'ruime mogelijkheden' voor bosbouw zijn;
- bij inspectie van het proefgebied is gebleken dat er binnen het gebied enkele slecht ontwaterde laagten voorkomen, met langdurige plas-drassituaties in de winterperioden; in de resul-

taten van het onderzoek komen deze natte plekken niet tot hun recht omdat ter plaatse geen peilbuizen staan en ook geen groeimetingen zijn gedaan.

Blijkens groeiopnamen uitgevoerd in 1992, 1995 en 1997 is de groei van de bomen op de percelen ingeplant met populier, eik en es (65% resp. 20% en 10% van de oppervlakte) beoordeeld als 'goed' tot 'zeer goed': bij vergelijking met gestandaardiseerde opbrengsttabellen valt de groei in de hoogste of op één na hoogste klasse. De waargenomen 'goede' tot 'zeer goede' groei gedurende de jaren negentig ten opzichte van de minder gunstige beoordeling van de groeiomstandigheden ten tijde van de bodemkartering aan het begin van de jaren tachtig is mede toe te schrijven aan de verlaging van het streefpeil die bij de aanleg van het proefgebied is doorgevoerd. Daarbij is de gemiddelde drooglegging vergroot van 40 à 50 cm tot 60 à 65 cm.
Het vóórkomen van Gt IV, V en VI impliceert GLG's van meer dan 80 cm-maaiveld (tegenover GLG's van 40-80 cm voor Gt II). Deze diepere grondwaterstanden in de zomerperiode zijn in de eerste plaats toe te schrijven aan het hoge verdampingsniveau van het bos in vergelijking met dat van grasland.

De over het geheel genomen 'goede' tot 'zeer goede' groei wijst op een tolerantie van de aangeplante populierensoorten en van de zomereik en es voor hoge grondwaterstanden in de winterperiode. Hierbij moet benadrukt worden dat deze conclusie van toepassing is op de groei en ontwikkeling van de bosopstand gedurende de eerste tien jaar na aanplant. Hoewel dus de veldopnamen in de periode 1990-1997 over het geheel genomen een gunstig beeld geven van de groei en ontwikkeling van het bos hebben zich in de jaren daarna toch ook problemen voorgedaan:
- in 1999 bleek een aantal bomen in de beide percelen met populier Schoorldam (zuidpunt van het proefgebied, figuur 3.1) te zijn scheefgewaaid;
- binnen één van de twee percelen met beuk ligt een lage en daardoor slecht ontwaterde plek waar de groei in de periode vanaf 1990 duidelijk is achter gebleven; na een droge en warme periode in de zomer van 1999 is daar een aanzienlijk aantal beukenboompjes alsnog afgestorven;

Het scheefwaaien van bomen wijst erop dat windworp op den duur een probleem zou kunnen worden. Vooralsnog heeft de stugheid van de klei-bovengrond voldoende houvast geboden aan het wortelstelsel, ook al blijft de diepte van verankering met dikkere wortels beperkt door de aanwezigheid van de verdichte veenlaag op 40-60 cm-mv.

9.4 Effecten op de waterhuishouding bij extreme neerslaghoeveelheden

De effecten van de bosaanplant op de waterhuishouding en op de belasting van polder- en boezemsystemen met overtollig water in kortdurende perioden met excessieve neerslaghoeveelheden, zijn als volgt:
- het hoge niveau van de bosverdamping heeft tot gevolg dat het bodemprofiel in de zomerperiode sterk uitdroogt, waarbij grondwaterstanden tot grotere diepte dalen dan bij grasland; dat impliceert dat in het najaar, tijdens perioden met een groot neerslagoverschot, meer ruimte voor berging van overtollige neerslag beschikbaar is;
- de betekenis van genoemd effect is van jaar tot jaar verschillend, afhankelijk van de mate van uitdroging van het bodemprofiel in de zomerperiode en de hoeveelheid en de verdeling van de neerslag in het najaar;
- de extra beschikbare bergingscapaciteit leidt tot een afname van de kans op wateroverlast in termen van af te voeren hoeveelheden overtollig water en/of waterstanden boven streefpeil; de extreem natte periode van september 1994 illustreert dit effect: in die periode had Noord-Holland benoorden het Noordzeekanaal te kampen met grote wateroverlast terwijl er in het Purmerbos proefgebied geen enkel probleem was vanwege de op dat moment nog grote beschikbare capaciteit tot berging van neerslag in het bodemprofiel;

- het effect van de extra capaciteit tot berging is vooral gunstig in perioden met excessieve neerslag in september maar kan ook in oktober en november nog merkbaar zijn (het is juist in de maanden september t/m december dat zich niet alleen in 1994 maar ook in de jaren daarna een aantal situaties met extreem veel neerslag heeft voorgedaan).

Zoals eerder aangegeven in par. 9.1 leidt het hogere verdampingsniveau van bos in vergelijking met grasland tot een afname van de noodzakelijke afvoer van overtollig water, met 100 à 150 mm gemiddeld op jaarbasis. In termen van piekafvoeren gaat het om een afname van de frequentie (toename van herhalingstijd) waarmee k-daagse afvoersommen (par. 8.3.1) zich voordoen.

9.5 Tijdelijke berging van water in polderbosgebied

Bij de vraag welke rol poldergebieden die met bos zijn ingeplant kunnen spelen bij het tijdelijk bergen van overtollig water bij extreme neerslag, valt te denken aan twee mogelijkheden:
- het tijdelijk stoppen van de bemaling om daarmee de belasting van boezemsystemen te beperken (doorvoeren van een maalstop);
- het gebruiken van dergelijke gebieden als inundatiegebied voor tijdelijke opslag van overtollig water.

In de periode 1990 t/m 2000 is herhaaldelijk een onbedoelde maalstop opgetreden door het uitvallen van het gemaal bij krooshekverontreiniging. Voor wat betreft de ontwikkeling van de bosopstand en het beheer van het gebied heeft dit niet tot problemen geleid, vooral ook omdat het steeds om perioden van hooguit enkele dagen ging. Hieruit wordt geconcludeerd dat ook het bewust doorvoeren van een tijdelijke maalstop, zowel vanuit het water- als het bosbeheer, verantwoord is als het er om gaat meer kwetsbare gebieden elders, bijvoorbeeld stedelijk gebied of tuinbouwgebied, te ontzien. Deze mogelijkheid biedt alléén perspectief als het desbetreffende peilgebied over de gehele oppervlakte met bos is ingeplant zodat geen rekening hoeft te worden gehouden met andere belangen.

Het gebruik van bosgebied als inundatiegebied is van een andere orde. Het moet dan gaan om gebieden die speciaal voor dat doel zijn aangewezen en ingericht, ter ontlasting van boezemsystemen onder extreme omstandigheden. De diepe ligging maakt dat in droogmakerijen naar verhouding grote hoeveelheden water over een beperkte oppervlakte kunnen worden geborgen. Bij inundatie echter gaat het niet om beperkte verhogingen van openwaterstanden met maximaal 40 à 50 cm boven streefpeil zoals in het Purmerbos proefgebied zijn voorgekomen, maar om inundatiediepten van enkele meters. Het onderzoek geeft geen antwoord op de vraag in hoeverre de functies (produktie)bos en inundatiegebied zijn te combineren.

9.6 Gebiedsinrichting en beheer

Met het oog op het onderzoek is het proefgebied door het afdammen van sloten hydrologisch van haar omgeving gescheiden en van een eigen bemaling voorzien (figuur 2.2). De inrichting van het gebied is mede ingegeven door de noodzaak de afwatering naar het gemaal te doen plaatsvinden. Dat betreft met name het bepalen van de te verbreden kavel- en dwarssloten. Omdat alle kavelsloten aan beide uiteinden zijn afgedamd is de rol van de dwarssloten belangrijker dan in de situatie van vóór het aanleggen van het proefgebied. Net als in de graslandsituatie wateren alle greppels af op de dwarssloten, maar daarnaast moeten nu óók zes van de zeven kavelsloten binnen het proefgebied via die dwarssloten afwateren op de centrale watergang met het gemaal.

Als het gebied niet als proefgebied voor het doen van onderzoek zou zijn ingericht en niet van een eigen gemaal zou zijn voorzien, dan zou de afwatering ook ná het aanplanten van bos

blijvend via de kavelsloten hebben kunnen plaatsvinden, in de richting van de Middentocht van De Purmer. Het is de vraag of het in die situatie ook nodig zou zijn om het slotenstelsel deels te verbreden. Zoals opgemerkt in par. 1.2 heeft het verbreden van kavelsloten en het graven van nieuwe dwarssloten te maken met de eis van het waterschap tot compensatie van het verlies aan waterbergend vermogen in de niet te onderhouden sloten. Anders gezegd: het waterschap ging er vanuit dat de *niet* onderhouden sloten op den duur geen rol meer zouden spelen. De resultaten van het onderzoek echter wijzen uit dat de *niet* onderhouden sloten in de gehele periode vanaf 1990 steeds hebben meegedaan als het gaat om de ontwatering, de waterberging en de afwatering. Volgens tabel 2.1 komt het erop neer dat het percentage open water binnen de grenzen van het proefgebied niet is afgenomen van 3,2% naar 1,95% (wat het geval zou zijn als de *niet* onderhouden sloten niet meer meetellen) maar is toegenomen van 3,2% naar 4,3%.

Zoals aangegeven bij het bespreken van figuur 8.1a in par. 8.1 moet de openwaterstand bij het gemaal dalen tot beneden streefpeil alvorens de klep voor het inlaten van water wordt geopend. De gemiddeld lagere waterstanden in wateraanvoersituaties hebben tot gevolg dat de effecten van de ophoping van plantenresten in de *niet* onderhouden sloten en van het gedeeltelijk verstopt raken van duikers duidelijker merkbaar zijn. De *niet* onderhouden sloten komen droog te staan, de infiltratie vanuit die sloten valt dus weg en gemiddeld genomen zullen grondwaterstanden dieper wegzakken. Overigens zullen deze effecten beperkt blijven: uit de berekeningen van hoofdstuk 7 blijkt dat de wateraanvoer maar een zeer ondergeschikte rol speelt in de waterbalans.

De rol die de *niet* onderhouden sloten, ook na een periode van tien jaar zonder enig onderhoud, nog steeds blijken te spelen leidt tot de volgende conclusies:
- het achterwege laten van het onderhoud van de helft van de kavel- en perceelssloten is een verantwoorde manier om de beheerkosten van het bosgebied te drukken;
- het verbreden van kavel- en perceelssloten ter compensatie van het deels achterwege blijven van het slootonderhoud is vanuit het oogpunt van het waterbeheer niet noodzakelijk;
- de kosten van slootonderhoud kunnen verder gedrukt kunnen worden door het schonen van de te onderhouden sloten niet jaarlijks maar om het andere jaar te doen plaatsvinden.

Als het bos te zijner tijd wordt gekapt om het gebied daarna opnieuw met bos in te planten moet worden overwogen om het *niet* onderhouden deel van het slotenstelsel te 'reviseren', dat wil zeggen uit te baggeren en weer op profiel te brengen. Ook de desbetreffende duikers zouden op dat moment kunnen worden geschoond.

9.7 Aanbevelingen ten aanzien van vervolgonderzoek

Bij de afronding van dit rapport komt automatisch de vraag naar voren of daarmee ook het onderzoek op de locatie Purmerbos kan worden afgesloten of dat een vervolg, wellicht in aangepaste vorm, zinvol is. Het is logisch om in dit kader in de eerste plaats na te gaan in hoeverre de oorspronkelijke doelstellingen van het onderzoek zijn gerealiseerd. Daarnaast is de vraag aan de orde of tijdens de uitvoering van het onderzoek nieuwe vragen naar voren zijn gekomen die via vervolgonderzoek beantwoord zouden kunnen worden.

Volgens het onderzoeksvoorstel van 1989 (par. 1.2) zou het onderzoek zich moeten concentreren op de volgende aspecten:
- de neerslag-afvoerrelatie en de veranderingen die daarin optreden tijdens de periode waarin de bosaanplant zich ontwikkelt tot een volgroeide bosopstand;
- de waterhuishouding in relatie tot de gebiedsinrichting en het beheer, in het bijzonder op de gevolgen van het achterwege blijven van het onderhoud van greppels en van een deel van de kavel- en perceelssloten;
- de eisen die verschillende boomsoorten (bosdoeltypen) stellen aan de waterhuishouding.

De neerslag-afvoerrelatie wordt sterk bepaald door de verdamping en de verandering daarin tijdens de ontwikkeling van de bosaanplant op grasland tot een volwassen bosopstand. Dit geldt zowel voor perioden van langere duur (waarbij de verdamping bepalend is voor het neerslag-overschot dat op jaarbasis of gedurende de winterperiode moet worden afgevoerd) als voor kortdurende perioden met extreme neerslaghoeveelheden (de verdamping is dan van invloed op de frequentie waarmee zulke perioden tot extreme afvoersituaties leiden). Aan de voor het proefgebied opgestelde waterbalansen en de daaraan gerelateerde bosverdamping kleeft een aantal onzekerheden. Dat betreft in het bijzonder de betrouwbaarheid van de kwel als balanspost en de invloed van randeffecten op de afvoer (via bemaling). Die randeffecten zijn vooral het gevolg van een afwijkend peilbeheer voor het proefgebied ten opzichte van het omringende landbouwgebied. Zowel voor de kwel als voor de randeffecten geldt dat voortzetting van het meetprogramma in de bestaande vorm geen duidelijk perspectief biedt tot het wegwerken van onzekerheden en het opstellen van meer betrouwbare waterbalansen. Gezien het reeds bereikte resultaat is de vraag aan de orde of voortzetting van het onderzoek in aangepaste vorm en gericht op de onzekerheden in de waterbalans (en dus in de neerslag-afvoerrelatie) wenselijk is.

Wat het aspect inrichting en beheer betreft (tweede doelstelling) wijst het onderzoek tot nu toe uit dat het niet onderhouden deel van het slotenstelsel nog steeds een belangrijke rol speelt in de waterhuishouding van het proefgebied. De verlanding van de desbetreffende sloten verloopt trager dan verondersteld bij aanvang van het onderzoek in 1990. De rol van de greppels heeft in het meetprogramma weinig aandacht gekregen. Het is aannemelijk dat ook de functie van de greppels door ophoping van gevallen blad en plantenresten in de loop van de periode vanaf 1990 steeds meer is verminderd. Gedurende het verdere verloop van de levenscyclus van het bos zal het proces van verlanding van sloten en het verstopt raken van greppels doorgaan. Het is daarom te verwachten dat de ontwaterings- en afwateringstoestand van het gebied verder zal verslechteren, resulterend in hogere grondwaterstanden gedurende langere perioden in het winterhalfjaar.

De te verwachten verdere verslechtering van de ontwatering en afwatering van het gebied raakt direct aan de derde hoofddoelstelling van het onderzoek: de eisen met betrekking tot de waterhuishouding. In de periode tot 1997 is de groei en ontwikkeling van het bos gunstig verlopen maar daarná zijn geen metingen meer gedaan. Met de toenemende hoogte van het bos zal de gevoeligheid voor windworp groter worden. Een geleidelijk verslechterende ontwateringstoestand kan die gevoeligheid nog versterken.

Indien wordt besloten het onderzoek wat het laatste aspect betreft voort te zetten wordt aanbevolen in het bijzonder de volgende aspecten daarbij te betrekken:
- het inventariseren van het nog (kunnen) functioneren van de greppels (waar komen afdammingen en verstoppingen voor);
- het inventariseren van het voorkomen van lage of slecht ontwaterde plekken met langdurig (extreem) hoge grondwaterstanden en inundaties;
- herhaling van de groeimetingen volgens de eerder toegepaste methodiek, aangevuld met groeimetingen voor speciaal de natte plekken binnen het proefgebied.

Als hiertoe besloten wordt ligt het voor de hand het bestaande meetprogramma voor de grond- en oppervlaktewaterstanden voort te zetten, zowel voor wat betreft de automatische als de handmatige metingen. Bovendien moet daarbij overwogen worden om plaatselijk, op laaggelegen en slecht ontwaterde plekken, aanvullend peilbuizen te plaatsen en grondwaterstandsmetingen te verrichten. De neerslag- en debietmetingen kunnen dan beëindigd worden. Voorts moet worden overwogen om de aparte (onder)bemaling van het proefgebied te beëindigen en de kavelsloten via vaste drempels op een het niveau van 480 cm-NAP (streefpeil voor het proefgebied, ingesteld in 1990 en sindsdien gehandhaafd) aan te sluiten op de Middentocht (een andere mogelijkheid is om de kavelsloten zonder drempel aan te sluiten op de Middentocht door het verwijderen van de afdammingen te plaatse; in dat geval wordt het streefpeil van het proefgebied met 25 cm verlaagd tot het streefpeil van het aangenzende landbouwgebied: 505 cm-NAP).

Hier wordt met deze korte suggesties volstaan. Nader overleg van betrokkenen zal moeten leiden tot een definitief besluit of, en zo ja in welke vorm, verder onderzoek aan de orde is.

Literatuur

Cate, J.A.M. ten, A.F. van Holst, H. Kleijer en J.Stolp, 1995. *Handleiding bodemgeografisch onderzoek. Deel B: Grondwater.* Wageningen, DLO-Staring Centrum, Technisch Document 19B.

Dolman, A.J., 1987. *Predicting evaporation from an oak forest.* Groningen, Proefschrift Rijksuniversiteit.

Elbers, J.A., A.J. Dolman, E.J. Moors en W. Snijders, 1996. *Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland. Fase 2: Meetopzet en eerste resultaten.* Wageningen, Staring Centrum, Rapport 333.2.

Gaast, J.W.J Van der en J.M.P.M Peerboom, 1996. *Effecten van de sanering van gasbronnen in Noord-Holland benoorden het IJ op de nutriënten- en chloridebelasting van het oppervlaktewater. Wageningen, Staring Centrum, Rapport 411.*

Gaast, J.W.J Van der en J.M.P.M Peerboom, 1996. *Geohydrologisch veldonderzoek in het Purmerbos.* Wageningen, Staring Centrum, Rapport 437.

Makkink , G. F., 1962. *Vijf jaren lysimeteronderzoek, een hydrologische studie.* Wageningen, Centrum voor Landbouwpublikaties en Landbouwdocumentatie, Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen nr. 68.1.

Ministerie van Landbouw en Visserij, 1986. *Meerjarenplan Bosbouw, deel C: Regerings-beslissing.* Tweede Kamer der Saten-Generaal, vergaderjaar 1985-1986, 18 630, nrs. 5-6.

Moors, E.J., A.J. Dolman, W. Bouten en A.W.J. Veen, 1996. *Evaporation of forests.* H_2O (29) nr. 16.

Steur, G.G.L. en W. Heijink, 1983. *Bodemkaart van Nederland Schaal 1:50 000. Algemene begrippen en indelingen.* Wageningen, Stichting voor Bodemkartering.

Stichting voor Bodemkartering, 1965. *Bodemkaart van Nederland Schaal 1:50 000. Toelichting bij kaartblad 25 Oost Amsterdam.* Wageningen, Stichting voor Bodemkartering.

Stichting voor Bodemkartering, 1987. *Bodemkaart van Nederland Schaal 1:50 000. Toelichting bij de kaartbladen 19 Oost Alkmaar en 20 West Lelystad (Noordhollands gedeelte).* Wageningen, Stichting voor Bodemkartering.

Werkgroep Noord-Holland, 1982. *Kwantiteit en kwaliteit van grond- en oppervlaktewater in Noord-Holland benoorden het IJ.* Wageningen, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, regionale studies 16.

Wolters, H.A., 1996. *Neerslag en afvoer in het landelijk gebied van Flevoland. Flevoberreicht nr. 357.* Lelystad, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie IJsselmeergebied.

Niet gepubliceerde bronnen

Beets, C.P., 1989. *Opzet hydrologisch onderzoek Purmerbos.* Utrecht, Staatsbosbeheer, afdeling Terreinbeheer.

Beets, C.P., 1999. *Neerslagmeting in het Purmerbos: optimalisatie van de datareeks.* Driebergen, Staatsbosbeheer.

Beets, C.P., 1999. *Data-inventarisatie en –optimalisatie hydrologisch onderzoek Purmerbos.* Driebergen, Staaatsbosbeheer.

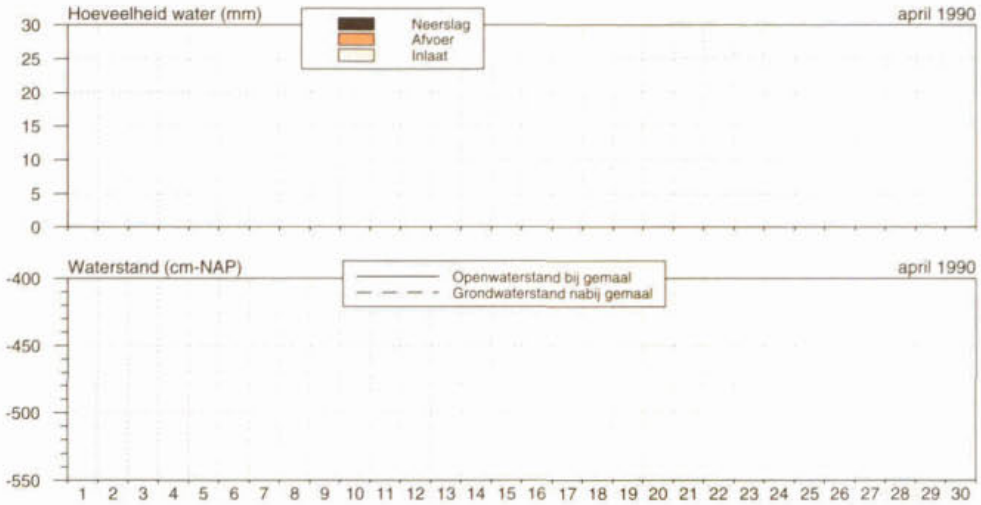
Bijlsma, J.W., J. Coppelmans, D.H. Edelman, E. Schoorl, Ph. Verhagen en C.D. Vlak, 1992. *Verslag van bodemonderzoek ten behoeve van aanleg Purmerbos.* Verslag van onderzoek uitgevoerd door studenten van de Vrije Universiteit van Amsterdam (op verzoek van de directie Bos- en Landschapsbouw van Staatsbosbeheer). Vrije Universiteit, Amsterdam.

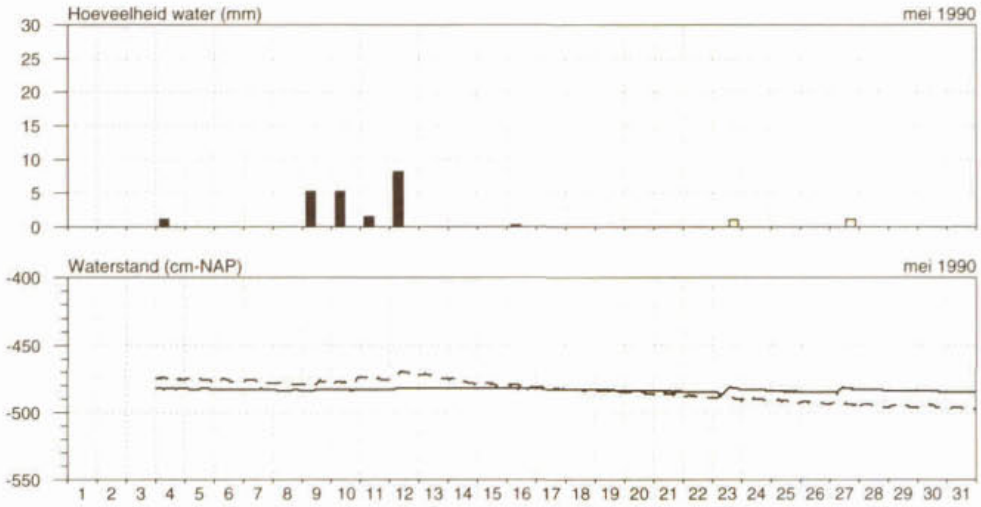
Ryhiner, A.H. en K.E. Wit, 1981. *Waterbalansen oppervlakte- en grondwater voor een aantal polders in Noord-Holland benoorden het IJ.* Wageningen, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Nota 1262.

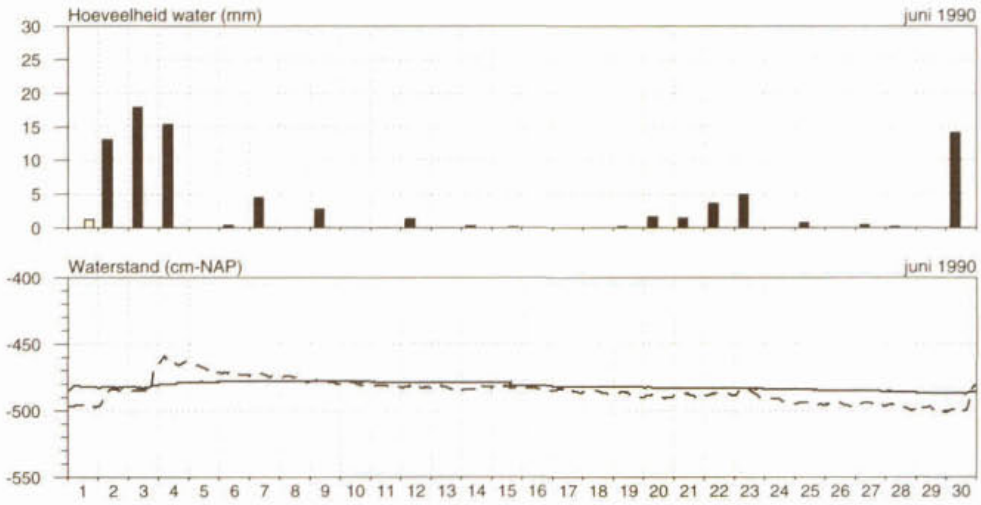
Szabo, P.J., 1998, *Bosontwikkeling Purmerbos, Evaluatie 1989-1997.* Driebergen, Staatsbosbeheer, afdeling Terreinbeheer.

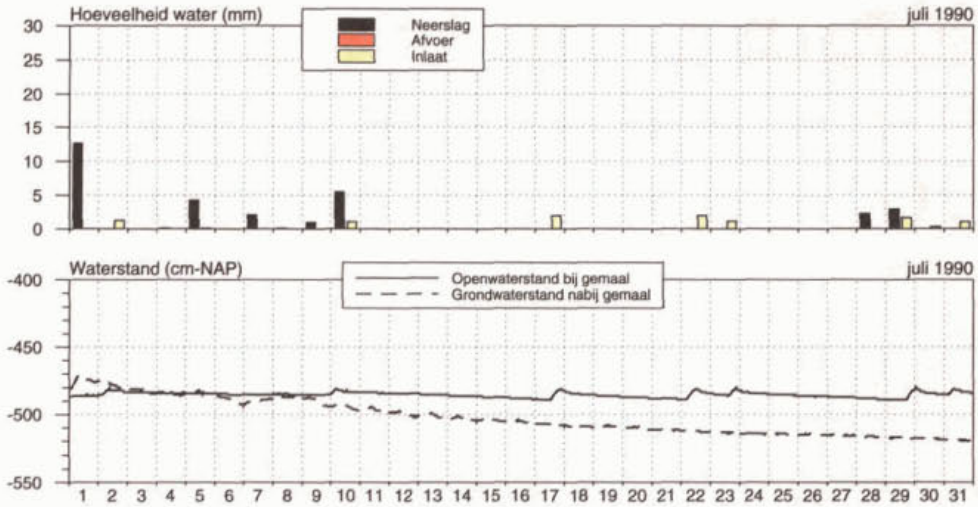
Aanhangsel 1
Neerslag-, waterafvoer-, waterinlaat- en waterstandsgegevens

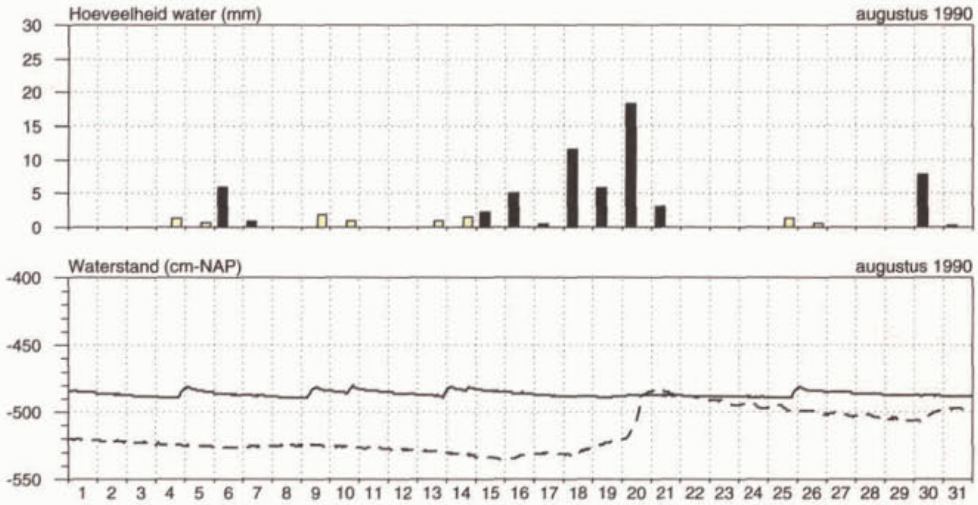
Grafische weergave voor de periode vanaf april 1990 t/m december 2000, opgesplitst in opeenvolgende deelperioden van drie maanden (43 grafieken)

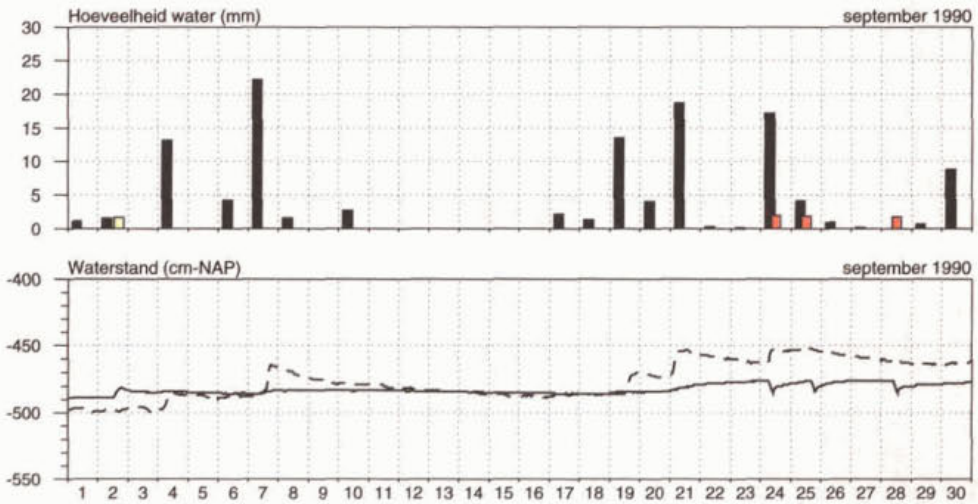

Hoeveelheid water (mm)
Neerslag
Afvoer
Inlaat
april 1990
Waterstand (cm-NAP)
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal
april 1990

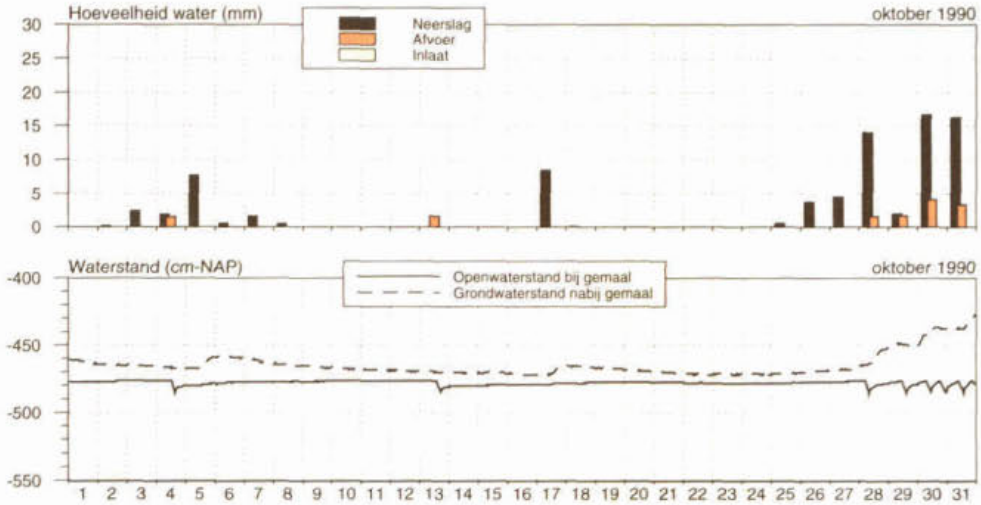

Hoeveelheid water (mm)
mei 1990
Waterstand (cm-NAP)
mei 1990

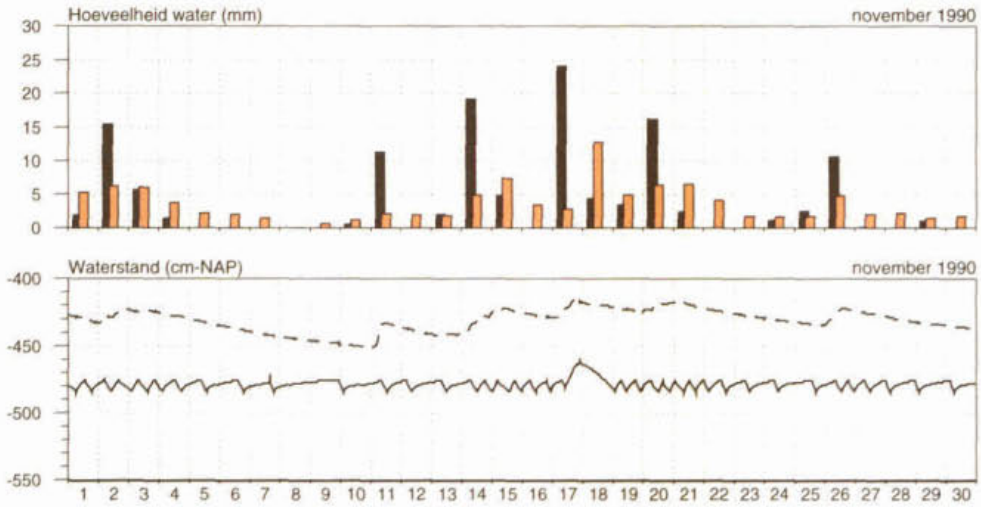

Hoeveelheid water (mm)
juni 1990
Waterstand (cm-NAP)
juni 1990

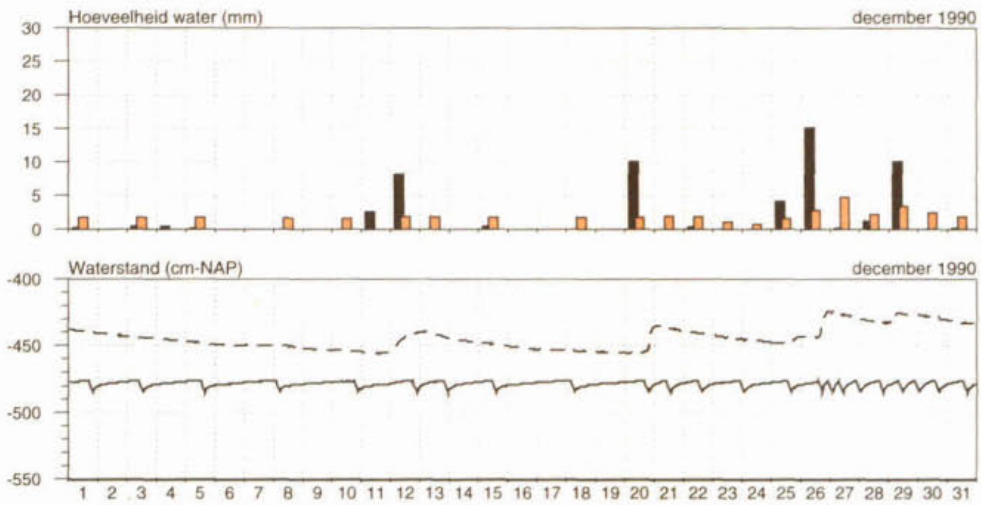

Hoeveelheid water (mm)
juli 1990
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 1990
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

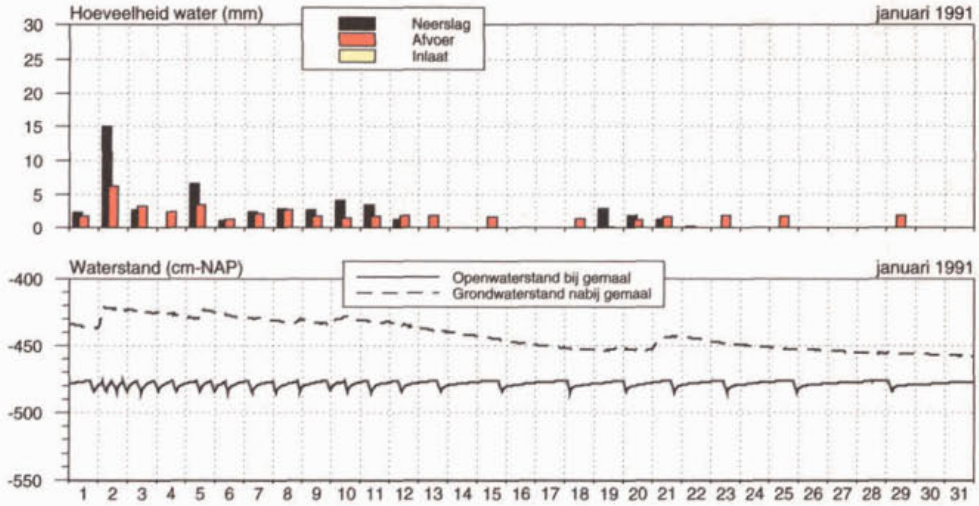

Hoeveelheid water (mm)
augustus 1990
Waterstand (cm-NAP)
augustus 1990

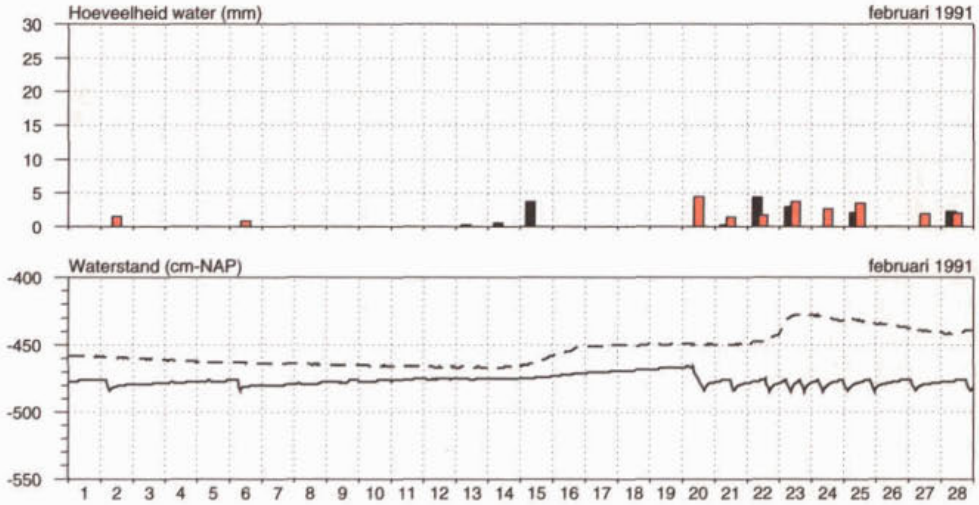

Hoeveelheid water (mm)
september 1990
Waterstand (cm-NAP)
september 1990

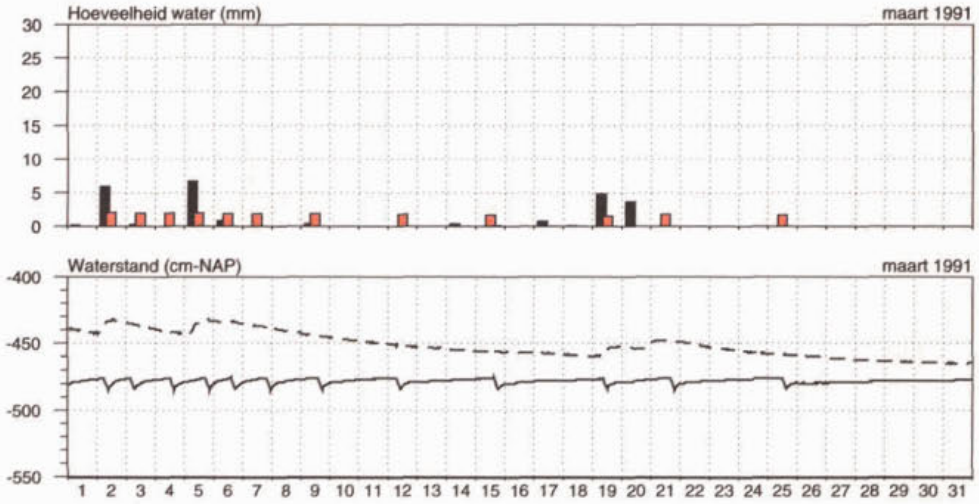

Hoeveelheid water (mm)
oktober 1990
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 1990
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

