32/446/420-1) 2 ex

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

Perceelsonderzoek naar het effect van beekbegeleidende bufferstroken op de stikstof- en fosforbelasting van de Mosbeek

Gebiedsbeschrijving, veldonderzoek en modelmatige analyse van de hydrologie

R.F.A. Hendriks
G.J. Leene
H.Th.L. Massop
R. Kruijne

Rapport 420.1

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1996

17 JAN. 1997

ISN 931 dig 8 deel 1

REFERAAT

Hendriks, R.F.A., G.J. Leene, H.Th.L. Massop en R. Kruijne, 1996. *Perceelsonderzoek naar het effect van beekbegeleidende bufferstroken op de stikstof- en fosforbelasting van de Mosbeek; gebiedsbeschrijving, veldonderzoek en modelmatige analyse van de hydrologie*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 420.1 223 blz.; 8 fig.; 12 tab.; 32 ref.; 20 aanh.

Op een onderzoekslocatie in Noordoost-Twente zijn de afspoeling en uitspoeling van stikstof en fosfor naar de Mosbeek en het effect van bufferstroken op deze nutriëntenbelasting onderzocht. In het veld is de bodem onderzocht, zijn hydrologische metingen verricht, is de chemische samenstelling van grondwater en oppervlakkig afstromend water bepaald, en zijn twee tracerexperimenten gedaan. Met het eendimensionale model SWAP is de hydrologie van de onderzoekslocatie gemodelleerd. Het model is gecalibreerd op gemeten grondwaterstanden en oppervlakkige afstroming. Met het gecalibreerde model zijn hydrologische berekeningen gedaan voor maïs- en graspercelen met en zonder bufferstrook. De resultaten vormden de invoer voor de berekening van de nutriëntenbelasting.

Trefwoorden: grondwater, milieubescherming, nutriëntenbelasting, oppervlaktewater, waterkwaliteit

ISSN 0927-4499

©1996 DLO-Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen.
Tel.: (0317) 474200; fax: (0317) 424812; e-mail: postkamer@sc.dlo.nl

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

DLO-Staring Centrum aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Project 2726 [rap4201.wp5/11-96]

Inhoud

	blz.
Woord vooraf	9
Samenvatting	11
1 Inleiding	15
1.1 Probleemstelling	15
1.2 Doelstelling	16
1.3 Methode	16
1.4 Opzet rapportage	17
2 Gebiedsbeschrijving	19
2.1 Geologie en bodemkunde	19
2.2 Geohydrologie en hydrologie	20
2.3 Landgebruik	20
2.4 De onderzoekslocatie	22
3 Veldonderzoek	25
3.1 Bodemkundige inventarisatie	25
3.1.1 Bodemkundige beschrijving	25
3.1.1.1 Methode	25
3.1.1.2 Resultaten	26
3.1.1.3 Conclusies	27
3.1.2 Bodemfysische eigenschappen	27
3.1.2.1 Methode	27
3.1.2.2 Resultaten	28
3.1.2.3 Conclusies	28
3.1.3 Bodemchemische eigenschappen	28
3.1.3.1 Methode	29
3.1.3.2 Resultaten	29
3.1.3.3 Conclusies	30
3.2 Hydrologische metingen	31
3.2.1 Neerslag	31
3.2.1.1 Methode	31
3.2.1.2 Resultaten	31
3.2.1.3 Conclusies	32
3.2.2 Grondwaterstand	32
3.2.2.1 Methode	32
3.2.2.2 Resultaten	33
3.2.2.3 Conclusies	38
3.2.3 Oppervlaktewaterpeil	38
3.2.3.1 Methode	38
3.2.3.2 Resultaten	39

3.2.3.3 Conclusies 39
3.2.4 Oppervlakkige afstroming 39
3.2.4.1 Methode 40
3.2.4.2 Resultaten 41
3.2.4.3 Conclusies 42
3.3 Chemie bodemwater 43
3.3.1 Methode 43
3.3.2 Resultaten 44
3.3.3 Conclusies 45
3.4 Tracerexperimenten 45
3.4.1 Methode 45
3.4.2 Resultaten en conclusies 45

4 Modelmatige analyse van de hydrologie 47
4.1 Modelbeschrijving 49
4.1.1 SWAP 49
4.1.2 PEST 50
4.2 Schematisering 51
4.3 Invoer SWAP 60
4.3.1 Modelparameters 60
4.3.1.1 Indeling in bodemlagen en compartimenten 60
4.3.1.2 Bodemfysische parameters 61
4.3.2 Randvoorwaarden 62
4.3.2.1 Bovenrandvoorwaarden 62
4.3.2.2 Onderrandvoorwaarde 65
4.4 Calibratie 66
4.4.1 Bodemfysische parameters 66
4.4.1.1 Methode 66
4.4.1.2 Resultaten 69
4.4.2 Onderrandvoorwaarde 69
4.4.2.1 Methode 70
4.4.2.2 Resultaten 72
4.4.3 Conclusie 76
4.5 Hydrologie van de bestaande situatie 76
4.5.1 Methode 77
4.5.2 Resultaten 77
4.5.2.1 Waterbalansen 78
4.5.2.2 Uit- en afstromende debieten 79
4.5.3 Conclusies 86
4.6 Hydrologische scenario's 88
4.6.1 Methode 88
4.6.1.1 Schematisering 88
4.6.1.2 Invoer 89
4.6.2 Resultaten 90
4.6.2.1 Waterbalansen 91
4.6.2.2 Uit- en afstromende debieten 92
4.6.3 Conclusies 94

5 Conclusies 95
5.1 Doelstellingen 95
5.2 Veldonderzoek 95
5.3 Modelmatige analyse van de hydrologie 97

Literatuur 101
Niet-gepubliceerde bronnen 102

Aanhangsels

1 Geologische doorsnede langs raai A-A' 107
2 Topografie maaiveld en bovenkant tertiaire afzettingen in de raaien 109
3 Resultaten van de bodemkartering 111
4 Van Genuchten-parameters van de gestoken monsters 119
5 Gemeten gehalten aluminium, ijzer en fosfaat, en de fosfaatbezettingsfractie 121
6 Gemeten gehalten organische stof 125
7 Resultaten van de continue registratie van de grondwaterstand, het beekpeil, de neerslag en de waterstand in het opvangvat van de oppervlakkige afstroming 127
8 Tabel met grondwaterstandswaarnemingen 139
9 Figuren met grondwaterstandswaarnemingen 143
10 Resultaten van de analyse van bodemwater en afstromend water 149
11 Theoretische beschrijving van de aangepaste berekening van de oppervlakkige afstroming in SWAP 157
12 Verantwoording van de schematisering 161
13 Bodemfysische schematisering 167
14 Enkele locatiegebonden invoergegevens betreffende de bovenrandvoorwaarden 171
15 Statistische criteria gebruikt bij de calibratie 173
16 Resultaten van de calibratie in de vorm van de gecalibreerde waarden van de constanten van de onderrandvoorwaarde en de waarden van de statistische criteria 175
17 Grafische weergave van het berekende grondwaterstandsverloop, de gemeten grondwaterstanden en het verloop van de berekende onderrandflux in de calibratieperiode 177
18 Berekende oppervlakkige afstroming 185
19 Berekende waterbalansen voor de bestaande situatie en de hydrologische scenario's 193
20 Tracerexperimenten 197

Woord vooraf

In opdracht van het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), de provincie Overijssel en het waterschap Regge en Dinkel heeft DLO-Staring Centrum een perceelsonderzoek uitgevoerd in de periode van september 1993 tot april 1996. De uitvoering is mogelijk geweest dankzij de bereidwilligheid van de eigenaars van de onderzoekspercelen (agrariër en stichting 'Het Overijssels landschap') om deze percelen ter beschikking te stellen.

Vanwege de omvang van het onderzoek is de verslaglegging in twee deelrapporten verschenen. Het eerste deelrapport bevat een uitgebreide bespreking van het veldonderzoek en de modelmatige analyse van de hydrologie. Het tweede deelrapport bevat de bespreking van het nutriëntenonderzoek, de scenarioberekeningen en de eindconclusies. Daarnaast zijn de hoofdpunten uit het eerste deelrapport opgenomen.

Het onderzoek is begeleid door de 'Projectgroep onderzoek Mosbeek'. Hieraan is door de volgende personen een bijdrage geleverd:
- ir. E.J.B. Uunk, waterschap Regge en Dinkel (voorzitter);
- ir. C. Dekker, provincie Overijssel;
- drs. M. Heuvelink, provincie Overijssel;
- drs. M.P.J.M. Kroot, provincie Overijssel;
- ir. D.T. van der Molen, RIZA;
- drs. J.C. de Ruiter, Waterleiding Maatschappij Overijssel;
- drs. G. Schmidt, waterschap Regge en Dinkel;
- eigenaar agrarische onderzoekspercelen.

Behalve de auteurs van beide deelrapporten hebben dr. A.J. Dolman, ir. P. Groenendijk, W. Hamminga, D.J. Groot Obbink (kartering van de onderzoekslocatie), ir. J.M.P.M. Peerboom, ir. O.F. Schoumans en ir. J.G. Wesseling van DLO-Staring Centrum bijgedragen aan het onderzoek. Het veldonderzoek is grotendeels uitgevoerd door het waterschap Regge en Dinkel, in het bijzonder door P.L.M. Elbers en H.H. Kielich.

Samenvatting

Inleiding en doel
DLO-Staring Centrum heeft van september 1993 tot april 1996 een perceelsonderzoek uitgevoerd naar het effect van beekbegeleidende bufferstroken op de stikstof- en fosforbelasting van de Mosbeek. Opdrachtgevers waren het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), de provincie Overijssel en het waterschap Regge en Dinkel. Het perceelsonderzoek bestond uit een veldonderzoek, een modelmatige analyse van de hydrologie en de nutriëntenhuishouding van de onderzoekspercelen, en scenarioberekeningen voor het vaststellen van het effect van beekbegeleidende bufferstroken op de stikstof- en fosforbelasting van de Mosbeek.

Het veldonderzoek had tot doel het verkrijgen van inzicht in en het verzamelen van gegevens voor de modellering van de hydrologie en de nutriëntenhuishouding van de hellende onderzoekspercelen met en zonder bufferstrook langs de Mosbeek. De doelstellingen van de modelmatige analyse van de hydrologie waren het verkrijgen van inzicht in de hydrologie van deze onderzoekspercelen, en het aanleveren van de hydrologische invoer voor de nutriëntenmodellering.