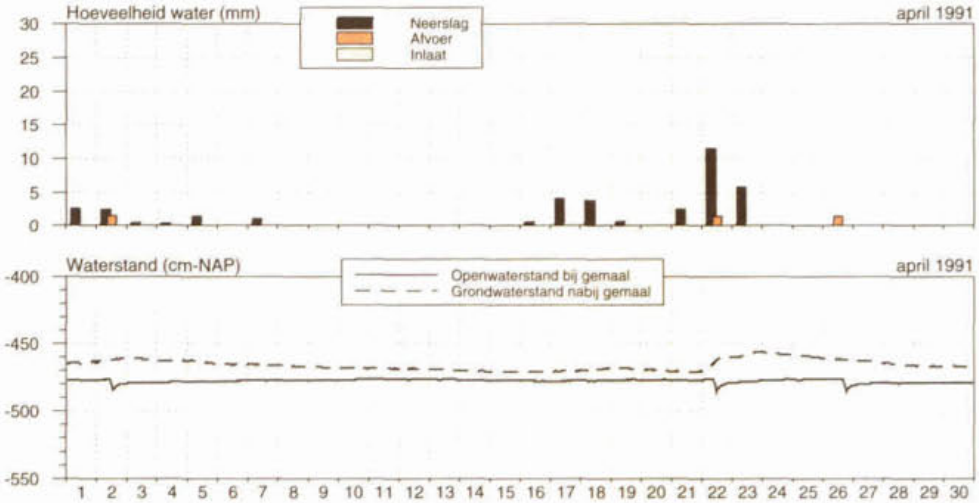

Hoeveelheid water (mm)
november 1990
Waterstand (cm-NAP)
november 1990

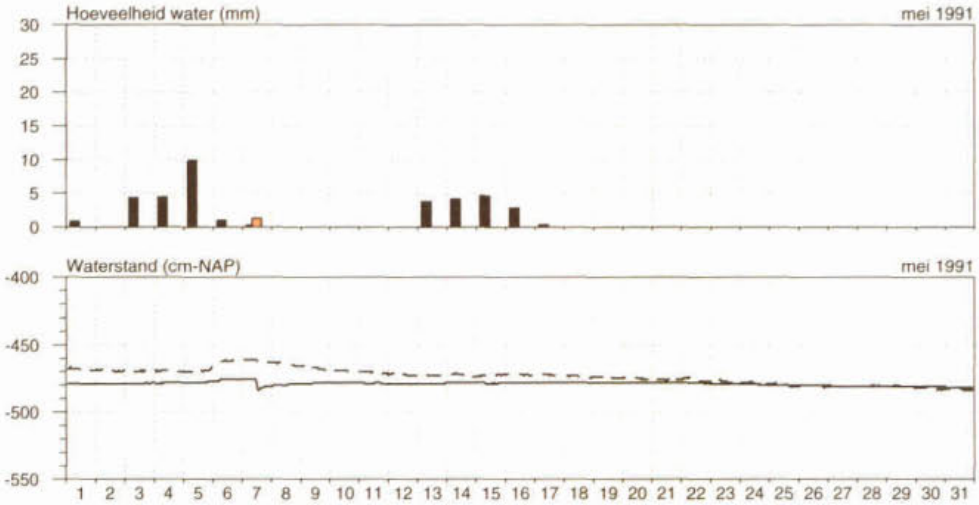

Hoeveelheid water (mm)
december 1990
Waterstand (cm-NAP)
december 1990

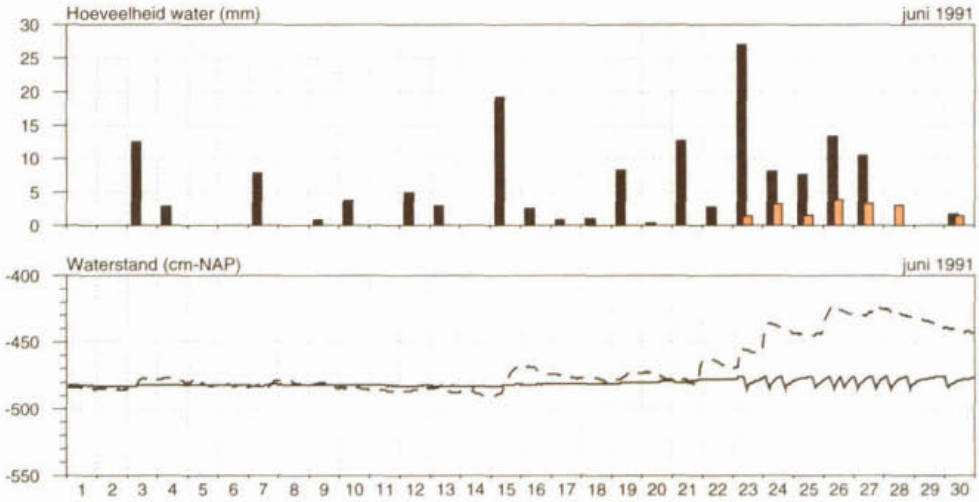

Hoeveelheid water (mm)
januari 1991
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
januari 1991
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

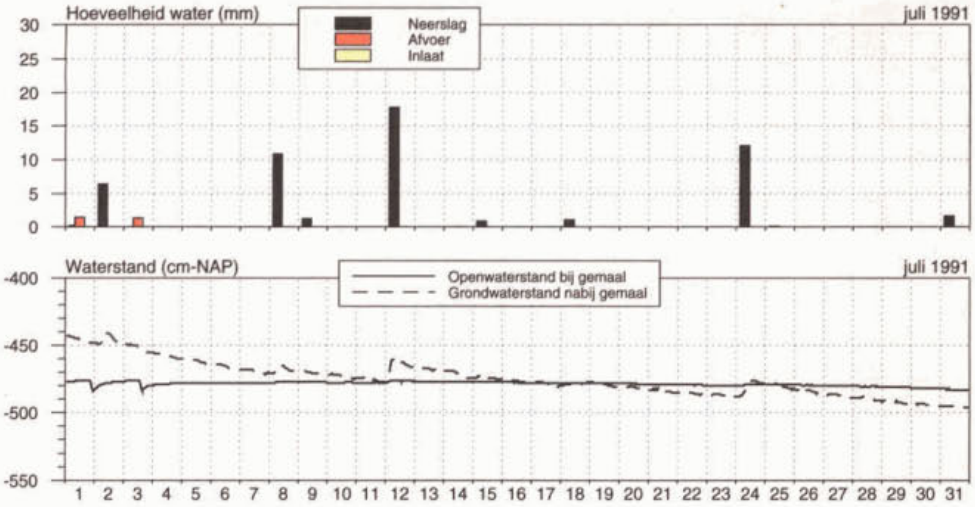

Hoeveelheid water (mm)
februari 1991
Waterstand (cm-NAP)
februari 1991

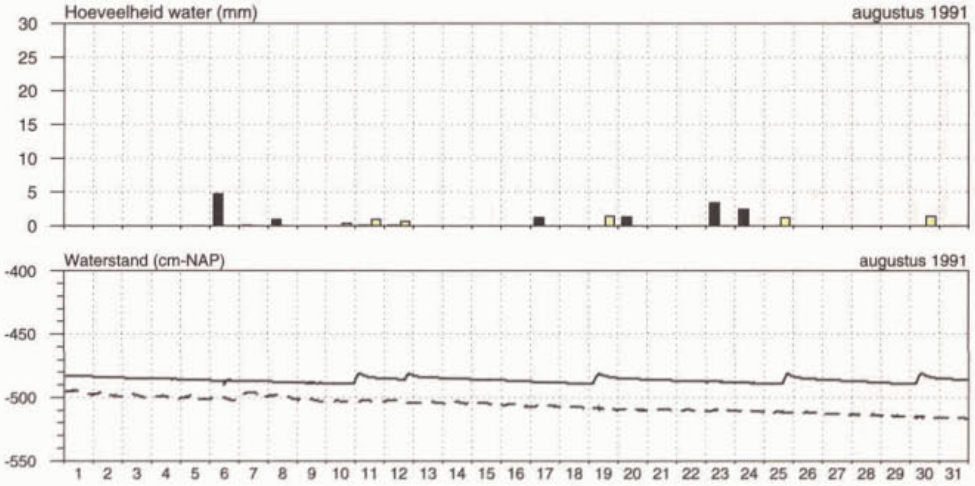

Hoeveelheid water (mm)
maart 1991
Waterstand (cm-NAP)
maart 1991

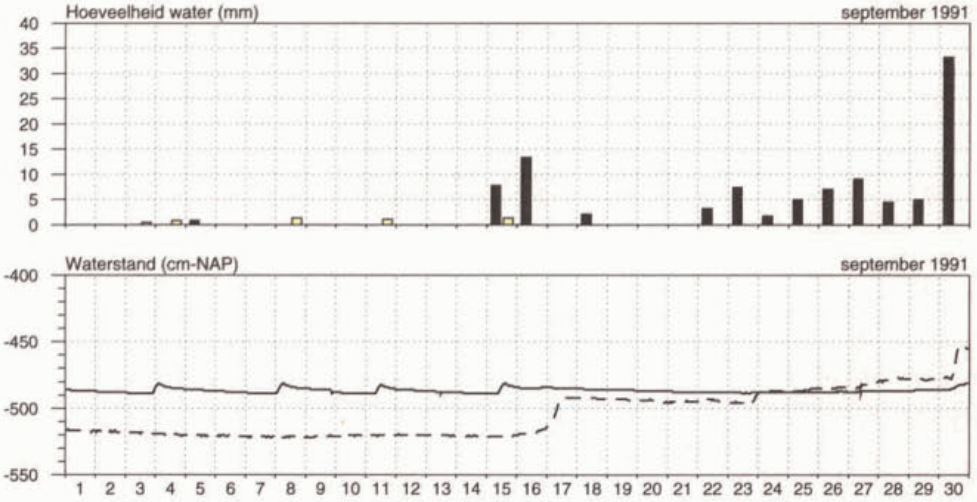

Hoeveelheid water (mm)
april 1991
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
april 1991
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

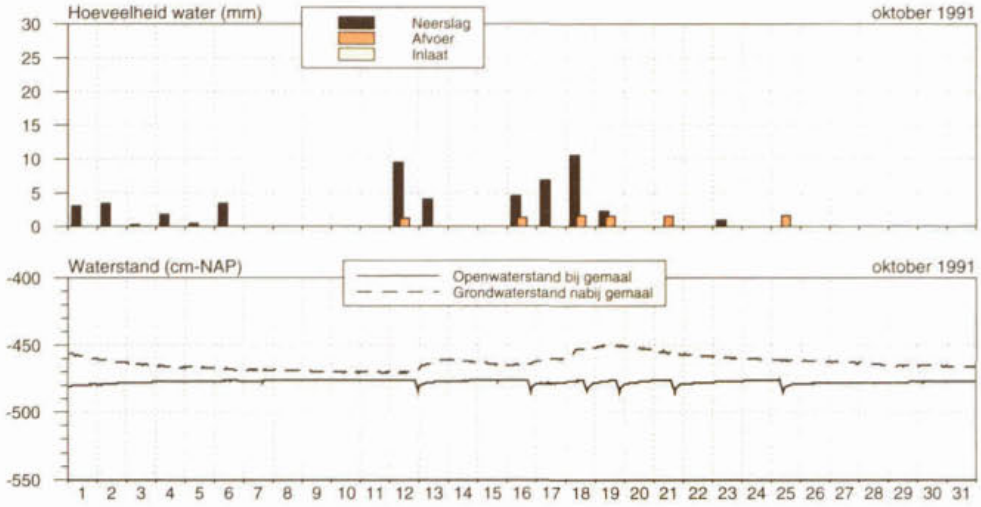

Hoeveelheid water (mm)
mei 1991
Waterstand (cm-NAP)
mei 1991

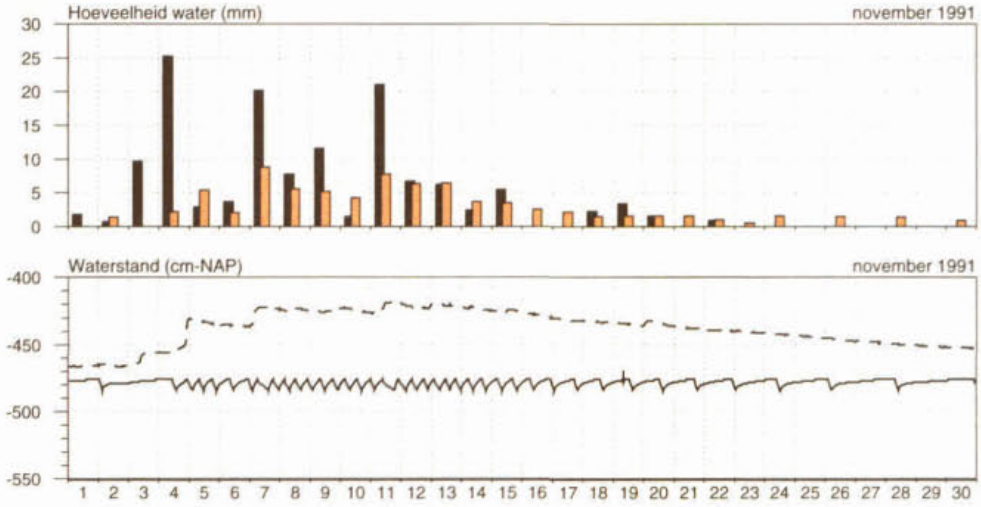

Hoeveelheid water (mm)
juni 1991
Waterstand (cm-NAP)
juni 1991

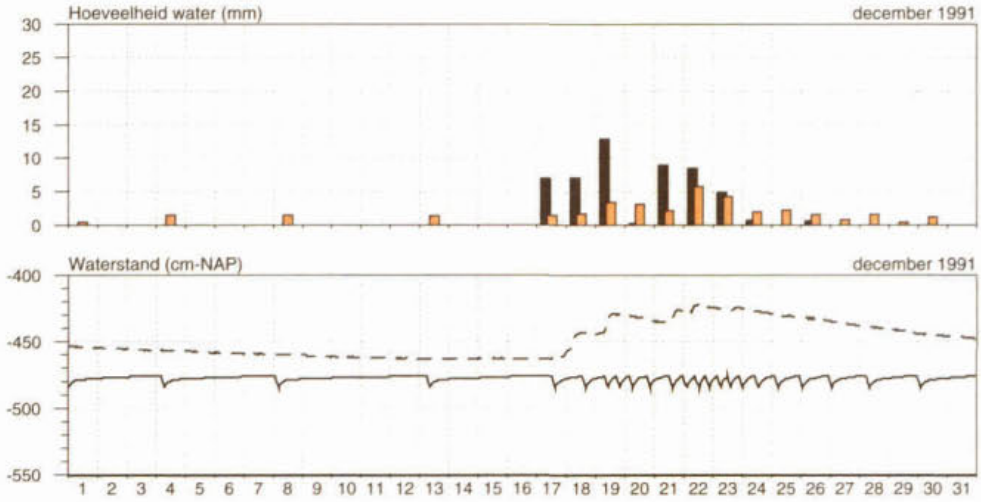

Hoeveelheid water (mm)
juli 1991
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 1991
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

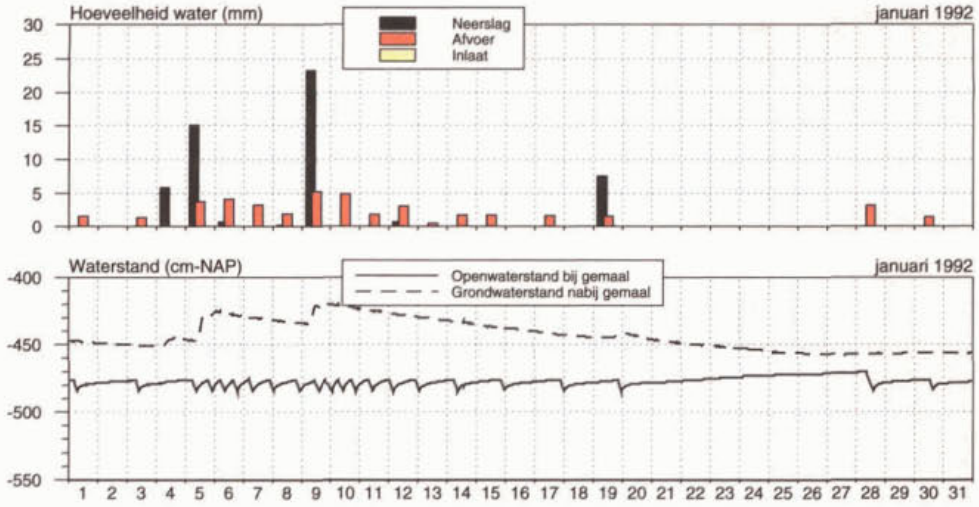

Hoeveelheid water (mm)
augustus 1991
Waterstand (cm-NAP)
augustus 1991

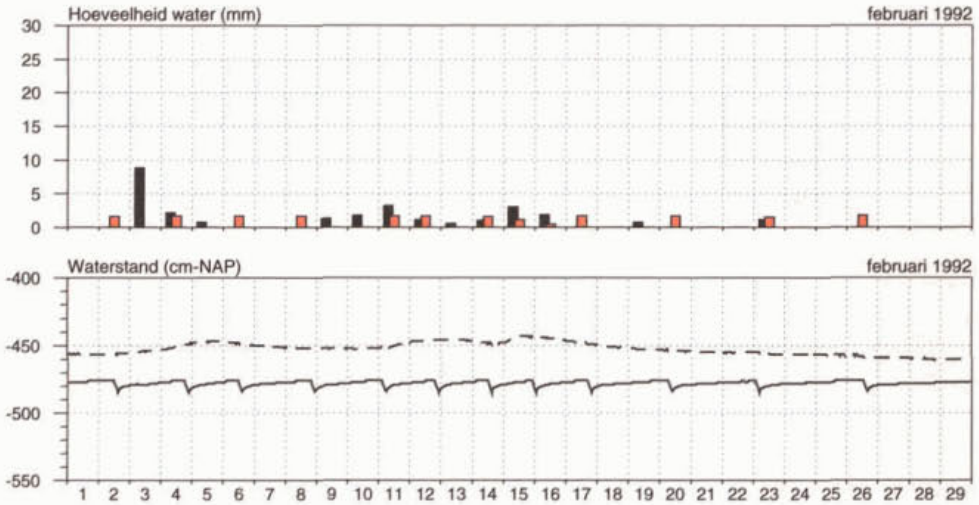

Hoeveelheid water (mm)
september 1991
Waterstand (cm-NAP)
september 1991

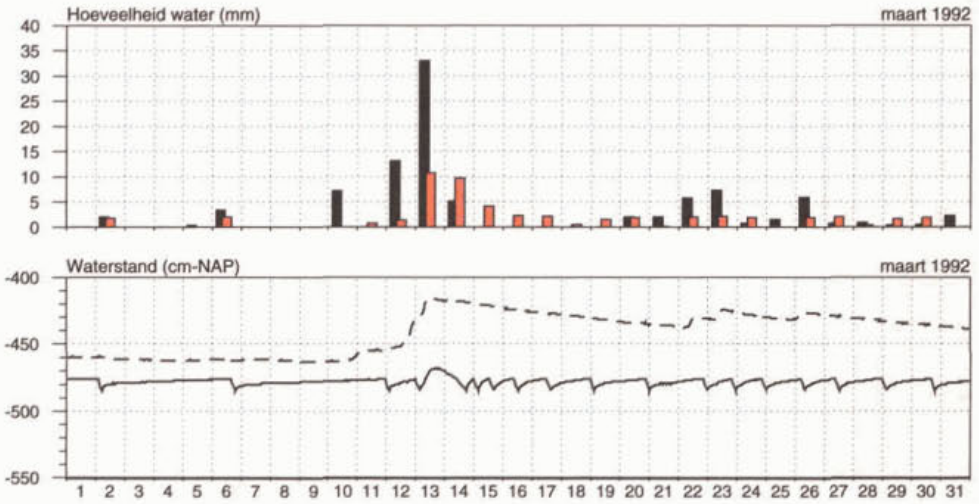

Hoeveelheid water (mm)
oktober 1991
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 1991
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

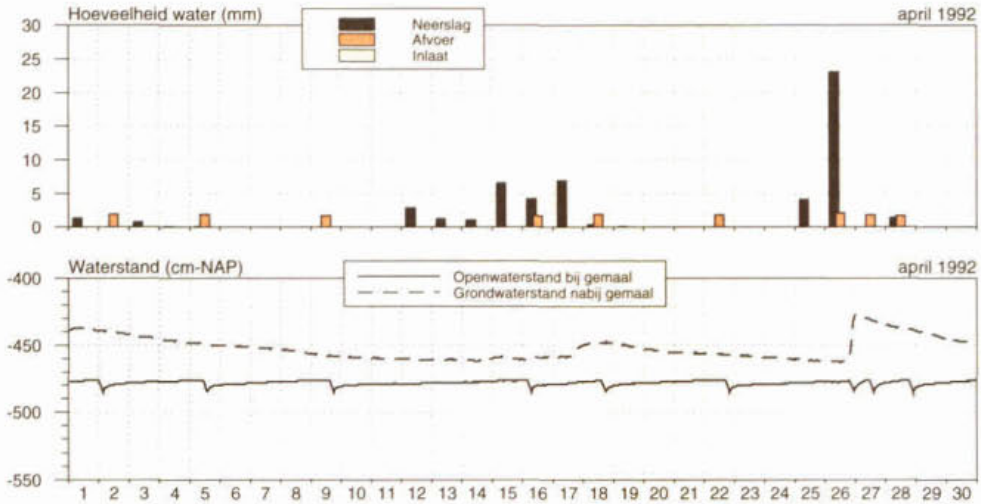

Hoeveelheid water (mm)
november 1991
Waterstand (cm-NAP)
november 1991

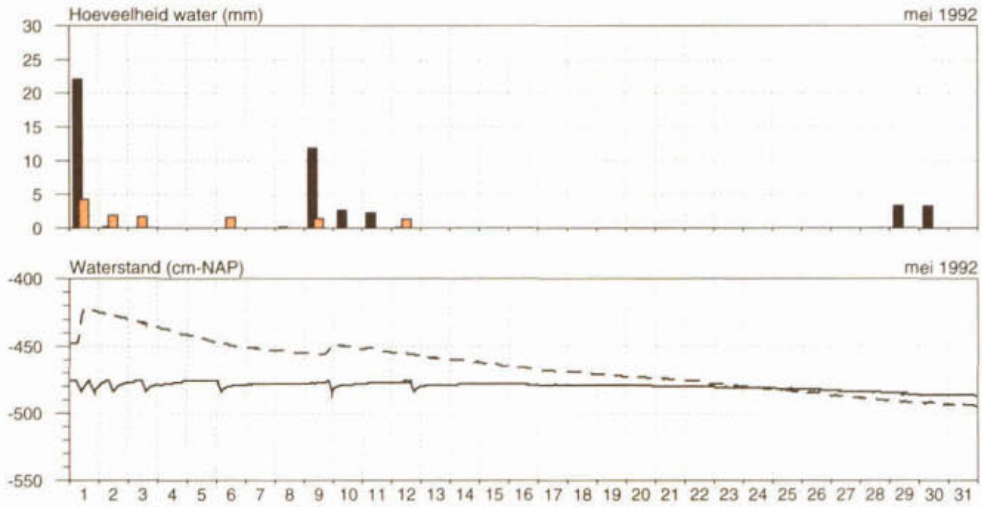

Hoeveelheid water (mm)
december 1991
Waterstand (cm-NAP)
december 1991

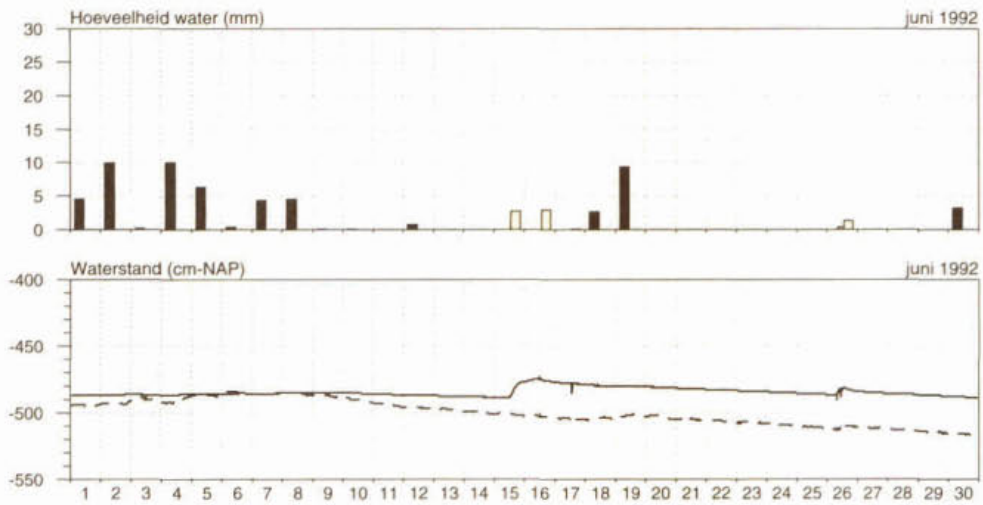

Hoeveelheid water (mm)
januari 1992
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
januari 1992
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

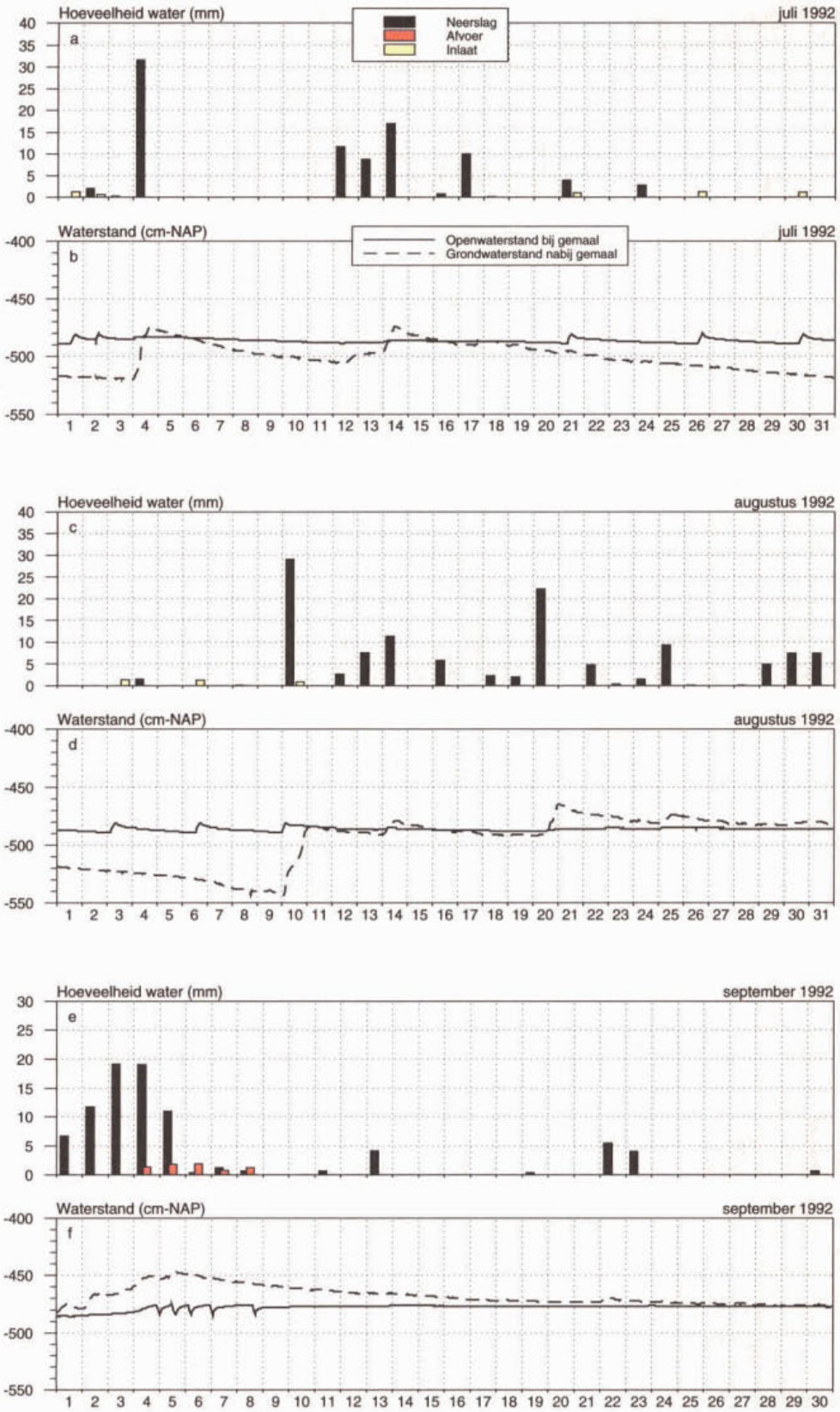

Hoeveelheid water (mm)
februari 1992
Waterstand (cm-NAP)
februari 1992

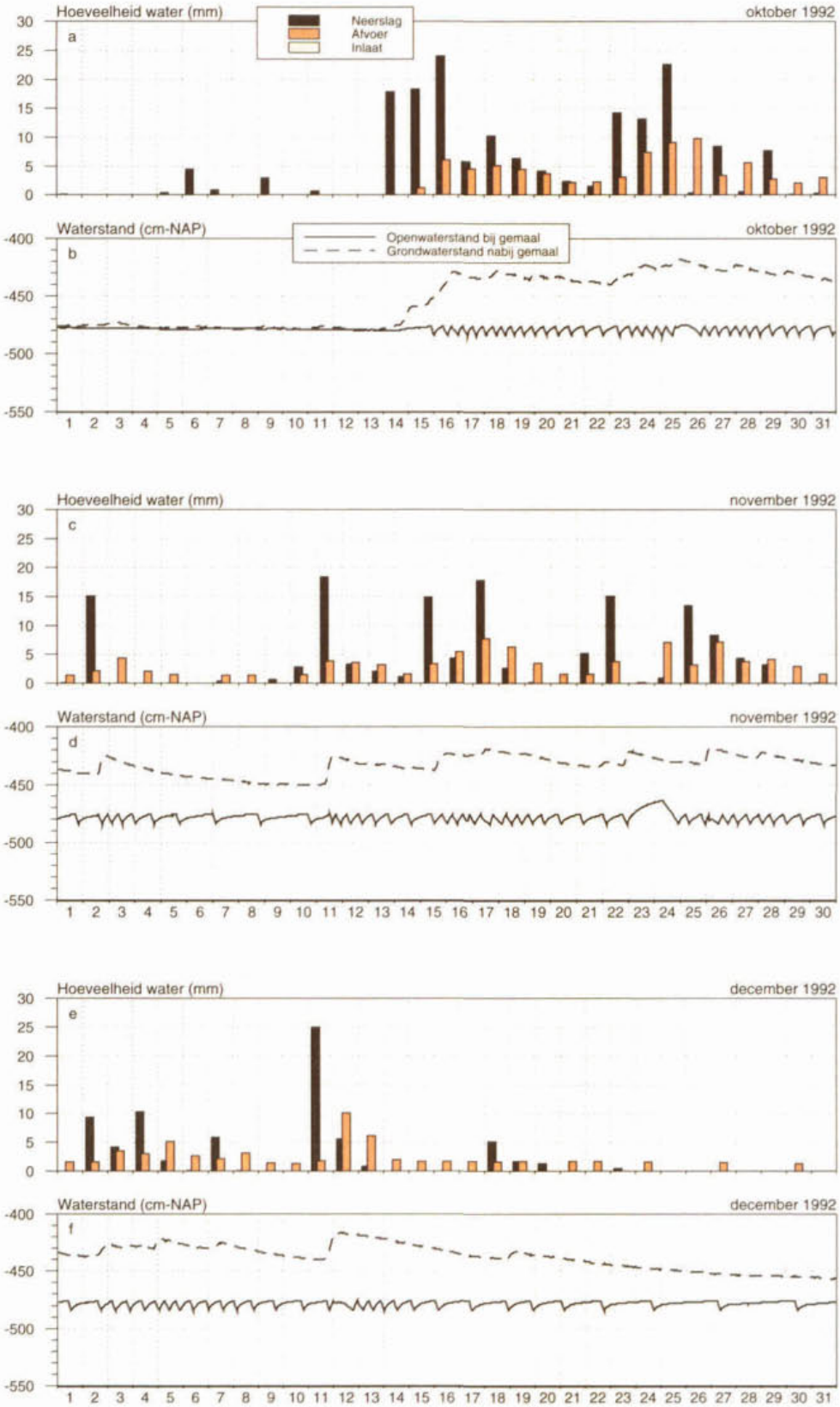

Hoeveelheid water (mm)
maart 1992
Waterstand (cm-NAP)
maart 1992

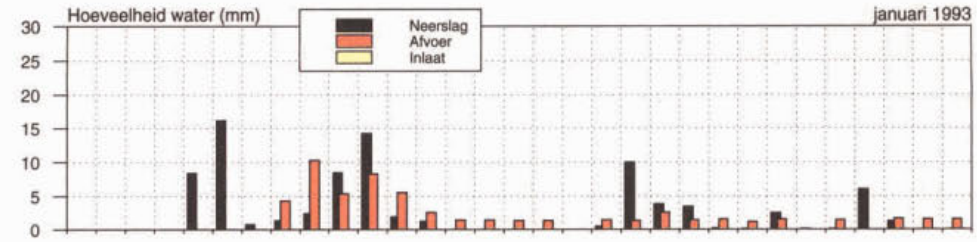

Hoeveelheid water (mm)
april 1992
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
april 1992
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

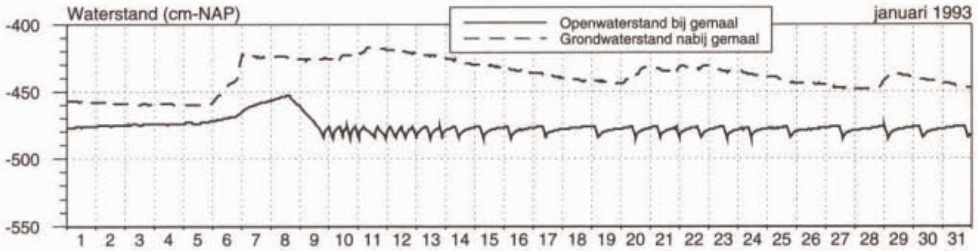

Hoeveelheid water (mm)
mei 1992
Waterstand (cm-NAP)
mei 1992

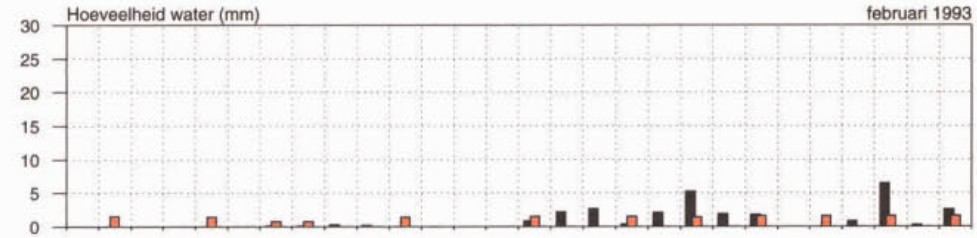

Hoeveelheid water (mm)
juni 1992
Waterstand (cm-NAP)
juni 1992

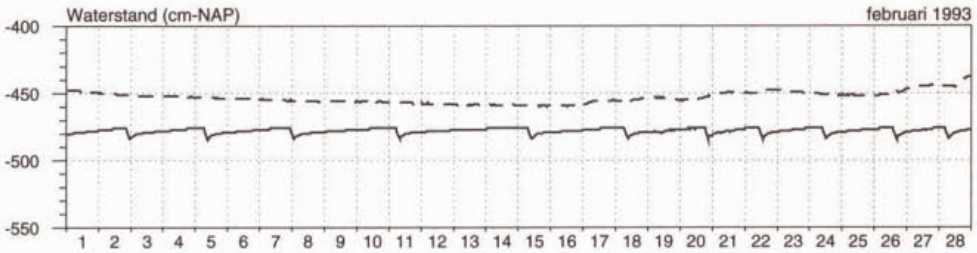

Hoeveelheid water (mm)
juli 1992
a
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 1992
b
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal
Hoeveelheid water (mm)
augustus 1992
c
Waterstand (cm-NAP)
augustus 1992
d
Hoeveelheid water (mm)
september 1992
e
Waterstand (cm-NAP)
september 1992
f

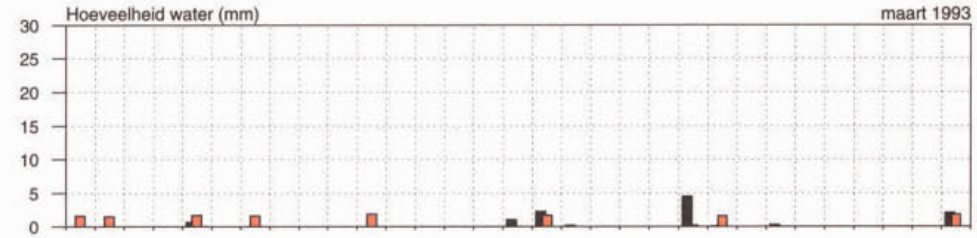

Hoeveelheid water (mm)
oktober 1992
a
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 1992
b
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal
Hoeveelheid water (mm)
november 1992
c
Waterstand (cm-NAP)
november 1992
d
Hoeveelheid water (mm)
december 1992
e
Waterstand (cm-NAP)
december 1992
f

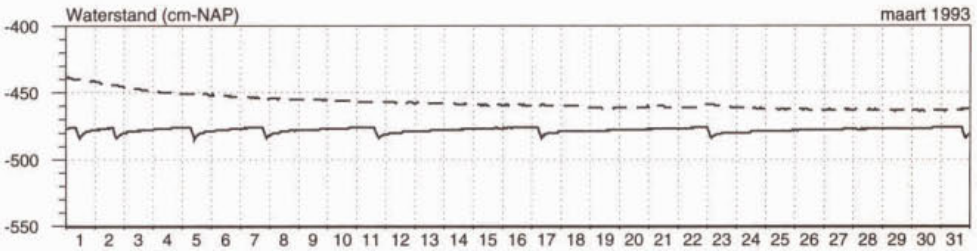

Hoeveelheid water (mm)
januari 1993
Neerslag
Afvoer
Inlaat
30
25
20
15
10
5
0

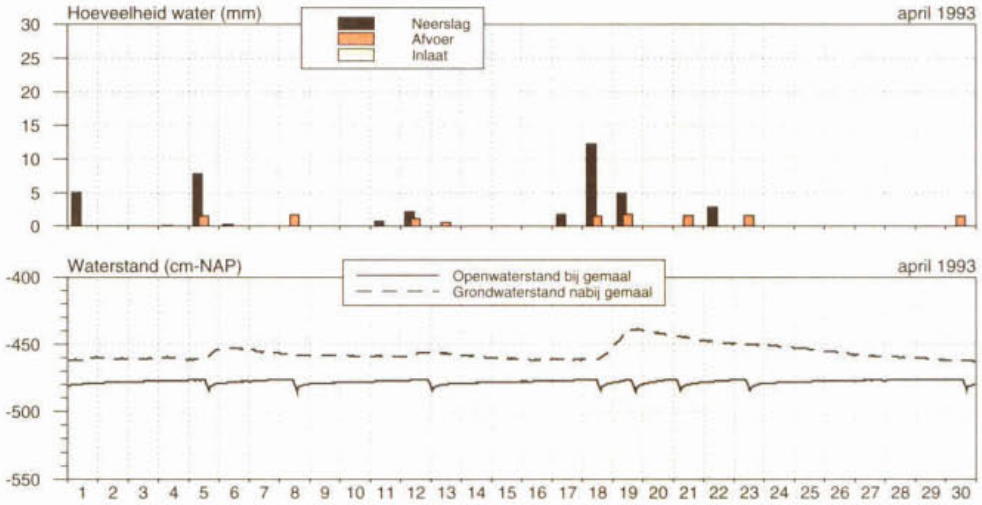

Waterstand (cm-NAP)
januari 1993
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal
-400
-450
-500
-550
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31

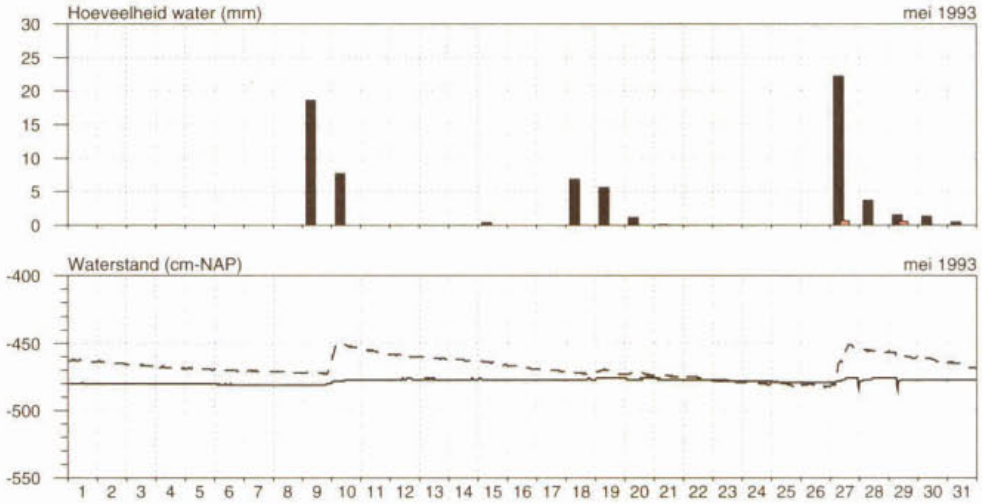

Hoeveelheid water (mm)
februari 1993
30
25
20
15
10
5
0

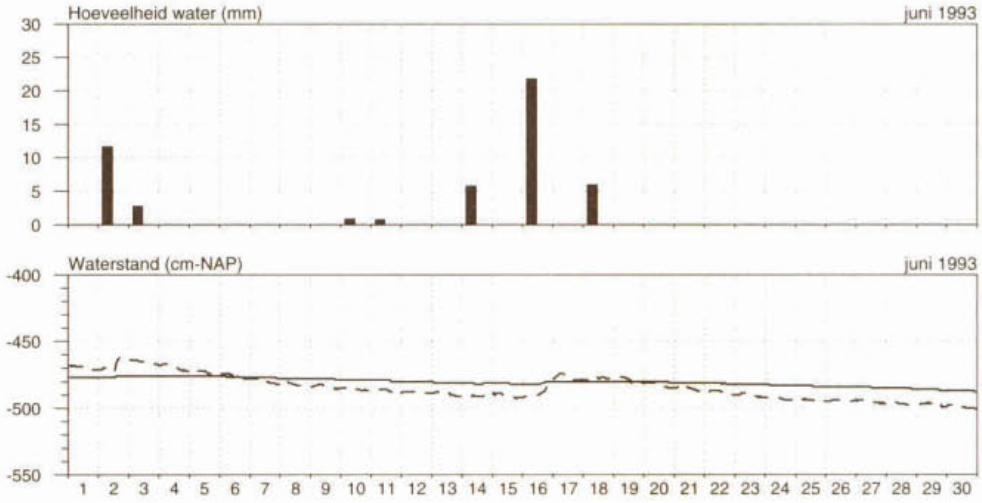

Waterstand (cm-NAP)
februari 1993
-400
-450
-500
-550
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28

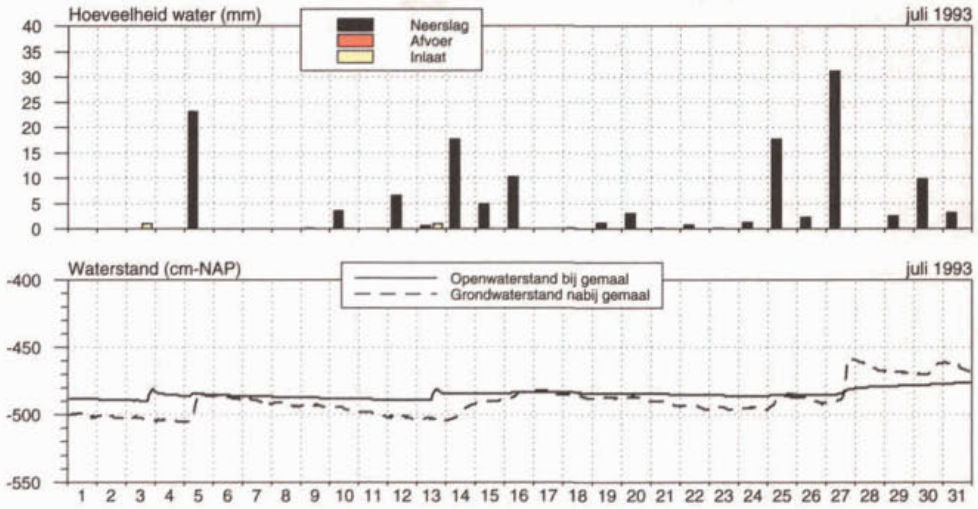

Hoeveelheid water (mm)
maart 1993
30
25
20
15
10
5
0

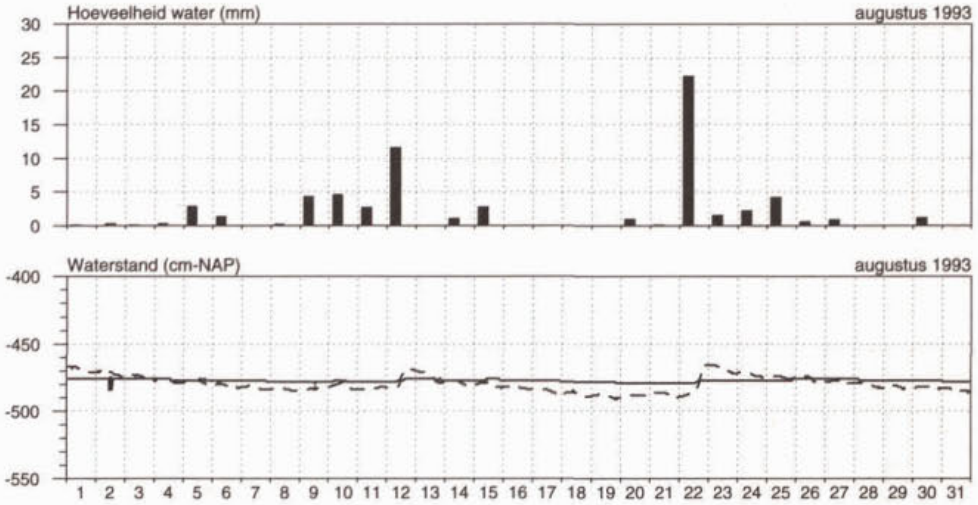

Waterstand (cm-NAP)
maart 1993
-400
-450
-500
-550
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31