Het onderzoek is beschreven in twee deelrapporten. In dit eerste deelrapport worden het veldonderzoek en de modelmatige analyse van de hydrologie beschreven. Het tweede deelrapport bevat een samenvatting van het eerste deelrapport en een beschrijving van het nutriëntenonderzoek, de scenarioberekeningen en de eindconclusies.

Methode
Voor het veldonderzoek is een onderzoekslocatie aan de Mosbeek geselecteerd. Deze locatie is gekozen, omdat hier de belangrijkste landgebruiksvormen van het stroomgebied van de Mosbeek (gras en maïs) en een bufferstrook in de vorm van een laaggelegen elzenbroekbosje voorkomen. Op de onderzoekslocatie zijn vier raaien met grondwaterstandsbuizen ongeveer loodrecht op de Mosbeek geplaatst. De raaien vormden de basis voor het veldonderzoek, en voor de modellering van de hydrologie en de nutriëntenhuishouding.

Het veldonderzoek is uitgevoerd in de periode november 1993 tot juli 1995. In het veldonderzoek is een bodemkundige inventarisatie uitgevoerd, zijn verschillende hydrologische metingen verricht, is de chemische samenstelling van grondwater en oppervlakkig afstromend water bepaald, en zijn twee tracerexperimenten gedaan.

De bodemkundige inventarisatie bestond uit het maken van profielbeschrijvingen, en de bepaling van enkele bodemfysische en bodemchemische karakteristieken van de voorkomende lagen. De hydrologische metingen betroffen de neerslag, de grondwaterstand, het oppervlaktewaterpeil en de oppervlakkige afstroming. Omdat de nutriëntenbelasting van de Mosbeek bestaat uit een uitspoelings- en een afspoelingsdeel zijn de nutriëntenconcentraties in het grondwater en in het oppervlakkig afgestroomde water bepaald. Twee tracerexperimenten met bromide als tracer zijn

uitgevoerd om de transportweg van water en stoffen door de bodem richting Mosbeek te traceren en een indruk te verkrijgen van de stroomsnelheid van het water.

De modelmatige analyse van de hydrologie is uitgevoerd met het dynamische eendimensionale model SWAP. Voor het onderzoek is de berekeningswijze van de oppervlakkige afstroming in het model verbeterd. In de aangepaste berekeningswijze wordt de neerslag op kleinere tijdsbasis ingevoerd. Hierdoor, en door een gedetailleerdere modellering, wordt de afstroming op een meer realistische wijze gemodelleerd dan in de oorspronkelijke benadering.

Voor het simuleren van de waterstroming door en over de bodem naar de Mosbeek met het eendimensionale hydrologische model SWAP was het nodig de hydrologische werkelijkheid te schematiseren. Hiertoe zijn de raaien opgedeeld in uniforme secties. In de modelberekeningen worden deze secties gerepresenteerd door eendimensionale verticale bodemkolommen. De modelberekeningen zijn uitgevoerd voor de verticale stroming in de bodemkolommen. De laterale stroming door de verzadigde zone is daarbij gemodelleerd als stroming door de onderrand van de kolom. De stroming in horizontale richting is verkregen door de berekende laterale stromingscomponenten van achter elkaar geplaatste bodemkolommen te koppelen. In een calibratieprocedure zijn op basis van gemeten grondwaterstanden de parameters vastgelegd die de laterale stromingscomponenten beschrijven.

Met de gecalibreerde hydrologische modellen zijn verschillende berekeningen uitgevoerd voor de analyse van de hydrologie van de onderzoekslocatie en voor het verkrijgen van de hydrologische invoer voor het nutriëntenhuishoudingsmodel. Dit zijn berekeningen voor de bestaande situatie en berekeningen voor enkele scenario's waarin de bestaande situatie is veranderd door een bufferstrook langs de beek in te richten. De bestaande situatie is doorgerekend voor het jaar 1994 en voor een 'gemiddeld' meteorologisch jaar. De scenario's zijn doorgerekend voor het 'gemiddelde' jaar.

Resultaten en conclusies

Op de onderzoekslocatie komen op de hogere delen veldpodzolen en laarpodzolen voor met de grondwatertrappen Gt V en VI, en op de lagere delen grenzend aan de Mosbeek moerige eerdgronden en beekeerdgronden met Gt II en III. Op een relatief geringe diepte komt een slecht doorlatend tertiair pakket voor. Dit pakket vormt de hydrologische basis voor de grondwaterstroming in het bovenliggende zandpakket.

De metingen van de grondwaterstanden op de onderzoekslocatie onderschrijven de indeling in grondwatertrappen uit de bodemkartering. In alle raaien nemen de fluctuaties van de grondwaterstand af en wordt de gemiddelde grondwaterstand ten opzichte van maaiveld ondieper naarmate de afstand tot de beek kleiner wordt. Er heerst een continue gradiënt in de grondwaterstand in de richting van de beek. Hierdoor is er een continue grondwaterstroming richting beek.

Naast de grondwaterstroming is oppervlakkige afstroming van belang op de onderzoekslocatie. Met de meetopstelling voor de afstroming zijn verschillende

momenten geregistreerd waarop afstroming optreedt. Het was moeilijk de afstroming te kwantificeren vanwege het optreden van erosie en omdat de meetopstelling verschillende beperkingen had.

Uit de tracerexperimenten blijkt dat de stromingsrichting van het grondwater globaal loodrecht op de Mosbeek is. Lokaal kunnen echter afwijkingen van de hoofdrichting bestaan. Water dat bovenstrooms van de bestaande bufferstrook tot uitstroming komt, stroomt door de bufferstrook naar de beek. Verder blijkt dat er sneltransport plaatsvindt via lagen met een hoge doorlatendheid die als preferente stroombanen fungeren. Bij de interpretatie van de modeluitkomsten moet rekening worden gehouden met dit complexe stromingspatroon.

De calibratie heeft modellen opgeleverd waarmee op basis van de toegepaste schematisering de waterbalansen van de kolommen en de grondwaterstroming in de richting van de Mosbeek realistisch worden gesimuleerd. Voor de oppervlakkige afstroming geldt dit in mindere mate, omdat op de onderzoekslocatie erosie optreedt.

Uit de hydrologische berekeningen blijkt dat van de totale waterstroming vanuit en vanaf de percelen op de onderzoekslocatie naar de Mosbeek de laterale grondwaterstroming (uitstroming) kwantitatief de belangrijkste component is (87,5 tot 100% van de totale stroming). De uitstroming en daarmee de totale stroming nemen op jaarbasis consequent toe richting beek: overal langs de raaien bestaat op jaarbasis een neerslagoverschot dat moet worden afgevoerd. De gemiddelde uitstroming per m raailengte is groter voor de raaien met maïs dan voor de raaien met gras.

De oppervlakkige afstroming heeft een relatief klein aandeel in de totale afvoer naar de beek. Absoluut gezien echter kan de afstroming een niet te verwaarlozen bijdrage aan de afvoer betekenen (piekafvoeren). Zowel in absolute als in relatieve zin is het aandeel van de afstroming veel groter in het natte jaar 1994 dan in het 'gemiddelde' jaar. De afstroming neemt op jaarbasis niet consequent toe richting beek: in sommige delen van de raai infiltreert netto (een deel van) de inkomende afstroming.

De bestaande bufferstrook met bos heeft een reducerend effect op zowel de uitstroming als de afstroming naar de beek. Deze reductie is in absolute termen het grootst voor de uitstroming. Relatief gezien is de reductie het grootst voor de afstroming: voor het natte jaar 1994 is een reductie van 50% berekend en voor het 'gemiddelde' jaar een reductie van 100%.

Het reducerende effect van de in de scenarioberekeningen nieuw ingerichte bufferstroken op de uitstroming naar de beek is zeer gering. Het reducerende effect op de afstroming is veel groter. Omdat de uitstroming de belangrijkste stromingscomponent naar de beek is, wordt de totale stroming naar de beek relatief weinig beïnvloed door deze bufferstroken.

De reductie is groter bij een bufferbreedte van 10 m dan bij een breedte van 1 m. De reductie van de uitstroming is iets groter bij de grasbuffer, die van de afstroming is iets groter bij de bosbuffer.

1 Inleiding

DLO-Staring Centrum heeft van september 1993 tot april 1996 een perceelsonderzoek uitgevoerd naar het effect van beekbegeleidende bufferstroken op de stikstof- en fosforbelasting van de Mosbeek. Opdrachtgevers waren het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), de provincie Overijssel en het waterschap Regge en Dinkel. Het perceelsonderzoek maakte deel uit van het project 'Onderzoek nutriëntenhuishouding Mosbeekgebied'. Dit is een van de projecten uit het plan van aanpak 'gebiedsgericht beleid Noordoost-Twente'. Het perceelsonderzoek bestond uit een veldonderzoek, een modelmatige analyse van de hydrologie en de nutriëntenhuishouding van de onderzoekspercelen, en scenario-berekeningen voor het vaststellen van het effect van beekbegeleidende bufferstroken op de stikstof- en fosforbelasting van de Mosbeek.

1.1 Probleemstelling

Afspoeling en uitspoeling van meststoffen naar het oppervlaktewater zijn vaak een belangrijke oorzaak van eutrofiëring van de oppervlaktewateren. Het inrichten van beekbegeleidende bufferstroken kan wellicht deze belasting verminderen. De effectiviteit van deze maatregel hangt sterk af van het kwantitatieve aandeel van de verschillende transportroutes naar het oppervlaktewatersysteem, de hoeveelheid aangevoerde nutriënten en de processen waarin nutriënten worden vastgelegd of vrijkomen. In het hellende landschap van Noordoost-Twente zijn oppervlakkige afspoeling en ondiepe uitspoeling belangrijke routes voor zowel stikstof als fosfor.