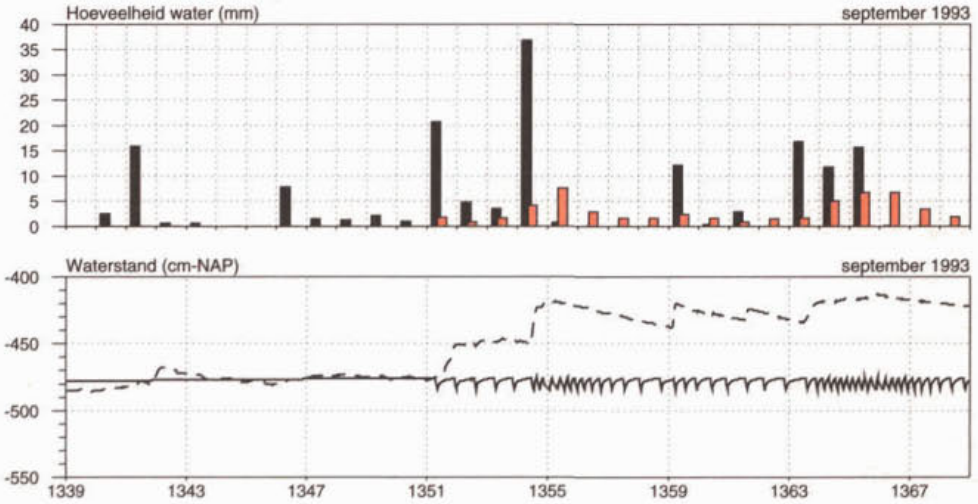

Hoeveelheid water (mm)
april 1993
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
april 1993
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

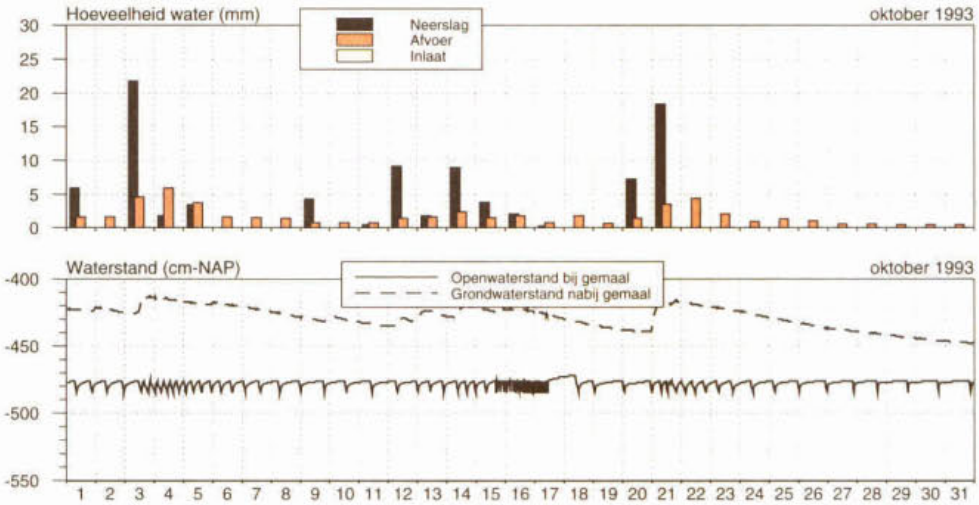

Hoeveelheid water (mm)
mei 1993
Waterstand (cm-NAP)
mei 1993

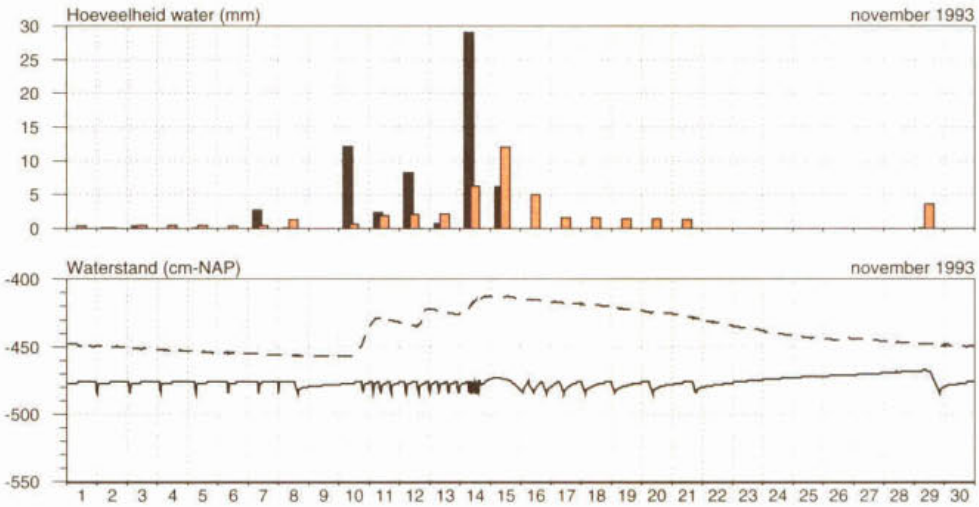

Hoeveelheid water (mm)
juni 1993
Waterstand (cm-NAP)
juni 1993

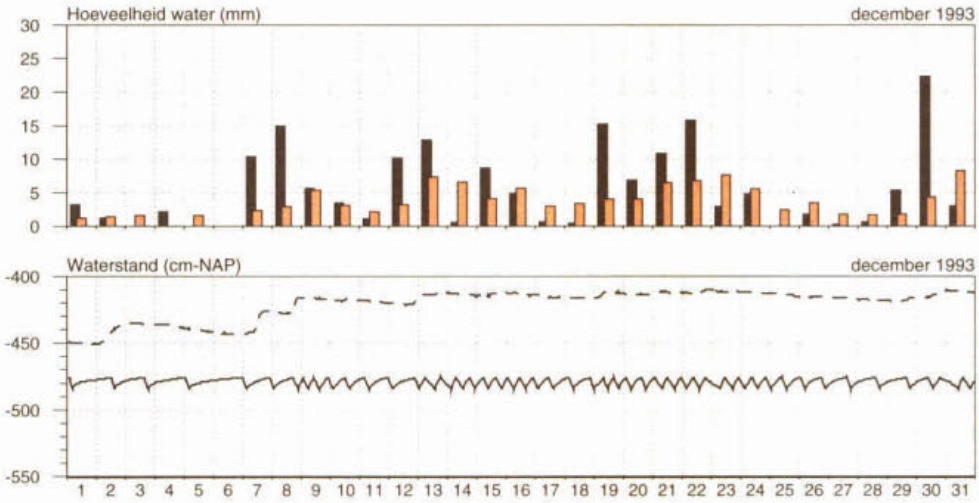

Hoeveelheid water (mm)
juli 1993
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 1993
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

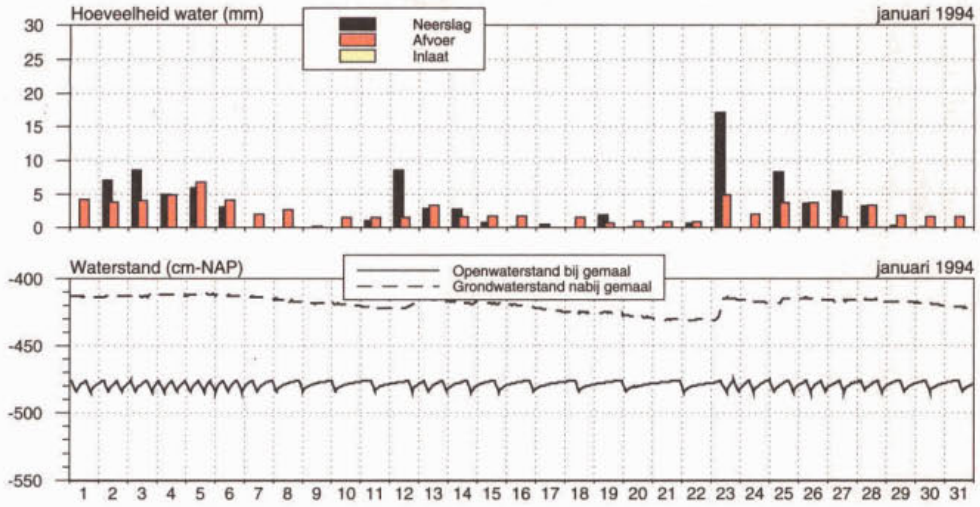

Hoeveelheid water (mm)
augustus 1993
Waterstand (cm-NAP)
augustus 1993

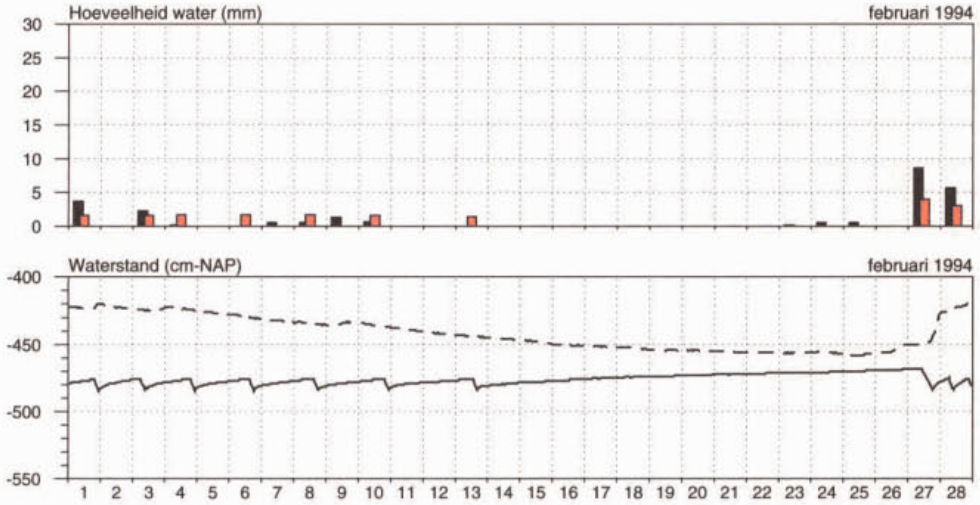

Hoeveelheid water (mm)
september 1993
Waterstand (cm-NAP)
september 1993

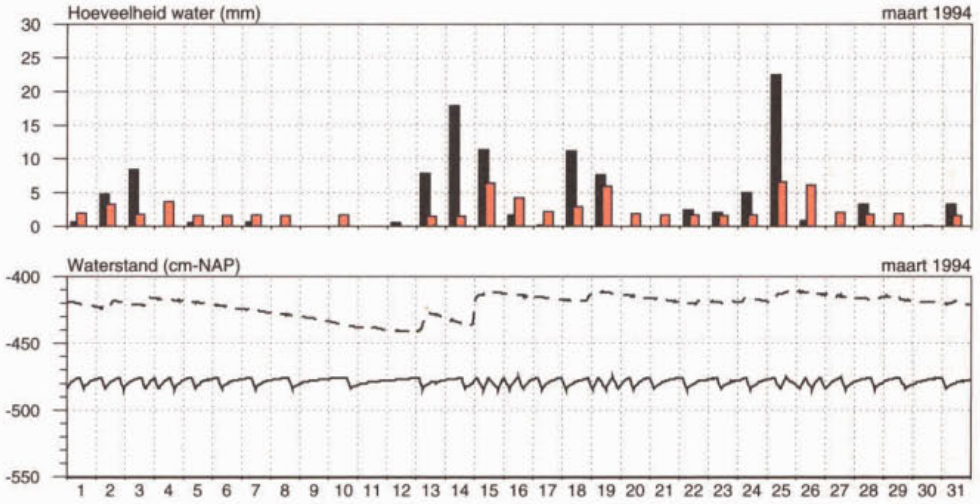

Hoeveelheid water (mm)
oktober 1993
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 1993
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

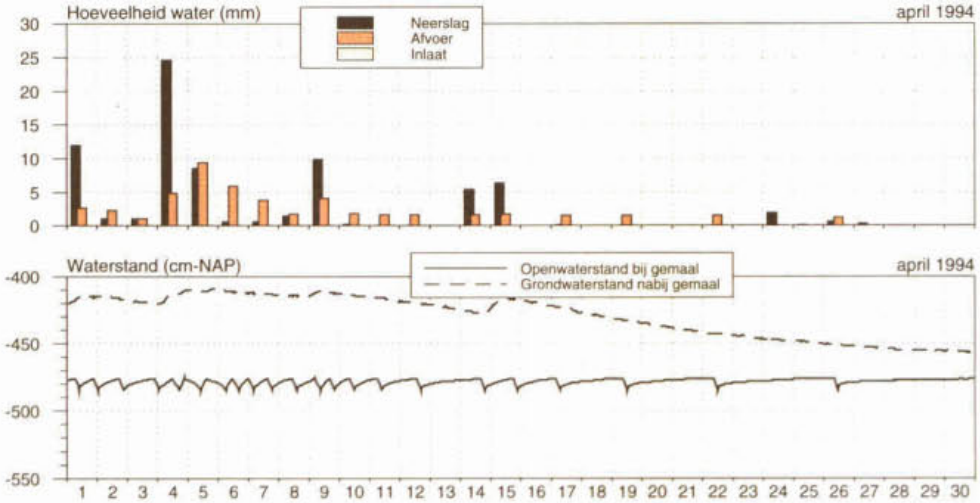

Hoeveelheid water (mm)
november 1993
Waterstand (cm-NAP)
november 1993

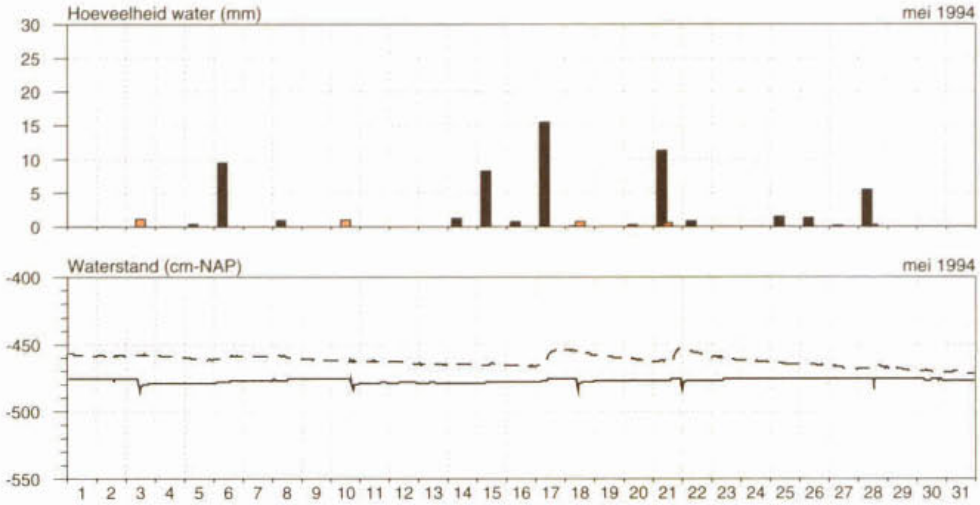

Hoeveelheid water (mm)
december 1993
Waterstand (cm-NAP)
december 1993

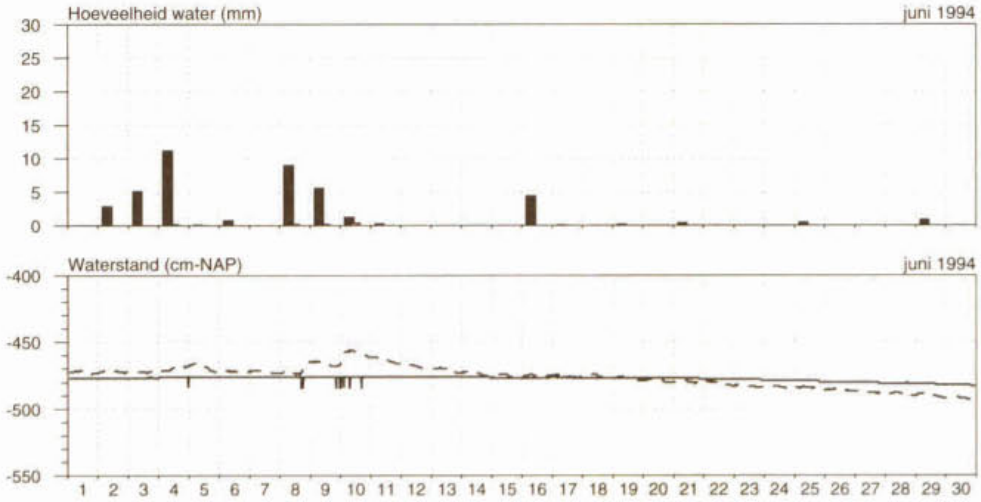

Hoeveelheid water (mm)
januari 1994
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
januari 1994
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

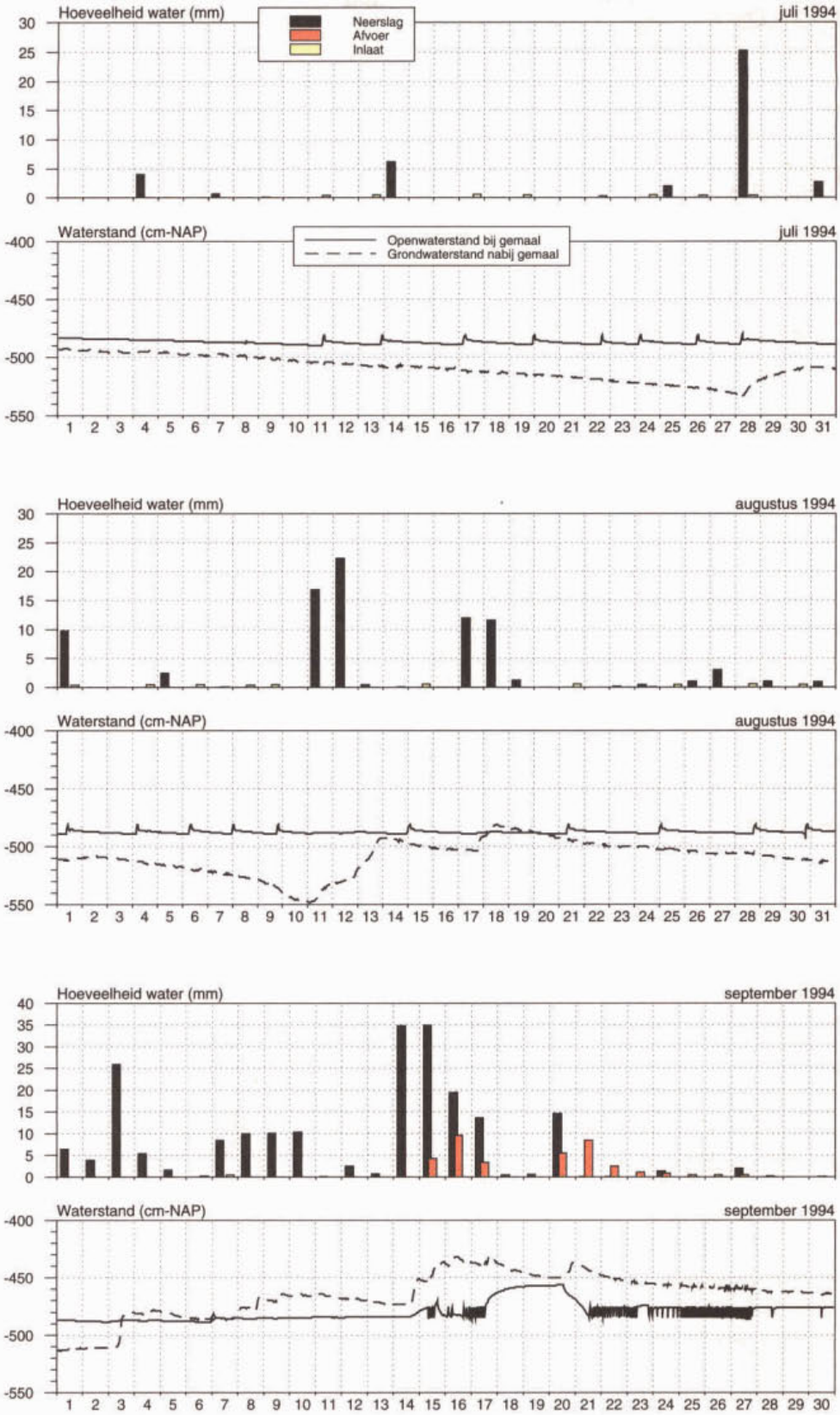

Hoeveelheid water (mm)
februari 1994
Waterstand (cm-NAP)
februari 1994

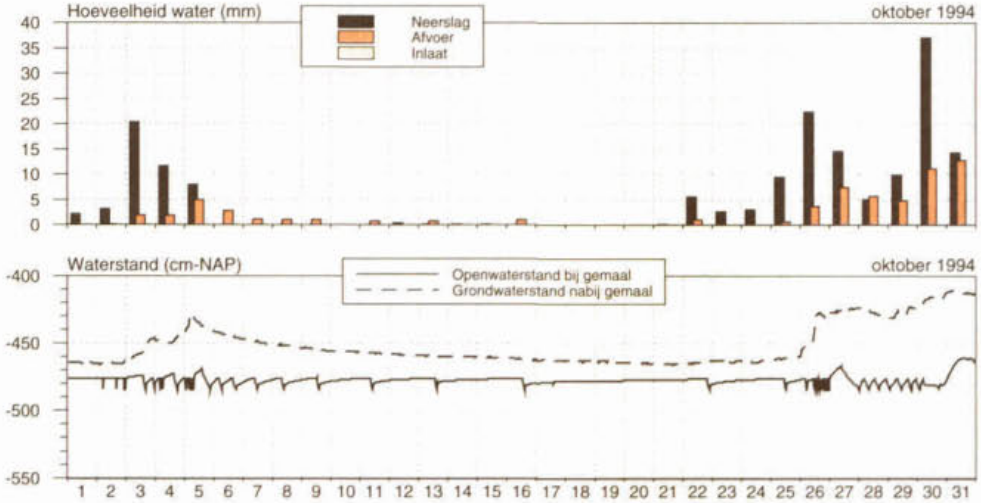

Hoeveelheid water (mm)
maart 1994
Waterstand (cm-NAP)
maart 1994

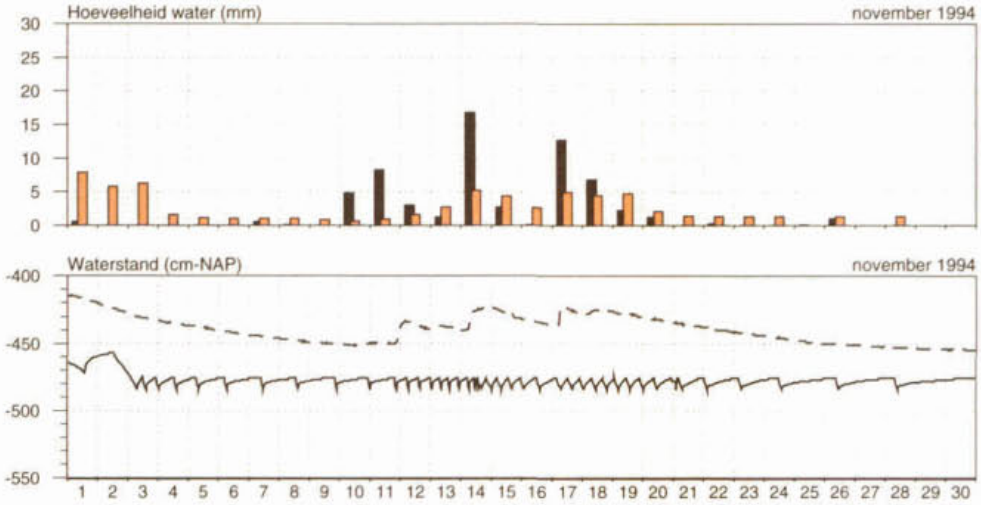

Hoeveelheid water (mm)
april 1994
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
april 1994
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

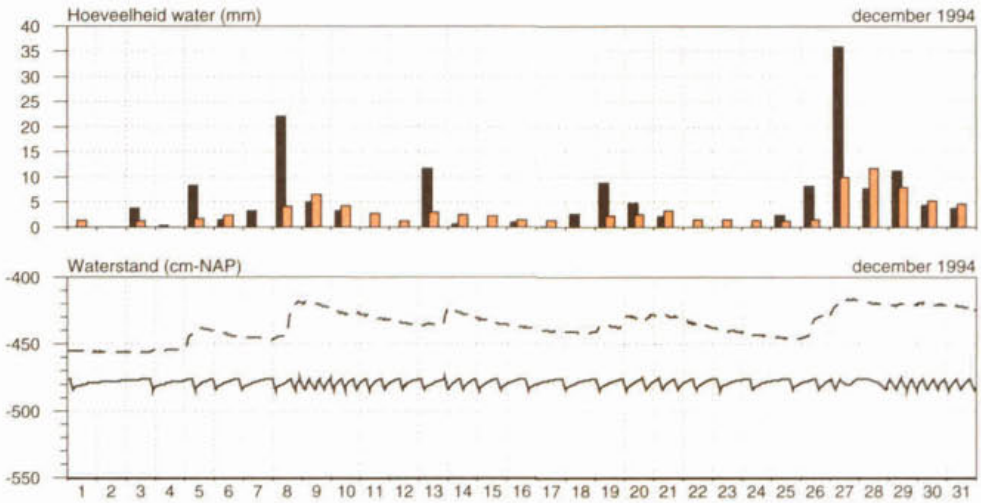

Hoeveelheid water (mm)
mei 1994
Waterstand (cm-NAP)
mei 1994

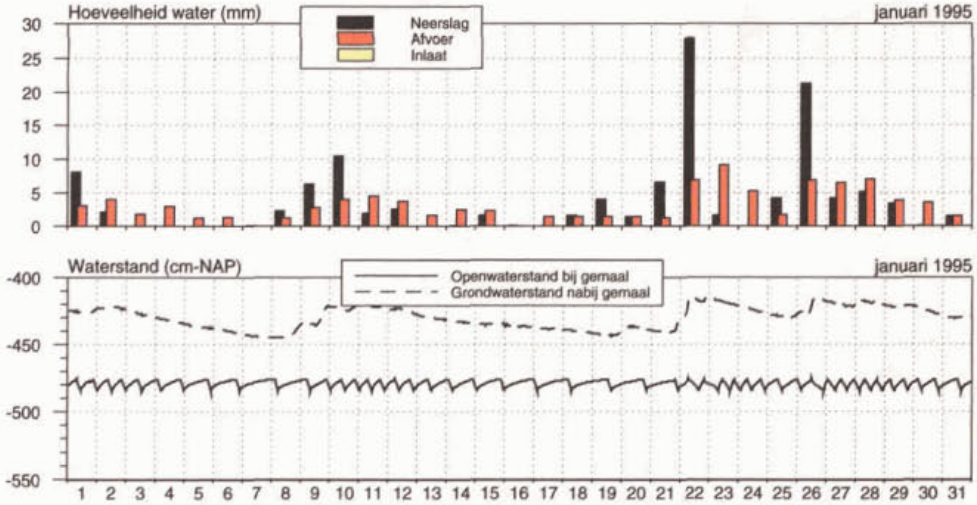

Hoeveelheid water (mm)
juni 1994
Waterstand (cm-NAP)
juni 1994

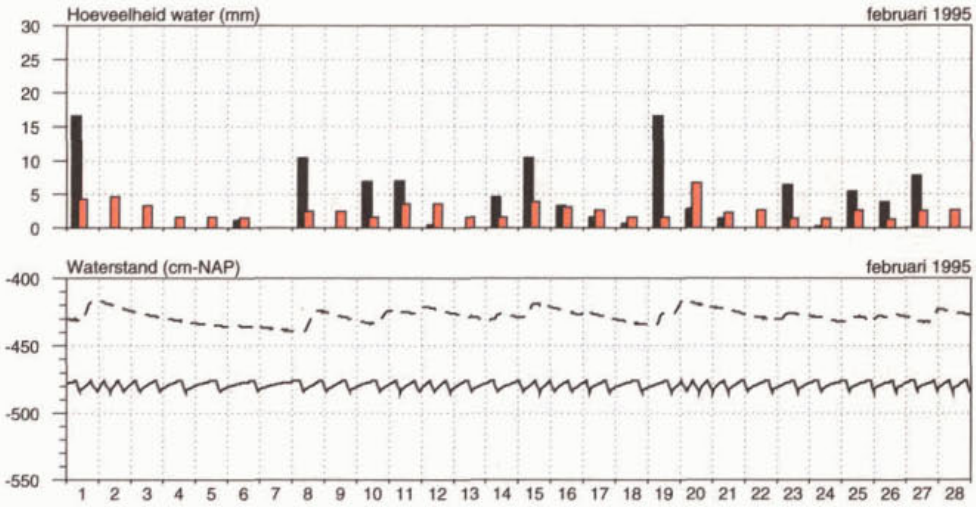

Hoeveelheid water (mm)
juli 1994
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 1994
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal
Hoeveelheid water (mm)
augustus 1994
Waterstand (cm-NAP)
augustus 1994
Hoeveelheid water (mm)
september 1994
Waterstand (cm-NAP)
september 1994

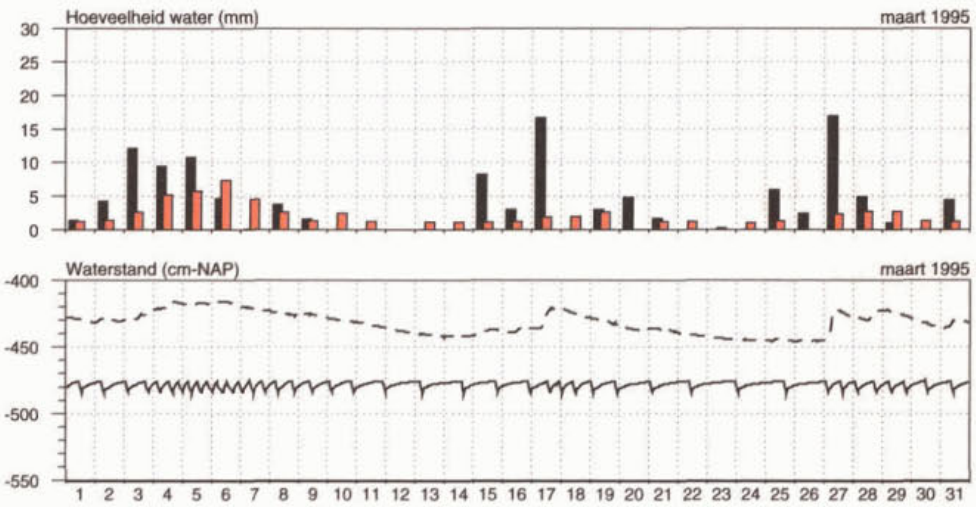

Hoeveelheid water (mm)
oktober 1994
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 1994
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

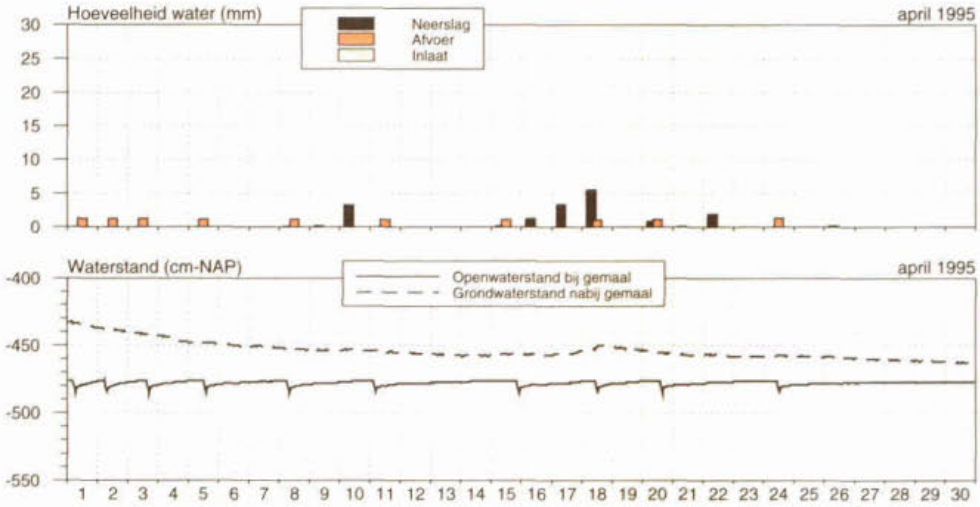

Hoeveelheid water (mm)
november 1994
Waterstand (cm-NAP)
november 1994

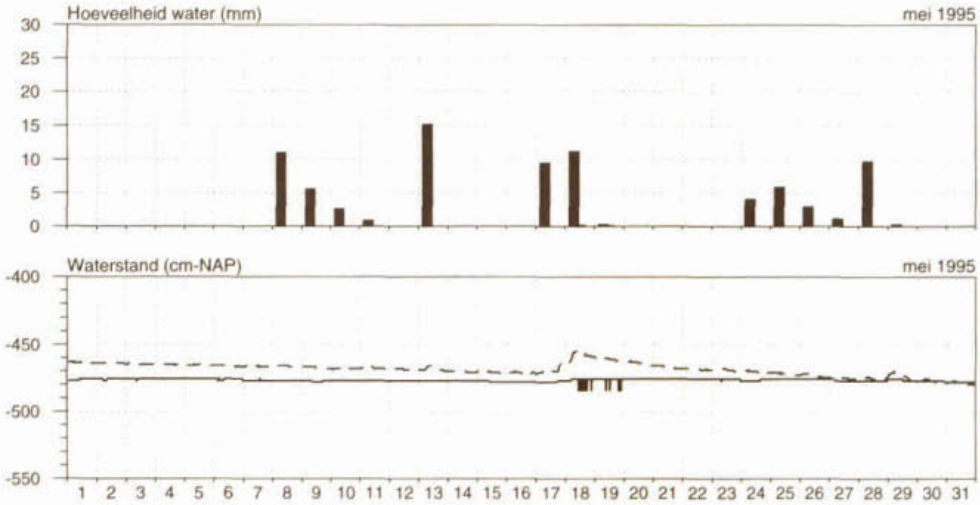

Hoeveelheid water (mm)
december 1994
Waterstand (cm-NAP)
december 1994

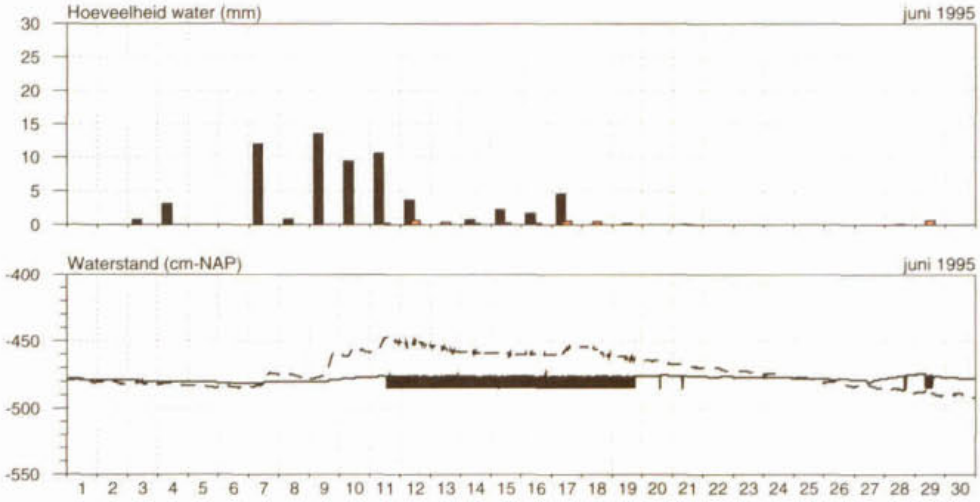

Hoeveelheid water (mm)
januari 1995
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
januari 1995
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

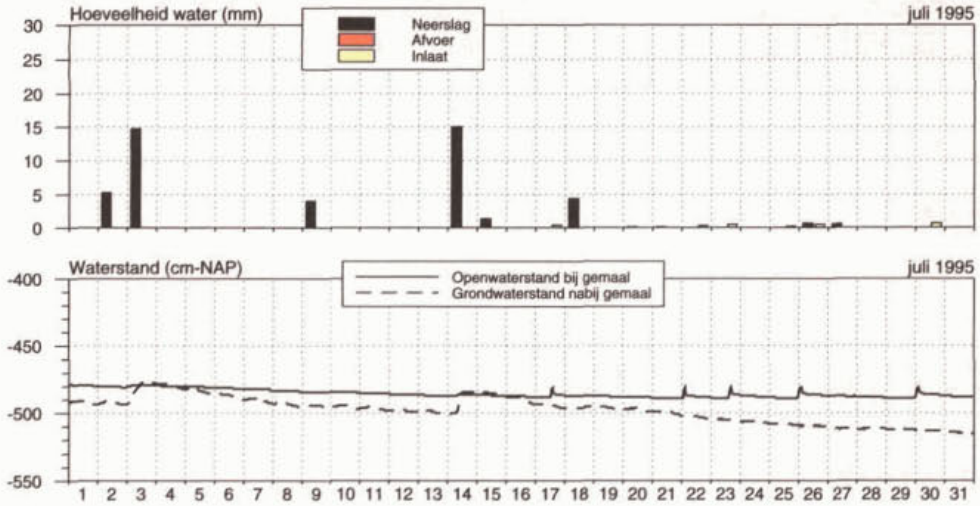

Hoeveelheid water (mm)
februari 1995
Waterstand (cm-NAP)
februari 1995

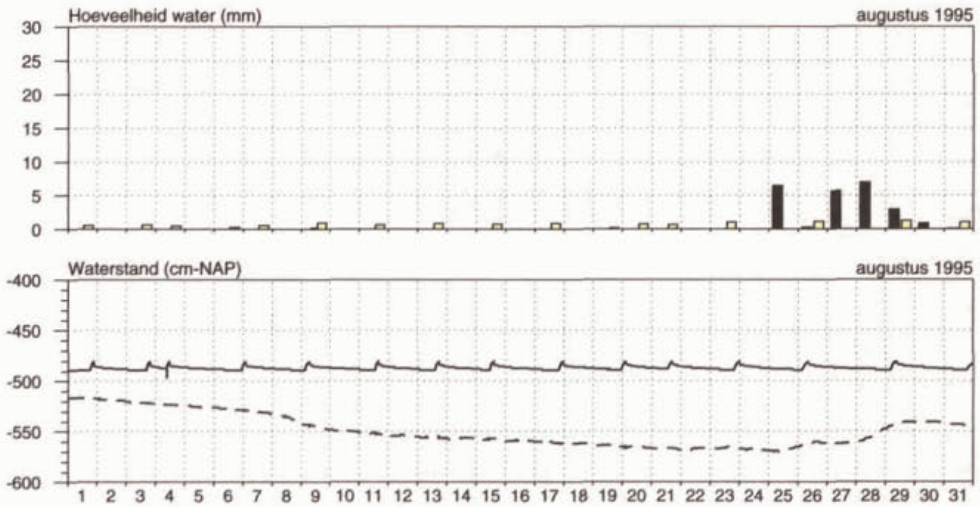

Hoeveelheid water (mm)
maart 1995
Waterstand (cm-NAP)
maart 1995

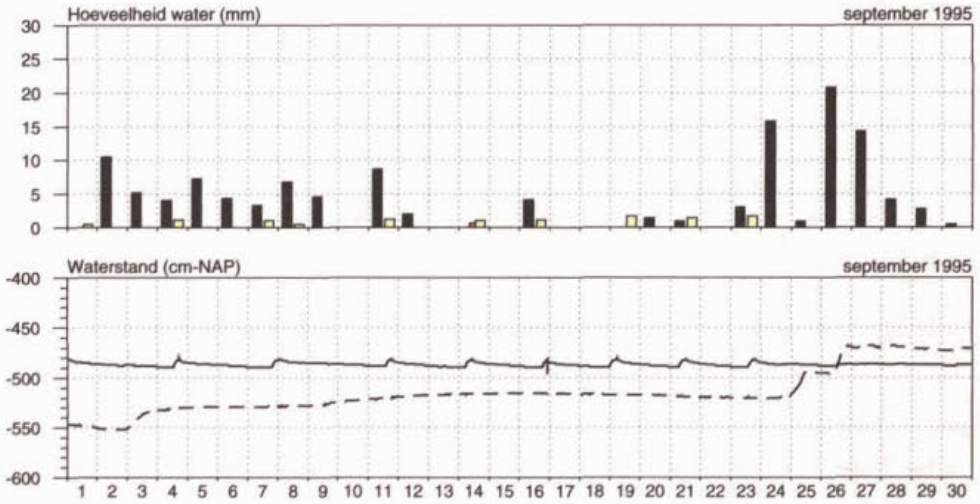

Hoeveelheid water (mm)
april 1995
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
april 1995
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

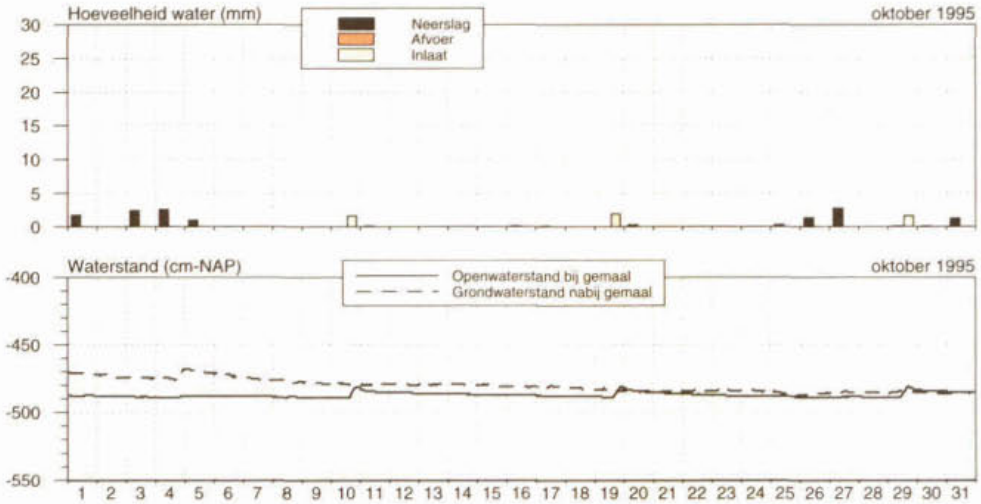

Hoeveelheid water (mm)
mei 1995
Waterstand (cm-NAP)
mei 1995

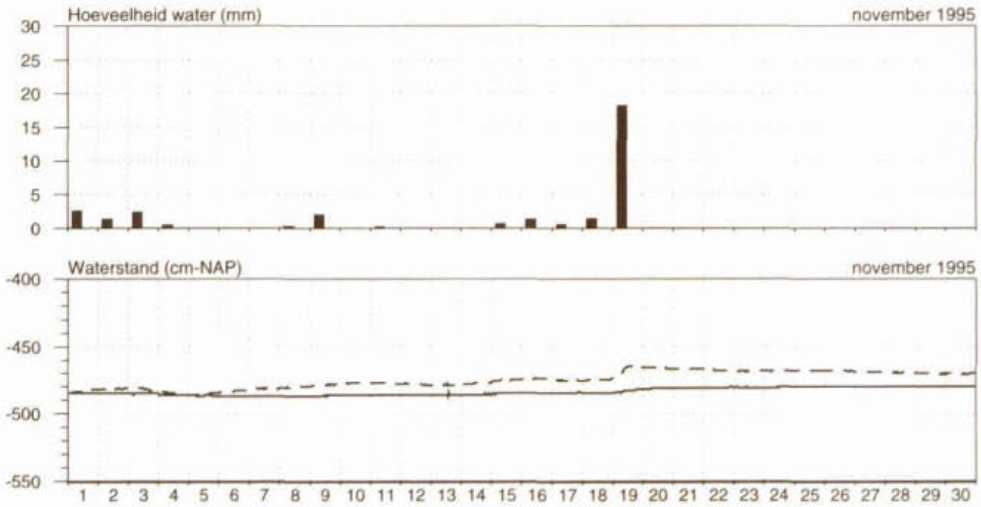

Hoeveelheid water (mm)
juni 1995
Waterstand (cm-NAP)
juni 1995

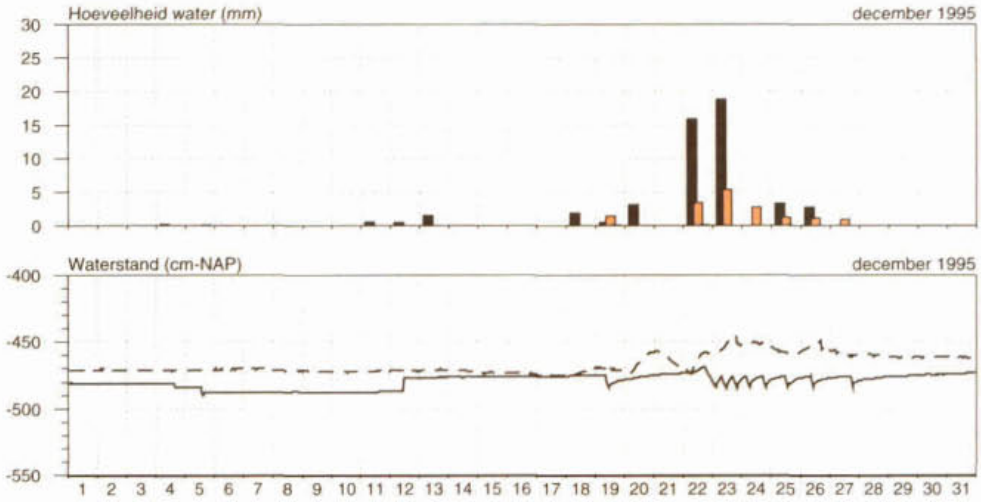

Hoeveelheid water (mm)
juli 1995
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 1995
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

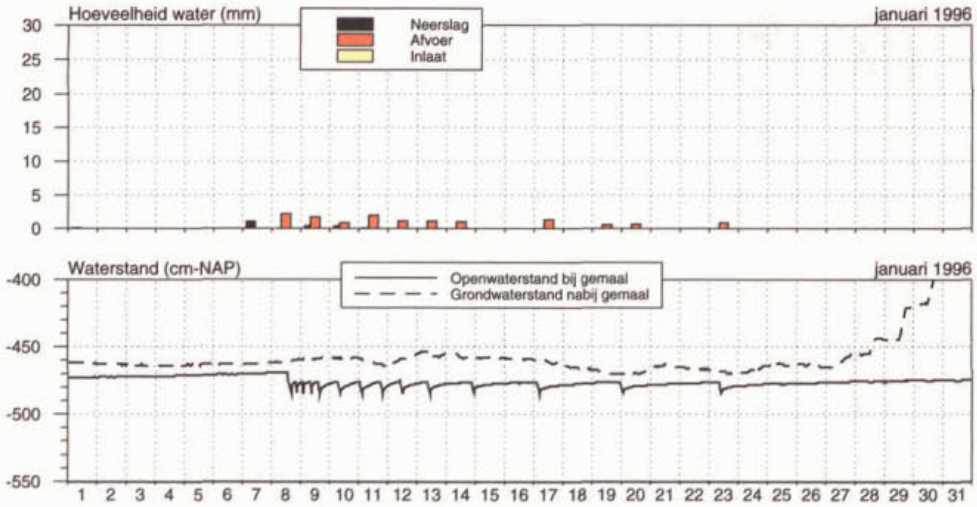

Hoeveelheid water (mm)
augustus 1995
Waterstand (cm-NAP)
augustus 1995

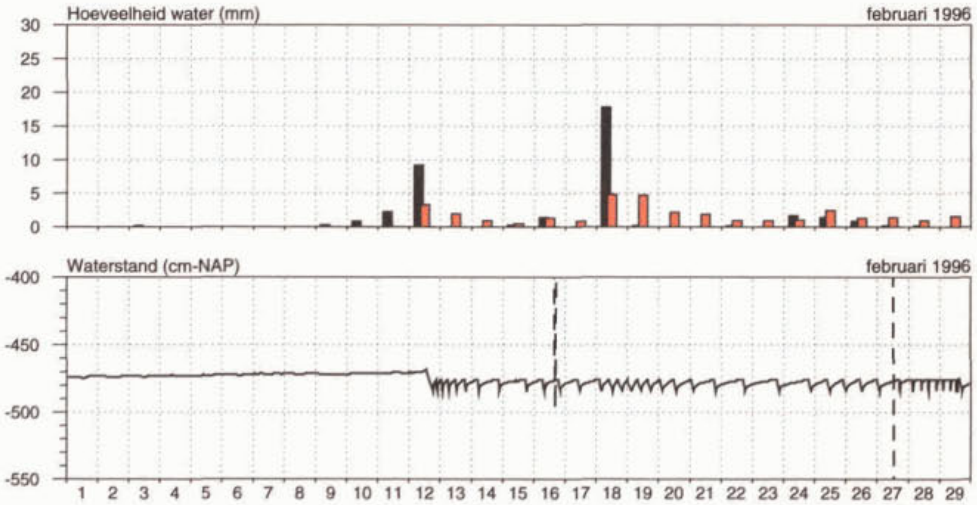

Hoeveelheid water (mm)
september 1995
Waterstand (cm-NAP)
september 1995

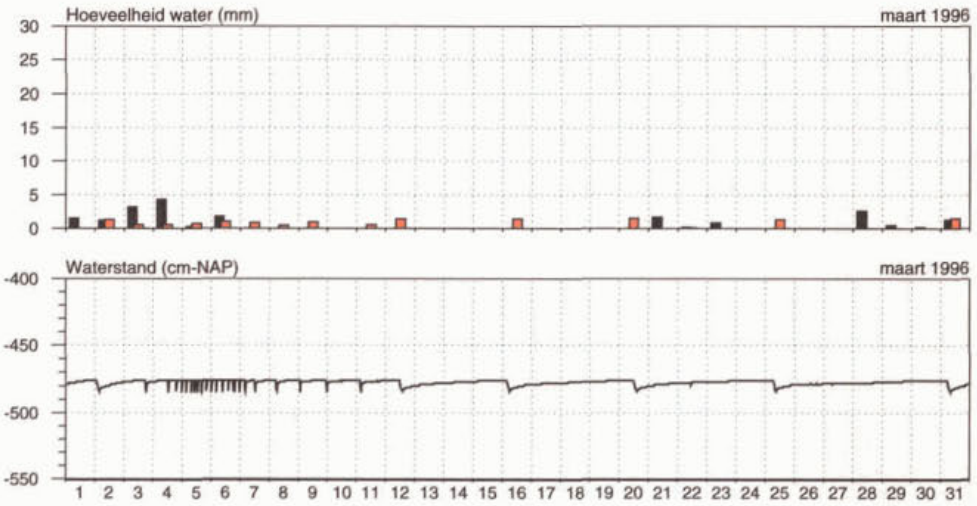

Hoeveelheid water (mm)
oktober 1995
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 1995
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

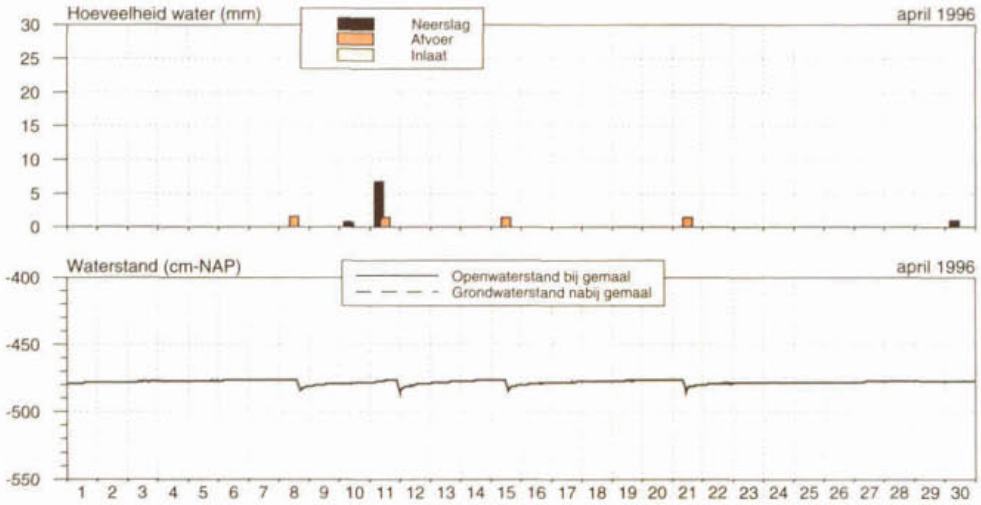

Hoeveelheid water (mm)
november 1995
Waterstand (cm-NAP)
november 1995

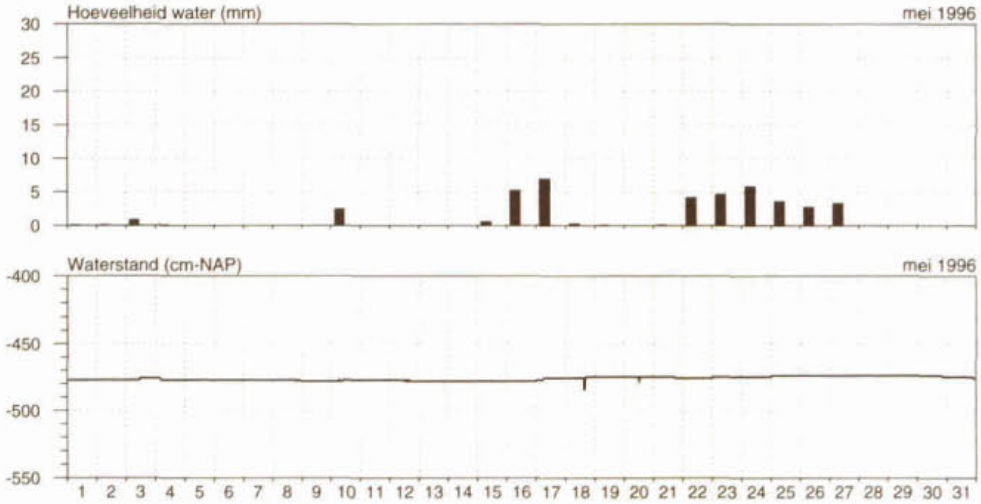

Hoeveelheid water (mm)
december 1995
Waterstand (cm-NAP)
december 1995

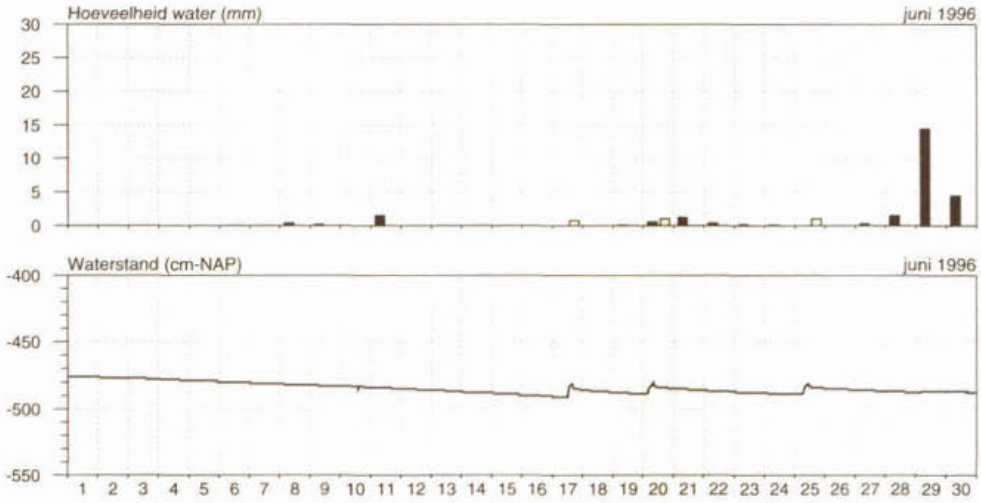

Hoeveelheid water (mm)
januari 1996
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
januari 1996
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

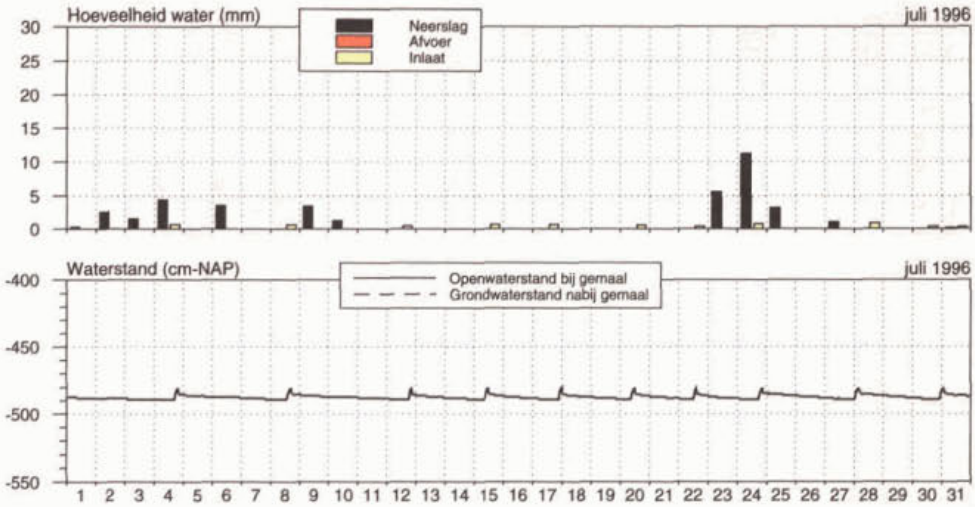

Hoeveelheid water (mm)
februari 1996
Waterstand (cm-NAP)
februari 1996

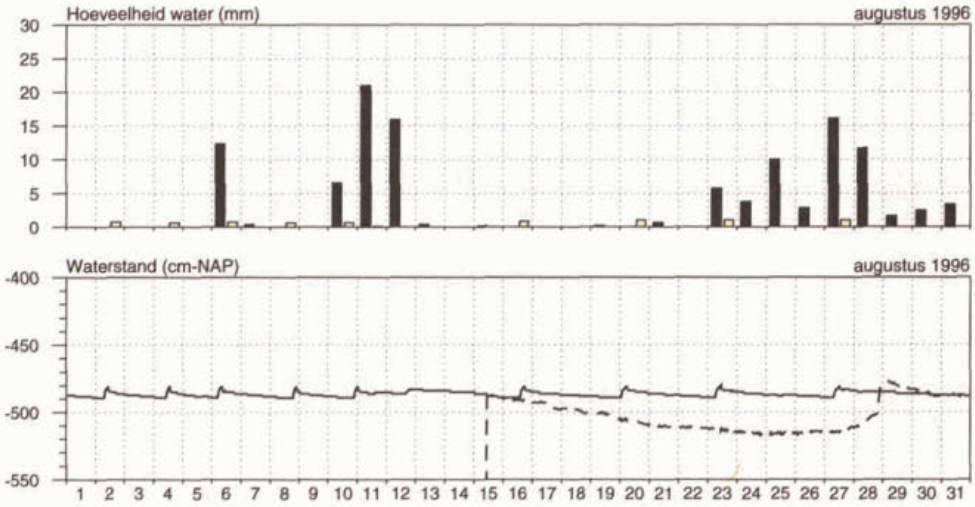

Hoeveelheid water (mm)
maart 1996
Waterstand (cm-NAP)
maart 1996

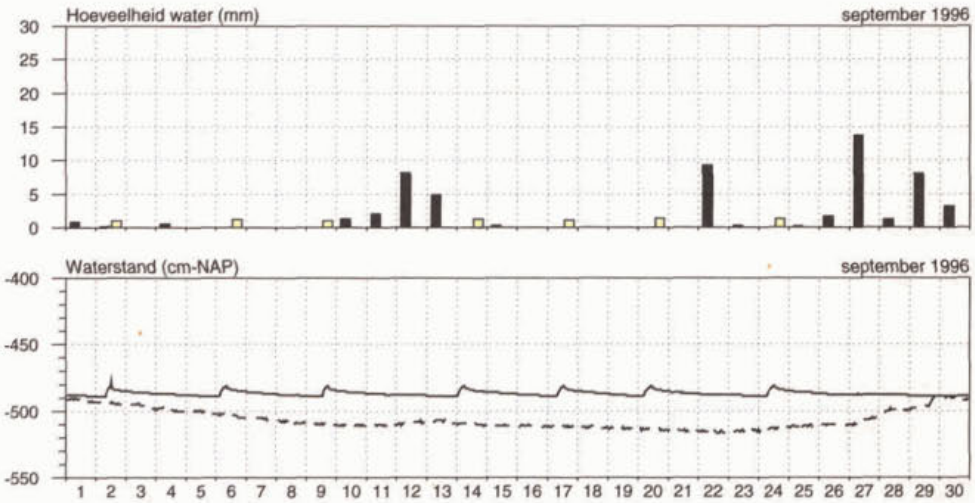

Hoeveelheid water (mm)
april 1996
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
april 1996
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

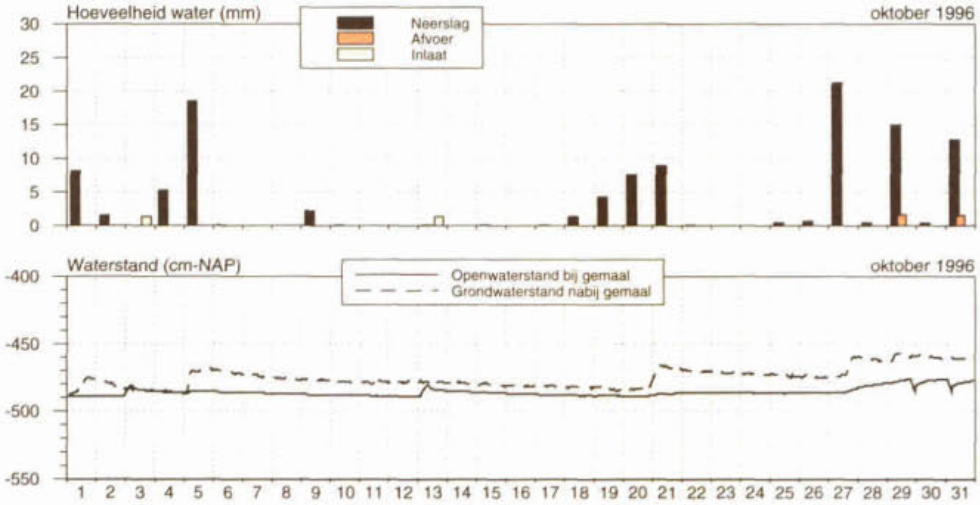

Hoeveelheid water (mm)
mei 1996
Waterstand (cm-NAP)
mei 1996

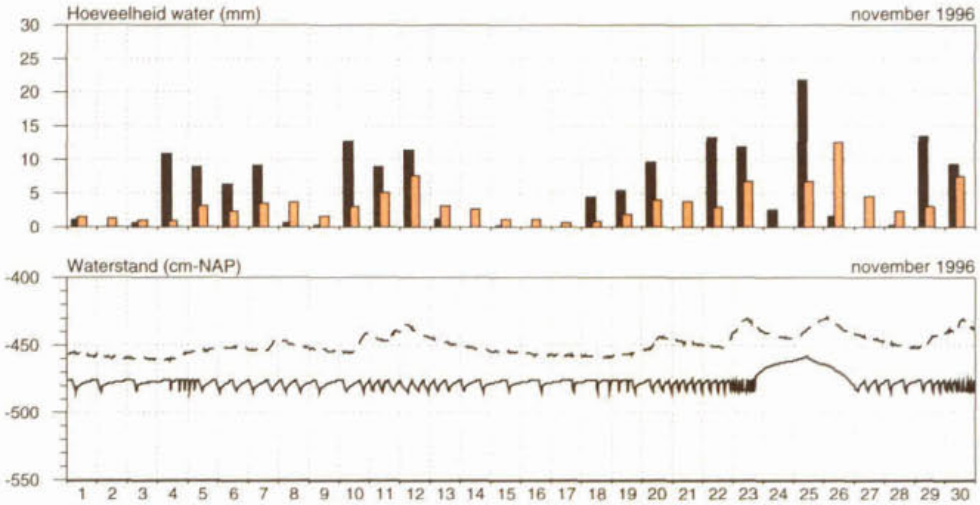

Hoeveelheid water (mm)
juni 1996
Waterstand (cm-NAP)
juni 1996

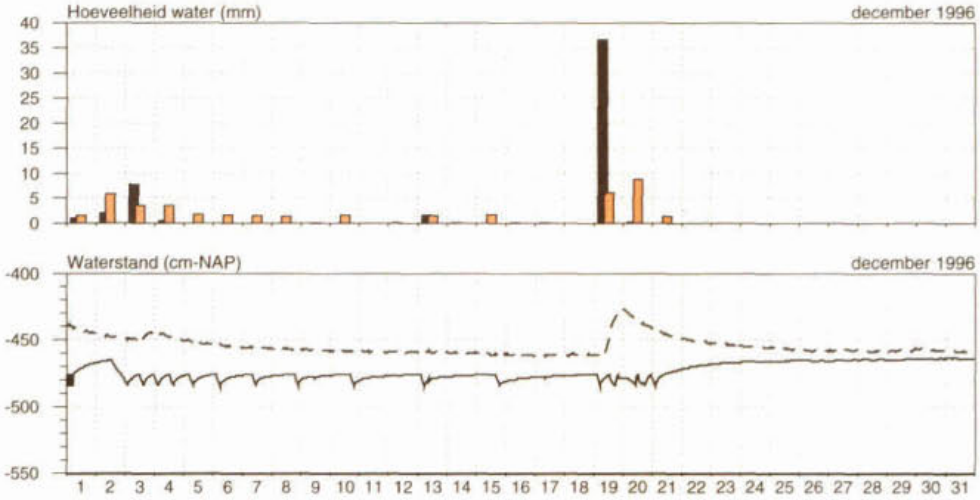

Hoeveelheid water (mm)
juli 1996
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 1996
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

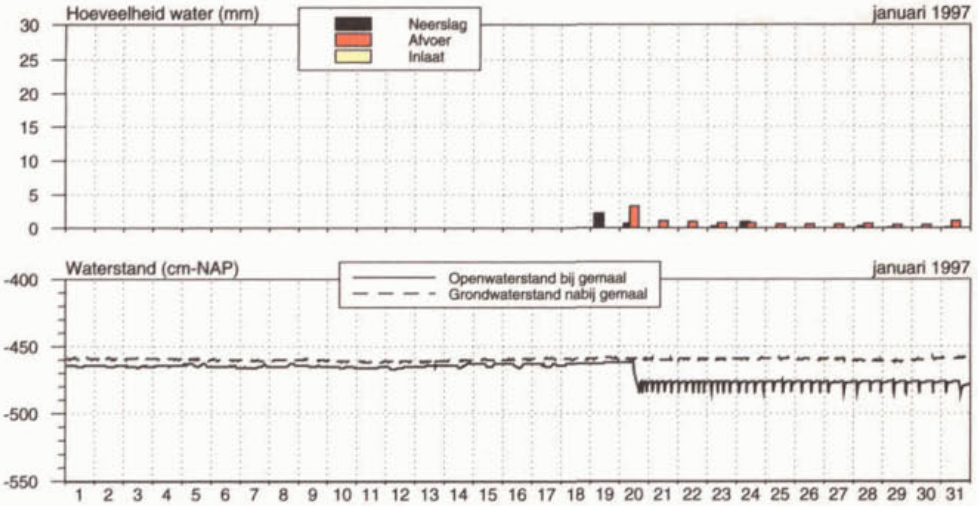

Hoeveelheid water (mm)
augustus 1996
Waterstand (cm-NAP)
augustus 1996

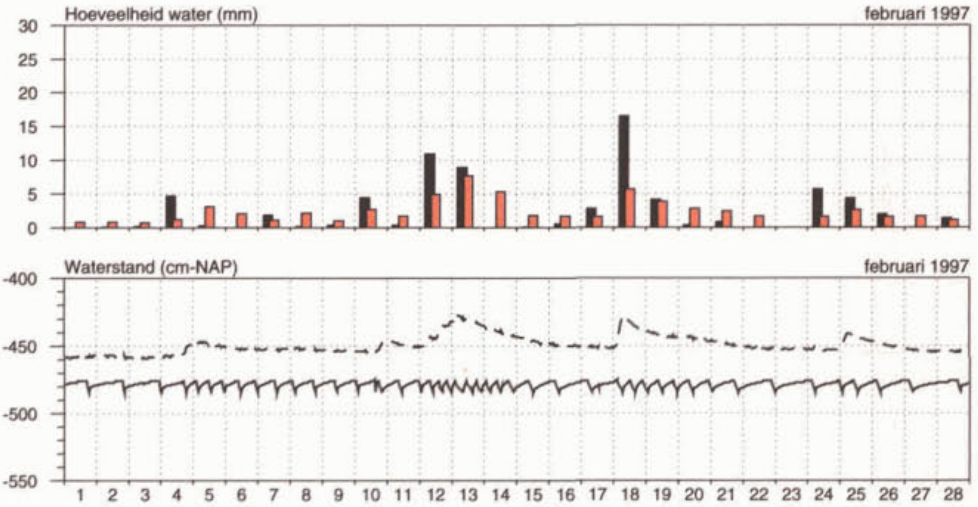

Hoeveelheid water (mm)
september 1996
Waterstand (cm-NAP)
september 1996

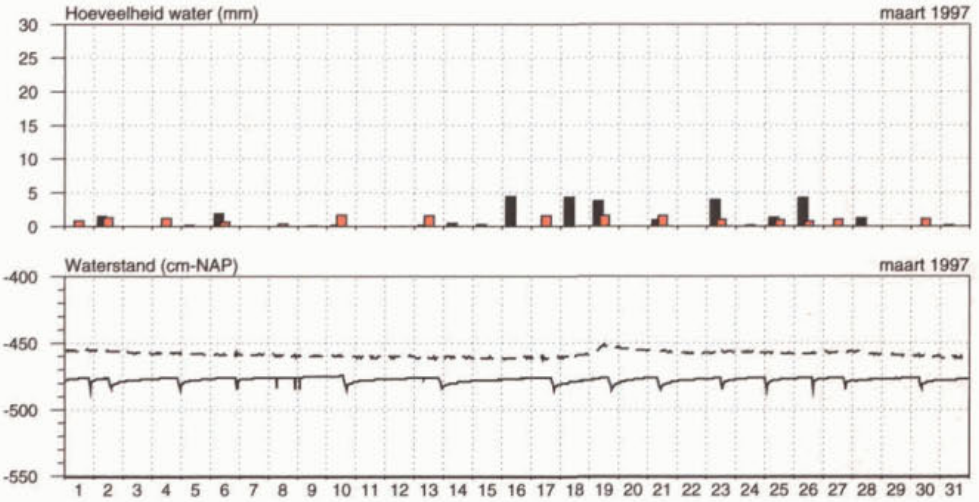

Hoeveelheid water (mm)
oktober 1996
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 1996
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

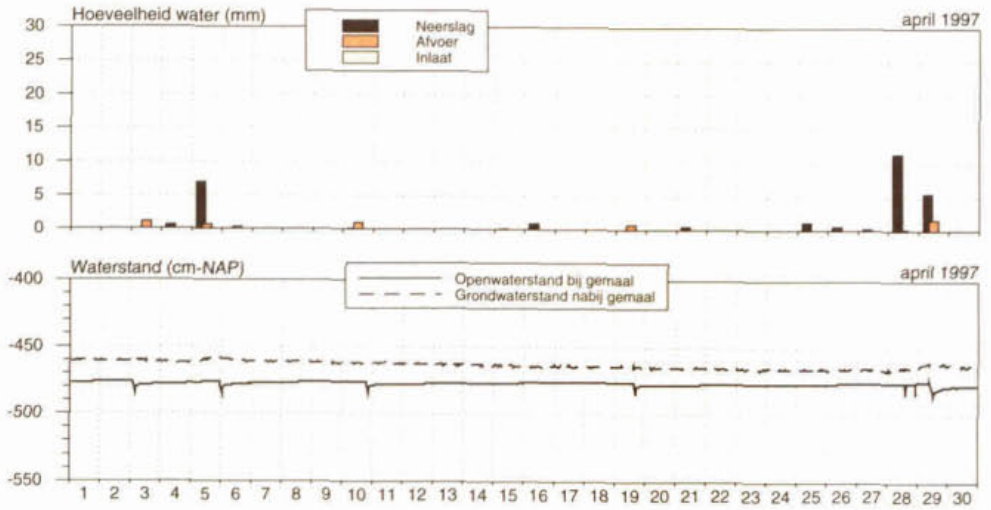

Hoeveelheid water (mm)
november 1996
Waterstand (cm-NAP)
november 1996

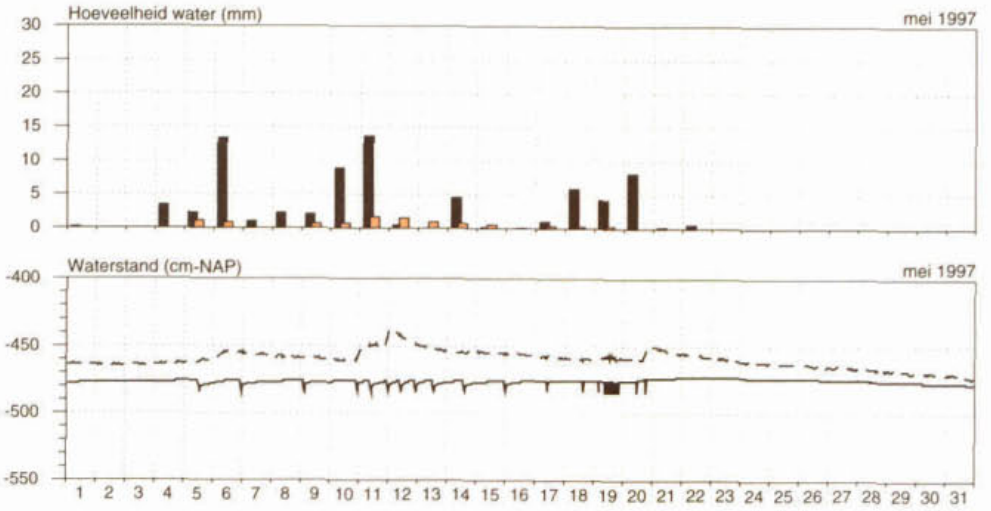

Hoeveelheid water (mm)
december 1996
Waterstand (cm-NAP)
december 1996

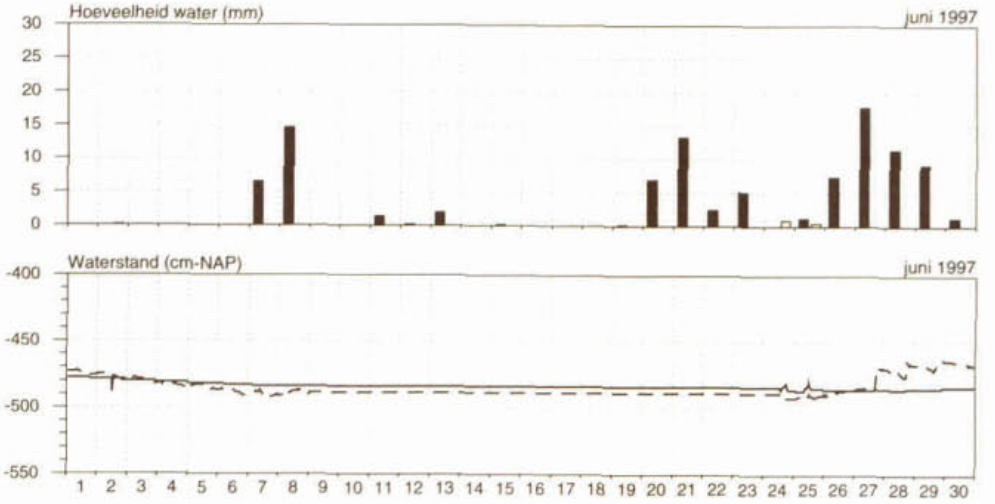

Hoeveelheid water (mm)
januari 1997
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
januari 1997
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

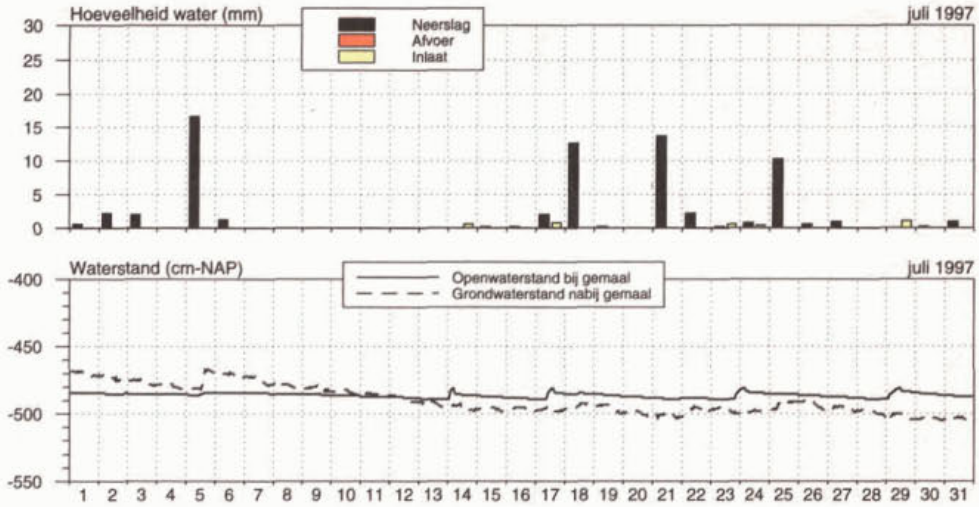

Hoeveelheid water (mm)
februari 1997
Waterstand (cm-NAP)
februari 1997

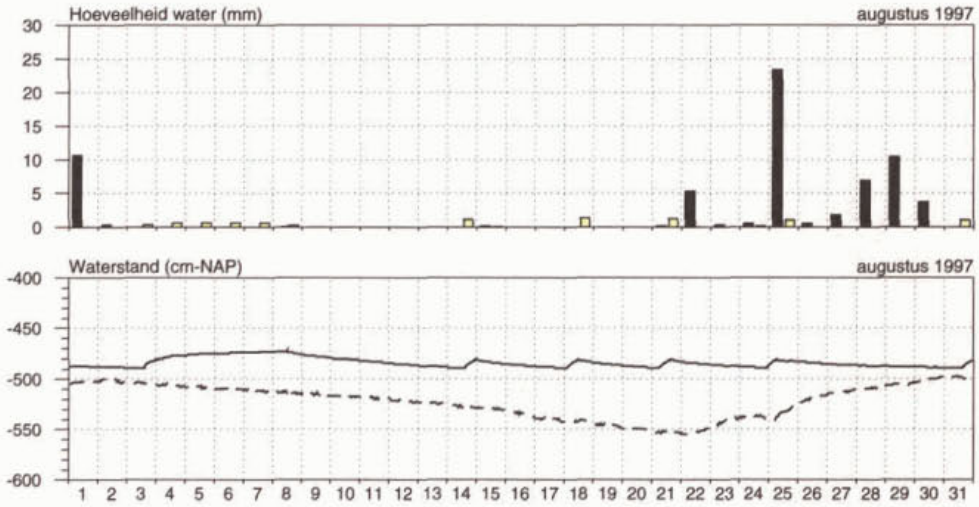

Hoeveelheid water (mm)
maart 1997
Waterstand (cm-NAP)
maart 1997

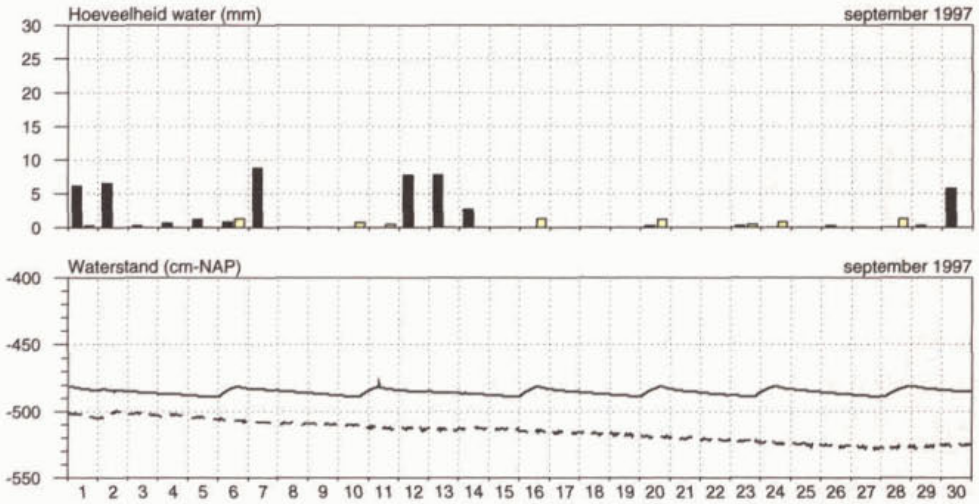

Hoeveelheid water (mm)
Neerslag
Afvoer
Inlaat
april 1997
Waterstand (cm-NAP)
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal
april 1997

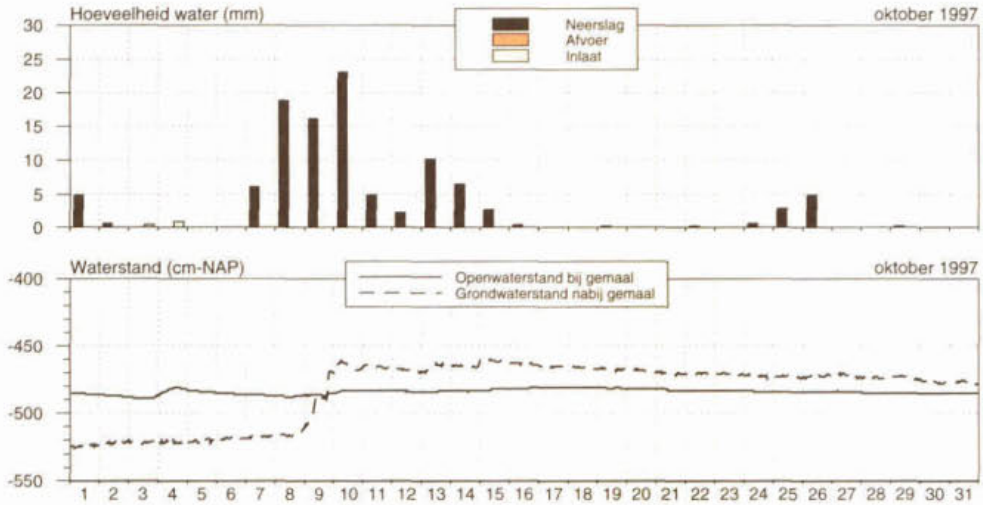

Hoeveelheid water (mm)
mei 1997
Waterstand (cm-NAP)
mei 1997

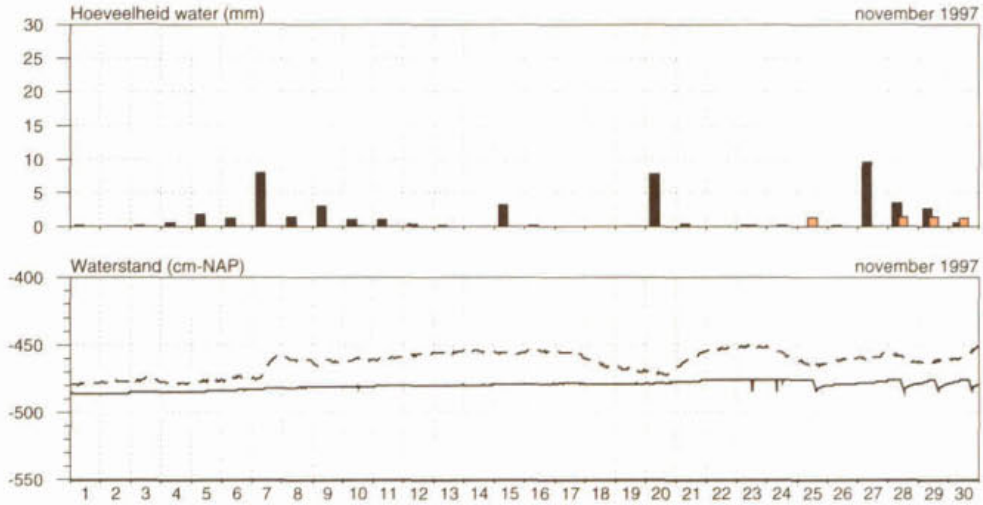

Hoeveelheid water (mm)
juni 1997
Waterstand (cm-NAP)
juni 1997

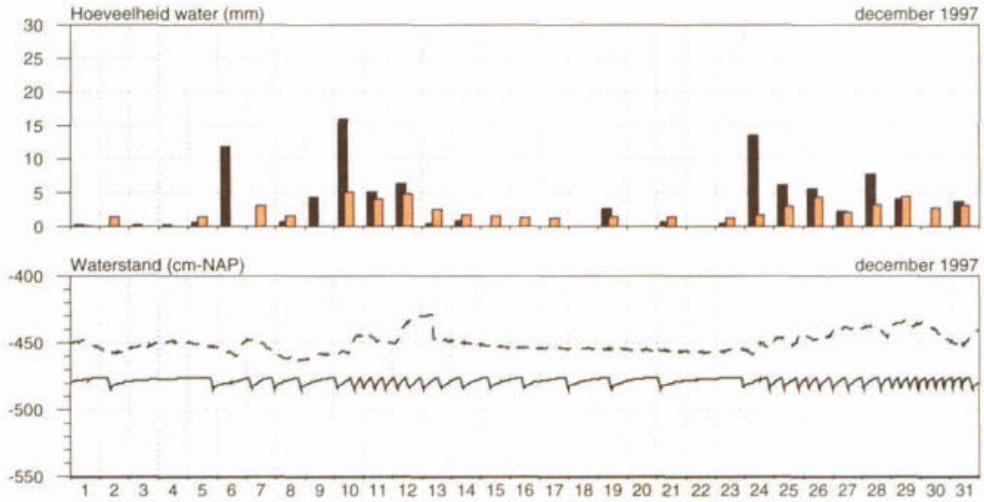

Hoeveelheid water (mm)
juli 1997
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 1997
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