Op initiatief van de provincie Overijssel is een plan van aanpak 'gebiedsgericht beleid Noordoost-Twente' opgesteld. Hierin wordt de inrichting van bufferstroken als een belangrijke maatregel genoemd om de uit- en afspoeling naar beken te verminderen. Daarom heeft het waterschap Regge en Dinkel in samenwerking met de provincie Overijssel een onderzoeksprogramma opgestart om de nutriëntenhuishouding in beeksystemen te bekijken. Hierin komt de vraag naar voren in hoeverre beekbegeleidende bufferstroken effectief kunnen zijn bij het verkleinen van de nutriëntenbelasting van beken. De effectiviteit van deze bufferstroken heeft tevens de belangstelling van RIZA. Verkennende literatuurstudies (o.a. Osborne en Kovacic, 1993; Orleans et al., 1994) wijzen uit dat beekbegeleidende bufferstroken een reducerende werking op de toevoer van nutriënten naar het oppervlaktewater kunnen hebben. Er zijn echter weinig gegevens beschikbaar om in kwantitatieve termen uitspraken te doen over de effectiviteit van bufferstroken.

Om de effectiviteit van beekbegeleidende bufferstroken in Nederland nader te bepalen, is in 1993 het project 'Onderzoek nutriëntenhuishouding Mosbeekgebied' gestart. Dit project is onderdeel van het gebiedsgericht beleid Noordoost-Twente van de provincie Overijssel.

1.2 Doelstelling

Doel van het perceelsonderzoek was het verkrijgen van inzicht in de mogelijkheden van het reduceren van de belasting met meststoffen van beeksystemen met behulp van de effectgerichte maatregel van beekbegeleidende bufferstroken. Dit is nader aan te duiden met:

1 het maken van een schatting van de belasting van de Mosbeek vanuit aangrenzende hellende percelen in relatie tot het landgebruik;
2 het verkrijgen van kwantitatief inzicht in de effectiviteit van beekbegeleidende bufferstroken in relatie tot het reduceren van nutriëntenstromen naar de Mosbeek.

Het onderzoek richtte zich op de reductie van de stikstof- en fosforbelasting van de Mosbeek door het toepassen van bufferstroken langs de beek. Factoren die van invloed zijn op de belasting van de Mosbeek zijn onder andere de bodemgesteldheid, de hydrologie, het grondgebruik en (de intensiteit van) het gebruik van de aangrenzende percelen. Het onderzoek richtte zich op de effecten van bufferstroken met verschillende breedten en begroeiingen.

Om deze doelstelling te bereiken zijn een veldonderzoek, een modelmatige analyse van de hydrologie en een nutriëntenonderzoek uitgevoerd.

De doelstellingen van het veldonderzoek waren:

1 het verkrijgen van inzicht in de hydrologie en de nutriëntenhuishouding van de hellende onderzoekspercelen met en zonder bufferstrook langs de Mosbeek;
2 het verzamelen van gegevens op de onderzoekslocatie voor de modellering van de hydrologie en de nutriëntenhuishouding.

De doelstellingen van de modelmatige analyse van de hydrologie waren:

1 het verkrijgen van inzicht in de hydrologie van de hellende onderzoekspercelen met en zonder bufferstrook langs de Mosbeek;
2 het aanleveren van de hydrologische invoer voor de nutriëntenmodellering.

1.3 Methode

Voor het perceelsonderzoek is een onderzoekslocatie geselecteerd en ingericht in het stroomgebied van de Mosbeek. Er is gekozen voor dit stroomgebied omdat de Mosbeek een kenmerkende beek is voor de streek en omdat over deze beek al veel gegevens beschikbaar waren. Op de onderzoekslocatie zijn verschillende vormen van landgebruik aanwezig. Een extensief en intensief gebruikt graslandperceel liggen direct aan de beek. Daarnaast ligt er een maïsperceel aan de beek. Een deel van dit maïsperceel wordt reeds door een bufferstrook van de Mosbeek gescheiden in de vorm van een laaggelegen elzenbroekbosje.

Op de onderzoekslocatie is het veldonderzoek uitgevoerd. Er is een bodemkundige kartering uitgevoerd en er zijn verscheidene bodemfysische en bodemchemische bepalingen gedaan. Daarnaast zijn verschillende hydrologische metingen verricht en

is de chemische samenstelling van het bodemwater en het oppervlakkig afstromende water bepaald. Ten slotte zijn twee tracerexperimenten uitgevoerd ter ondersteuning van het hydrologische onderzoek.

Voor de modelmatige analyse van de hydrologie is gebruik gemaakt van het eendimensionale onverzadigde-zone-model SWAP (Feddes en Kabat, in voorb.) in combinatie met het optimalisatie-instrumentarium PEST (Watermark Computing, 1994). De SWAP-modellen zijn gecalibreerd op meetgegevens. Met de gecalibreerde modellen zijn verschillende hydrologische scenario's doorgerekend. De resultaten hiervan zijn gebruikt om de effecten van bufferstroken op de nutriëntenbelasting van de beek vast te stellen. Daartoe is de uitvoer van SWAP gebruikt als hydrologische invoer voor het nutriëntenuitspoelingsmodel ANIMO (Berghuis et al., 1985), waarmee de uit- en afspoeling van nutriënten zijn geanalyseerd voor de meetperiode en voor de scenario's (Kruijne, 1996).

1.4 Opzet rapportage

Vanwege de omvang van het onderzoek is de verslaglegging in twee deelrapporten verschenen. Dit eerste deelrapport bevat een beschrijving van het gebied, en behandelt het veldonderzoek en de modelmatige analyse van de hydrologie. Het tweede deelrapport bevat, naast een samenvatting van de inhoud van het eerste deelrapport, een beschrijving van het nutriëntenonderzoek en de scenarioberekeningen voor het vaststellen van het effect van beekbegeleidende bufferstroken op de stikstof- en fosforbelasting van de Mosbeek (Kruijne, 1996). Het nutriëntenonderzoek betreft de interpretatie van de veldgegevens over de nutriënten en de modelmatige analyse van de nutriëntenhuishouding. De eindconclusies van het gehele onderzoek worden gegeven in het tweede deelrapport.

In dit eerste deelrapport wordt in hoofdstuk 2 allereerst een beschrijving gegeven van het gebied. Het veldonderzoek wordt beschreven in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 volgt de modelmatige analyse van de hydrologie en in hoofdstuk 5 worden de conclusies gegeven.

2 Gebiedsbeschrijving

In dit hoofdstuk worden het stroomgebied van de Mosbeek en de onderzoekslocatie in dit stroomgebied beschreven. Het stroomgebied van de Mosbeek ligt in Noordoost-Twente. De ligging van het stroomgebied en de ligging van de onderzoekslocatie zijn aangegeven in figuur 1.

Allereerst wordt een beknopte geologische en bodemkundige beschrijving van het stroomgebied gegeven (2.1). Vervolgens wordt een beeld geschetst van de hydrologie en de hydrogeologie van het stroomgebied (2.2) en van het landgebruik van het stroomgebied (2.3). Een nadere uitwerking van deze facetten voor de onderzoeks-locatie volgt in 2.4.

2.1 Geologie en bodemkunde

De geologie van het stroomgebied van de Mosbeek wordt beschreven aan de hand van aanhangsel 1, een geologische doorsnede langs raai A-A' (zie fig. 1) van de heuvelrug van Ootmarsum ter hoogte van de ligging van het stroomgebied van de Mosbeek (naar: Broks, 1991). In de doorsnede is een duidelijk breuksysteem te onderscheiden (zie ook fig. 1). De slenkstructuur (Slenk van Reutum) is gevormd tijdens de Hercynische opheffingsfase. In deze Slenk van Reutum worden afzettingen uit het Plioceen aangetroffen. De geologie van het stroomgebied van de Mosbeek is verder voor een groot deel bepaald door het effect van de ijstijden. In de tweede helft van het Saalien (voorlaatste ijstijd) zijn Noord- en Midden-Nederland overstroomd met landijs uit Scandinavië. De landijstongen hebben stuwwallen aan de rand gevormd. De afzettingen die met het landijs samenhangen zijn grondmorenes (keileem) en smeltwaterafzettingen (Van den Berg en Den Otter, 1993). Uit het Weichselien (laatste ijstijd) dateren de afzettingen van de Formatie van Twente. Hieronder vallen de hellingafzettingen, de periglaciale afzettingen en het dekzand. De geologische ondergrond van het stroomgebied van de Mosbeek bestaat in het bovenstroomse deel uit grondmorenes en gestuwde tertiaire afzettingen. In het benedenstroomse deel wordt de ondergrond gevormd door de afzettingen van de Formatie van Twente.

Het Nederlandse deel van het stroomgebied van de Mosbeek is bodemkundig gekarteerd (Ebbers en Van het Loo, 1992). De overheersende bodemkundige groepen zijn podzolgronden, enkeerdgronden en eerdgronden. De podzolgronden en de enkeerdgronden worden vooral op de hoger gelegen delen aangetroffen. Onder de eerdgronden vallen de gooreerdgronden en de beekeerdgronden. Deze worden vooral in de nabijheid van de beek aangetroffen. Op enkele plaatsen in het beekdal komen venige beekdalgronden voor.

2.2 Geohydrologie en hydrologie

Uit het regionale isohypsenpatroon blijkt dat het grondwater globaal van het oosten naar het westen stroomt. Het water stroomt door het dunne watervoerende pakket, bestaande uit matig grove tot matig fijne zanden van de smeltwaterafzettingen, bovenop de stuwwal naar het westen. Rond de meest westelijk gelegen rand van de Slenk van Reutum komt een kwelzone voor (Broks, 1991).

De grootte van het stroomgebied van de Mosbeek is op basis van topografische grenzen geschat op ongeveer 1000 ha. Hiervan ligt het grootste deel in Nederland (83%). Het overige deel ligt in Duitsland (17%). Analyse van recente afvoergegevens wijzen er echter op dat het areaal dat op de Mosbeek afwatert aanzienlijk kleiner zou kunnen zijn (IWACO, 1995). De Mosbeek is ongeveer 8 km lang en ligt in zijn geheel in Nederland. Het stroomgebied watert benedenstrooms af op de Elzenbeek. Vanaf het punt waar de Mosbeek en de Elzenbeek samenkomen, heet de beek de Geesterse Molenbeek. Deze beek watert af op de Regge. De gemiddelde afvoer van het stroomgebied van de Mosbeek over de jaren 1993 en 1994 bedroeg 0,044 $m^3.s^{-1}$ (IWACO, 1995).