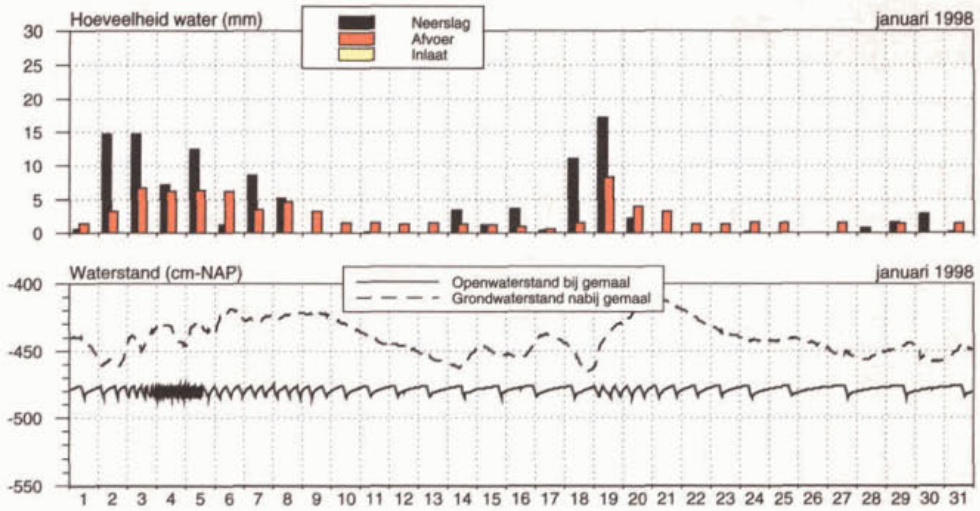

Hoeveelheid water (mm)
augustus 1997
Waterstand (cm-NAP)
augustus 1997

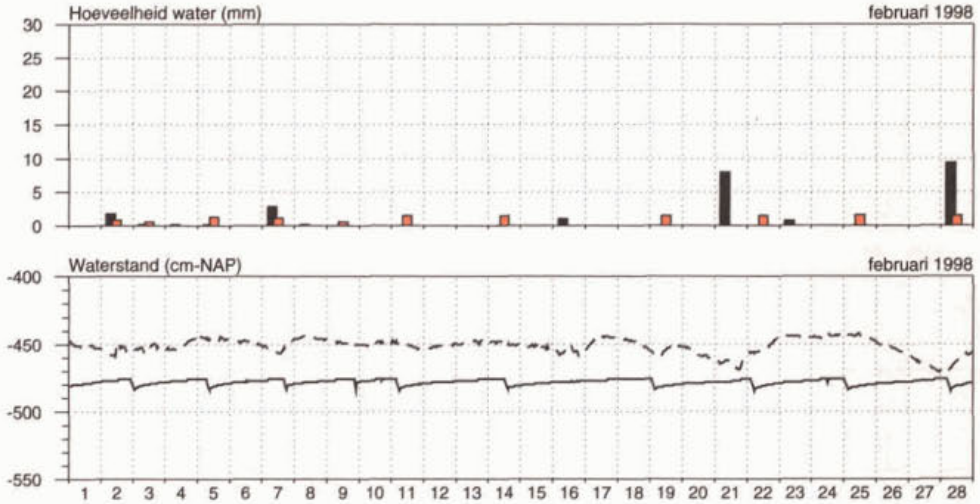

Hoeveelheid water (mm)
september 1997
Waterstand (cm-NAP)
september 1997

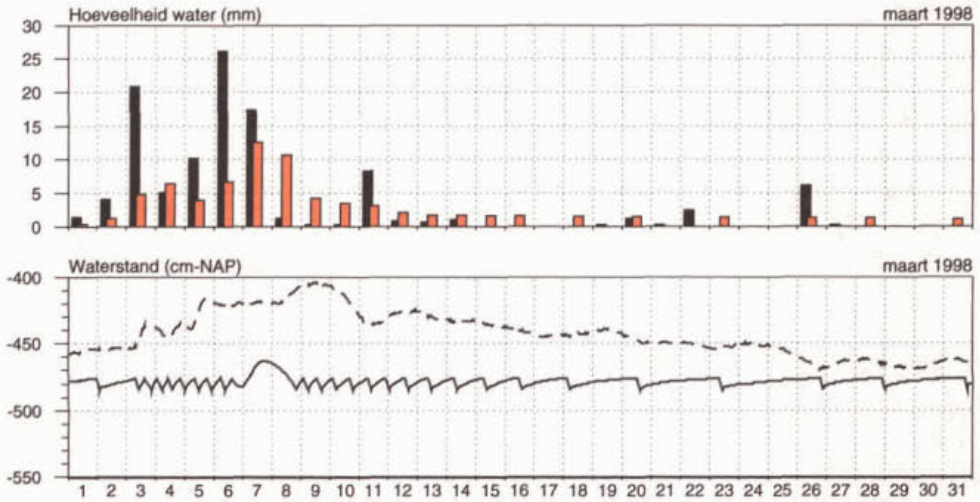

Hoeveelheid water (mm)
oktober 1997
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 1997
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

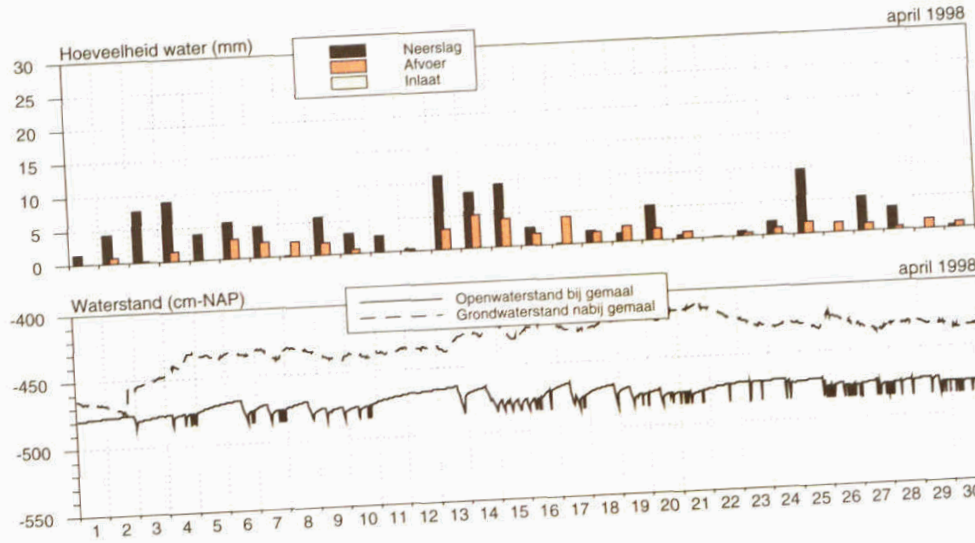

Hoeveelheid water (mm)
november 1997
Waterstand (cm-NAP)
november 1997

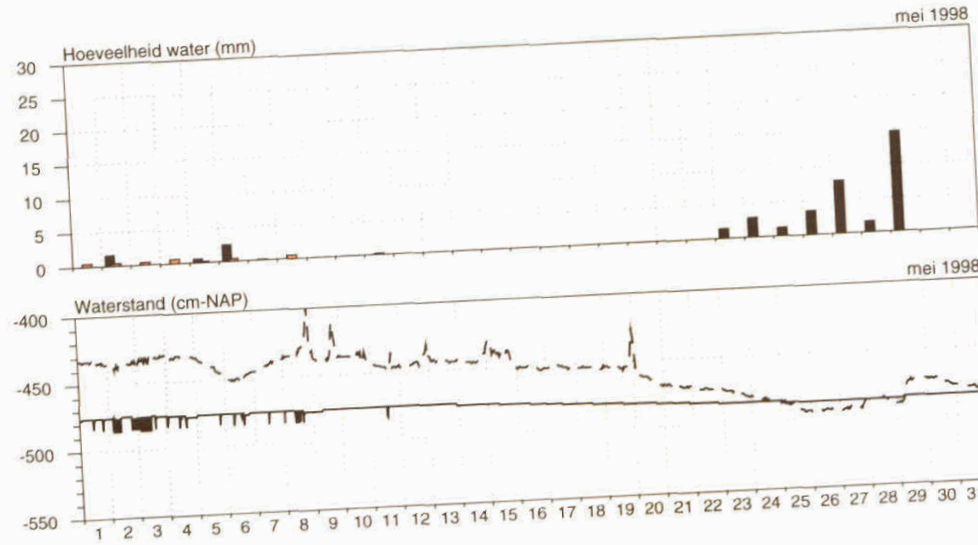

Hoeveelheid water (mm)
december 1997
Waterstand (cm-NAP)
december 1997

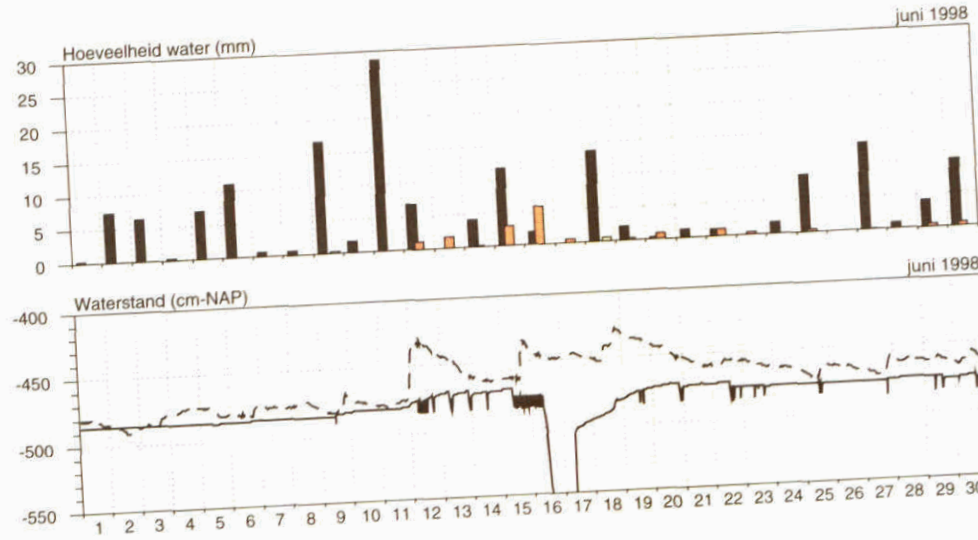

Hoeveelheid water (mm)
januari 1998
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
januari 1998
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

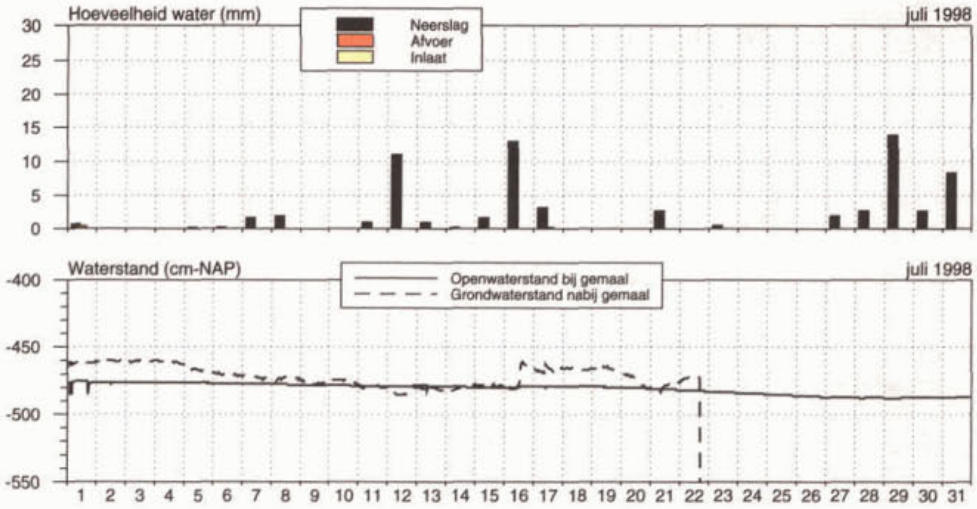

Hoeveelheid water (mm)
februari 1998
Waterstand (cm-NAP)
februari 1998

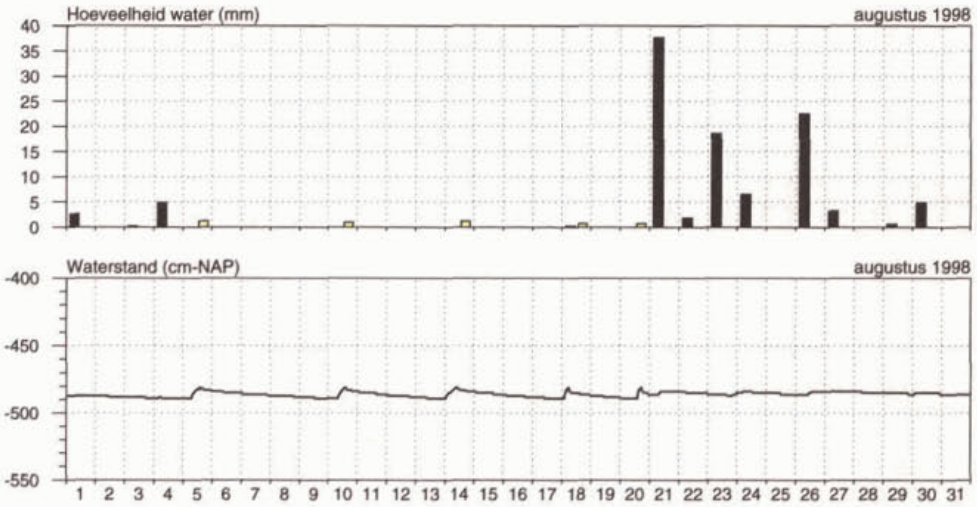

Hoeveelheid water (mm)
maart 1998
Waterstand (cm-NAP)
maart 1998

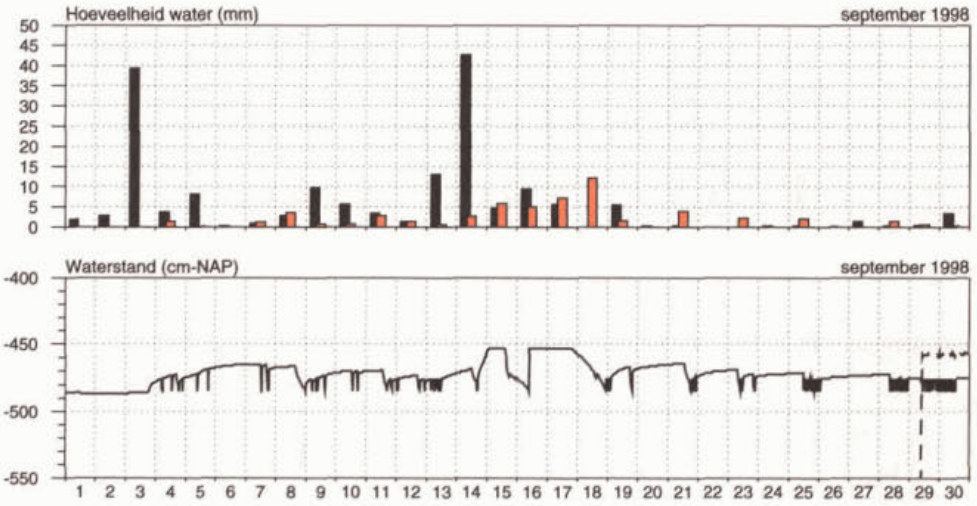

april 1998
Hoeveelheid water (mm)
Neerslag
Afvoer
Inlaat
30
25
20
15
10
5
0
april 1998
Waterstand (cm-NAP)
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal
-400
-450
-500
-550
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

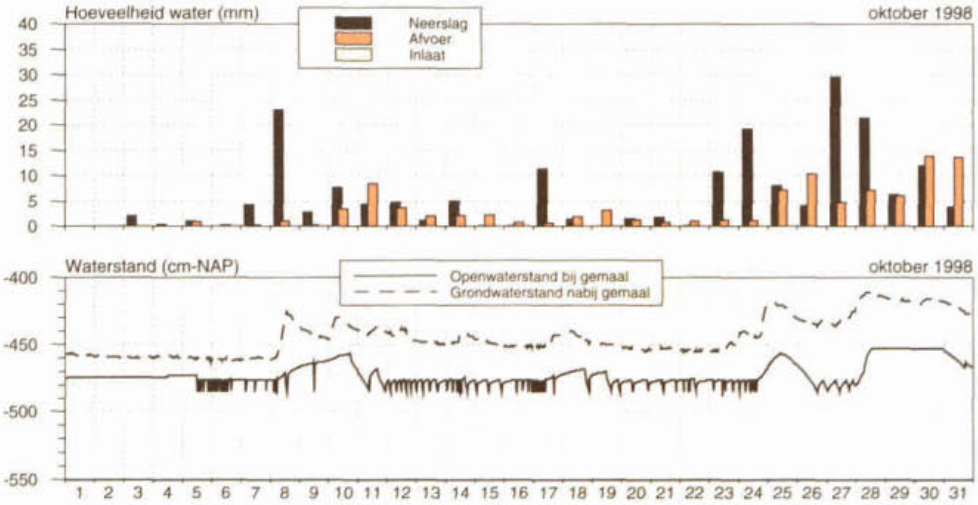

mei 1998
Hoeveelheid water (mm)
30
25
20
15
10
5
0
mei 1998
Waterstand (cm-NAP)
-400
-450
-500
-550
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31

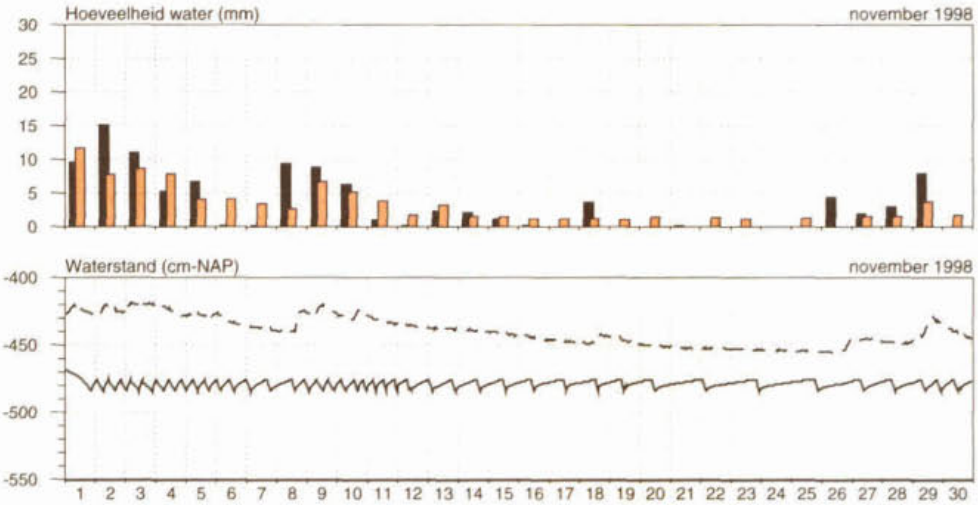

juni 1998
Hoeveelheid water (mm)
30
25
20
15
10
5
0
juni 1998
Waterstand (cm-NAP)
-400
-450
-500
-550
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

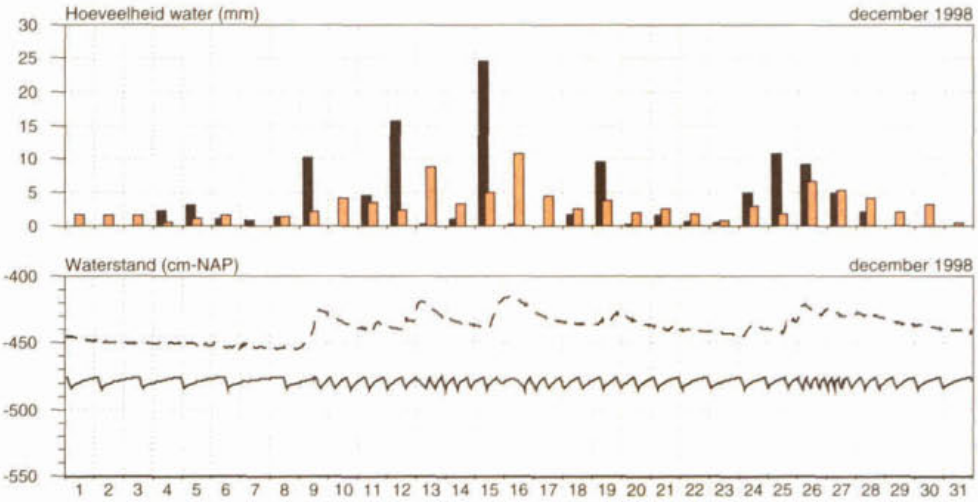

Hoeveelheid water (mm)
juli 1998
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 1998
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

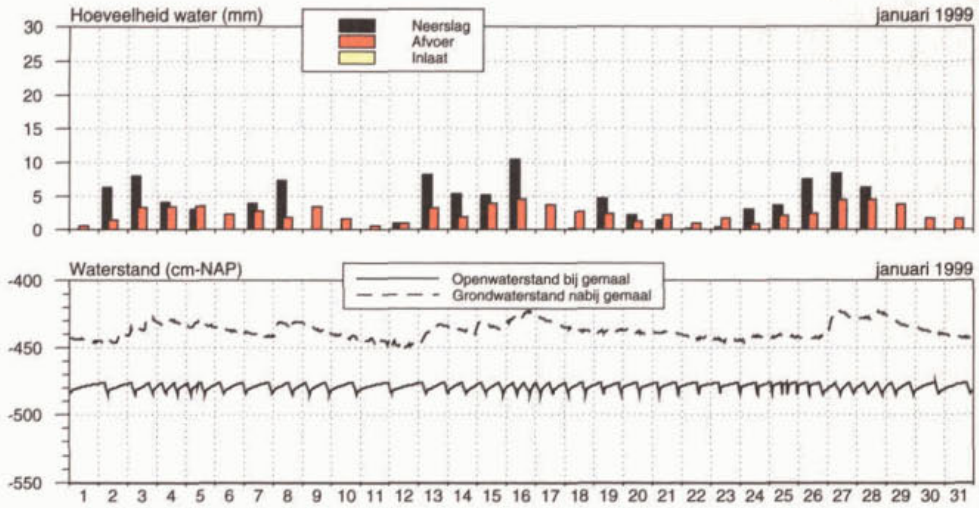

Hoeveelheid water (mm)
augustus 1998
Waterstand (cm-NAP)
augustus 1998

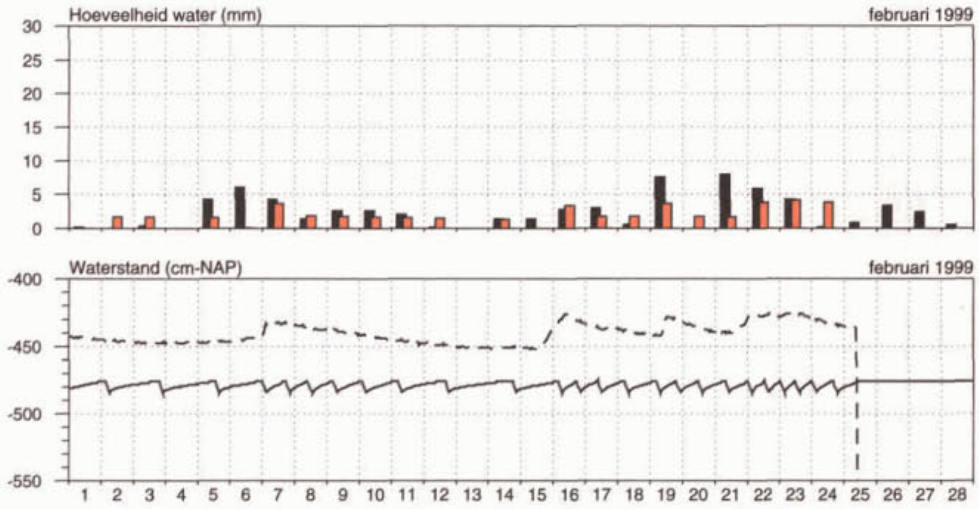

Hoeveelheid water (mm)
september 1998
Waterstand (cm-NAP)
september 1998

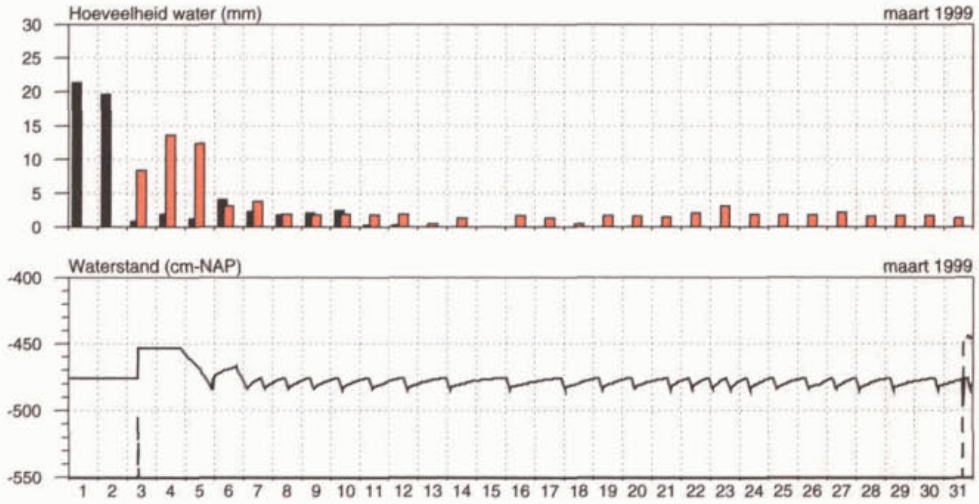

Hoeveelheid water (mm)
oktober 1998
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 1998
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

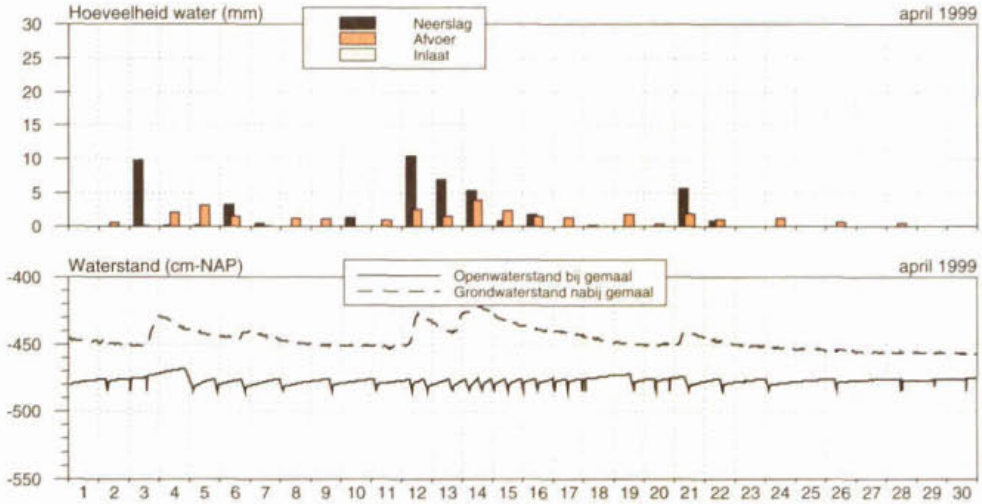

Hoeveelheid water (mm)
november 1998
Waterstand (cm-NAP)
november 1998

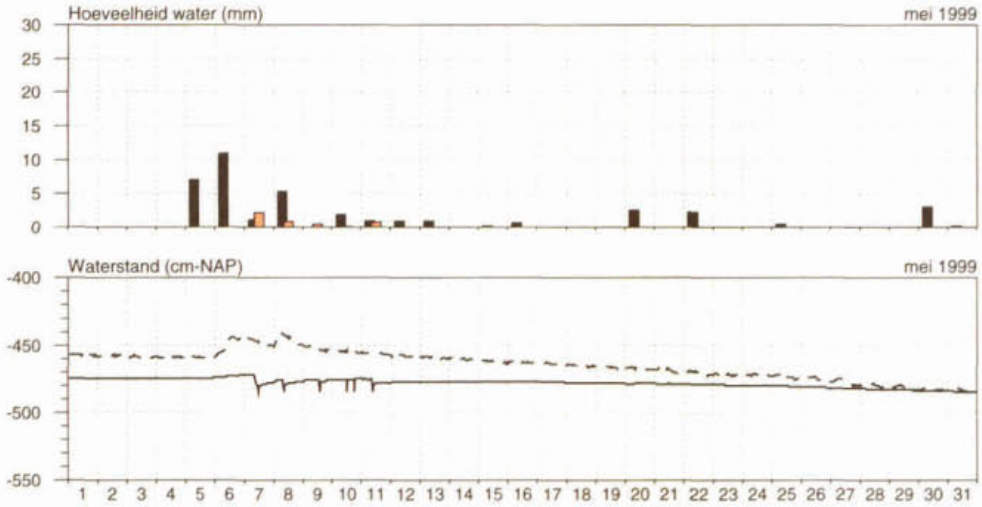

Hoeveelheid water (mm)
december 1998
Waterstand (cm-NAP)
december 1998

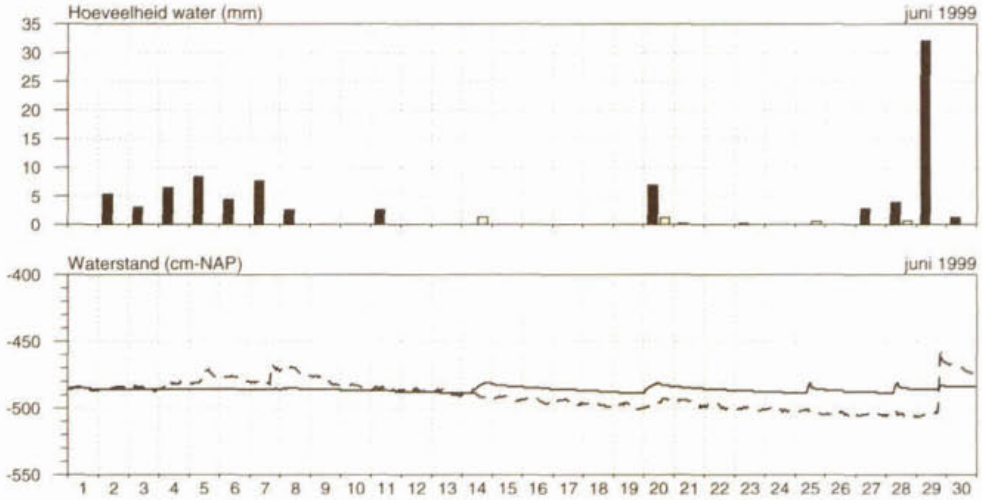

Hoeveelheid water (mm)
januari 1999
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
januari 1999
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

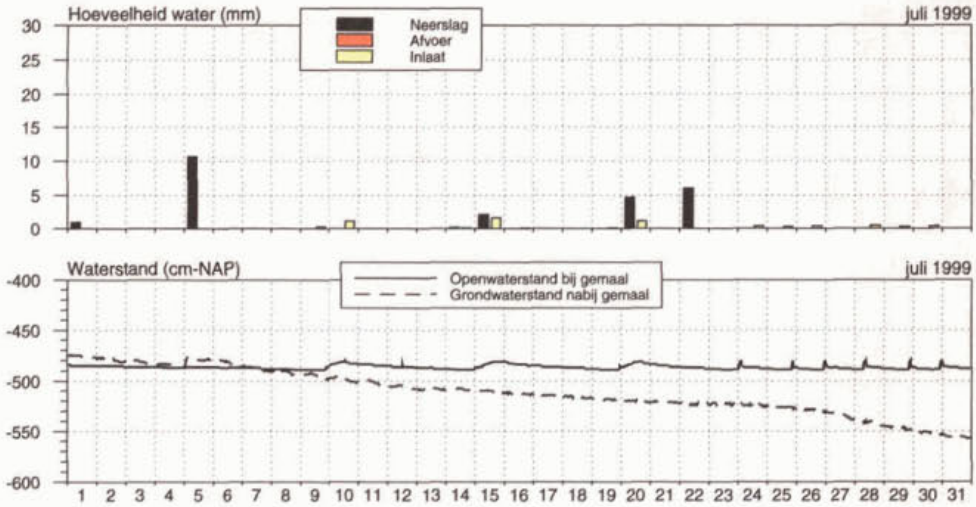

Hoeveelheid water (mm)
februari 1999
Waterstand (cm-NAP)
februari 1999

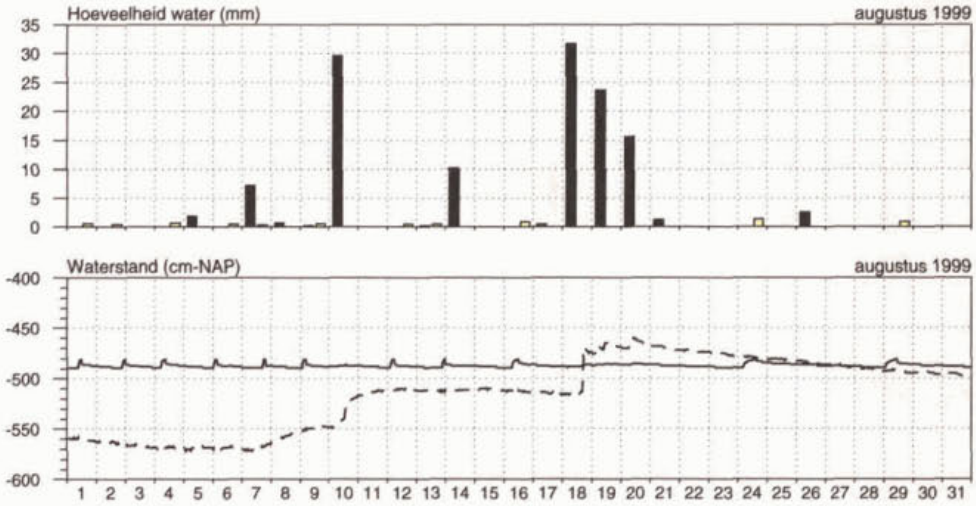

Hoeveelheid water (mm)
maart 1999
Waterstand (cm-NAP)
maart 1999

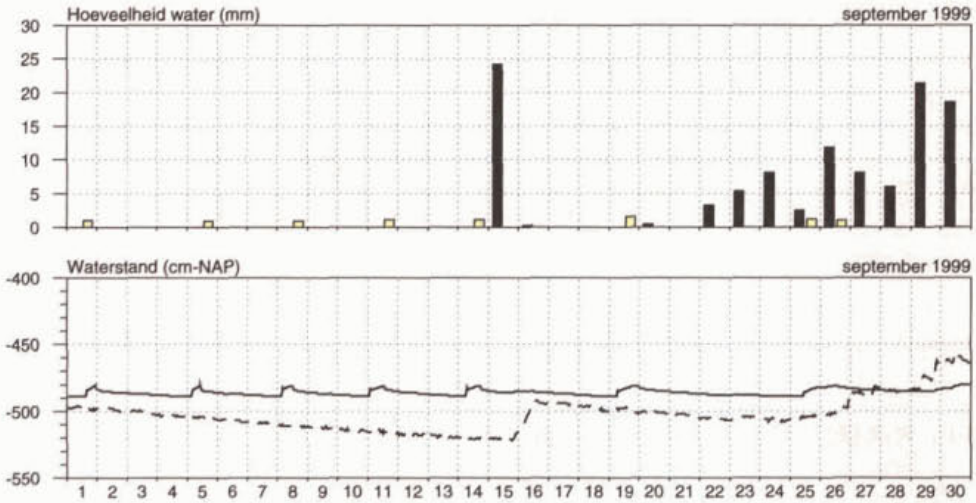

Hoeveelheid water (mm)
april 1999
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
april 1999
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

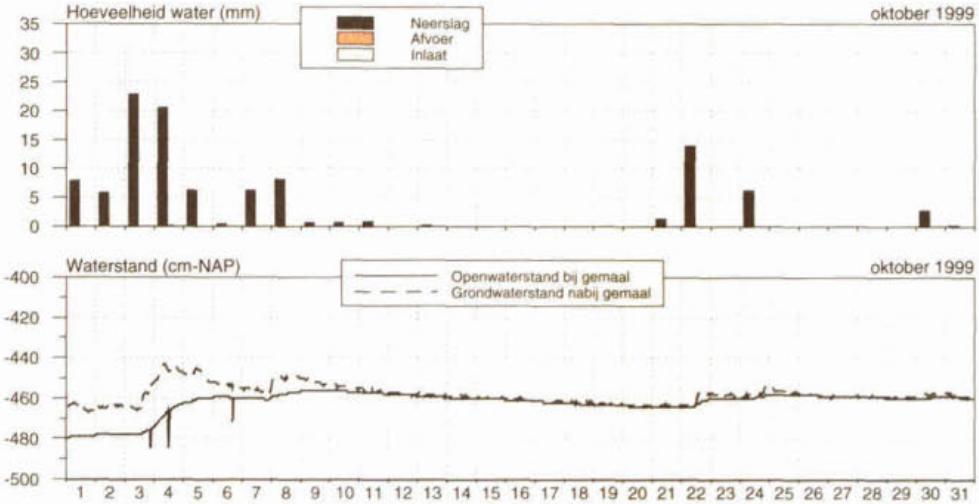

Hoeveelheid water (mm)
mei 1999
Waterstand (cm-NAP)
mei 1999

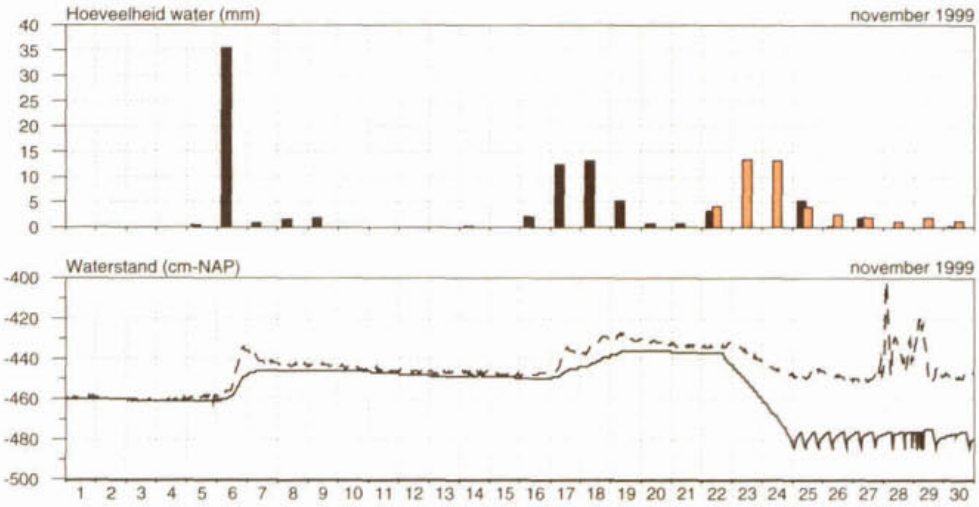

Hoeveelheid water (mm)
juni 1999
Waterstand (cm-NAP)
juni 1999

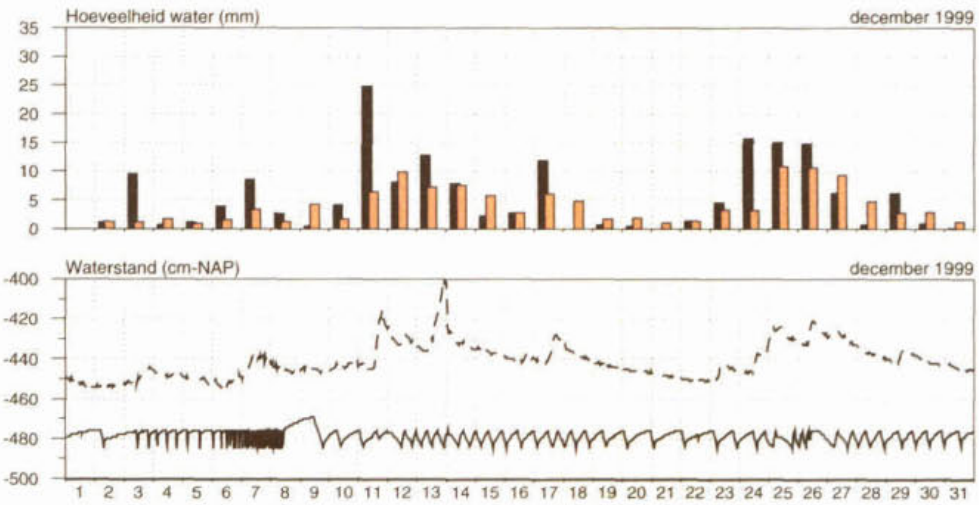

Hoeveelheid water (mm)
juli 1999
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 1999
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