2.3 Landgebruik

Het landgebruik in het stroomgebied van de Mosbeek is voornamelijk grasland. Daarnaast zijn grote delen in gebruik als bos en maïsland. De procentuele verdeling van het landgebruik in het Nederlandse deel van het stroomgebied op basis van de topografische grenzen is weergegeven in tabel 1 (pers. med. Provincie Overijssel). In dezelfde tabel wordt de verdeling van het landgebruik direct grenzend aan de Mosbeek weergegeven. Deze verdeling is verkregen door van figuur 3.1 in Vermulst (1994) de hokjes per categorie langs de beek te tellen en hiervan de procentuele verdeling te bepalen.

Tabel 1 Procentuele verdeling van het oppervlak per landgebruiksvorm van het stroomgebied van de Mosbeek en de procentuele verdeling van het landgebruik direct grenzend aan de Mosbeek in het Nederlandse deel van het stroomgebied

Landgebruik	Oppervlak in het stroomgebied (100%. $ha.ha^{-1}$)	Lengte grenzend aan beek (100%. $m.m^{-1}$)
Gras	59	58
Maïs	16	21
Akkerbouw	1	2
Bos	21	11
Natuur (excl. bos)	2	4
Verhard oppervlak	1	4

Fig. 1 Ligging van het stroomgebied van de Mosbeek en de onderzoekslocatie

Uit de tabel blijkt dat het landgebruik in het overgrote deel van het stroomgebied agrarisch gericht is (76% van het oppervlak). Daarnaast wordt de Mosbeek voor 81% van zijn lengte begrensd door agrarisch landgebruik. Langs de Mosbeek gelegen bos zou eventueel als buffer kunnen fungeren voor de af- en uitspoeling van stikstof en fosfor naar de Mosbeek. Hoewel 21% van het oppervlak van het stroomgebied begroeid is met bos, wordt slechts 11% van de Mosbeek begrensd door bos.

2.4 De onderzoekslocatie

Voor het verkrijgen van veldgegevens is een onderzoekslocatie geselecteerd. De veldgegevens dienden inzicht te geven in de hydrologie en de af- en uitspoeling van nutriënten van dit hellende gebied, en vormden een deel van de invoer van de gebruikte modellen.

De onderzoekslocatie is afgebeeld in figuur 2. Ze ligt op de heuvelrug (stuwwal) van Ootmarsum aan de Mosbeek nabij de Molen van Frans. De landgebruiksvormen op de onderzoekslocatie zijn representatief voor het stroomgebied van de Mosbeek (zie tabel 1). Er is voor deze locatie gekozen om voor de verschillende landgebruiksvormen de effecten van een bufferstrook te kunnen bestuderen.

De Mosbeek heeft zich op de onderzoekslocatie ingesneden in het landschap. Plaatselijk heeft dit geresulteerd in geleidelijke hellingen in de richting van de beek. Op andere plaatsen zijn steilranden gevormd. De percelen hellen met gemiddeld 3% in de richting van de beek.

De ondergrond van de onderzoekslocatie bestaat uit gestuwd tertiair materiaal in de vorm van kleien en sterk glauconiethoudende zeer fijne zanden. Op deze tertiaire afzettingen is een laag van 1 à 2 m met matig grove en matig fijne zanden afgezet met plaatselijk wat leem. De verzadigde doorlatendheden van het tertiaire materiaal in de ondergrond zijn zeer klein ten opzichte van de verzadigde doorlatendheden van de matig grove en matig fijne zanden van de bovengrond. Dit heeft tot gevolg dat de verticale en horizontale stroming van het water in de tertiaire ondergrond relatief zeer gering is (Broks, 1991). Hierdoor kan worden gesteld dat de tertiaire ondergrond als nagenoeg ondoorlatende hydrologische basis fungeert op de onderzoekslocatie. De stroming van het water vindt vrijwel volledig plaats door de laag die op de tertiaire ondergrond is afgezet. Mede onder invloed van de helling stroomt het neerslagoverschot relatief snel naar de beek.

De bodems die worden aangetroffen zijn veldpodzolen en laarpodzolen op de hellingen en moerige eerdgronden en beekeerdgronden in de lage delen langs de beek (Ebbers en Van het Loo, 1992). De hellingen zijn relatief nat.

Op de onderzoekslocatie komen verschillende landgebruiksvormen voor op de drie geselecteerde onderzoekspercelen (zie fig. 2):

1 extensief gebruikt grasland, met een laaggelegen strook begroeid met adelaarsvaren tussen het perceel en de beek (onderzoeksperceel extensief grasland);

Grondwatertrappen (Gt)

Gt	Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (m - mv.)	Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (m - mv.)
IIa	<0,25	0,50 - 0,80
IIIa	<0,25	0,80 - 1,20
Vao	<0,25	1,20 - 1,80
Vad	<0,25	>1,80
Vbd	0,25 - 0,40	>1,80
VIo	0,40 - 0,80	1,20 - 1,80
VId	0,40 - 0,80	>1,80

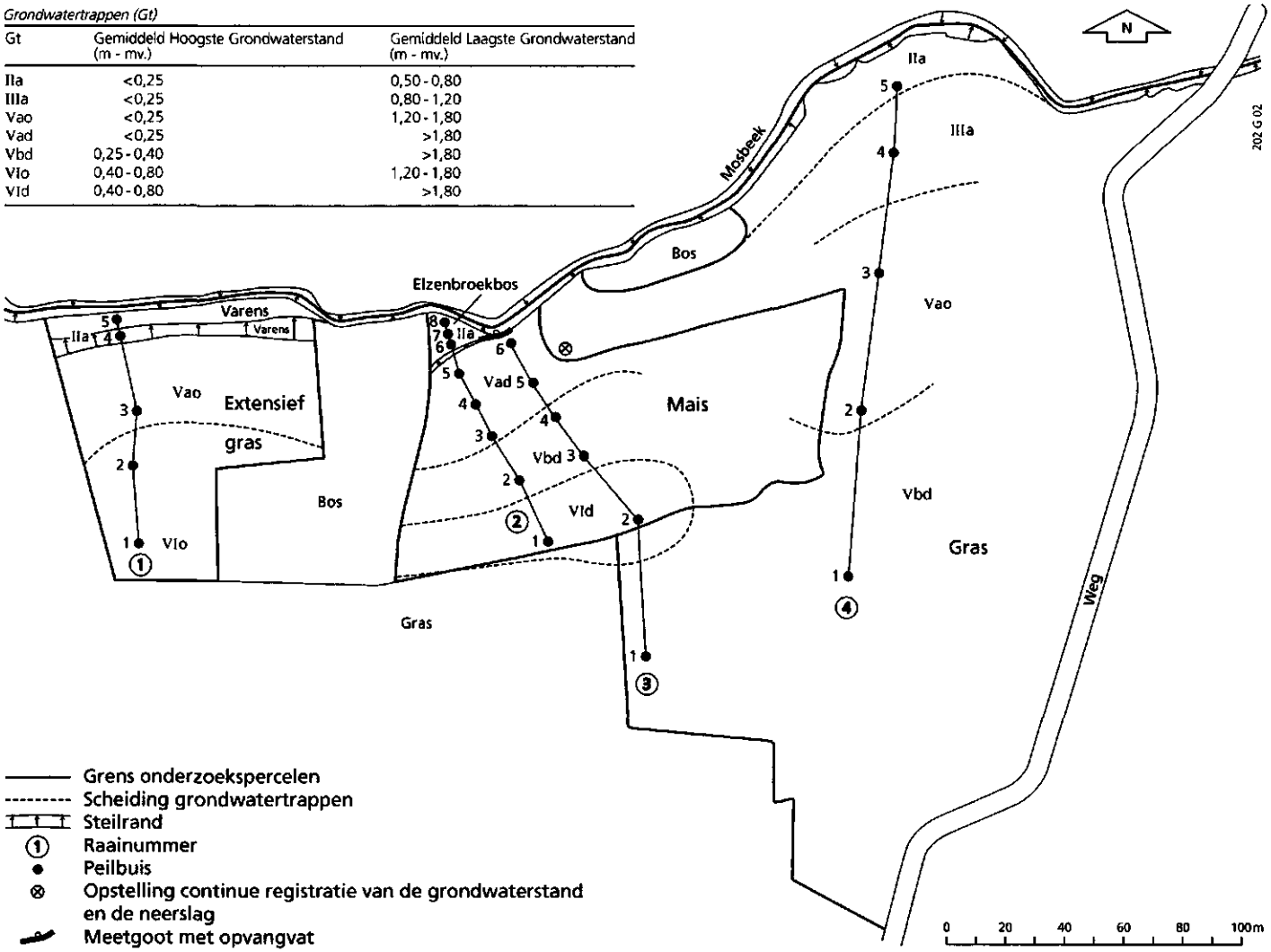


Fig. 2 De onderzoekslocatie

2 maïsland, met een bufferstrook in de vorm van een laaggelegen elzenbroekbos tussen het maïsland en de beek (onderzoeksperceel maïsland);
3 maïsland, met een steilrand grenzend aan de beek (onderzoeksperceel maïsland);
4 intensief gebruikt grasland, met een geleidelijk afnemende helling naar de beek (onderzoeksperceel intensief grasland).

Op de onderzoekslocatie zijn vier raaien met grondwaterstandsbuizen (peilbuizen) geplaatst in de drie onderzoekspercelen. De verschillende landgebruiksvormen vormden de basis voor de keuze van de ligging van de raaien. De raaien zijn in figuur 2 aangegeven. De dwarsdoorsneden in de lengterichting van de raaien zijn opgenomen in aanhangsel 2. De nummers van de raaien corresponderen met de nummers van de landgebruiksvormen zoals hierboven beschreven. De raaien beginnen op de vermoedelijke waterscheiding en lopen af in de richting van de beek. De raaien zijn uitgezet in de op basis van de topografie vermoede stromingsrichting van water naar de beek. Verondersteld is dus dat de raaien de richting van de stroming van water naar de beek representeren. Aanwijzingen in het veld voor de waterscheiding zijn het voorkomen van laagten, de aanwezigheid van drainagesystemen aan de andere zijde van de waterscheiding en de aanwezigheid van kleibanken in de ondergrond die als barrière werken (pers. med. eigenaar agrarische onderzoekspercelen). De lengte van de raaien varieert van 79 tot 222 m.