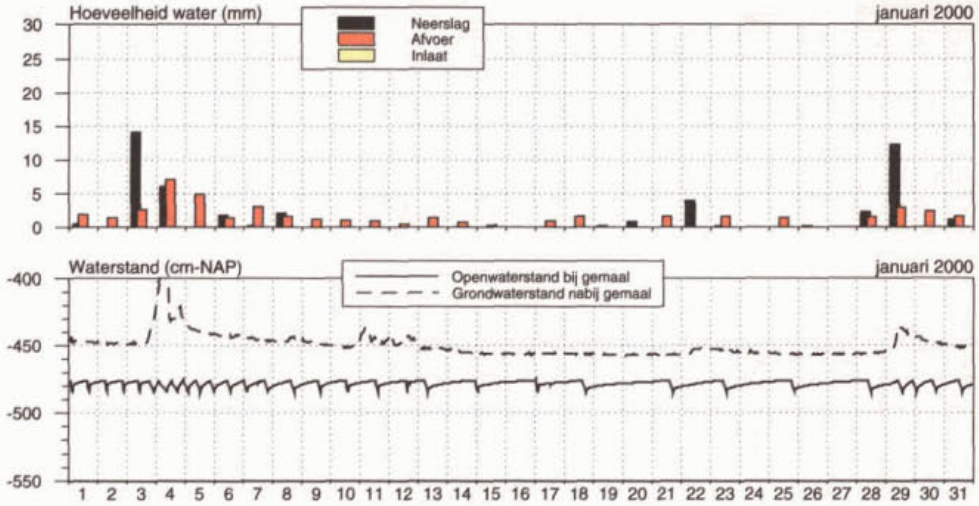

Hoeveelheid water (mm)
augustus 1999
Waterstand (cm-NAP)
augustus 1999

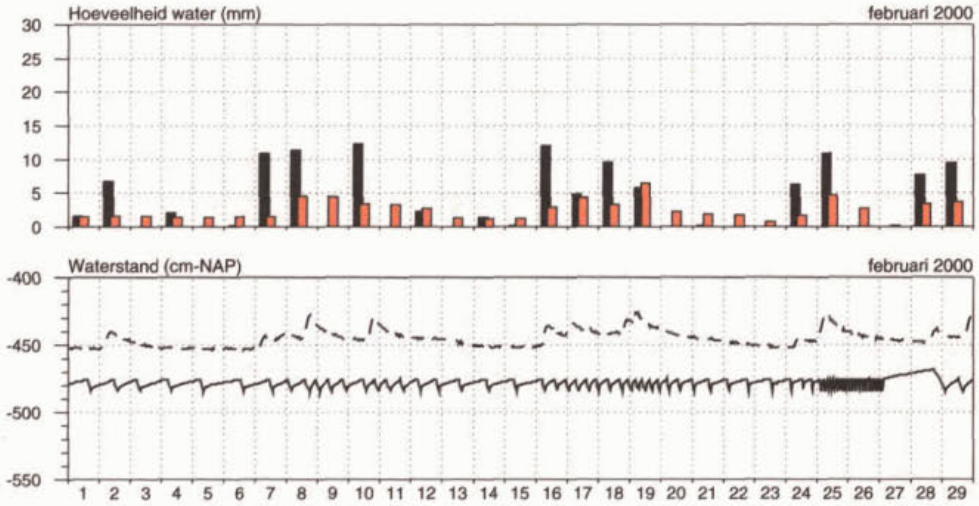

Hoeveelheid water (mm)
september 1999
Waterstand (cm-NAP)
september 1999

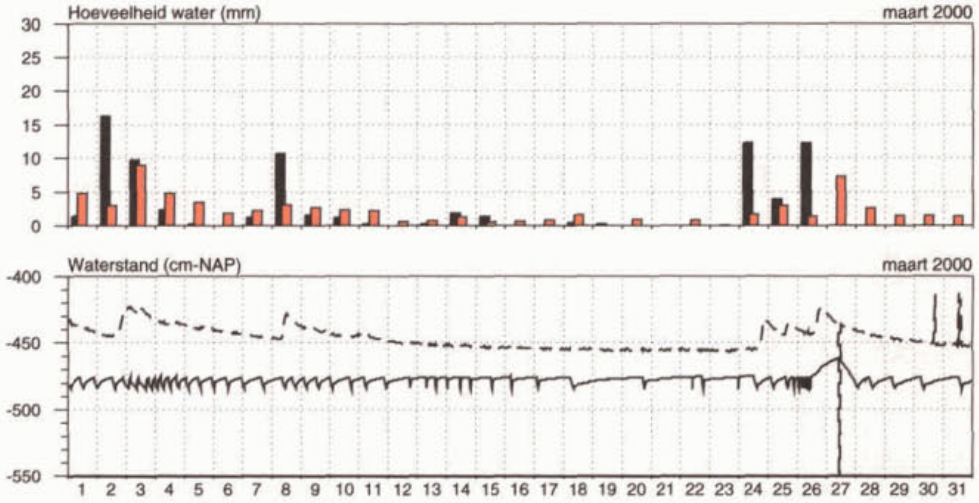

Hoeveelheid water (mm)
oktober 1999
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 1999
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

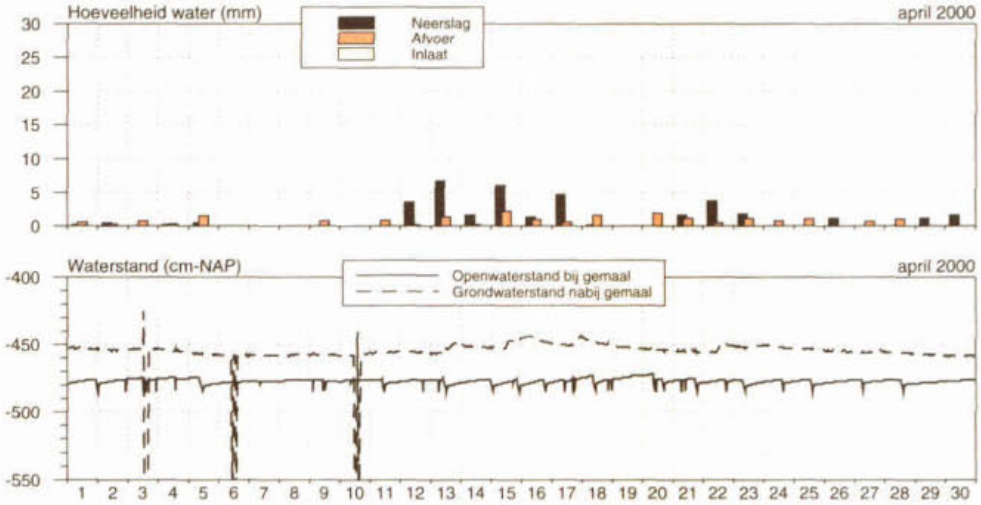

Hoeveelheid water (mm)
november 1999
Waterstand (cm-NAP)
november 1999

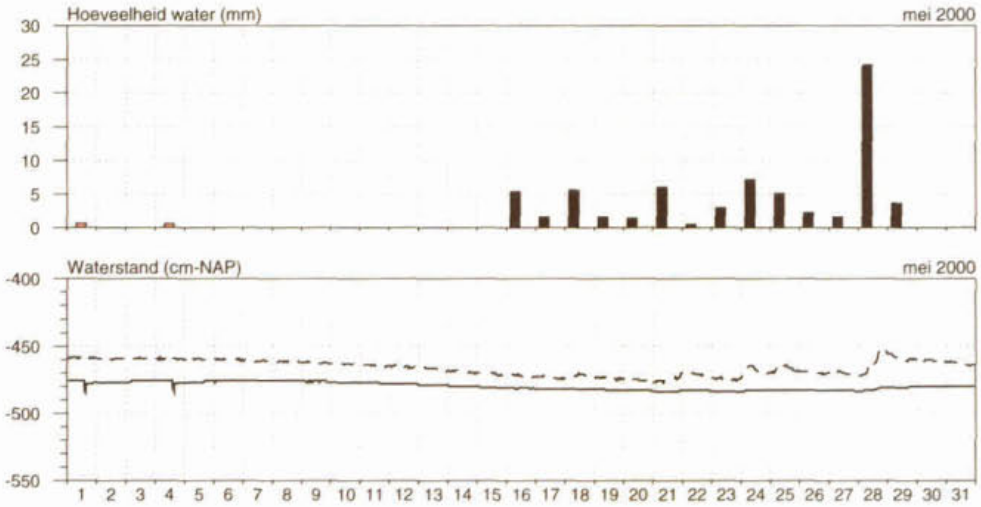

Hoeveelheid water (mm)
december 1999
Waterstand (cm-NAP)
december 1999

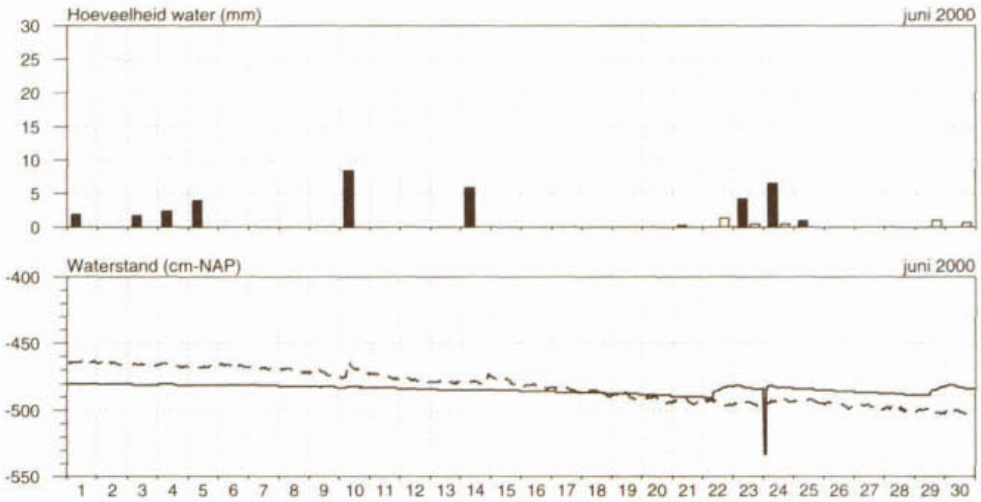

Hoeveelheid water (mm)
januari 2000
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
januari 2000
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

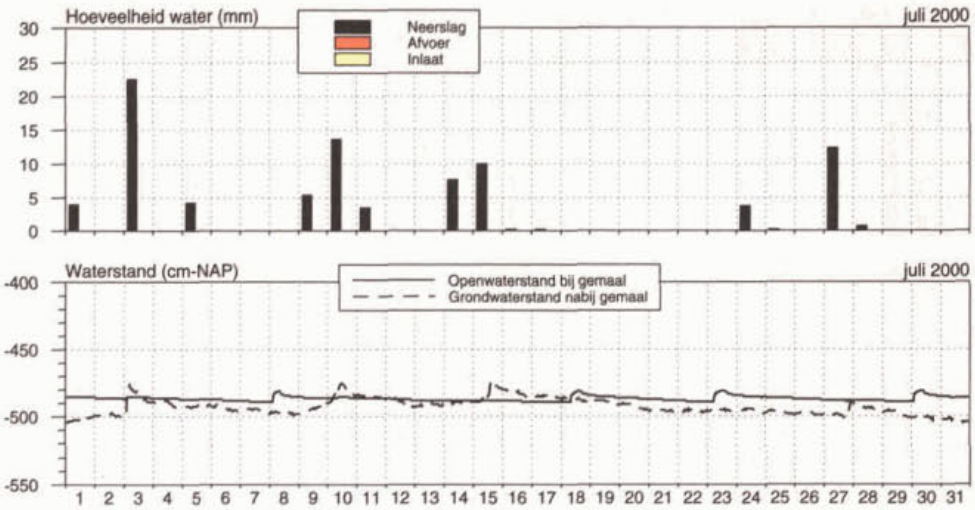

Hoeveelheid water (mm)
februari 2000
Waterstand (cm-NAP)
februari 2000

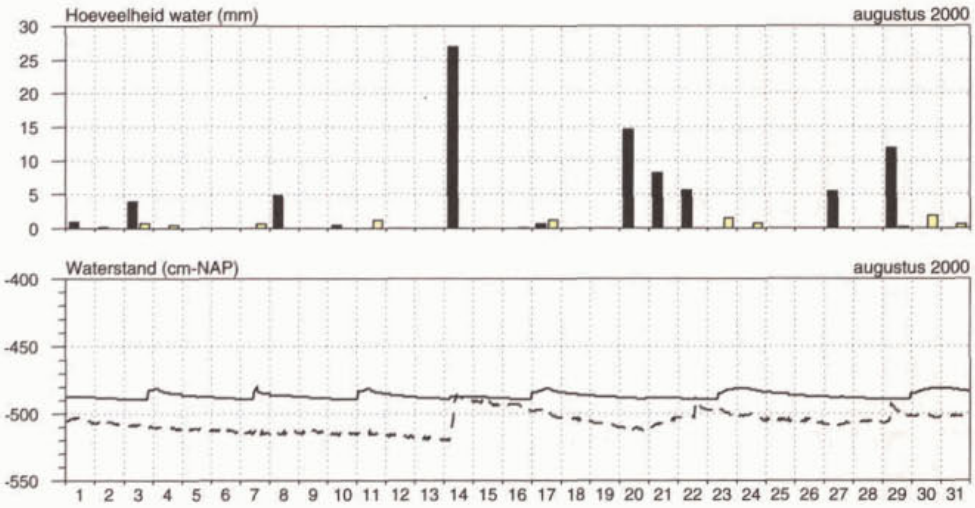

Hoeveelheid water (mm)
maart 2000
Waterstand (cm-NAP)
maart 2000

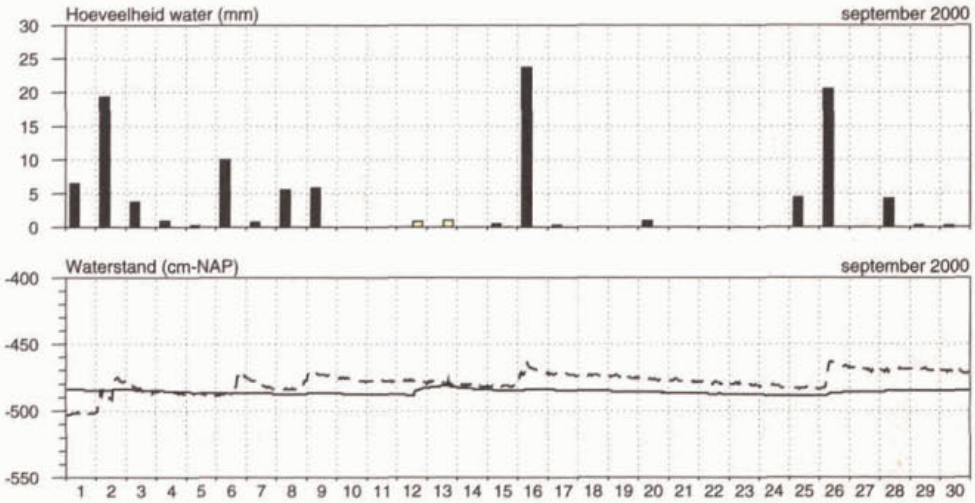

Hoeveelheid water (mm)
april 2000
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal

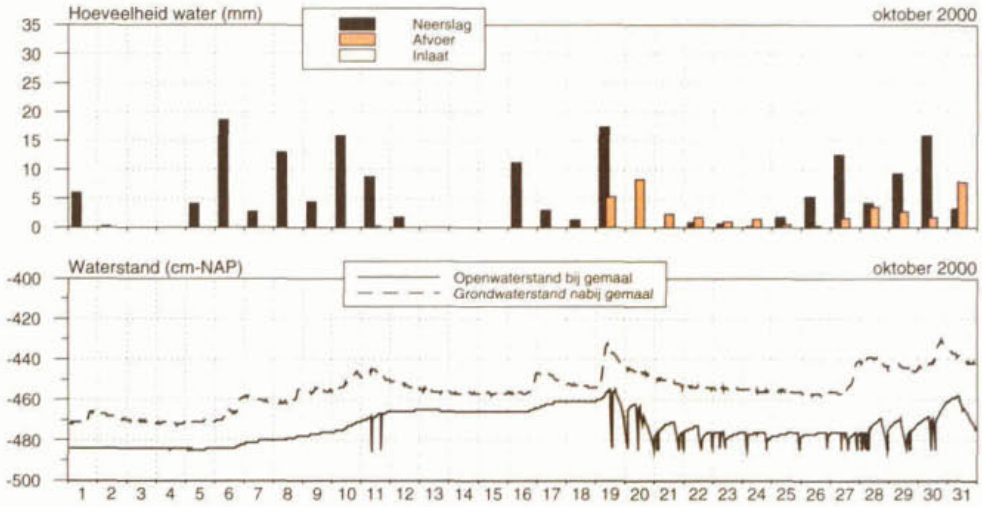

Hoeveelheid water (mm)
mei 2000
Waterstand (cm-NAP)

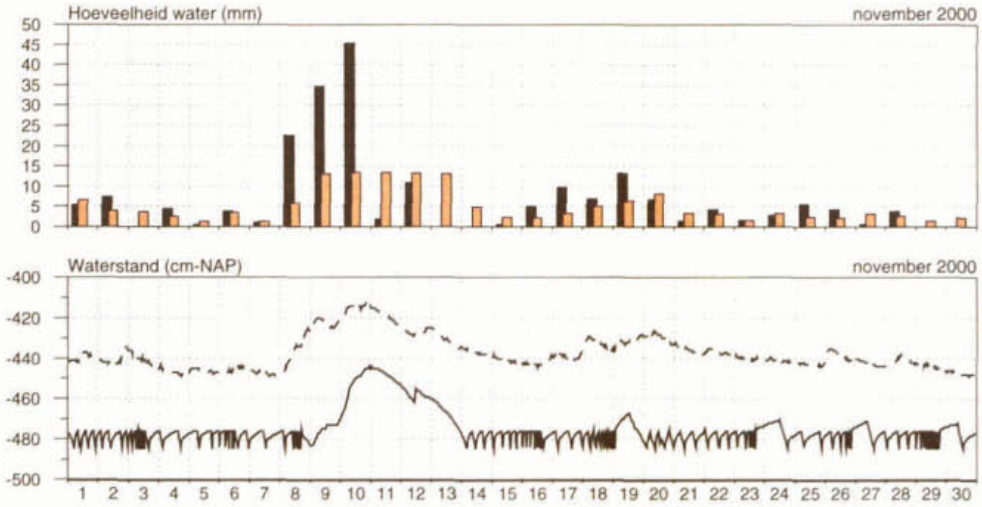

Hoeveelheid water (mm)
juni 2000
Waterstand (cm-NAP)

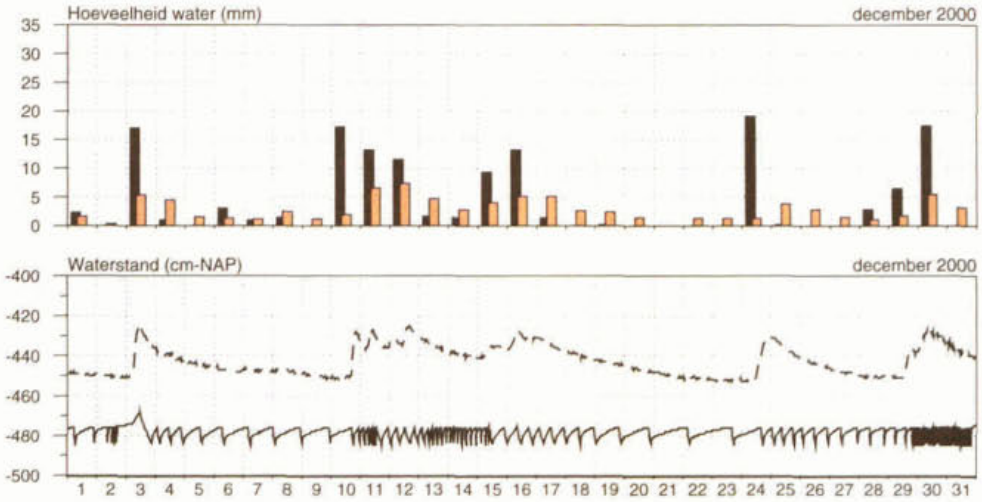

Hoeveelheid water (mm)
juli 2000
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
juli 2000
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal


Hoeveelheid water (mm)
augustus 2000
Waterstand (cm-NAP)
augustus 2000


Hoeveelheid water (mm)
september 2000
Waterstand (cm-NAP)
september 2000


Hoeveelheid water (mm)
oktober 2000
Neerslag
Afvoer
Inlaat
Waterstand (cm-NAP)
oktober 2000
Openwaterstand bij gemaal
Grondwaterstand nabij gemaal


Hoeveelheid water (mm)
november 2000
Waterstand (cm-NAP)
november 2000


Hoeveelheid water (mm)
december 2000
Waterstand (cm-NAP)
december 2000

Aanhangsel 2
Bosverdamping

Aanhangsel 2 betreft de verdamping als post in de waterbalans van het Purmerebos proefgebied. Achtereenvolgens komen de volgende aspecten aan de orde:
- de referentieverdamping volgens Makkink;
- het berekenen van de bosverdamping via toepassing van relaties ontleend aan Moors *et al.* (1996);
- het berekenen van de bosverdamping via toepassing van relaties die zijn gebaseerd op gegevens van recent onderzoek bij een loofbos in Oostelijk Flevoland;
- gegevens met betrekking tot de bosverdamping volgens onderzoek van Wolters (1996), uitgevoerd in de periode 1980-1985, eveneens in Oostelijk Flevoland.

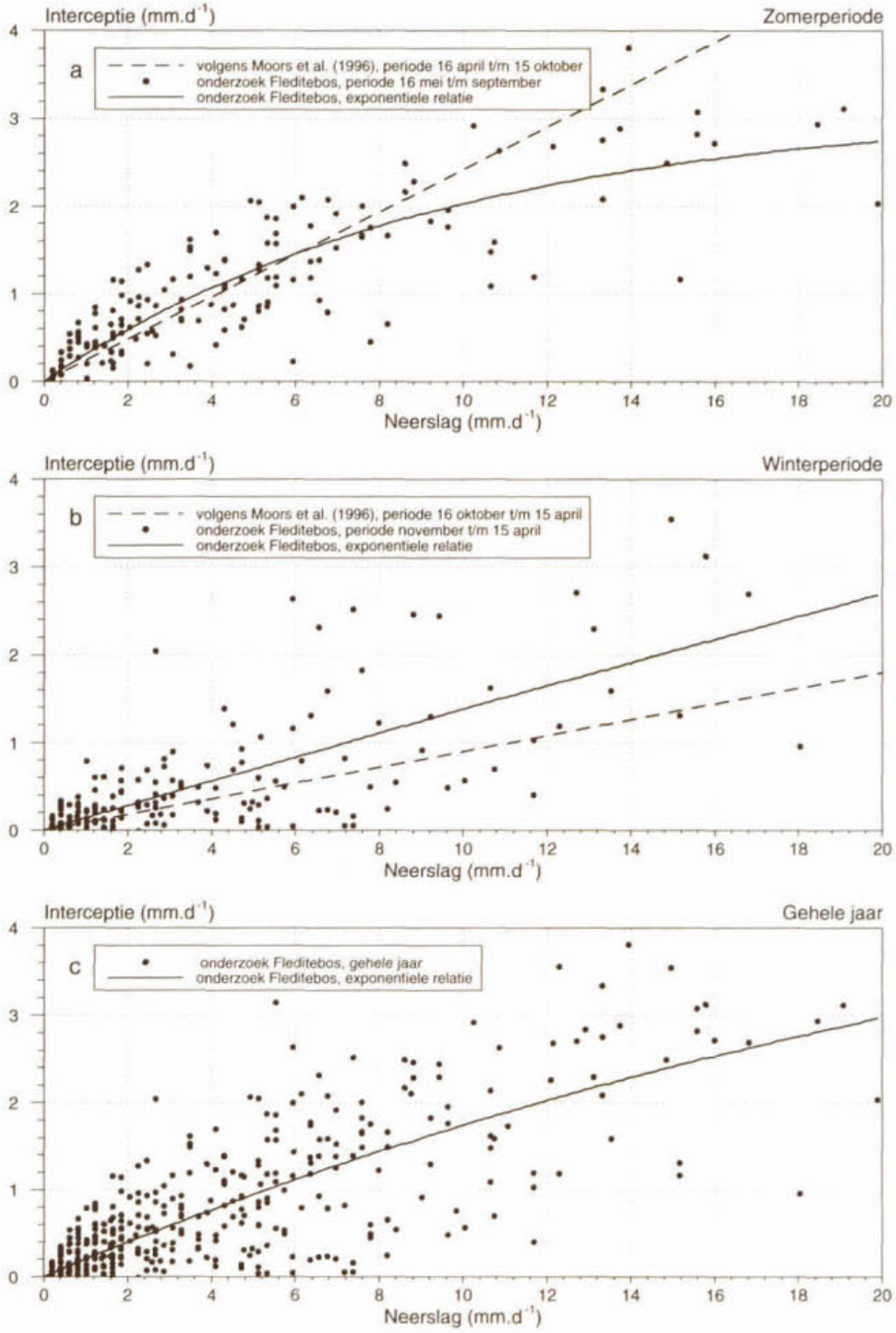
Deze aspecten komen in de volgende paragrafen aan de orde, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen:
- E_{ref} = referentieverdamping;
- E_{int} = interceptie van neerslag door de boskruin (is gelijk aan interceptie-verdamping);
- E_{tra} = transpiratie van de boskruin en de ondergroei, inclusief verdamping vanaf het grondoppervlak voor zover van betekenis;
- E_{gew} = gewasverdamping;
- E_{bos} = bosverdamping (som van de transpiratie en de interceptieverdamping).

Referentieverdamping volgens Makkink

Het is gebruikelijk om de verdamping van landbouwgewassen te schatten door uit te gaan van de zogenoemde referentieverdamping volgens Makkink (1962):

$$E_{ref} = [0{,}65 \cdot R_g \cdot \{\Delta/(\gamma + \Delta)\}]/\lambda \qquad (1)$$

waarin
- E_{ref} = referentieverdamping ($kg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ = mm/d);
- R_g = globale straling ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$);
- Δ = hellingshoek van de raaklijn aan de verzadigde dampspanningslijn bij heersende luchttemperatuur ($kPa \cdot {}^{o}C^{-1}$);
- γ = psychrometerconstante ($kPa \cdot {}^{o}C^{-1}$);
- λ = verdampingswarmte van water ($MJ \cdot kg^{-1}$).



Figuur A2-1 Interceptie in relatie tot de neerslag, volgens Moors et. al. (1996) en volgens recente gegevens uit onderzoek in het Fleditebos (populierenbos in Zuidelijk Flevoland)

In relatie (1) zijn γ en λ constanten. De grootheid Δ is een (bekende) functie van de temperatuur. De factor 0,65 is van toepassing bij het berekenen van de verdamping voor kort gras en verdisconteert de afhankelijkheid van de verdamping van het albedo, het dampdrukdeficit en de windsnelheid. Het is gebruikelijk om, uitgaande van relatie (1), de verdamping voor andere landbouwgewassen te schatten via

$$E_{gew} = f \cdot E_{ref} \qquad (2)$$

waarbij de waarde van de gewasfactor f afhankelijk is van de aard en het ontwikkelingsstadium van het gewas. De factor is dan tijdsafhankelijk en moet empirisch worden vastgesteld.

Om E_{ref} te berekenen via relatie (1) zijn alléén dagwaarden van de globale straling en de luchttemperatuur nodig. Berekeningen voor de lokatie Purmerbos zijn uitgevoerd op basis van de volgende KNMI-gegevens voor station Schiphol voor de periode 1990 t/m 1998, aangevuld voor 1999 en 2000 met gegevens voor station de Kooy:
- de maximum etmaaltemperatuur T_{max} (°C);
- de minimum etmaaltemperatuur T_{min} (°C);
- de etmaalsom van de globale straling R_g ($kJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$).

Bij het berekenen van Δ is uitgegaan van het rekenkundig gemiddelde van T_{min} en T_{max} als etmaaltemperatuur, zonder verder rekening te houden met de variatie van de daglengte gedurende het jaar. Het resultaat van deze berekening is opgenomen in tabel A2-1.
Het gemiddelde voor de periode 1991 t/m 2000 komt uit op 570 mm per jaar, met een minimum en maximum van 525 mm in 1998 resp. 619 mm in 1999. De verschillen tussen de jaren worden bepaald door de verschillen in globale straling. Zo is het quotiënt van E_{ref} voor 1998 en 1999 (525/619 = 0,85) exact gelijk aan het quotiënt van de som van de globale straling voor die beide jaren (3330/3930 = 0,85, straling in $MJ \cdot m^{-2}$). Omdat E_{ref} betrekking heeft op kort gras speelt de interceptie(verdamping) geen rol van betekenis.

Relatie (2) is ook wel gebruikt om de bosverdamping te berekenen. De resultaten zijn echter weinig bevredigend omdat de rol van de interceptieverdamping daarbij niet wordt meegenomen, evenmin als de invloed van het dampdrukdeficit, de windsnelheid en de aërodynamische weerstand. Vooral die laatste factor is bij bossen van veel grotere invloed dan bij landbouwgewassen.

Bosverdamping volgens relaties ontleend aan Moors et al. (1996)

Moors *et al.* (1996) beschrijven een eenvoudige methode om de bosverdamping te berekenen waarbij expliciet onderscheid wordt gemaakt tussen de (evapo)transpiratie en de interceptie-verdamping. Uitgaande van de referentieverdamping volgens Makkink wordt de totale transpiratie van de boskruin plus ondergroei bij *droge* boskruin berekend volgens

$$E_{bos} = E_{tra} = f \cdot E_{ref} \qquad (3)$$

Tabel A2-1 Neerslag (N), Makkink-referentieverdamping (E_{ref}) en bosverdamping volgens relaties van Moors et al. (1996) resp. recent onderzoek in het Fleditebos in Oostelijk Flevoland (E_{tra} = bostranspiratie, E_{int} = interceptieverdamping; E_{bos} = totale verdamping)

			Moors *et al.* (1996)			relaties Fleditebos		
Jaar	N (mm)	E_{ref} (mm)	E_{tra} (mm)	E_{int} (mm)	E_{bos} (mm)	E_{tra} (mm)	E_{int} (mm)	E_{bos} (mm)
1991	713	549	494	119	613	467	118	585
1992	990	594	534	160	695	514	150	664
1993	954	545	490	167	657	462	151	614
1994	1103	565	509	174	683	489	160	649
1995	783	617	555	124	679	534	121	655
1996	661	549	494	102	597	468	106	574
1997	714	584	525	128	653	499	117	616
1998	1310	525	473	211	683	443	196	639
1999	1061	619	557	164	721	530	159	689
2000	1119	563	507	171	678	478	172	651
Gemidd.	941	571	514	152	666	488	145	634

Voor *natte* omstandigheden wordt de interceptieverdamping E_{int} afzonderlijk berekend. Ook díe berekening wordt op dagbasis uitgevoerd. Aangezien het bladerdek tijdens een dag met neerslag niet de gehele dag lang nat hoeft te zijn speelt de transpiratie óók op dagen met neerslag een rol. Die transpiratie moet dan gecorrigeerd worden voor de periode van de dag dat de kruin geheel of gedeeltelijk nat is. Dit wordt bereikt door de transpiratie bij droge kruin met een fractie $c \cdot E_{int}$ te corrigeren:

$$E_{bos} = (E_{tra} + E_{int}) - c \cdot E_{int} = f \cdot E_{ref} + (1-c) \cdot E_{int} \qquad (4)$$

waarbij c een parameter is die uit onderzoeksgegevens moet worden afgeleid. Volgens Dolman (1987) geldt voor de omstandigheden in Nederland dat gerekend kan worden met $c \approx 0{,}07$.

De interceptieverdamping E_{int} wordt berekend als fractie van de neerslag N:

$$E_{int} = p \cdot N \qquad (5)$$

met p als interceptiefactor. De waarde van p is afhankelijk van de capaciteit van de boskruin om water vast te houden en van de ruwheid van het bos die bepaalt hoe snel dat water weer verdampt. Moors *et al.* (1996) geven voor bladverliezende bossen in Nederland p = 0,26 voor de zomerperiode en p = 0,10 voor de winterperiode (perioden met resp. zonder blad aan de boom). Relatie (5) met de gegeven interceptiefactoren is weergegeven in figuur A2-1a en b. Het is duidelijk dat hiermee voor de zomerperiode bij gote neerslaghoeveelheden geen realistische waarden voor de interceptieverdamping op dagbasis worden berekend. Voor het berekenen van de bosverdamping voor perioden van langere duur is dat echter geen serieus probleem.

Tabel A2-2 Waterbalansgegevens voor loofbos in Oostelijk Flevoland volgens Wolters (1996); N = neerslag, E_{tra} = actuele transpiratie, E_{int} = interceptieverdamping, E_{bos} = actuele totale verdamping ($E_{bos} = E_{tra}+E_{int}$), $E_{bos,p}$ = potentiële totale verdamping

Balansperiode	N (mm)	E_{tra} (mm)	E_{int} (mm)	E_{bos} (mm)	$E_{bos,p}$ (mm)
april 1980 t/m maart 1981	882	366	246	612	623
april 1981 t/m maart 1982	801	350	256	606	621
april 1982 t/m maart 1983	817	382	241	623	639
april 1983 t/m maart 1984	902	367	225	592	612
april 1984 t/m maart 1985	734	325	224	549	553
Gemiddeld 1980 t/m 1985	639	358	238	596	609

Bij berekeningen voor het Purmerbos proefgebied is uitgegaan van de volgende relaties:
- dagen zonder neerslag:
  $E_{bs} = 0{,}9 \bullet E_{ref}$ (6a)
- dagen met neerslag in de zomerperiode (16 april t/m 15 oktober):
  $E_{bos} = 0{,}9 \bullet E_{ref} + 0{,}93 \bullet 0{,}26 \bullet N$ (6b)
- dagen met neerslag in de winterperiode (16 oktober t/m 15 april):
  $E_{bos} = 0{,}9 \bullet E_{ref} + 0{,}93 \bullet 0{,}10 \bullet N$ (6c)

De berekende jaartotalen zijn opgenomen in tabel A2-1. De reductiefactor f is sterk bepalend voor het niveau van de E_{bos}. Bij het rekenen met f = 0,9 komt de bosverdamping uit op gemiddeld 666 mm per jaar en ligt daarmee bijna 100 mm boven het gemiddelde niveau van E_{ref}. De interceptieverdamping draagt dan voor gemiddeld 23% bij tot de totale verdamping en is duidelijk gerelateerd aan de neerslag. Zo loopt E_{int} uiteen van 100 mm in het relatief droge jaar 1996 tot meer dan 200 mm in het extreem natte jaar 1998.

Het afzonderlijk meenemen van de interceptieverdamping is een duidelijke verbetering ten opzichte van het rekenen op basis van alléén relatie (1) volgens Makkink. Het rekenen met een vaste waarde voor de gewasfactor f, in dit geval f = 0,9 blijft echter een zwakke schakel in het geheel.

Verdamping op basis van het onderzoek in het Fleditebos

Het Fleditebos is een loofbos in Zuidelijk Flevoland, nabij Zeewolde. De lokatie waar de metingen zijn uitgevoerd ligt binnen een boscomplex dat is beplant met populier (76% van de oppervlakte), es, eik en esdoorn. Het onderzoek vond plaats in de periode 1995 t/m 1998 en was gericht op:
- directe bepaling van de transpiratie door het meten van het transport van waterdamp boven de boskruin;
- bepaling van de interceptieverdamping via meting van de neerslag boven de boskruin en de neerslagdoorval op de grond.

Voor een reeks van afzonderlijke dagen zonder neerslag, dus bij droge boskruin, in de jaren 1995 t/m 1998 zijn de metingen van de waterdampuitwisseling herleid tot de (bos)transpiratie E_{tra} per etmaal, uitgedrukt in mm/d. De punten in figuur A2-2 betreffen het qoutiënt van de *gemeten* transpiratie en de *berekende* referentieverdamping. Uit de figuur blijkt een grote spreiding: dat is illustratief voor het gegeven dat E_{ref} afhankelijk is van alléén de straling en temperatuur terwijl E_{tra} mede bepaald wordt door het dampdrukdeficit, de windsnelheid en de aërodynamische weerstand. Blijkens figuur A2-2 is het quotiënt in de winterperiode soms negatief, dat wil zeggen dat $E_{tra} < 0$ ten gevolge van condensatie.

In figuur A2-2 is ook de relatie weergegeven die is uitgewerkt als beschrijving van de puntenzwerm:

$q = E_{tra} / E_{ref} = 0{,}5$ voor $X < 91$ en $X > 291$ (7a)

$q = E_{tra} / E_{ref} = 0{,}81 + 0{,}35 \cdot \cos[(2 \cdot \pi \cdot (X - 190) / 240]$ (7b)

waarin X het dagnummer is (X =1, 2, 3,..., 365).

Met behulp van bovenstaande relaties is de bostranspiratie bij droge kruin te berekenen volgens

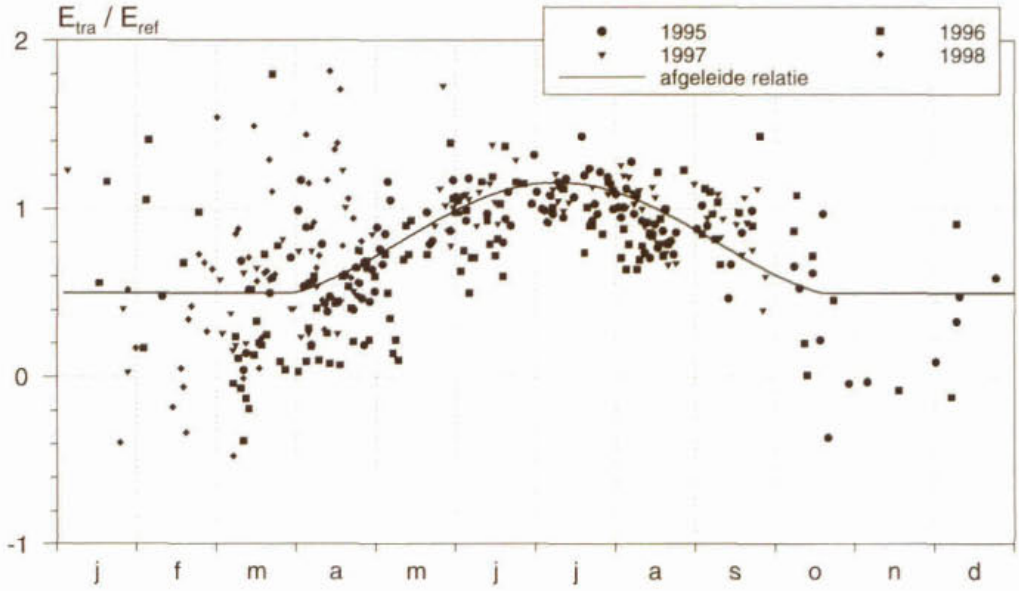
$E_{tra} = q \cdot E_{ref}$ (8)

waarbij q is aan te duiden als de bosfactor naar analogie met de gewasfactor f.

Resultaten van de neerslag- en doorvalmetingen zijn verwerkt in figuur A2-1. De interceptieverdamping is berekend als het verschil tussen de neerslag boven de boskruin en de doorval. Er zijn twee perioden onderscheiden. Voor beide perioden is de relatie tussen de interceptieverdamping en de neerslag te beschrijven als een exponentiële relatie:

$E_{int} = 5{,}28 \cdot [1 - \exp(-0{,}073 \cdot N)]$ voor de maanden juni t/m september (9a)

$E_{int} = 5{,}78 \cdot [1 - \exp(-0{,}044 \cdot N)]$ voor de resterende acht maanden (9b)



Figuur A2-2 Quotiënt van de gemeten transpiratie (E_{tra}, bij droge boskruin) en de berekende referentieverdamping (E_{ref}, volgens Makkink), voor het Fleditebos in Zuidelijk Flevoland

Tenslotte is dan de totale verdamping E_{bos} voor het Fleditebos te berekenen via relatie (4), met q volgens relatie (7) in plaats van f en met c = 0,07 om te corrigeren voor de perioden waarin de boskruin geheel of gedeeltelijk nat is.

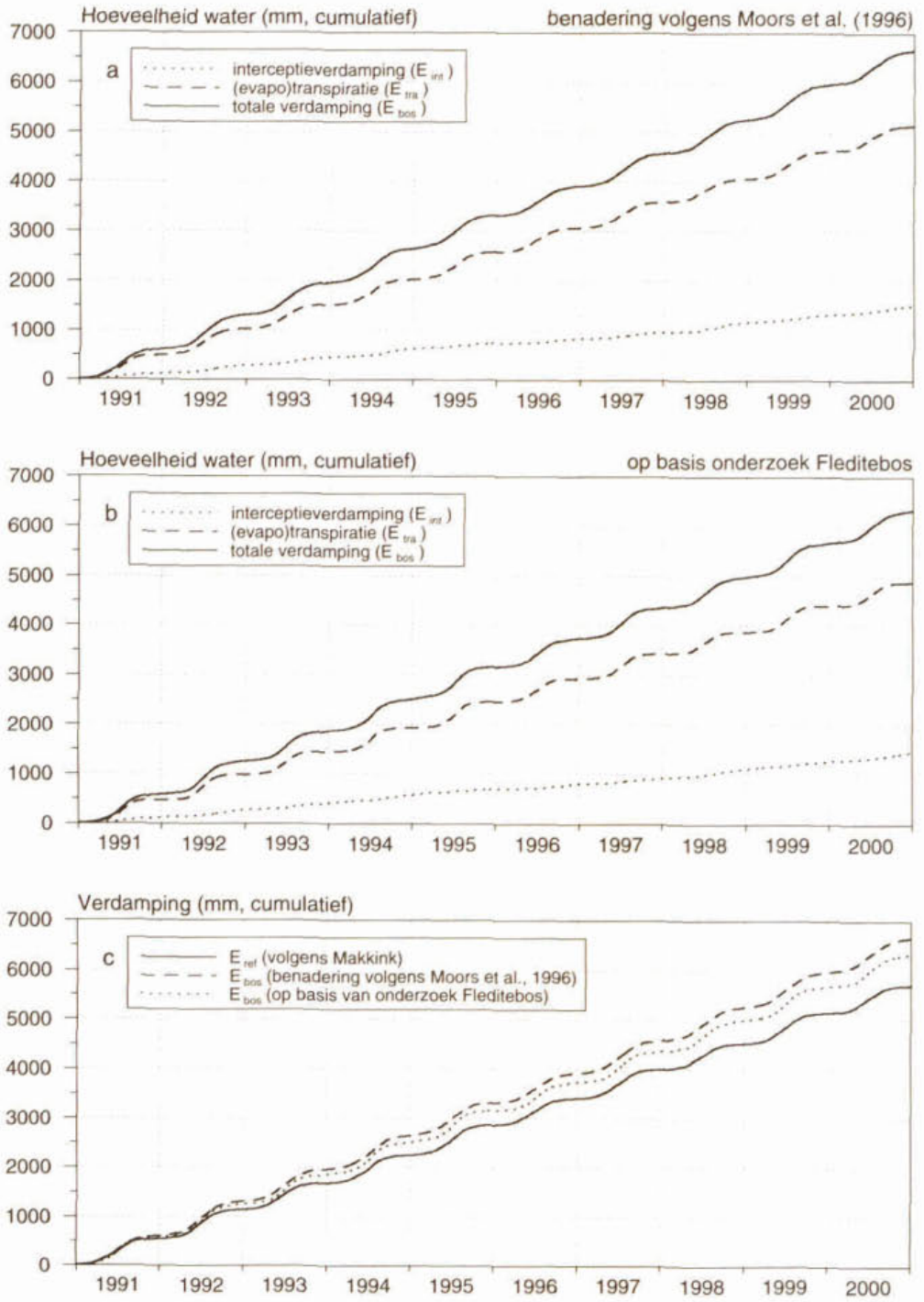
Tabel A2-1 geeft de berekende jaartotalen voor het Fleditebos. De interceptieverdamping op jaarbasis, berekend met de exponentiële relaties (9a) en (9b), blijkt maar weinig te verschillen van de interceptie als berekend met de lineaire relatie (5). De jaartotalen voor de transpiratie E_{tra} zijn wat lager dan de jaartotalen berekend volgens $0{,}90 \cdot E_{ref}$ in de benadering van Moors et al (1996).