De ligging van raai 2 is zo gekozen dat het onderste deel van deze raai in een bestaande bufferstrook ligt (zie fig. 2). Deze bufferstrook bestaat uit een laaggelegen, 14 m brede, natte strook met elzenbroekbos langs de beek. Het aangrenzende maïsperceel loopt via een steilrand over in de bufferstrook. De aanwezigheid van deze bufferstrook maakte het mogelijk de werking van een bufferstrook in een bestaande situatie te bestuderen. Zo kan bijvoorbeeld worden gekeken naar het stromingsbeeld van het water in en rond de bufferstrook, het vermogen van een bufferstrook om oppervlakkige afstroming af te vangen en de capaciteit voor denitrificatie van vanuit de helling spoelend nitraat.

De locaties van de peilbuizen in de raaien zijn zodanig gekozen dat ter plekke van alle langs de raai voorkomende bodemsoorten, grondwatertrappen en landgebruiksvormen minstens één buis staat (zie fig. 2). De peilbuizen representeren daarmee de verschillende delen waarin een raai kan worden opgedeeld op grond van bodemsoort, grondwatertrap en landgebruiksvorm. De metingen van grondwaterstanden en stoffenconcentraties in een peilbuis zijn representatief voor het deel van de raai waarin de buis staat.

Concluderend kan worden gesteld dat een representatieve onderzoekslocatie is gekozen waar de belangrijkste landgebruiksvormen aanwezig zijn. Daarnaast bieden de hellende percelen en de aanwezigheid van een bufferstrook de mogelijkheid om inzicht te krijgen in de processen die zich in deze situaties voordoen.

3 Veldonderzoek

In dit hoofdstuk wordt het veldonderzoek beschreven. Het veldonderzoek is uitgevoerd om inzicht te krijgen in de hydrologie en de nutriëntenhuishouding van de hellende onderzoekspercelen grenzend aan de Mosbeek. Daarnaast beoogde het veldonderzoek gegevens op te leveren die in een later stadium konden worden gebruikt voor de modellering van de hydrologie en de nutriëntenhuishouding.

In het veldonderzoek zijn op de onderzoekslocatie verschillende metingen verricht. Het veldonderzoek is uitgevoerd in de periode november 1993 tot juli 1995. Er is een bodemkundige inventarisatie uitgevoerd (3.1). Van de locaties van de peilbuizen zijn profielbeschrijvingen gemaakt. Op verschillende plaatsen zijn monsters gestoken om de bodemfysische en bodemchemische eigenschappen van de voorkomende bodems te bepalen. Gedurende de periode van het veldonderzoek zijn verschillende hydrologische metingen verricht (3.2). Naast de neerslag zijn grondwaterstanden, oppervlaktewaterpeilen en het optreden van oppervlakkige afstroming gemeten. Van het water uit de peilbuizen en uit het opvangvat voor de oppervlakkige afstroming is op een aantal tijdstippen de chemische samenstelling bepaald (3.3). Verder zijn op de onderzoekslocatie twee tracerexperimenten uitgevoerd (3.4).

3.1 Bodemkundige inventarisatie

De bodemkundige inventarisatie is uitgevoerd om de onderzoekslocatie bodemkundig in kaart te brengen. Achtereenvolgens worden de profielbeschrijvingen (3.1.1), en de bepaling van enkele bodemfysische (3.1.2) en bodemchemische karakteristieken (3.1.3) van de voorkomende lagen besproken.

3.1.1 Bodemkundige beschrijving

De bodemkundige beschrijving omvatte het maken van profielbeschrijvingen. Deze dienden als basis voor de schematisering van de profielen voor de modellering met het gebruikte hydrologische model SWAP.

3.1.1.1 Methode

Van de locaties van de peilbuizen zijn profielbeschrijvingen gemaakt. Hierbij heeft de karteerder in het veld op basis van expertise enkele bodemeigenschappen geschat. Deze zijn het organischestofgehalte, het lutumgehalte, het leemgehalte, de mediaan van de korrelgrootteverdeling (M50), de verzadigde doorlatendheid, de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG), de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) en de

bewortelbare diepte. Aan de hand van een aantal van deze eigenschappen heeft de karteerder het profiel in een aantal horizonten of lagen verdeeld en aan deze lagen een bepaalde code toegekend. Verder is het profiel op basis van zijn eigenschappen in een groep van bodemprofielen ingedeeld. Aan de hand van de GHG en de GLG heeft de karteerder de grondwatertrap (Gt) van de locatie bepaald.

3.1.1.2 Resultaten

De resultaten van de bodemkartering zijn weergegeven in aanhangsel 3. In figuur 2 is een ruimtelijk beeld gegeven van de voorkomende grondwatertrappen. Op de hogere delen van de helling komen Gt V en Gt VI voor. De natte plekken op de helling met Gt V zijn het gevolg van kleibanken in de ondergrond (pers. med. eigenaar agrarische onderzoekspercelen). Op enkele plaatsen waar de kleibanken minder prominent aanwezig zijn, is het droger (Gt VI). De lage delen langs de beek zijn nat met Gt III tot Gt II. Het maaiveld in deze delen ligt maar weinig hoger dan het beekpeil (ca. 1 m).

Op de onderzoekslocatie komen op de hoger gelegen gronden overwegend veldpodzolgronden voor. Bovenaan raai 2 en 3 (peilbuislocatie 2.1 en 3.1) worden laarpodzolgronden aangetroffen (zie fig. 2). In een smalle strook langs de beek worden moerige eerdgronden (onderaan raai 1) en beekeerdgronden (onderaan raai 2 en raai 4) gevonden.

In de bodemkundige inventarisatie zijn op 11 van de 24 peilbuislocaties de tertiaire afzettingen in de vorm van klei aangeboord. Op de plaatsen waar in eerste instantie geen tertiaire afzettingen zijn aangeboord, en op extra plaatsen, zijn aanvullende boringen verricht om een meer volledig beeld van het voorkomen van deze afzettingen te verkrijgen. Hier zijn, na dieper boren, de tertiaire afzettingen op de meeste plaatsen wel aangeboord (zie ook aanhangsel 20.2 voor de ligging van de extra plaatsen). Op enkele plaatsen waar het niet is gelukt de tertiaire laag aan te boren vanwege de aanwezigheid van een keienvloer, is door interpolatie, extrapolatie en inzicht in de ruimtelijke verspreiding van de tertiaire laag de diepte van de bovenkant van deze laag vastgesteld. De tertiaire afzettingen komen naar alle waarschijnlijkheid onder de gehele onderzoekslocatie voor. De diepte waarop deze afzettingen zijn aangetroffen, varieert van 0,70 m - mv. op locatie 6 in raai 3 tot 3,15 m - mv. op meetpunt O6 bij locatie 6 in raai 2 (zie aanhangsel 20.2 voor meetpunt O6). De dikte van het bovenliggende zandpakket varieert overeenkomstig tussen 0,70 en 3,15 m. In aanhangsel 2 is per raai een dwarsdoorsnede van de bovenkant van de tertiaire afzettingen weergegeven.

De door de karteerder geschatte verzadigde doorlatendheden van de lagen variëren van 0,05 $m.d^{-1}$ voor de tertiaire afzettingen tot 4,80 $m.d^{-1}$ voor de leemarme zandige afzettingen. De verzadigde doorlatendheid van de bodemlagen hangt sterk af van de korrelgrootteverdeling, en de hoeveelheid lutum en leem in de laag. De M50 varieert op de onderzoekslocatie van 110 tot 400 µm. De bijbehorende range van fracties loopt van zeer fijn zand (105-150 µm) tot matig grof zand (210-420 µm). Lutum (< 2 µm) en leem (2-50 µm) werken verkittend. De verzadigde doorlatendheid neemt daardoor af met toenemend leem- en lutumgehalte. Omdat de tertiaire afzettingen meestal voorkomen als kleien (lutum minstens 30%) is de in het veld gemaakte schatting van de

doorlatendheid van de tertiaire afzettingen aan de hoge kant. Bij lutumgehalten van 40 tot 50% in ongerijpte kleien zijn eerder verzadigde doorlatendheden in de orde van 10^{-6} tot 10^{-5} $m.d^{-1}$ te verwachten (Van der Molen, 1984). In het laaggelegen deel van raai 2 is het tertiair aangeboord in de vorm van sterk glauconiethoudend zeer fijn zand. De doorlatendheid hiervan is even gering als die van de tertiaire klei vanwege de sterk versmerende werking van het glauconiet (pers. med. Groot Obbink). De doorlatendheid van het tertiaire pakket is in vergelijking met die van het bovenliggende zandpakket zo laag dat het tertiaire pakket kan worden beschouwd als nagenoeg ondoorlatende basis voor de grondwaterstroming in het zandpakket (Broks, 1991). Hierdoor en door de helling van de bovenkant van het tertiaire pakket kan wegzijging van water vanuit het zandpakket naar de tertiaire afzettingen worden uitgesloten.

3.1.1.3 Conclusies

De bodemsoorten die op de onderzoekslocatie voorkomen zijn veldpodzolgronden, laarpodzolgronden, beekeerdgronden en moerige eerdgronden. De voorkomende grondwatertrappen zijn Gt II, Gt III, Gt V en Gt VI.

De tertiaire afzettingen zijn op vrijwel alle peilbuislocaties aangetroffen. Hierdoor mag worden aangenomen dat overal op de onderzoekslocatie op een relatief geringe diepte het slecht doorlatende tertiaire pakket voorkomt. De tertiaire laag vormt de nagenoeg ondoorlatende basis voor de grondwaterstroming in het bovenliggende zandpakket. De diepte van de bovenkant van het tertiaire pakket varieert van 0,70 tot 3,15 m - mv.

Met de bodemkundige beschrijving zijn gemeten waarden en schattingen in het veld verkregen van voor het onderzoek relevante bodemeigenschappen.

3.1.2 Bodemfysische eigenschappen

Met de bepaling van de bodemfysische eigenschappen is beoogd een gegevensset te verkrijgen die de waterretentiekarakteristiek (vermogen om water vast te houden) en de doorlatendheidskarakteristiek (vermogen om water door te laten) van representatieve bodemlagen op de onderzoekslocatie beschrijven. Deze karakteristieken worden door zogenaamde Van Genuchten-parameters beschreven (Van Genuchten en Leij, 1992). Deze parameters vormen belangrijke invoergegevens voor het hydrologische model SWAP.

3.1.2.1 Methode

Op tien locaties zijn bodemmonsters gestoken om belangrijke bodemfysische eigenschappen van de voorkomende bodemlagen in de boven- en ondergrond op de onderzoekslocatie te bepalen. Met deze bepalingen is getracht een representatief beeld

te krijgen van de bodemfysische eigenschappen van deze bodemlagen. De monsters zijn in duplo gestoken.

Met de verdampingsmethode en de methode van de hangende waterkolom zijn de doorlatendheidskarakteristieken (k(h)) en de waterretentiekarakteristieken (pF) van de monsters bepaald. Voor een beschrijving van de methoden wordt verwezen naar Stolte et al. (1992).

Vervolgens zijn de gemeten waarden die uit de verschillende methoden komen gecombineerd in een puntenwolk. Met het programma RETC zijn in een optimalisatieprocedure curves gefit door de punten (Drost, 1990; Van Genuchten et al., 1991). Uit de optimalisatie komt een set Van Genuchten-parameters. Deze parameters karakteriseren de doorlatendheidskarakteristiek en de waterretentiekarakteristiek van de monsters. De parameters dienen als invoer voor het hydrologische model SWAP (zie 4.1.1).

3.1.2.2 Resultaten

In aanhangsel 4 is voor de 10 monsterlocaties aangegeven wat de raai, de peilbuislocatie en de diepte van de herkomst van de monsters is. Daarnaast wordt aangegeven of het om een ondergrond- of een bovengrondmonster gaat. Vervolgens wordt de set geoptimaliseerde Van Genuchten-parameters gegeven, zoals die met RETC zijn bepaald. Als laatste wordt aangegeven welke code in het onderzoek is gebruikt. De varianten 5a en 5b op bepaling 5 zijn resultaten van extra berekeningen die zijn gedaan voor de modellering.

Bij de optimalisatie van de curves is uitgegaan van de waarden voor de verzadigde doorlatendheden die bij de bodemkartering zijn geschat (zie 3.1.1.2). Het bereik van de gebruikte verzadigde doorlatendheden van de verschillende geoptimaliseerde karakteristieken loopt van 0,05 $m.d^{-1}$ tot 3 $m.d^{-1}$.

3.1.2.3 Conclusies

Met de bodemfysische bepalingen is een beeld gekregen van de waterretentiekarakteristiek en de doorlatendheidskarakteristiek van de op de onderzoekslocatie voorkomende bodemlagen. Met de Van Genuchten-parameters zijn deze karakteristieken kwantitatief vastgelegd voor gebruik in het hydrologische model SWAP.

3.1.3 Bodemchemische eigenschappen

De bepaling van bodemchemische eigenschappen had tot doel voor de bovengrond van de onderzoekslocatie de fosfaattoestand vast te stellen, en na te gaan hoeveel fosfaat uit deze bovengrond kan vrijkomen en met welke fosfaatconcentraties dit gebeurt.

Hiertoe zijn van bodemmonsters het aluminium-, ijzer- en fosfaatgehalte bepaald. Daarnaast is het organischestofgehalte van de monsters bepaald. Deze gehalten vormen (de basis van) belangrijke invoerparameters en calibratiegegevens voor het nutriëntenhuishoudingsmodel ANIMO.

3.1.3.1 Methode

Aluminium-, ijzer- en fosfaatgehalten
Op de onderzoekslocatie zijn ter plaatse van de 24 peilbuizen (zie fig. 2) bodemmonsters van de bovengrond verzameld (0-0,6 m diepte), waarbij een dikte van de bemonsteringslagen van 0,2 m is aangehouden. In eerste instantie zijn 41 van de op deze wijze verkregen 72 monsters geanalyseerd op de gehalten oxalaatextraheerbaar aluminium, ijzer en fosfaat. Op basis van deze gegevens zijn de fosfaatsorptieparameters afgeleid. De gevolgde methodiek en de resultaten zijn in detail beschreven door Schoumans (1994). De veronderstelling was dat het aantal van 41 monsters voldoende was voor het verkrijgen van een goed beeld van de fosfaattoestand en de bepalende parameters voor de onderzoekslocatie.

Nadere analyse van deze resultaten en van overige gegevens die in de loop van het veldonderzoek zijn verzameld, wees uit dat er behoefte bestond aan meer gegevens. Daarom zijn in tweede instantie ook met de overige 31 monsters oxalaatextracties uitgevoerd. Bij de monsters uit beide series zijn de voorbehandeling en de oxalaat-extracties uitgevoerd conform de voorschriften NEN 5751 en SWVM 0028 SC-DLO. De geëxtraheerde hoeveelheden fosfaat, aluminium en ijzer zijn gemeten op de ICP/AES (SWVM 0028 SC-DLO) (zie voor meer detail Schoumans, 1994).

Organischestofgehalten
Tijdens de bodemkundige beschrijving is van elke beschreven horizont een schatting van het gehalte aan organische stof gemaakt (zie 3.1.1). Om deze schattingen te onderbouwen en zonodig bij te stellen, is van 50 van de 72 bodemmonsters van de bovengrond het organischestofgehalte gemeten. Om de veronderstelling dat de bufferstrook humeuze tot venige lagen bevat, te toetsen, is het organischestofgehalte bepaald van vier extra bodemmonsters uit raai 2 ter hoogte van peilbuis 8. Het gehalte aan organische stof is bepaald uit het gloeiverlies bij 500 °C.

3.1.3.2 Resultaten

Aluminium-, ijzer- en fosfaatgehalten
De resultaten van de gemeten gehalten oxalaatextraheerbaar aluminium en ijzer, en fosfaat zijn voor de 72 monsters gegeven in respectievelijk aanhangsel 5a en 5b. De fosfaatbezettingsfractie, dat is de verhouding tussen het gehalte fosfaat en het gehalte aluminium en ijzer, is gegeven in aanhangsel 5c. De extra meetgegevens die zijn verkregen met de tweede serie bepalingen, bevestigen de conclusies van Schoumans

(1994) over de belangrijkste fosfaatkarakteristieken van de onderzoekslocatie. De meerwaarde van de extra gegevens ligt in het inzicht dat is verkregen in het verloop van de fosfaatbezettingsfractie binnen de raaien en de spreiding van de gegevens rond het gemiddelde. De resultaten worden in meer detail besproken en geïnterpreteerd voor gebruik in het model ANIMO door Kruijne (1996).

Organischestofgehalten
De resultaten van de metingen van de organischestofgehalten zijn gegeven in aanhangsel 6. Deze meetwaarden zijn over het algemeen lager dan de schattingen van het gehalte organische stof (aanhangsel 3). Uitzonderingen hierop vormen de hoge gehalten die in bodemmonsters ter plaatse van peilbuis 5 in raai 1 en ter plaatse van peilbuis 8 in raai 2 zijn gemeten. Op deze plaatsen zijn de meetwaarden hoger dan de schattingen.

De meetwaarden wijzen uit dat de bodem van de bufferstrook vrij heterogeen is voor het gehalte aan organische stof. Wel bestaat een eenduidig onderscheid tussen de bovenste 0,10 m en de diepere profiellagen. De bovenste 0,10 m bestaat uit venig zand tot veen. Dieper in het profiel wisselen matig humeuze en matig humusarme zandlagen elkaar af. Tijdens de uitvoering van het tweede bromide-experiment is intensief geboord in de bufferstrook (zie aanhangsel 20). Daarbij zijn veelvuldig plaatselijk en op verschillende diepten dunne laagjes nauwelijks verteerde takjes en boombladeren aangeboord. Dit is een extra, kwalitatieve aanwijzing voor de heterogeniteit van het organischestofgehalte in het bodemprofiel van de bufferstrook. Plaatselijk en op wisselende diepten kan dit gehalte zeer hoog zijn.

De metingen in combinatie met de schattingen vormen een goede basis voor het vaststellen van het organischestofgehalte van de relevante bodemhorizonten. De in ANIMO gebruikte gehalten per horizont en de wijze waarop deze tot stand zijn gekomen, worden beschreven door Kruijne (1996).

3.1.3.3 Conclusies

Van 72 monsters uit de bovenste 0,6 m van de bodem van de onderzoekslocatie zijn gehalten oxalaatextraheerbaar aluminium en ijzer, en fosfaat gemeten waaruit fosfaatsorptieparameters zijn afgeleid. Hiermee is een goed beeld van de fosfaattoestand en de bepalende parameters voor de onderzoekslocatie verkregen.

De gemeten organischestofgehalten vormen in combinatie met de tijdens de bodembeschrijving geschatte gehalten een goede basis voor het vaststellen van het organischestofgehalte van de relevante bodemhorizonten.

De bodem van de bufferstrook is vrij heterogeen voor het gehalte aan organische stof. Plaatselijk en op wisselende diepten kan dit gehalte zeer hoog zijn. Dit geldt vooral voor de bovenste 0,1 m die uit venig zand tot veen bestaat.

Met de gemeten gehalten oxalaatextraheerbaar aluminium en ijzer, en fosfaat, en de gemeten organischestofgehalten zijn belangrijke invoerparameters en calibratiegegevens verkregen voor het nutriëntenhuishoudingsmodel ANIMO.

3.2 Hydrologische metingen

Er zijn hydrologische metingen verricht om inzicht te krijgen in de hydrologie van de onderzoekslocatie en om invoer- en calibratiegegevens te verkrijgen voor de modellering. De volgende metingen zijn verricht:
- neerslag (3.2.1);
- grondwaterstand (3.2.2);
- oppervlaktewaterpeil (3.2.3);
- oppervlakkige afstroming (3.2.4).

3.2.1 Neerslag

De neerslag is gemeten om invoer te verkrijgen voor de modellering. Aangezien de neerslagintensiteit een belangrijke rol speelt bij het optreden van oppervlakkige afvoer is gekozen voor een kort registratie-interval.

3.2.1.1 Methode

In de periode van 18 juli 1994 tot 9 mei 1995 is met een zelfregistrerende regenmeter de neerslag op de onderzoekslocatie gemeten nabij peilbuis 5 in raai 3. De neerslag is in die periode elke twintig minuten vastgelegd. De neerslag is gemeten in stappen van 0,2 mm.