Onderzoek van Wolters (1996) in Oostelijk Flevoland

Het onderzoek van Wolters (1996) vond indertijd plaats in Oostelijk Flevoland, in een proefgebied van 46 ha nabij Lelystad dat voor 45% van de oppervlakte beplant was met populier en voor het overige met esdoorn, beuk, wilg, eik, iep en spar.

De soortensamenstelling van dit bos vertoont overeenkomst met die van het Purmerbos proefgebied: ook hier domineert de populier. Daardoor bieden de gegevens van Wolters enig houvast bij het beoordelen van de resultaten voor het Purmerbos. De resultaten van Wolters zijn samengevat in tabel A2-2. Afgezien van de gemeten neerslag zijn alle verdampingsgegevens modelmatig berekend, uitgaande van meteorologische gegevens (globale straling, temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, windsnelheid) en modelparameters die deels op het onderzoek zelf zijn gebaseerd en deels aan de literatuur ontleend.

De totale actuele verdamping loopt uiteen van 550 tot 625 mm per jaar, met een gemiddelde van bijna 600 mm. De interceptieverdamping is gemiddeld 240 mm per jaar en draagt daarmee voor 40% bij tot de totale verdamping



Figuur A2-3 Cumulatieve verdamping volgens a: relaties ontleend aan Moors et al. (1996), b: volgens onderzoek in het Fleditebos en c: in vergelijking met de referentieverdamping volgens Makkink

Samenvatting

In figuur A2-3 is de referentieverdamping volgens Makkink (1962) en zijn de verdampingsgegevens volgens Moors *et al.* (1996) en voor het Fleditebos cumulatief weergegeven, voor de gehele periode 1991 t/m 2000. Uit de tabellen A2-1 en A2-2 en figuur A2-3 blijkt het volgende:

- waar het gaat om de cumulatieve interceptie, transpiratie en totale verdamping zijn de verschillen tussen de benadering volgens Moors en de benadering uitgaande van het onderzoek voor het Fleditebos klein;
- het rekenen met een vaste f-waarde van 0,9 in de benadering volgens Moors tegenover een tijdsafhankelijke q-waarde volgens de relaties (7a) en (7b) voor het Fleditebos heeft tot gevolg dat de transpiratie E_{tra} (en dus ook de totale verdamping E_{bos}) volgens Moors een gelijkmatiger verloop over het jaar heeft;
- de interceptieverdamping E_{int} loopt uiteen van minimaal ca. 100 mm in 1996 tot maximaal ca. 200 mm in 1998 en is duidelijk positief gecorreleerd met de neerslag;
- gemiddeld over de gehele periode van tien jaar draagt de interceptieverdamping in zowel de benadering van Moors als voor het Fleditebos voor 23% bij tot de totale bosverdamping; volgens de berekeningen van Wolters (1996) is die bijdrage met 40% veel hoger.

De verdampingsberekeningen in dit aanhangsel zijn in de eerste plaats uitgewerkt met het oog op de waterbalansberekeningen van hoofdstuk 7. Daartoe zal worden uitgegaan van de hier verkregen gevens voor het Fleditebos omdat daarvoor zowel de interceptie als de bostranspiratie zijn gebaseerd op meetgegevens.

Een laatste punt van belang betreft de potentiële versus de actuele verdamping. Volgens het onderzoek van Wolters bleef de actuele verdamping in de jaren 1980 t/m 1985 nauwelijks achter bij de potentiële verdamping (E_{bos} / $E_{bos,p}$ = 0,98: zie tabel A2-2). Voor het onderzoek in het Fleditebos is dit niet bekend maar wordt op basis van de vergelijkbare hydrologische en bodemkundige omstandigheden hetzelfde verondersteld.

Aanhangsel 3
Correctie van de afvoer via bemaling voor randeffecten

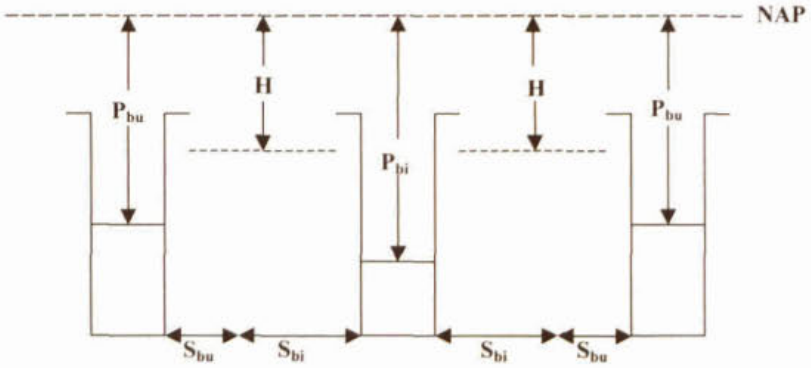
Inleiding

Het onderzoek in het Purmerbos heeft betrekking op een proefgebied dat hydrologisch van haar omgeving is geïsoleerd door het afdammen van sloten. Hierdoor doet zich het probleem voor dat de ontwatering van het proefgebied deels plaatsvindt naar sloten die rondom aan de buitenkant van het proefgebied liggen (figuur 2.2). Daar komt nog bij dat het streefpeil binnen het proefgebied vanaf de aanvang van het onderzoek in 1990 afwijkend is geweest van het streefpeil daarbuiten (zie par. 2.2.2). Randeffecten hebben dus een rol gespeeld waardoor de gemeten afvoer via bemaling afwijkt van de afvoer als gedefinieerd door de waterbalans-vergelijking (par. 7.1, relatie (7.1)). Het komt er op neer dat de gemeten afvoer betrekking heeft op een oppervlakte die kleiner is dan de oppervlakte van 66 ha van het proefgebied.

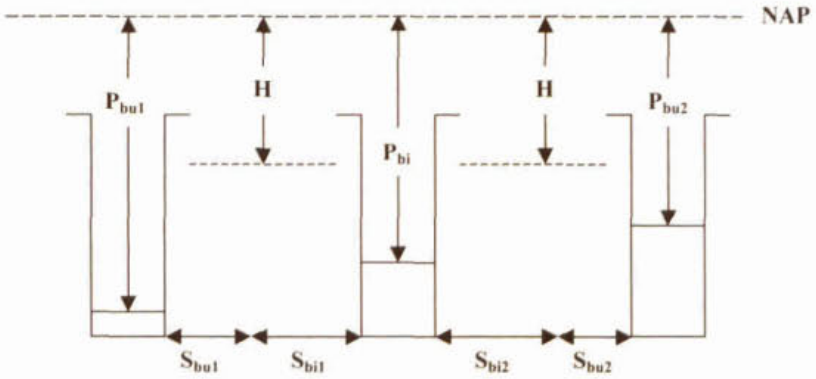
In deze bijlage is een methode uitgewerkt om de gemeten afvoer voor deze randeffecten te corrigeren. De methode houdt in dat, uitgaande van de gemeten grondwaterstand, de breedte van de randstroken wordt berekend, waarvan de ontwatering plaatsvindt naar de randsloten buiten het proefgebied. De breedte van de randstroken wordt vervolgens omgerekend tot een oppervlakte, waarna op basis van de verhouding tussen die oppervlakte en de totale oppervlakte van 66 ha van het proefgebied de gemeten afvoer wordt gecorrigeerd.

Vanwege de aanpassing van het streefpeil buiten het proefgebied in 1993 is onderscheid gemaakt tussen de periode vanaf 1990 tot medio 1993 en de periode vanaf medio 1993. Figuur A3-1 illustreert de beide situaties:
- H is de gemiddelde grondwaterstand binnen het proefgebied;
- P_{bi} is het streefpeil binnen het proefgebied;
- P_{bu} is het streefpeil buiten het proefgebied, dat wil zeggen het streefpeil in de randsloten;
- S_{bu} is de strookbreedte waarvan de ontwatering naar randsloten plaatsvindt;
- S_{bi} is de strookbreedte waarvan de ontwatering naar sloten binnen het proefgebied plaatsvindt.

Alle waterstanden worden uitgedrukt in cm ten opzichte van NAP en zijn dus negatief.
Op basis van figuur 2.2 en de gegevens in par. 2.3 is uitgegaan van $(S_{bi} + S_{bu}) = S = 90$ m, zijnde de afstand tussen de kavelsloten. Om de berekeningen uit te voeren is een apart rekenprogramma geschreven waarmee de berekeningen voor de periode 1990 t/m 2000 op dagbasis zijn uitgevoerd.



situatie vanaf 1990 tot medio 1993



situatie vanaf medio 1993

Figuur A3-1 Geschematiseerde dwarsdoorsnede van het Purmerbos proefgebied ter illustratie van de methode van berekening van randeffecten om de gemeten afvoer via bemaling te corrigeren; H = grondwaterstand, P_{bi} = openwaterstand binnen proefgebied, P_{bu} = openwaterstand (streefpeil) in sloten rondom het proefgebied (periode tot medio 1993); P_{bu1}, P_{bu2} = openwaterstanden (streefpeilen) in sloten rondom het proefgebied (periode vanaf medio 1993); S_{bu1}, S_{bu0}, S_{bi1}, S_{bi2} = breedte van de randstroken waarvan de afwatering op sloten buiten resp binnen het proefgebied plaatsvindt; alle waterstanden gerekend ten opzichte van NAP en dus negatief

Berekeningen voor de periode vanaf 1990 tot medio 1993

Voor deze periode zijn de volgende twee situaties te onderscheiden:
- dagen waarop $H \leq P_{bu}$, dat wil zeggen dagen waarop geen afvoer plaatsvindt en dus correcties niet aan de orde zijn;
- dagen waarop $H > P_{bu}$.

Voor de laatstgenoemde situatie geldt:

$$(P_{bu} - H)/(P_{bi} - H) = S_{bu}/S_{bi} = Q$$

en verder

$$S_{bu} + S_{bi} = S$$

Oplossen voor S_{bu} leidt tot:

$$S_{bu} = \{Q/(Q + 1)\} \bullet S$$

Het proefgebied wordt gekarakteriseerd door de lengte L, breedte B en oppervlakte O, waarbij geldt:

$$O = L \bullet B$$

De gemeten afvoer heeft betrekking op oppervlakte O^*, waarbij geldt:

$$O^* = L^* \bullet B^* = (L - 2 \bullet S_{bu}) \bullet (B - 2 \bullet S_{bu}) \approx O - 2 \bullet S_{bu} \bullet (L + B)$$

De afvoer is evenredig met de oppervlakte zodat:

$$A/A^* = O/O^*$$

waarin A^* de gemeten afvoer en A de afvoer als gedefinieerd door de waterbalansvergelijking is. Uitwerken resulteert in

$$A = A^* \bullet (O/O^*) = A^* \bullet O/\{(O - 2 \bullet S_{bu} \bullet (L + B)\}$$

Berekeningen voor de periode vanaf medio 1993

Voor deze periode zijn vier situaties te onderscheiden:
- dagen waarop $H \leq P_{bu1}$, dat wil zeggen dagen waarop geen afvoer plaatsvindt en dus correcties niet aan de orde zijn;
- dagen waarop $P_{bu1} < H \leq P_{bi}$, dat wil zeggen dagen waarop er wel een randeffect is, met zijdelingse wegstroming naar twee van de vier zijden van het proefgebied, maar geen gemeten afvoer, dus ook geen daarop toe te passen correctie;
- dagen waarop $P_{bi} < H \leq P_{bu2}$;
- $H > P_{bu2}$.

Uitwerking voor randvoorwaarde $P_{bi} < H \leq P_{bu2}$

$(P_{bu1} - H)/(P_{bi} - H) = S_{bu1}/S_{bi1} = Q_1$
$S_{bu1} + S_{bi1} = S$

Oplossen voor S_{bu1} leidt tot:

$S_{bu1} = \{Q_1/(Q_1 + 1)\} \bullet S$

Het proefgebied wordt gekarakteriseerd door de lengte L, breedte B en oppervlakte O, waarbij geldt:

$O = L \bullet B$

De gemeten afvoer heeft betrekking op oppervlakte O^*, waarbij geldt:

$O^* = L^* \bullet B^* = (L - S_{bu1}) \bullet (B - S_{bu1}) \approx O - S_{bu1} \bullet (L + B)$

De afvoer is evenredig met de oppervlakte zodat:

$A/A^* = O/O^*$, dus

$A = A^* \bullet (O/O^*) = A^* \bullet O/\{(O - S_{bu1} \bullet (L + B)\}$

Uitwerking voor randvoorwaarde: $H > P_{bu2}$

$(P_{bu1} - H)/(P_{bi} - H) = S_{bu1}/S_{bi1} = Q_1$
$S_{bu1} + S_{bi1} = S$

$(P_{bu2} - H)/(P_{bi} - H) = S_{bu2}/S_{bi2} = Q_2$
$S_{bu2} + S_{bi2} = S$

Oplossen voor S_{bu1} resp. S_{bu2}:

$S_{bu1} = \{Q_1/(Q_1 + 1)\} \bullet S$
$S_{bu2} = \{Q_2/(Q_2 + 1)\} \bullet S$

Het proefgebied wordt gekarakteriseerd door de lengte L, breedte B en oppervlakte O, waarbij geldt:

$O = L \bullet B$

De *gemeten* afvoer heeft betrekking op oppervlakte O^*, waarbij geldt:

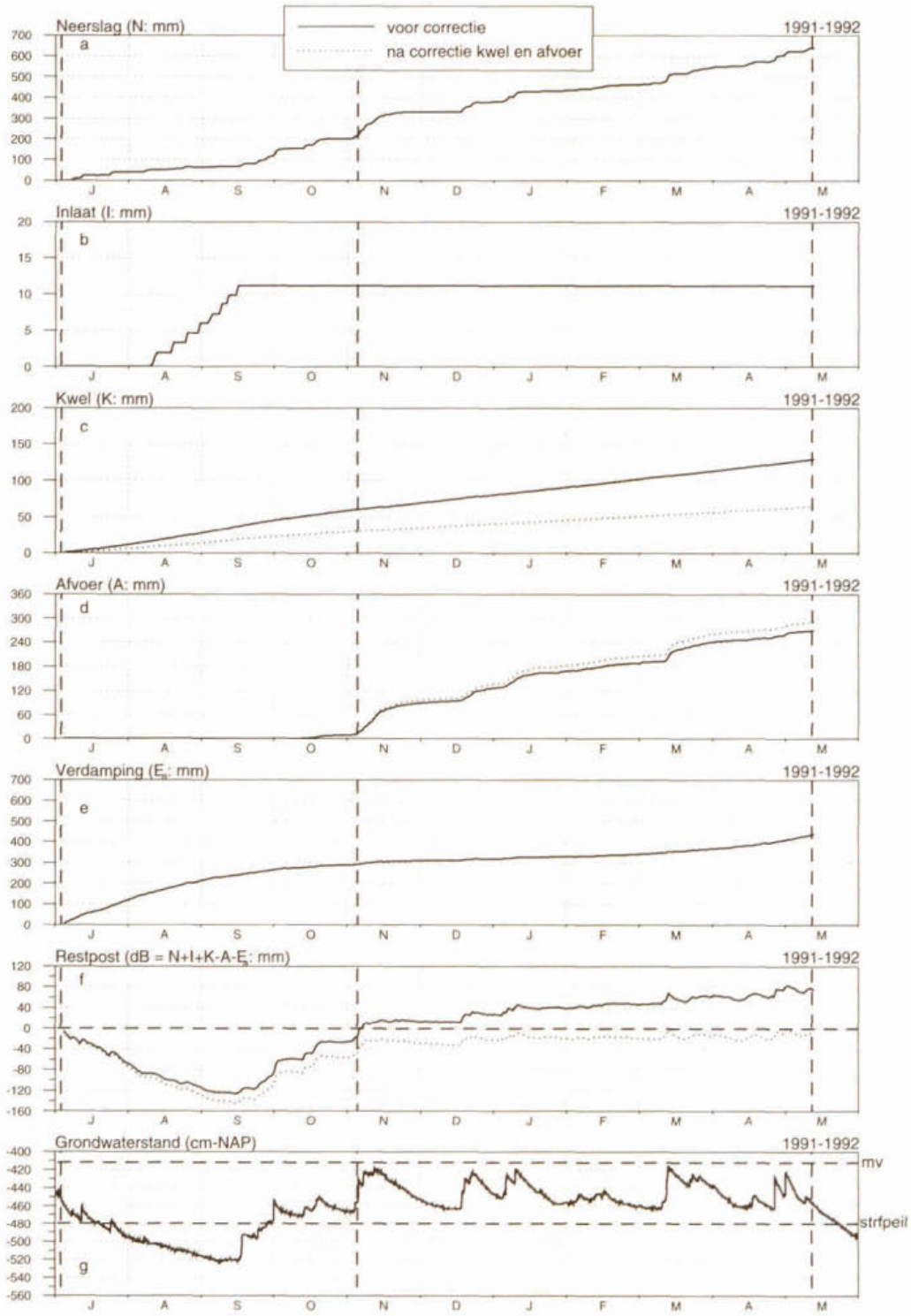
$O^* = L^* \bullet B^* = (L - S_{bu1} - S_{bu2}) \bullet (B - S_{bu1} - S_{bu2}) \approx O - (S_{bu1} + S_{bu2}) \bullet (L + B)$

De afvoer is evenredig met de oppervlakte zodat:

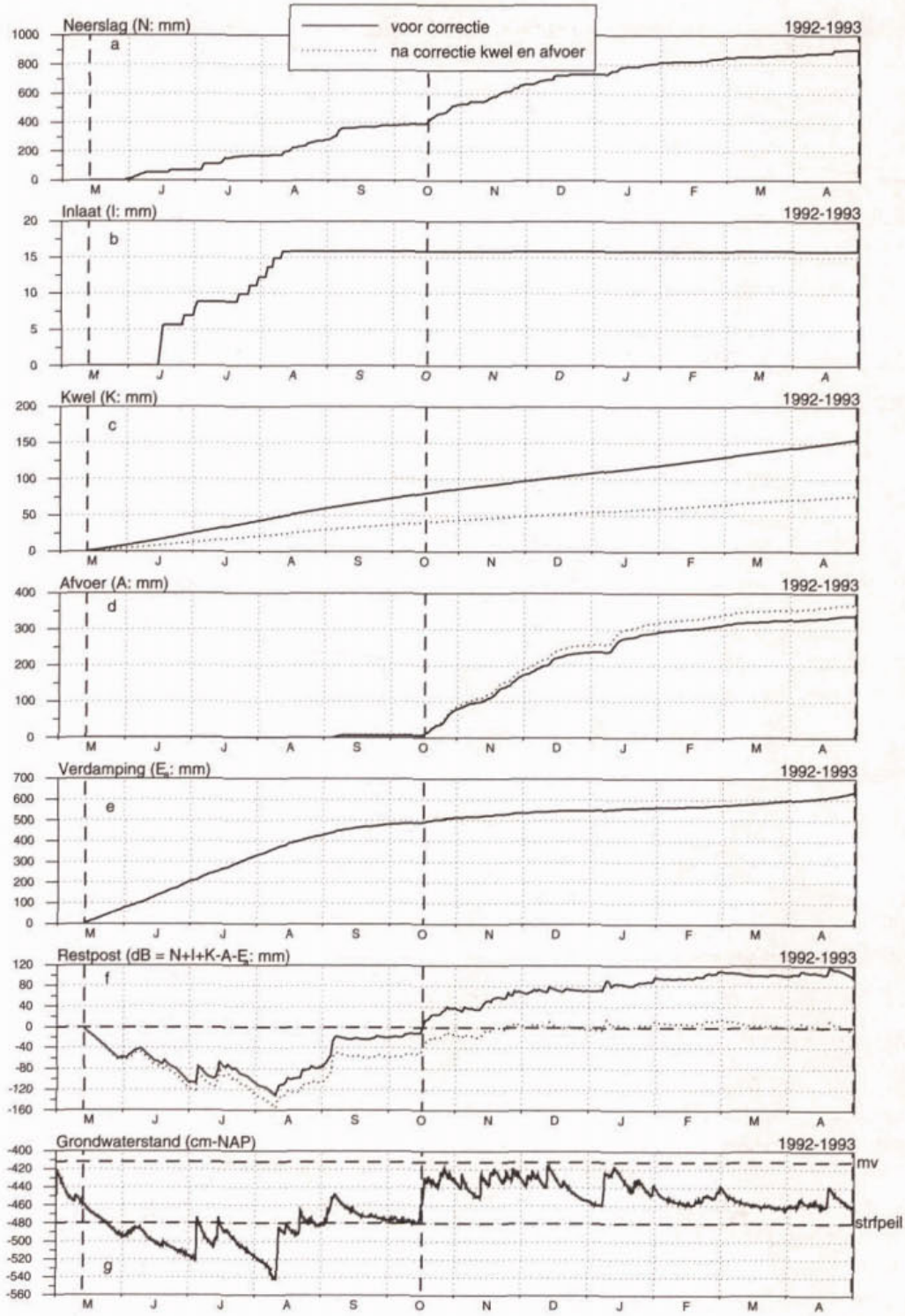
$A/A^* = O/O^*$, dus

$A = A^* \bullet (O/O^*) = A^* \bullet O/\{(O - (S_{bu1} + S_{bu2}) \bullet (L + B)\}$

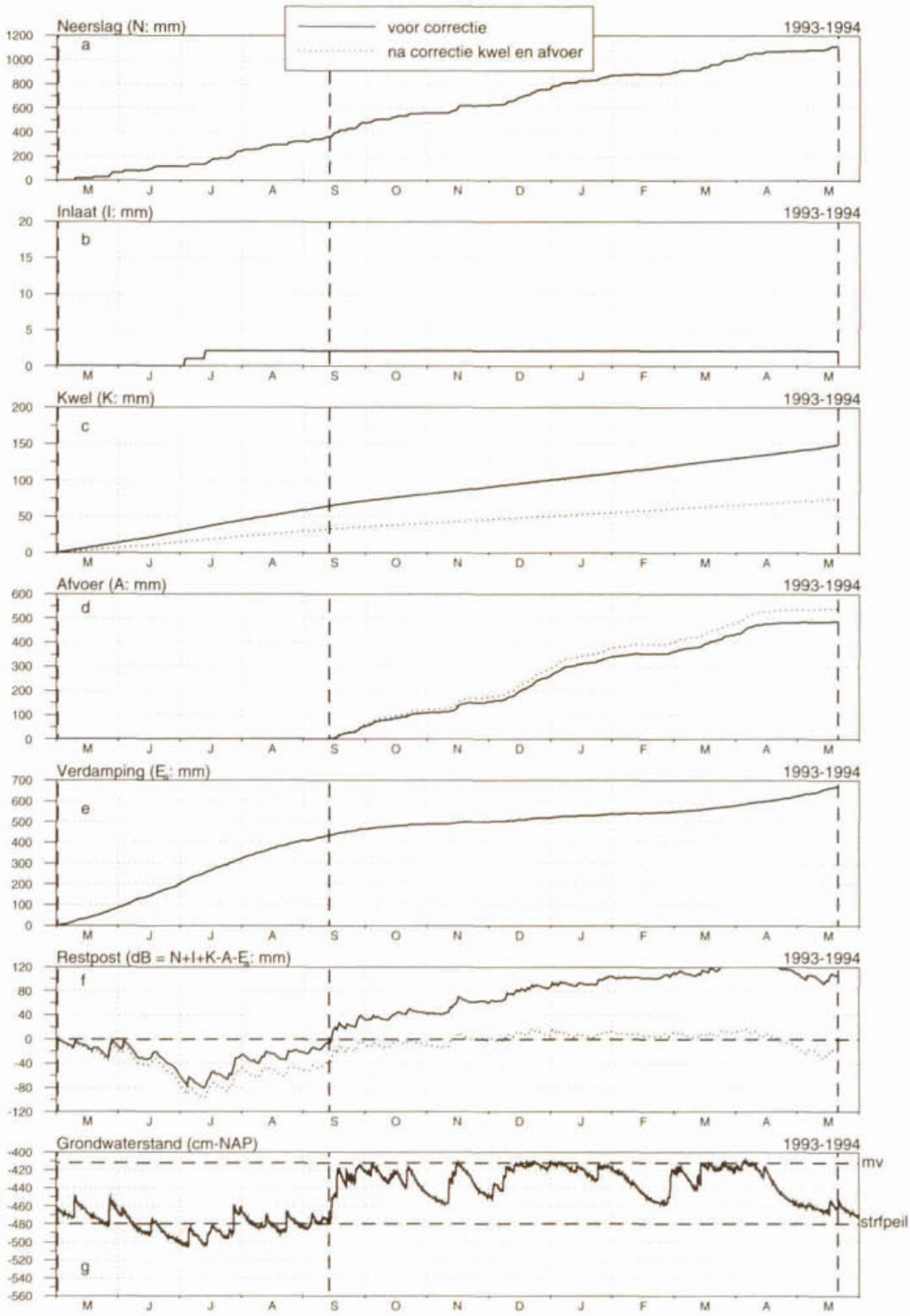
Aanhangsel 4
Waterbalansposten 1991-2000
(figuren 7.2 t/m 7.10)



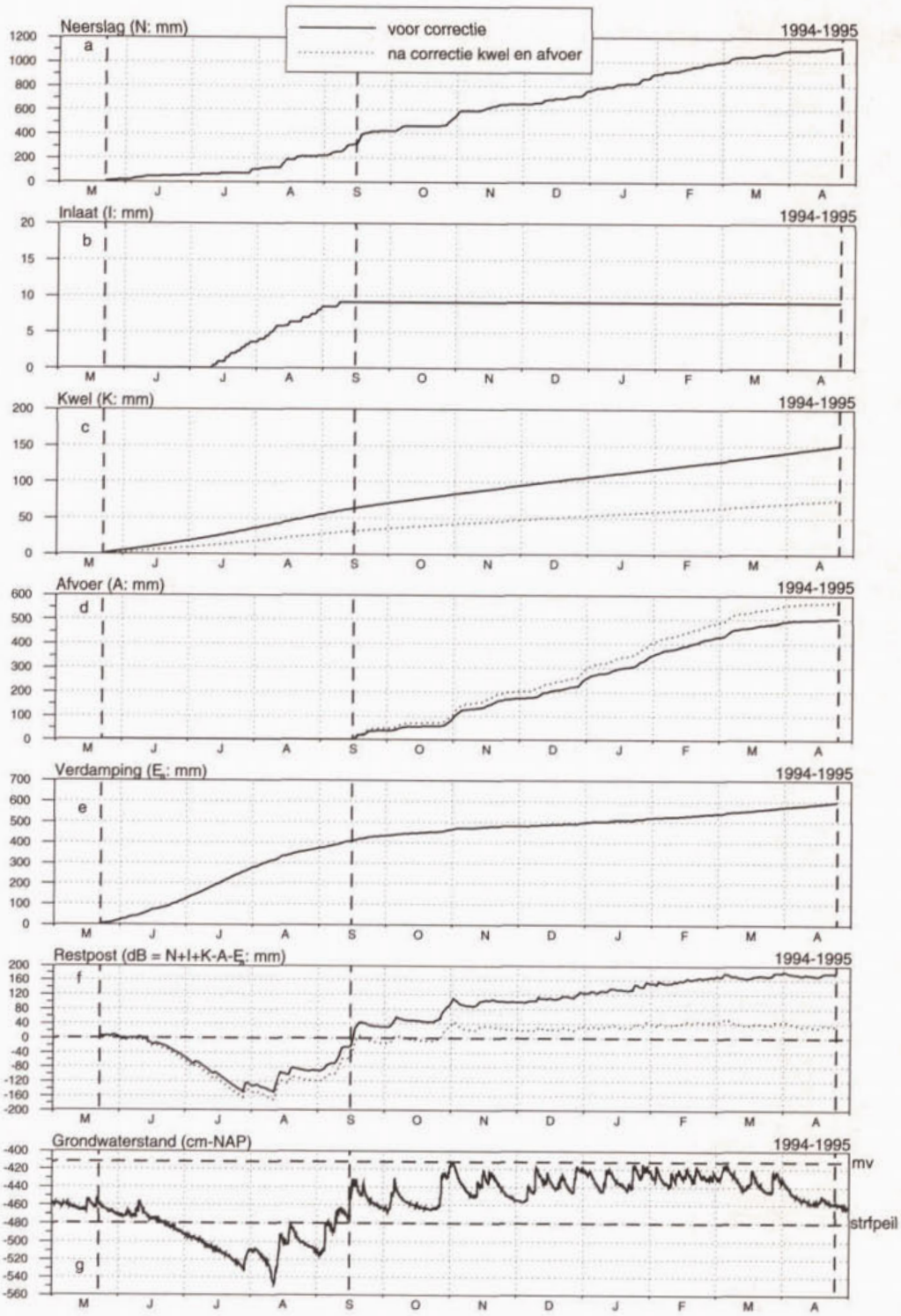
Figuur 7.2 Cumulatieve neerslag (N), waterinlaat (I), kwel (K), afvoer (A), verdamping (E_a), verandering in waterberging (dB = N+I+K-A-E_a) en verloop van de grondwaterstand, voor het hydrologische jaar 1991-1992



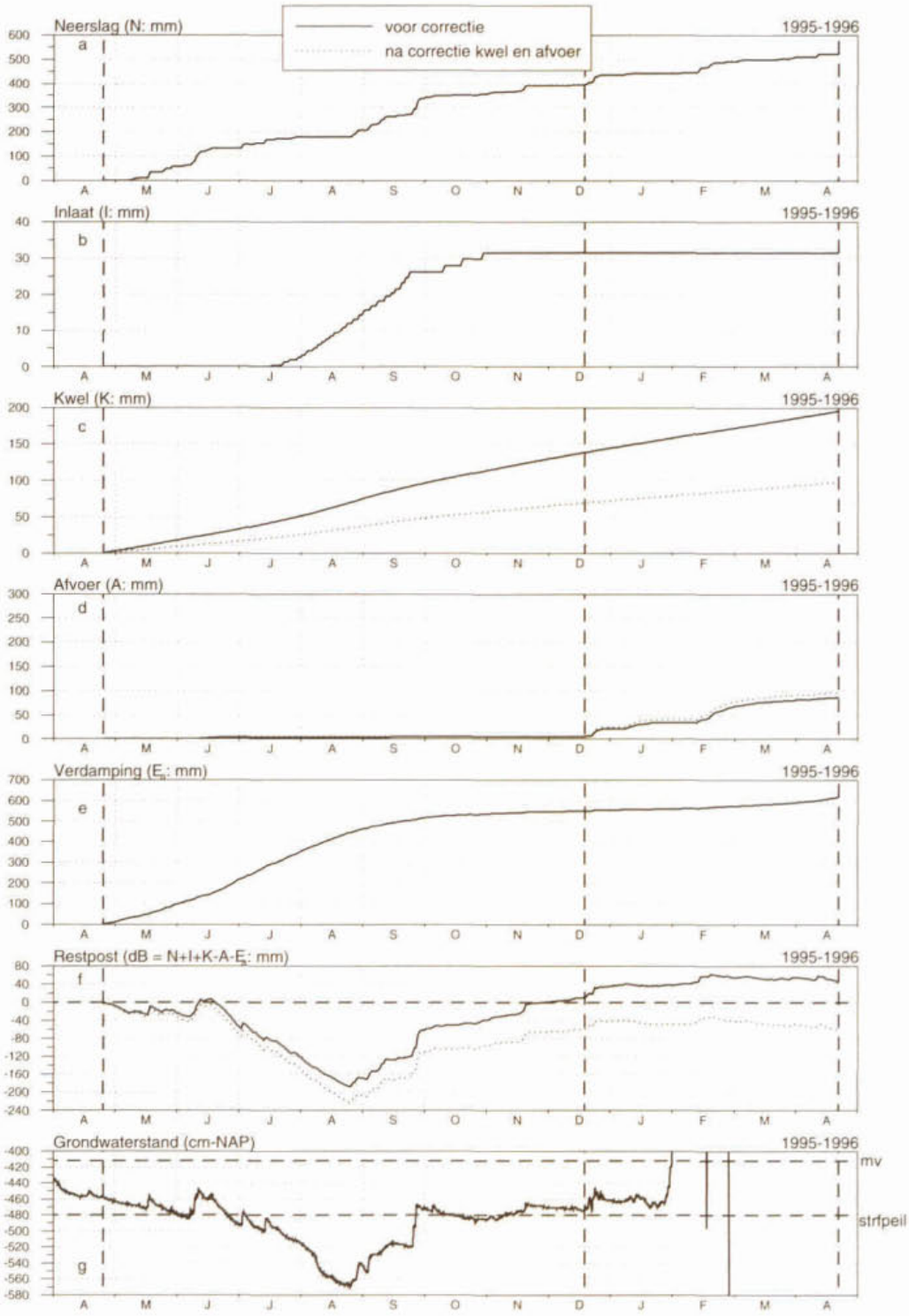
Figuur 7.3 Cumulatieve neerslag (N), waterinlaat (I), kwel (K), afvoer (A), verdamping (E_a), verandering in waterberging (dB = N+I+K-A-E_a) en verloop van de grondwaterstand, voor het hydrologische jaar 1992-1993



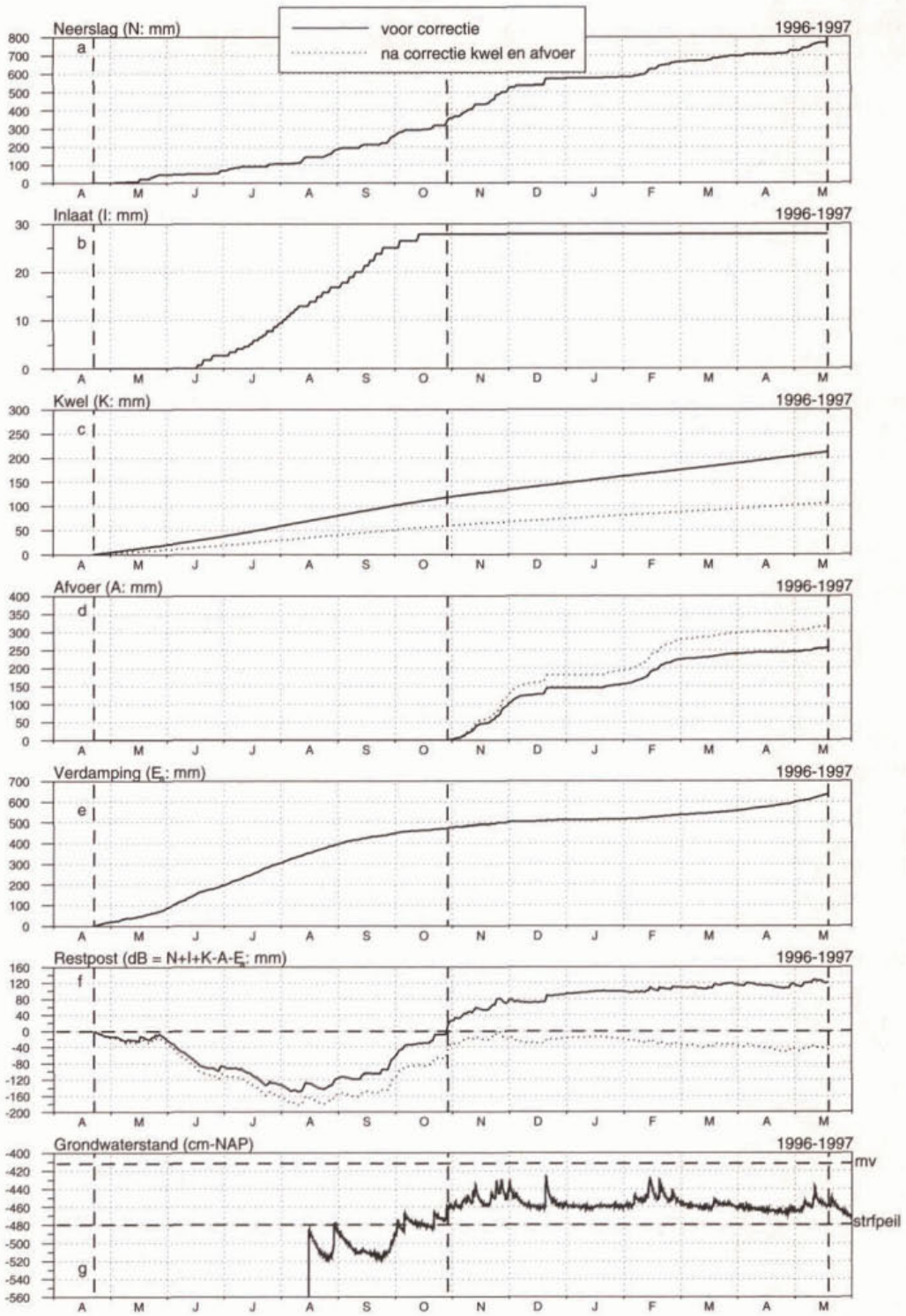
Figuur 7.4 Cumulatieve neerslag (N), waterinlaat (I), kwel (K), afvoer (A), verdamping (E_a), verandering in waterberging ($dB = N+I+K-A-E_a$) en verloop van de grondwaterstand, voor het hydrologische jaar 1993-1994



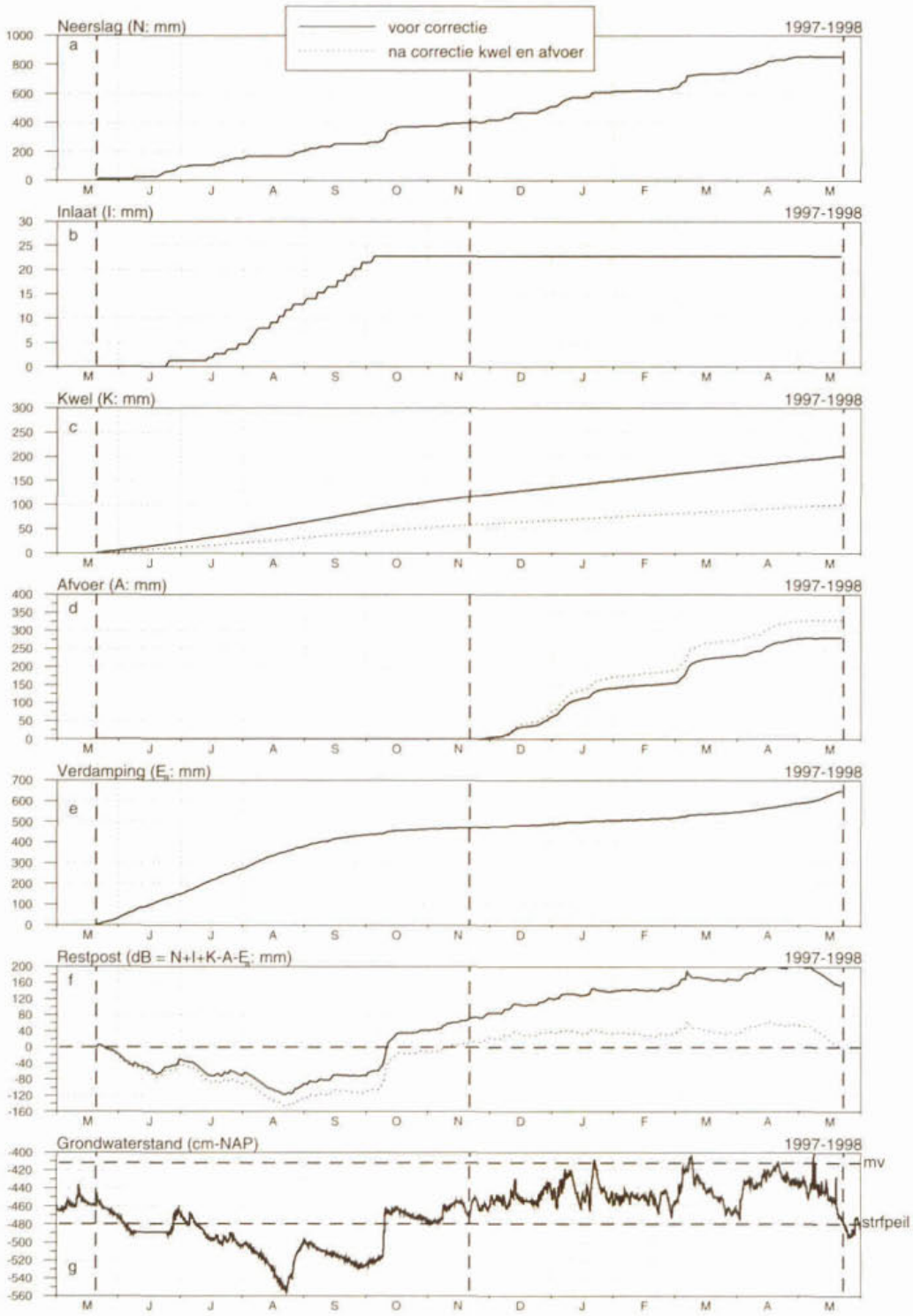
Figuur 7.5 Cumulatieve neerslag (N), waterinlaat (I), kwel (K), afvoer (A), verdamping (E_a), verandering in waterberging (dB = N+I+K-A-E_a) en verloop van de grondwaterstand, voor het hydrologische jaar 1994-1995