3.2.1.2 Resultaten

In aanhangsel 7 zijn de metingen grafisch weergegeven. De neerslagintensiteiten variëren van 0 tot 5,8 mm in twintig minuten. Dit maximum komt overeen met een intensiteit van 418 $mm.d^{-1}$. Op enkele momenten zijn er problemen geweest met de registratie. Dit is gebeurd op momenten dat de regenmeter is omgewaaid of verstopt is geraakt.

Uit de metingen blijkt dat de neerslagintensiteit over een dag sterk kan variëren en dat eveneens de neerslagduur sterk kan variëren. Zo zijn op 7 en 8 september 1994 twee korte hevige buien te zien. Dit zijn waarschijnlijk onweersbuien. Anderszijds is op 27 en 28 december 1994 een aanhoudende regenval te zien met een lage intensiteit die varieert tussen 0,2 en 1,4 mm per twintig minuten.

3.2.1.3 Conclusies

Gedurende de meetperiode heeft de zelfregistrerende regenmeter op enkele perioden na goed gefunctioneerd. De metingen geven een goed beeld van de dynamiek van de neerslag op de onderzoekslocatie door de tijd. De intensiteit kan sterk variëren. De gemeten neerslagintensiteiten variëren van 0 tot 5,8 mm per twintig minuten.

De metingen hebben twintig-minuten-neerslagcijfers opgeleverd die invoer vormden voor het hydrologische model SWAP.

3.2.2 Grondwaterstand

Er zijn grondwaterstanden gemeten om een beeld te krijgen van de stroming van het water op de onderzoekslocatie. Daarnaast vormden de gemeten grondwaterstanden de basis voor de calibratie van het hydrologische model SWAP.

3.2.2.1 Methode

Op de onderzoekslocatie zijn voor het meten van grondwaterstanden 24 peilbuizen geplaatst in vier raaien (zie fig. 2). Ter hoogte van elke raai is bovendien een peilbuis in de beek geplaatst. In paragraaf 2.4 is een verantwoording gegeven van de keuze van de raaien en de locaties van de peilbuizen. De buizen zijn van 29 november 1993 tot 18 juli 1995 handmatig bemeten, in principe eenmaal per week. In de nabijheid van peilbuis 5 in raai 3 is een extra buis geïnstalleerd met een drukopnemer die de grondwaterstand continu registreerde. Deze metingen zijn verricht van september 1994 tot juni 1995 (aanhangsel 7).

Het merendeel van de gemeten grondwaterstanden is gebruikt voor de calibratie van SWAP (periode van 10 januari 1994 tot 25 april 1995). Van deze gemeten grondwaterstanden zijn voor elke peilbuis het gemiddelde en de standaarddeviatie berekend. Dezelfde grondwaterstanden zijn gebruikt om correlatieberekeningen binnen de raaien uit te voeren. De berekeningen zijn uitgevoerd met de grondwaterstanden ten opzichte van maaiveld.

De gemiddelde waarden van de gemeten grondwaterstanden geven een ruimtelijk inzicht in het freatisch vlak binnen de raaien ten opzichte van het maaiveld. De standdaarddeviatie van de waarnemingen is een maat voor de spreiding rond het gemiddelde en geeft inzicht in de fluctatie van de grondwaterstand in de tijd. Met correlatieberekeningen kan een genuanceerder beeld worden verkregen van de verschillen in de grondwaterregimes, dan op basis van de indeling in grondwatertrappen die bij de bodemkartering is gemaakt. De resultaten van de correlatieberekeningen worden gepresenteerd in de vorm van een tabel met coëfficiënten, waaruit blijkt in welke mate het grondwaterstandsverloop van buizen in een raai overeenstemt. Buizen met een min of meer gelijk grondwaterstandsverloop onderscheiden zich door grote correlatiecoëfficiënten (maximum = 1).

De correlaties zijn berekend uit waarnemingen op hetzelfde tijdstip. Ontbreekt op een bepaald tijdstip in slechts één van de buizen van de raai een waarneming dan kunnen voor dat tijdstip geen correlaties voor die raai worden berekend. Om deze reden is het aantal waarnemingen bij de correlatieberekeningen kleiner dan het aantal dat is gebruikt bij de berekening van het gemiddelde en de standaarddeviatie van de afzonderlijke buizen. Op basis van de resultaten voor de afzonderlijke raaien en een aantal topografische kenmerken wordt de stromingsrichting van het grondwater geanalyseerd. Tot slot worden een aantal conclusies gegeven voor de onderzoekslocatie als geheel.

3.2.2.2 Resultaten

De gemeten grondwaterstanden zijn in aanhangsel 8 gegeven in tabelvorm. In aanhangsel 9 zijn de metingen uitgezet tegen de tijd. In deze figuren is het verloop van de grondwaterstanden van 10 januari 1994 tot 18 juli 1995 opgenomen. Dwarsdoorsneden van de raaien zijn opgenomen in aanhangsel 3. Van 29 november 1993 tot 10 januari 1994 zijn de buizen afgesloten geweest met een dichte dop. Hierdoor is er mogelijk geen goede uitwisseling geweest tussen de luchtkolom in de buis en de atmosfeer, en zijn de metingen van deze periode niet betrouwbaar. Deze metingen worden daarom niet gepresenteerd en zijn evenmin gebruikt bij de verschillende berekeningen, of bij de calibratie van het hydrologisch model.

De buizen in de beekbodem zijn ook buiten de correlatieberekeningen gehouden, omdat er geen gebruik van is gemaakt bij de modelberekeningen. Uit de reeksen van de peilbuizen in de beekbodem is wel informatie te krijgen over de horizontale gradiënt in het grondwater in de nabijheid van de beek. In het verzadigde deel van het doorlatend pakket zijn de drukverschillen in verticale richting te verwaarlozen, zodat het niveau in een peilbuis, uitgedrukt ten opzichte van een referentiepunt (NAP), gelijk is aan de stijghoogte. Er zijn geen gegevens beschikbaar over het verschil tussen het beekpeil en de stijghoogte van het grondwater in de bodem onder de beek.

Een aantal buizen is om verschillende redenen voor kortere of langere tijd niet bemeten. Soms houdt dit verband met de bedrijfsvoering op de onderzoekslocatie (bijvoorbeeld in raai 2 en 3 rond het tijdstip van zaaien of oogsten van de maïs). Van het intensief gebruikte graslandperceel (buis 1 in raai 3 en alle buizen in raai 4) ontbreken om redenen die samenhangen met de bedrijfsvoering de waarnemingen van de periode van 31 mei 1994 tot 27 september 1994. In de zomer is het wel eens voorgekomen dat buizen droog stonden (bijvoorbeeld buis 5 in raai 2, of buis 3 en 4 in raai 3).

Raai 1

In de richting van de beek wordt de gemiddelde grondwaterstand in raai 2 ondieper (tabel 2). Vanaf buis 2 neemt de spreiding van de grondwaterstanden rond het gemiddelde af. Dit geeft aan dat de fluctuatie van de grondwaterstand afneemt in de richting van de beek. Dit is het duidelijkst voor buis 5, die het dichtst bij de beek staat, maar geldt in mindere mate ook voor buis 4. De verschillen tussen aangrenzende buizen nemen toe vanaf buis 3.

Tabel 2 De grondwatertrap (Gt), het gemiddelde, de standaarddeviatie en het aantal waarnemingen van de grondwaterstand per buis, en de correlatiecoëfficiënten van de buizen in raai 1 (aantal = 57)

Locatie	Gt	Gemid. grwst. (m - mv.)	Stand. dev. (m)	Aantal	Correlatiecoëfficiënten				
					Buis 1	Buis 2	Buis 3	Buis 4	Buis 5
Buis 1	VIo	1,075	0,371	60	1,00				
Buis 2	VIo	0,966	0,402	63	0,99	1,00			
Buis 3	Vao	0,862	0,351	60	0,99	0,98	1,00		
Buis 4	Vao	0,687	0,231	63	0,94	0,95	0,95	1,00	
Buis 5	IIa	0,296	0,149	63	0,79	0,83	0,79	0,83	1,00

voor de betekenis van de grondwatertrappen, zie figuur 2

De correlaties tussen buis 1 t/m 3 van raai 1 zijn hoog en in dezelfde orde van grootte (tabel 2). De verklaring ligt in de topografie van de raai. In de eerste buis in de raai, die zich ter hoogte van de waterscheiding bevindt, wordt de fluctuatie van de grondwaterstand in hoge mate bepaald door de processen in de onverzadigde zone. Laterale aanvoer via de verzadigde zone speelt in deze locatie geen rol van betekenis en de bovenrand van de ondoorlatende laag bevindt zich op een zodanige diepte, dat de grondwaterstand vrij kan fluctueren. In de volgende buizen treedt in deze situatie geleidelijk verandering op, omdat de laterale aanvoer een rol gaat spelen die in betekenis groeit naarmate de afstand tot de waterscheiding toeneemt. In de lager gelegen delen (buis 5) speelt de stroming in de verzadigde zone een duidelijke rol in de fluctuatie van de grondwaterstand. Aanvoer van de hoger gelegen delen houdt over het algemeen stand, zodat de grondwaterstand minder diep kan uitzakken. Het grondwaterregime in buis 4 is het resultaat van een overgangssituatie die geldt in de nabijheid van de steilrand tussen buis 4 en 5. Het stijghoogteverschil tussen buis 5 en de buis in de beekbodem fluctueert tussen 0,5 en 1,0 m. Dit betekent dat er een continue gradiënt heerst en dat het grondwater in de richting van de beek stroomt.

De gemeten grondwaterstanden onderschrijven in grote lijnen de indeling in grondwatertrappen die bij de bodemkartering is gemaakt (tabel 2).

Raai 2

Buis 2 in raai 2 heeft gedurende de veldwerkperiode niet goed gefunctioneerd en heeft geen bruikbare meetreeks opgeleverd. Voor de calibratie van het hydrologisch model is voor deze locatie een reeks van grondwaterstanden gegenereerd, door toepassing van een regressie op enkele vergelijkbare buizen in raai 2 en 3. Ter hoogte van buis 3 hebben twee buizen gestaan met het filter op verschillende diepte. Omdat buis 3R nauwelijks is bemonsterd, is deze niet gebruikt. Wanneer over buis 3 wordt geproken, wordt 3L bedoeld. Deze buis is gebruikt bij de calibratie op deze locatie.