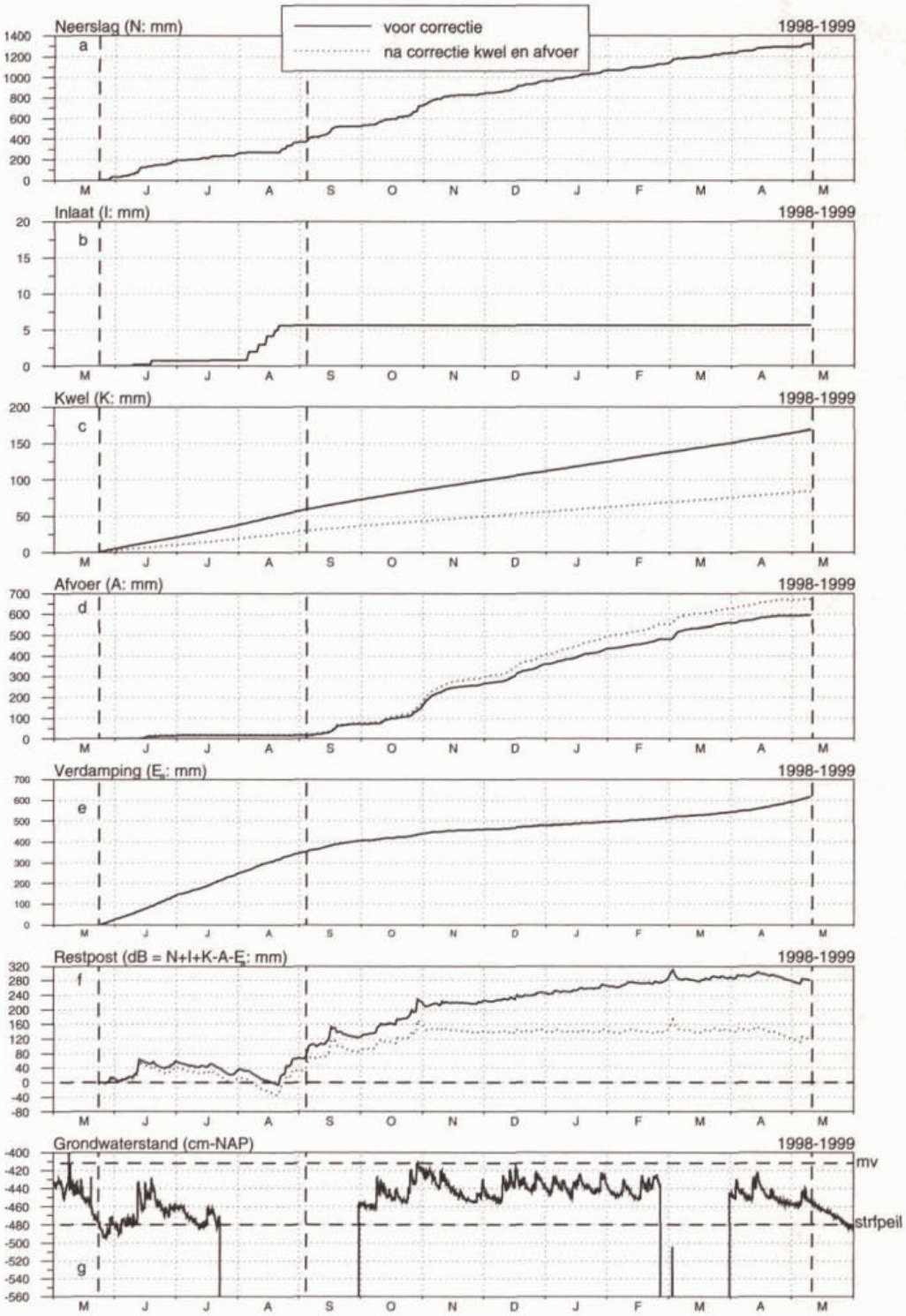
Figuur 7.6 Cumulatieve neerslag (N), waterinlaat (I), kwel (K), afvoer (A), verdamping (E_a), verandering in waterberging (dB = N+I+K-A-E_a) en verloop van de grondwaterstand, voor het hydrologische jaar 1995-1996



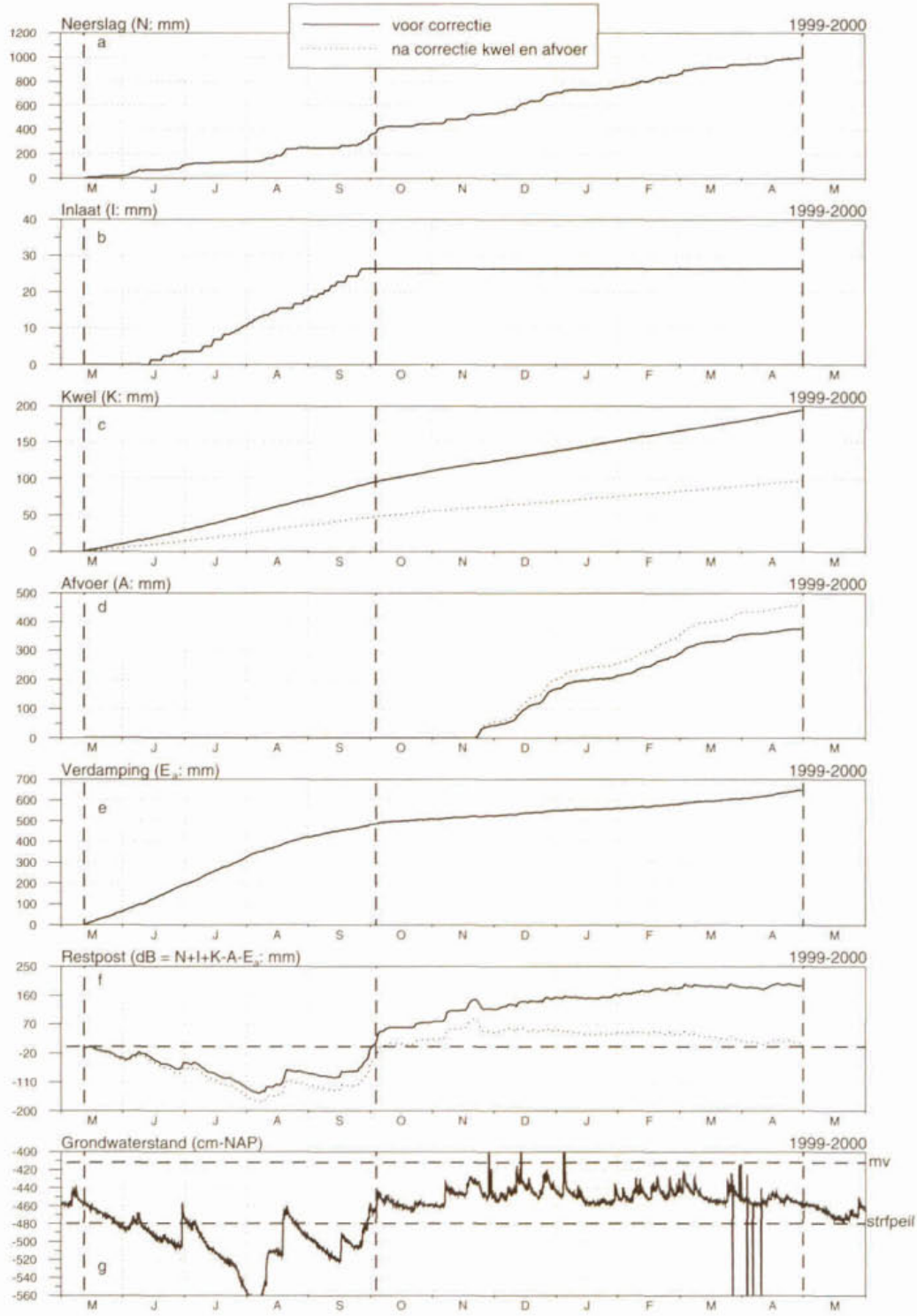
Figuur 7.7 Cumulatieve neerslag (N), waterinlaat (I), kwel (K), afvoer (A), verdamping (E_a), verandering in waterberging (dB = N+I+K-A-E_a) en verloop van de grondwaterstand, voor het hydrologische jaar 1996-1997



Figuur 7.8 Cumulatieve neerslag (N), waterinlaat (I), kwel (K), afvoer (A), verdamping (E_a), verandering in waterberging (dB = N+I+K-A-E_a) en verloop van de grondwaterstand, voor het hydrologische jaar 1997-1998

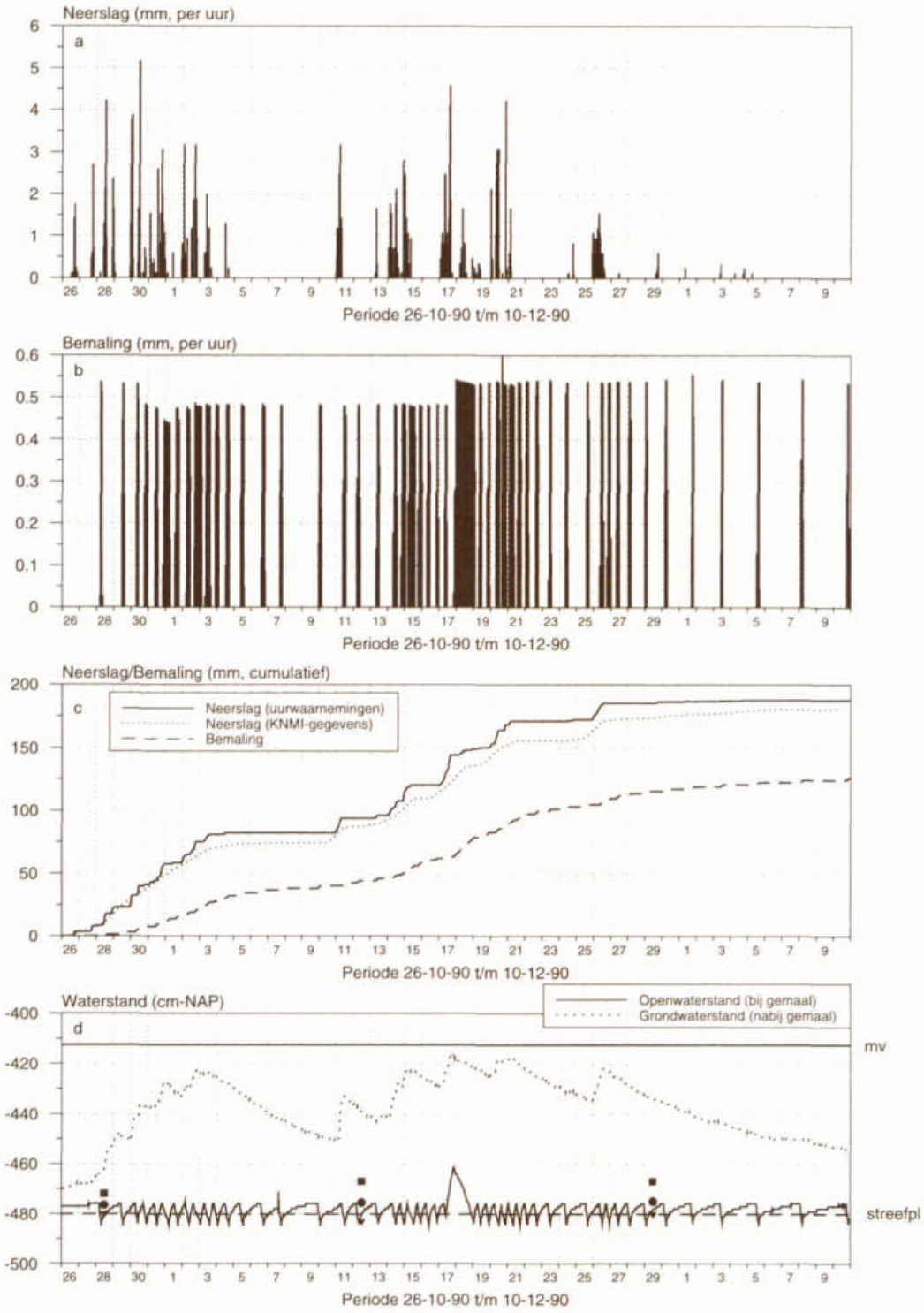


Figuur 7.9 Cumulatieve neerslag (N), waterinlaat (I), kwel (K), afvoer (A), verdamping (E_a), verandering in waterberging (dB = N+I+K-A-E_a) en verloop van de grondwaterstand, voor het hydrologische jaar 1998-1999

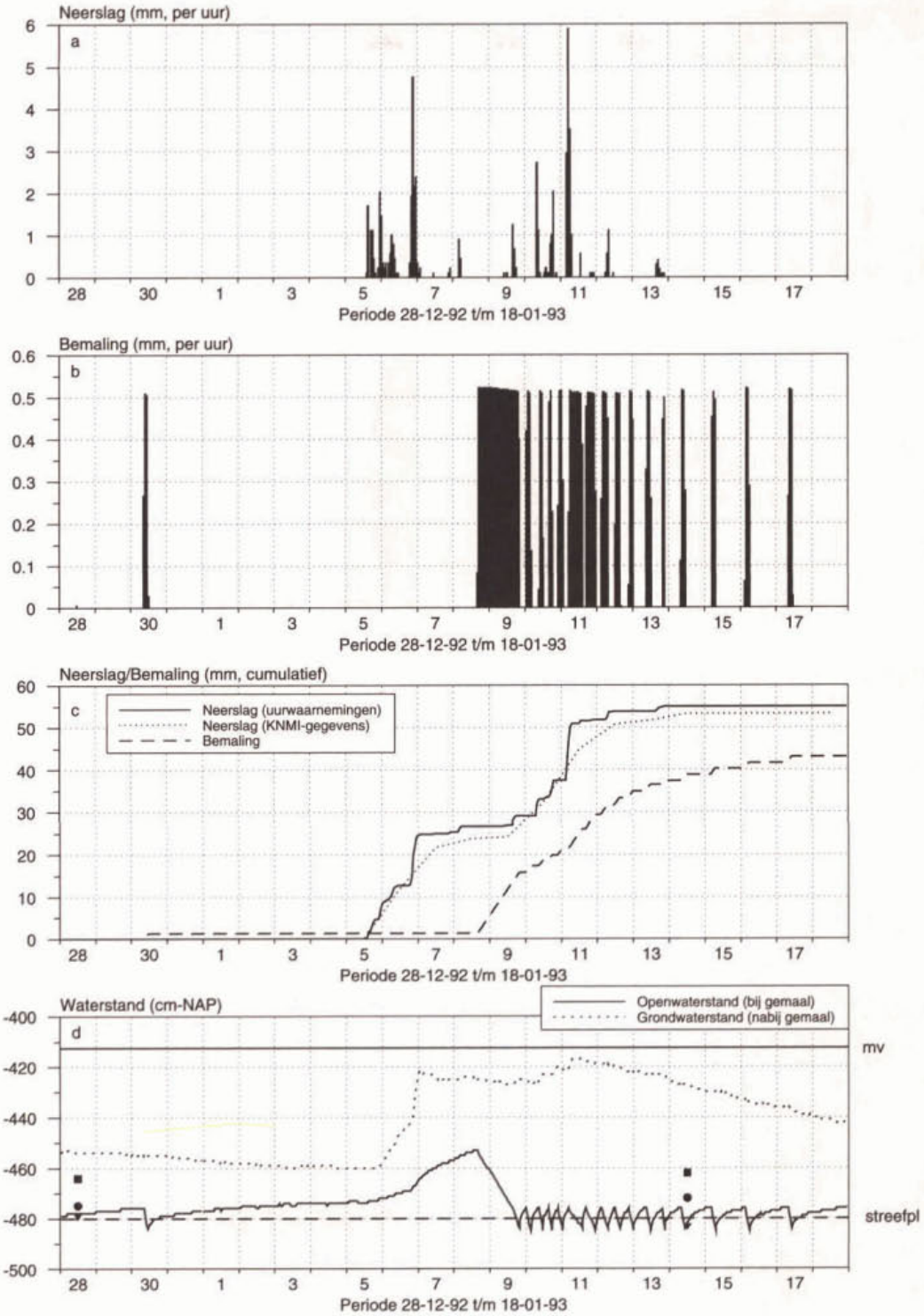


Figuur 7.10 Cumulatieve neerslag (N), waterinlaat (I), kwel (K), afvoer (A), verdamping (E_a), verandering in waterberging (dB = N+I+K-A-E_a) en verloop van de grondwaterstand, voor het hydrologische jaar 1999-2000

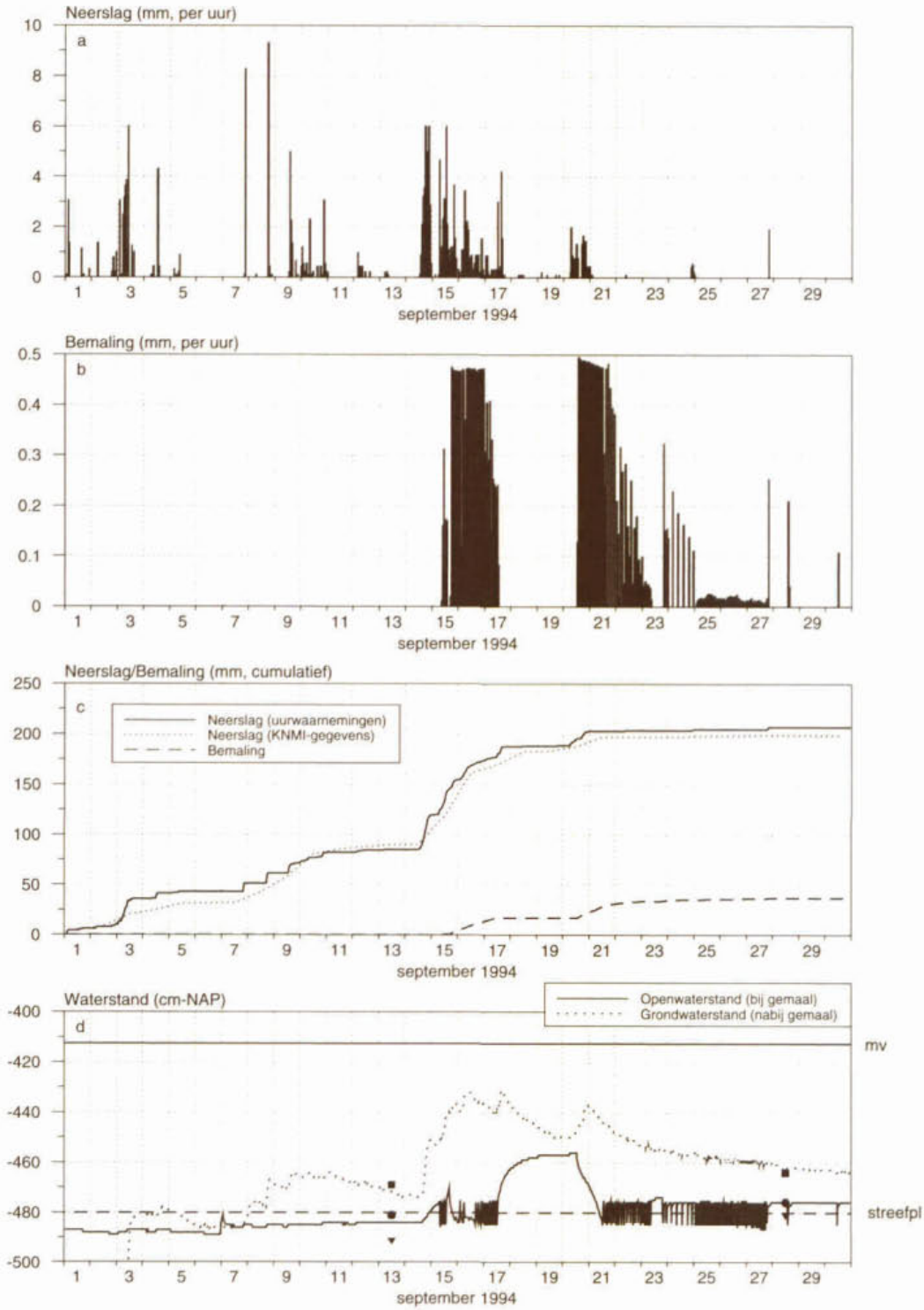
Aanhangsel 5
Karakterisering waterhuishouding in extreem natte perioden (figuren 8.9 t/m 8.17)



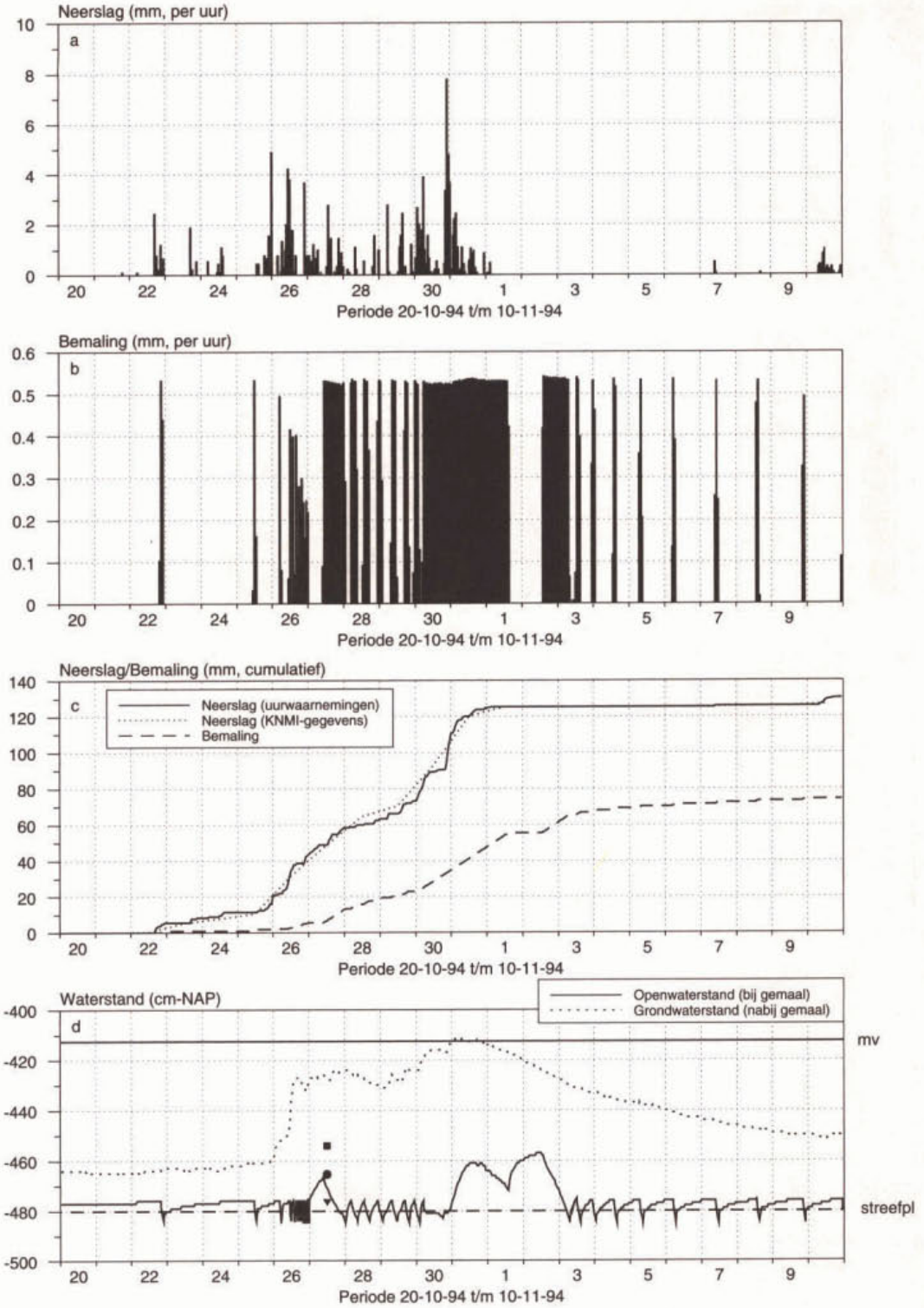
Figuur 8.9 Karakterisering van de waterhuishouding van het Purmerbos proefgebied voor de periode oktober-december 1990; de punten (vierkant, rond, driehoekig) in deelfiguur d betreffen openwaterstanden bij de piketten in de niet onderhouden sloten (zie inleidende tekst par. 8.4)



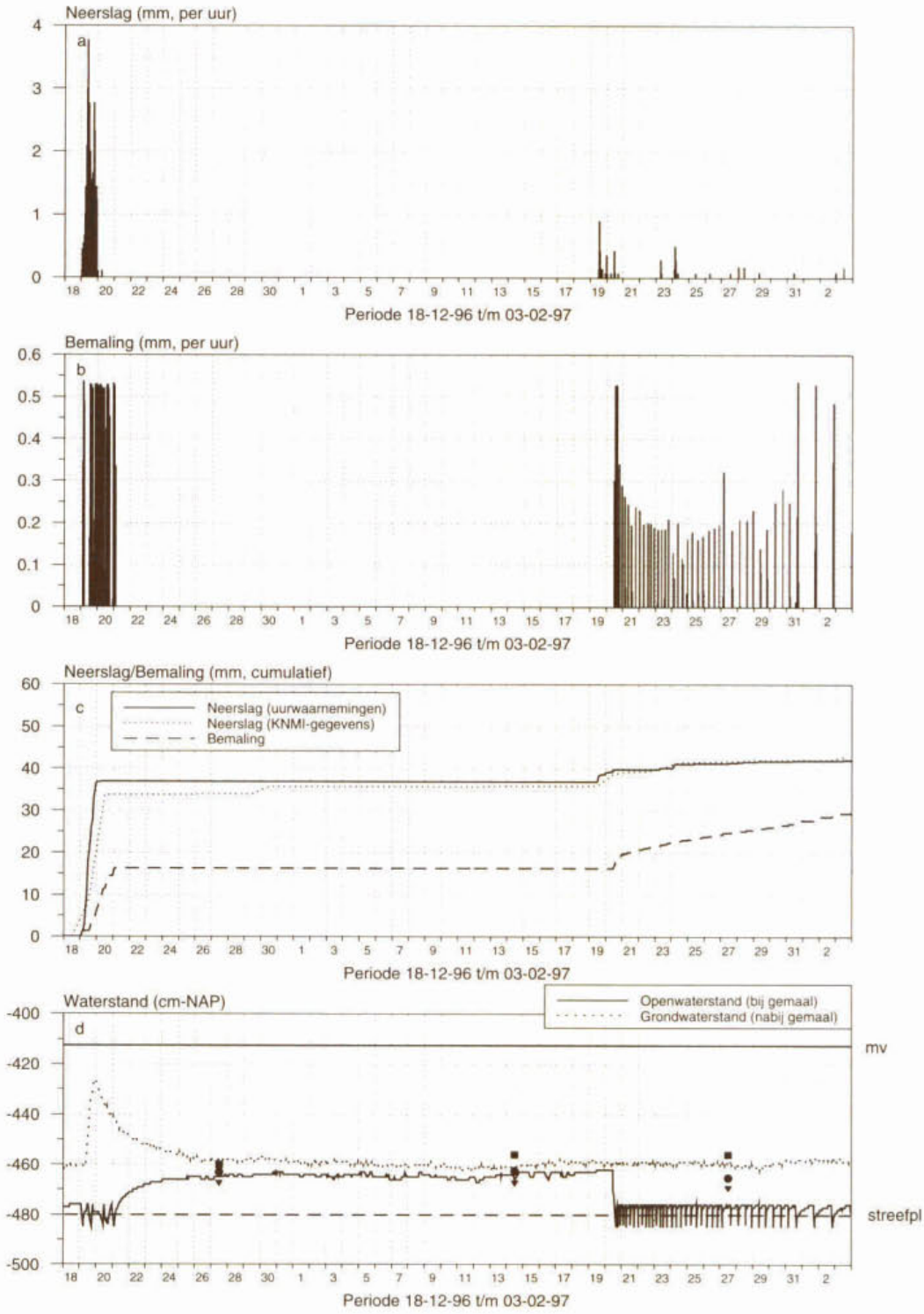
Figuur 8.10 Karakterisering van de waterhuishouding van het Purmerbos proefgebied voor de periode december 1992-januari 1993; de punten (vierkant, rond, driehoekig) in deelfiguur d betreffen openwaterstanden bij de piketten in de niet onderhouden sloten (zie inleidende tekst par. 8.4)



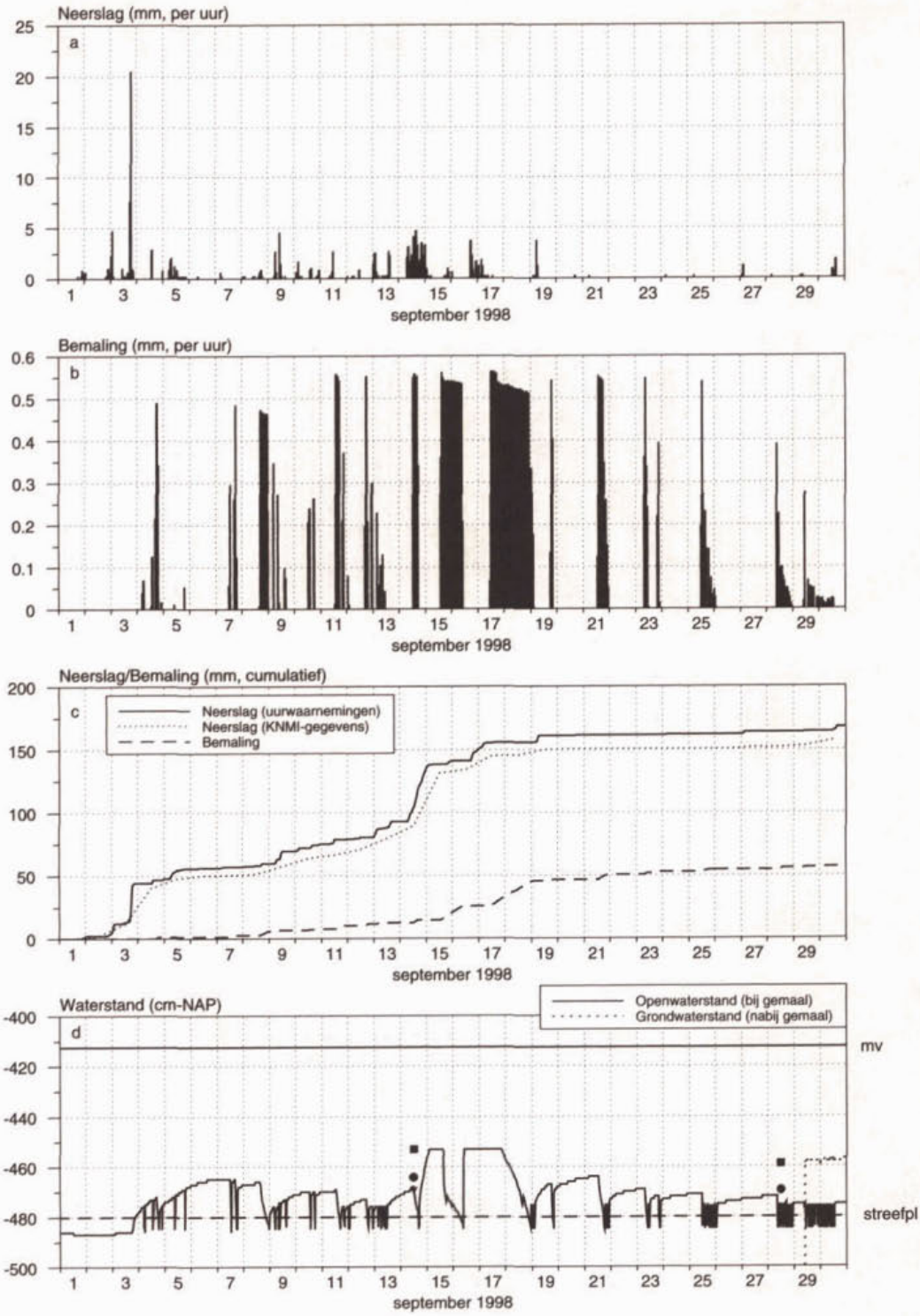
Figuur 8.11 Karakterisering van de waterhuishouding van het Purmerbos proefgebied voor de maand september 1994; de punten (vierkant, rond, driehoekig) in deelfiguur d betreffen openwaterstanden bij de piketten in de niet onderhouden sloten (zie inleidende tekst par. 8.4)



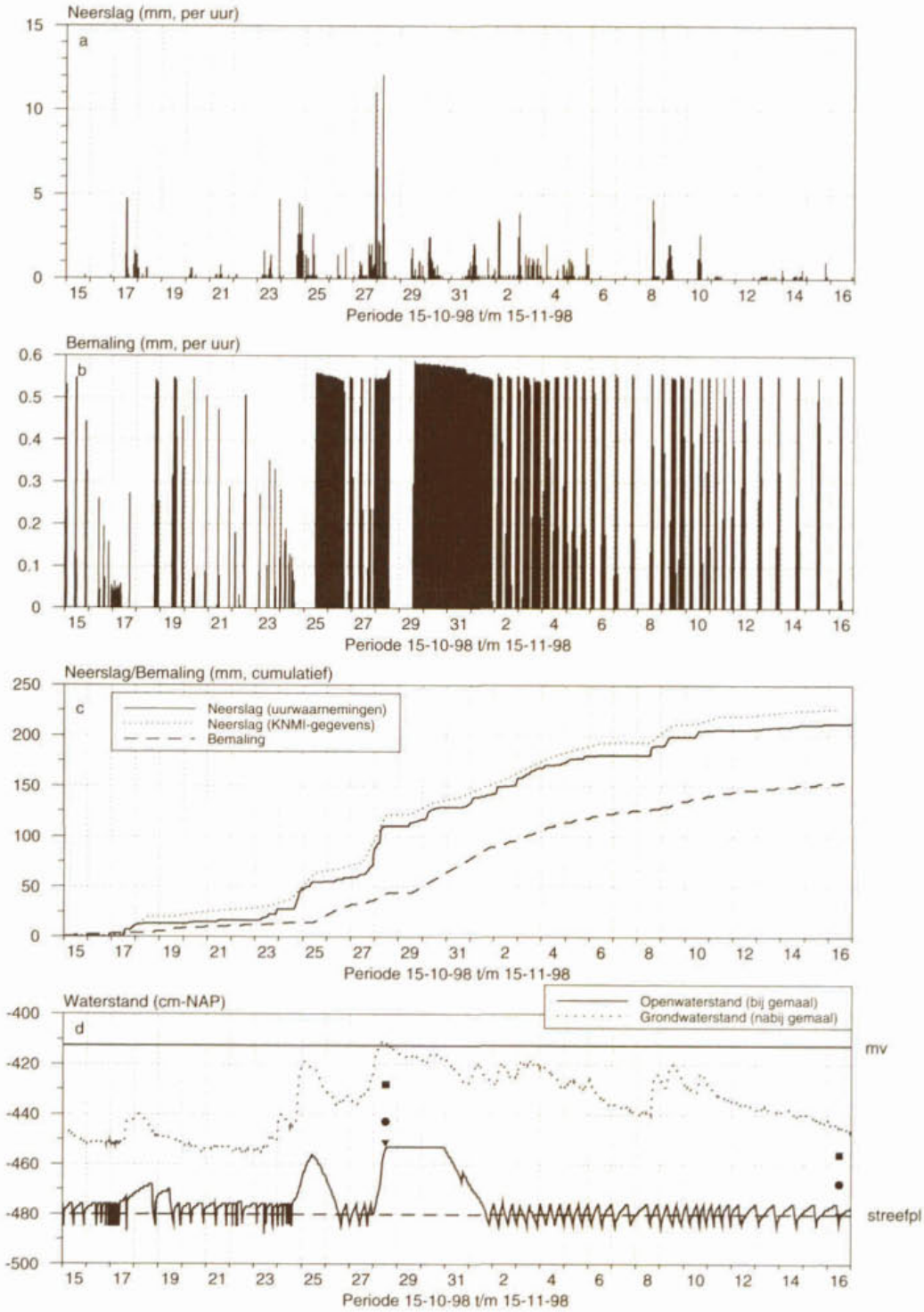
Figuur 8.12 Karakterisering van de waterhuishouding van het Purmerbos proefgebied voor de periode oktober-november 1994; de punten (vierkant, rond, driehoekig) in deelfiguur d betreffen openwaterstanden bij de piketten in de niet onderhouden sloten (zie inleidende tekst par. 8.4)



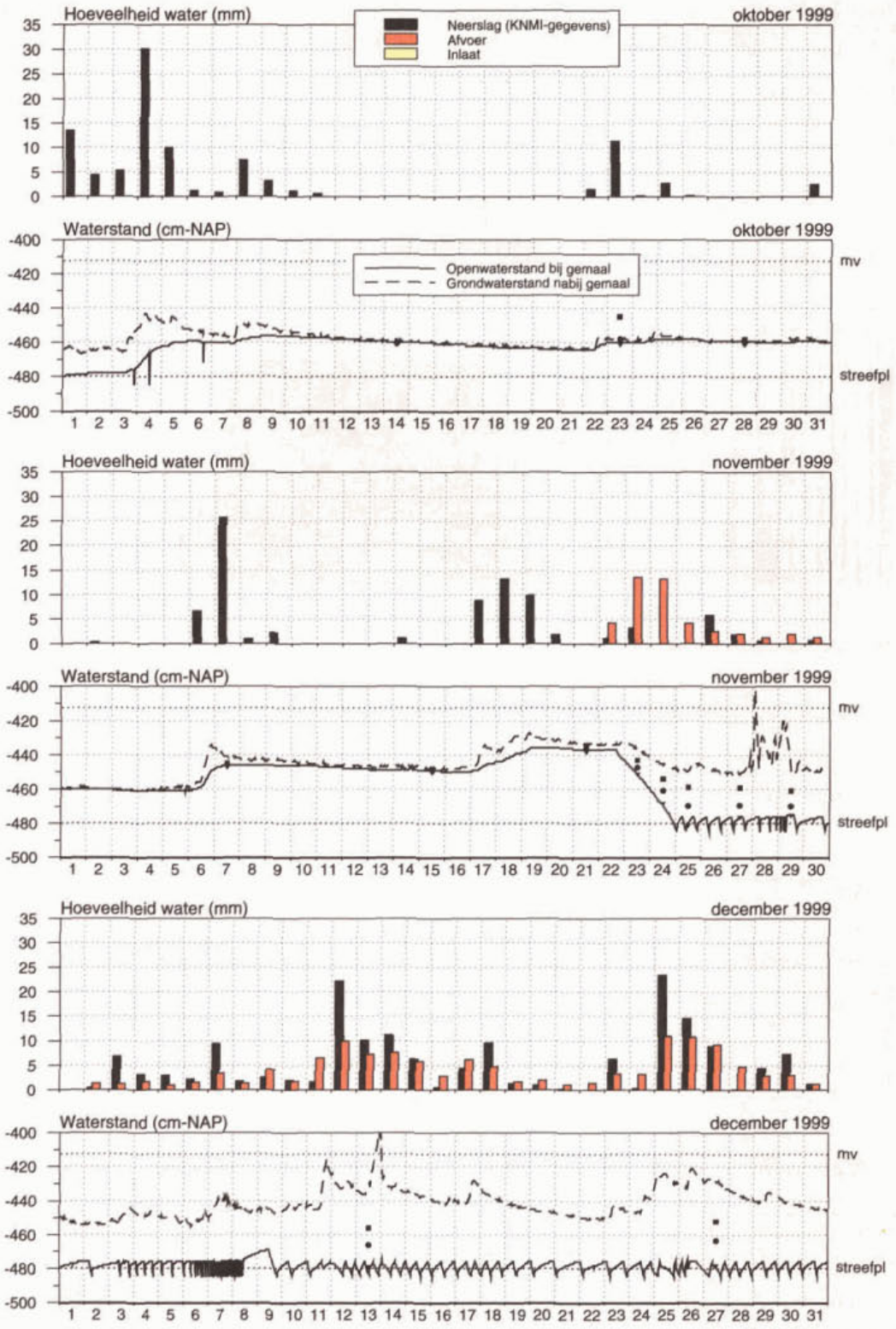
Figuur 8.13 Karakterisering van de waterhuishouding van het Purmerbos proefgebied voor de periode december 1996-februari 199; de punten (vierkant, rond, driehoekig) in deelfiguur d betreffen openwaterstanden bij de piketten in de niet onderhouden sloten (zie inleidende tekst par. 8.4)



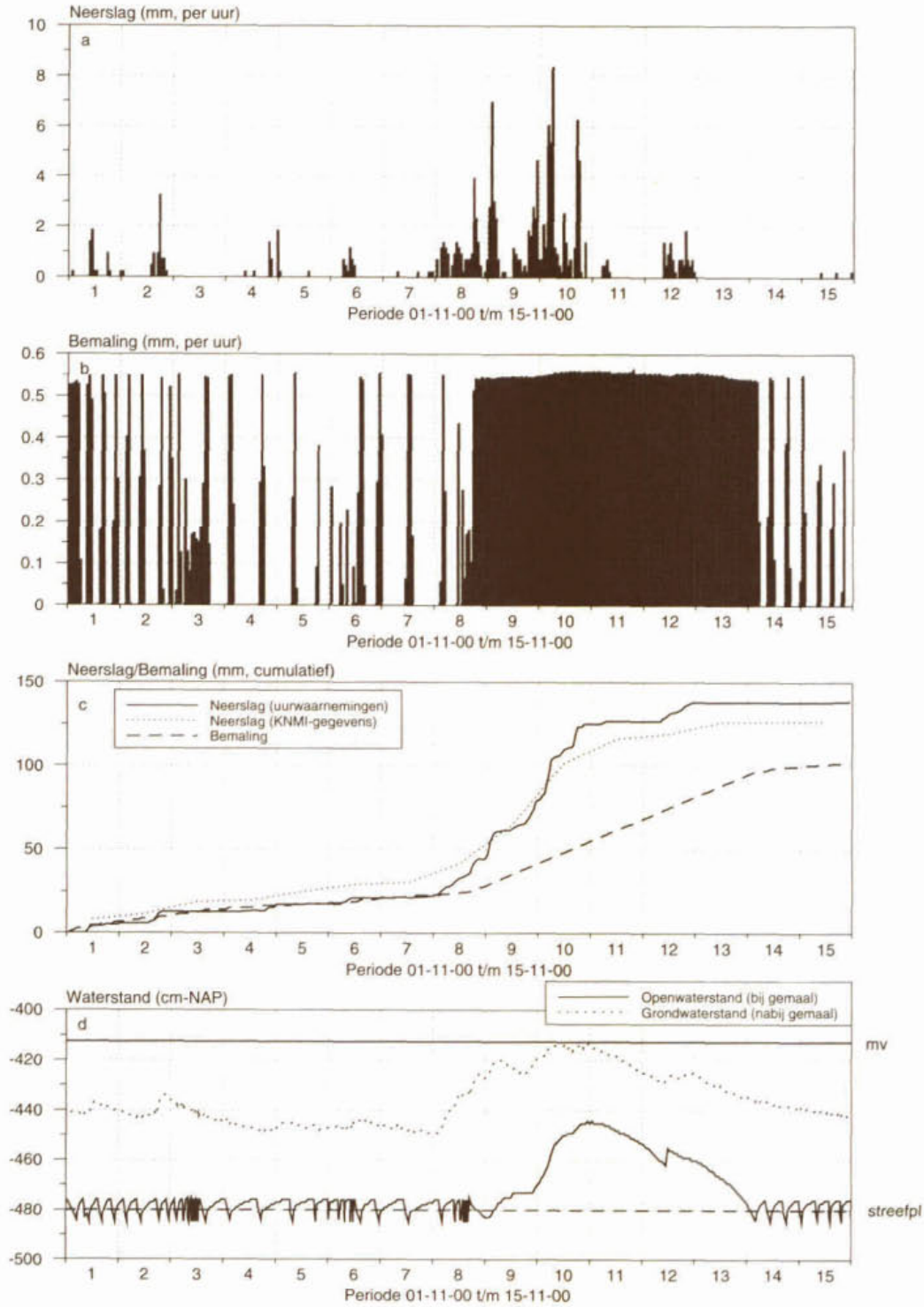
Figuur 8.14 Karakterisering van de waterhuishouding van het Purmerbos proefgebied voor de maand september 1998; de punten (vierkant, rond, driehoekig) in deelfiguur d betreffen openwaterstanden bij de piketten in de niet onderhouden sloten (zie inleidende tekst par. 8.4)



Figuur 8.15 Karakterisering van de waterhuishouding van het Purmerbos proefgebied voor de periode oktober-november 1998; de punten (vierkant, rond, driehoekig) in deelfiguur d betreffen openwaterstanden bij de piketten in de niet onderhouden sloten (zie inleidende tekst par. 8.4)



Figuur 8.16 Karakterisering van de waterhuishouding van het Purmerbos proefgebied voor de periode oktober-december 1999; de punten (vierkant, rond, driehoekig) in de desbetreffende deelfiguren betreffen openwaterstanden bij de piketten in de niet onderhouden sloten (zie inleidende tekst par. 8.4)



Figuur 8.17 Karakterisering van de waterhuishouding van het Purmerbos proefgebied voor de periode van 1 t/m 15 november 2000