De gemiddelde grondwaterstand is voor de meeste buizen op de helling van raai 2 (buis 1 t/m 5) vrijwel gelijk (tabel 3a). Van buis 3 is het gemiddelde wat minder diep. In de bufferstrook zijn het gemiddelde van buis 6 en dat van 7 van dezelfde orde van

Tabel 3a De grondwatertrap (Gt), het gemiddelde, de standaarddeviatie en het aantal waarnemingen van de grondwaterstand per buis voor raai 2

Locatie	Gt	Gemid. grwst. (m - mv.)	Stand. dev. (m)	Aantal
Buis 1	VId	0,767	0,463	63
Buis 3	Vad	0,686	0,381	62
Buis 4	Vad	0,756	0,359	63
Buis 5	Vad	0,787	0,287	58
Buis 6	IIa	0,524	0,136	63
Buis 7	IIa	0,550	0,111	63
Buis 8	IIa	0,465	0,082	63

Tabel 3b De correlatiecoëfficiënten van de buizen in raai 2 (aantal = 46)

Locatie	Gt	Buis 1	Buis 3	Buis 4	Buis 5	Buis 6	Buis 7	Buis 8
Buis 1	VId	1,00						
Buis 3	Vad	0,90	1,00					
Buis 4	Vad	0,91	0,96	1,00				
Buis 5	Vad	0,80	0,86	0,94	1,00			
Buis 6	IIa	0,65	0,62	0,69	0,73	1,00		
Buis 7	IIa	0,61	0,59	0,67	0,73	0,90	1,00	
Buis 8	IIa	0,42	0,43	0,48	0,51	0,85	0,77	1,00

voor de betekenis van de grondwatertrappen, zie figuur 2

grootte. Het gemiddelde van buis 8 nabij de beek is het minst diep. De spreiding rond het gemiddelde neemt in de richting van de beek af. De verklaring hiervoor is dezelfde als die voor de helling van raai 1 is gegeven. De verschillen zijn klein op de helling en in de bufferstrook. De overgang tussen beide zones bevindt zich in de buurt van buis 5.

De correlaties voor raai 2 zijn op de helling het grootst tussen buis 3 en 4, en tussen buis 4 en 5 (tabel 3b). Buis 1 en 3 bevinden zich op grotere afstand van elkaar dan de overige buizen, maar zijn ook sterk gecorreleerd. In de bufferstrook is de correlatie tussen buis 6 en 7 het grootst. Buis 5 staat boven de steilrand die de grens tussen het maïsperceel en de bufferstrook vormt. Deze buis bevindt zich, net als buis 4 in raai 1, in de overgangsituatie tussen de helling en het laaggelegen, relatief vlakke terrein onderaan de helling.

De gemeten grondwaterstanden onderschrijven in grote lijnen de indeling in grondwatertrappen die bij de bodemkartering is gemaakt (tabel 3).

Wanneer de stijghoogten in de buizen in de bufferstrook worden vergeleken met de stijghoogten in de buis in de beekbodem, blijkt dat de stijghoogten in buis 6 en 7

meestal 0,1 tot 0,2 m hoger zijn dan die in de buis in de beek. Bij de laagst gemeten grondwaterstanden geldt het omgekeerde. De stijghoogte in buis 8 is in de gehele meetperiode vrijwel gelijk aan de stijghoogte onder de beekbodem. Hieruit kan worden geconcludeerd dat in afvoersituaties tot en met buis 7 in de raai een gradiënt heerst in de richting van de beek. Bij diepe grondwaterstanden (zoals gemeten in augustus 1994) verandert de gradiënt in de bufferstrook van richting. In deze situatie worden op de helling uitsluitend grondwaterstanden gemeten in de ondoorlatende laag, wat impliceert dat de grondwaterstroming vanuit de helling naar de bufferstrook nihil is. Dit betekent dat er in deze laaggelegen bufferstrook, in perioden met lage grondwaterstanden, infiltatie vanuit de beek kan optreden.

Raai 3

De gemiddelden en de spreiding van raai 3 vertonen niet het beeld dat in raai 1 en 2 is te zien (tabel 4). Alleen buis 6 heeft een duidelijk lagere spreiding rond het gemiddelde dan de overige buizen. De meetreeks van buis 1 bevat vrijwel geen waarnemingen uit de zomer. De resultaten van deze buis zijn hier duidelijk door beïnvloed, en kunnen daarom niet met het gemiddelde en de spreiding van de andere buizen worden vergeleken. Om deze reden zijn de correlaties bepaald voor buis 2 tot en met 6.

In raai 3 is buis 4 sterk gecorreleerd met buis 3 en 2, maar duidelijk minder sterk met buis 5 en 6 (tabel 4). Het landgebruik en de topografie van de raai 3 zijn minder uniform dan in de overige raaien. Buis 1 staat in het graslandperceel, terwijl de overige buizen in het maïsperceel staan. Van meer betekenis voor de afvoersituatie in deze raai is het feit dat de helling in de richting van de beek steeds steiler wordt (van 0,4% tussen buis 1 en 2 tot 8,8% tussen buis 5 en 6), en dat de dikte van het doorlatend pakket in dezelfde richting afneemt van 1,7 à 1,4 m tot 1,0 à 0,7 m. De steilrand bevindt zich tussen buis 6 en de beek. Pieken in de grondwaterstand tijdens afvoersituaties zijn ter hoogte van buis 6 van relatief korte duur door de grote gradiënt in de richting van de beek. De uitzakking van het grondwater in droge perioden wordt duidelijk geremd, zodra de grondwaterstand zich in de ondoorlatende laag bevindt. Het stijghoogteverschil tussen

Tabel 4 De grondwatertrap (Gt), het gemiddelde, de standaarddeviatie en het aantal waarnemingen van de grondwaterstand per buis, en de correlatiecoëfficiënten van buis 2 t/m 6 in raai 3 (aantal = 46)

Locatie	Gt	Gemid. grwst. (m - mv.)	Stand. dev. (m)	Aantal	Correlatiecoëfficiënten					
					Buis 1	Buis 2	Buis 3	Buis 4	Buis 5	Buis 6
Buis 1	Vbd	0,608	0,320	35	-					
Buis 2	VId	0,692	0,558	60	-	1,00				
Buis 3	Vbd	0,578	0,286	50	-	0,93	1,00			
Buis 4	Vad	0,417	0,246	56	-	0,87	0,94	1,00		
Buis 5	Vad	0,555	0,281	60	-	0,65	0,68	0,75	1,00	
Buis 6	Vad	0,846	0,162	62	-	0,61	0,72	0,75	0,70	1,00

voor de betekenis van de grondwatertrappen, zie figuur 2

buis 6 en de buis in de beek is minimaal 0,9 m. Het grondwaterregime staat in deze buis sterk onder invloed van de helling en de geringe dikte van het doorlatend pakket.

De gemeten grondwaterstanden onderschrijven in grote lijnen de indeling in grondwatertrappen die bij de bodemkartering is gemaakt (tabel 4). Uitzonderingen hierop vormen de eerste drie buislocaties in deze raai: bij de bodemkartering is de gemiddelde hoogste grondwaterstand in locatie 1 en 3 geschat op 0,35 m - mv. en in locatie 2 op 0,70 m - mv., terwijl uit de gemeten grondwaterstanden een omgekeerd beeld blijkt.

Raai 4

Vanwege het ontbreken van waarnemingen uit de periode 31 mei 1994 tot 27 september 1994 zijn de meetreeksen van raai 4 niet representatief voor alle seizoenen. Aan het gemiddelde, de spreiding en de correlaties kunnen geen conclusies worden verbonden die meer details geven dan de informatie die beschikbaar is van de bodemkartering.

Vanaf buis 2 nemen het gemiddelde en de spreiding van de grondwaterstand in raai 4 af (tabel 5). De gehele raai ligt op het graslandperceel en de onderlinge afstanden tussen de buizen zijn relatief groot. De helling is uniform met een hellingpercentage van 2,4%. Een steilrand ontbreekt en de ontwateringssituatie onderaan de helling is slecht. Ook tijdens de kartering is vastgesteld dat de bovengrond onderaan de helling zeer gevoelig is voor vertrapping. In afvoersituaties is het verschil in stijghoogte tussen buis 4 en 5 circa 0,5 m. In droge perioden neemt dit verschil af, maar blijft positief van teken. Het stijghoogteverschil tussen buis 5 en de buis in de beek is in beide situaties groter en varieert van 1,4 tot 1 m. Deze gegevens vormen een aanwijzing dat er continu een gradiënt heerst in de richting van de beek.

De gemeten grondwaterstanden onderschrijven in grote lijnen de indeling in grondwatertrappen die bij de bodemkartering is gemaakt (tabel 5).

Tabel 5 De grondwatertrap (Gt), het gemiddelde, de standaarddeviatie en het aantal waarnemingen van de grondwaterstand per buis, en de correlatiecoëfficiënten van de buizen in raai 4 (aantal = 31)

Locatie	Gt	Gemid. grwst. (m - mv.)	Stand. dev. (m)	Aantal	Correlatiëcoefficiënten				
					Buis 1	Buis 2	Buis 3	Buis 4	Buis 5
Buis 1	Vbd	0,679	0,245	40	1,00				
Buis 2	Vao	0,521	0,401	40	0,95	1,00			
Buis 3	Vao	0,223	0,209	39	0,82	0,89	1,00		
Buis 4	IIIa	0,252	0,189	37	0,82	0,87	0,97	1,00	
Buis 5	IIa	0,153	0,112	32	0,70	0,71	0,87	0,93	1,00

voor de betekenis van de grondwatertrappen, zie figuur 2

3.2.2.3 Conclusies

De metingen van de grondwaterstanden op de onderzoekslocatie onderschrijven over het algemeen de indeling in grondwatertrappen uit de bodemkartering. Analyse van de meetreeksen heeft meer inzicht gegeven in de overgang in grondwaterregime van de hoger gelegen delen van de raaien naar de lager gelegen delen.

In alle raaien op de onderzoekslocatie nemen de fluctuaties van de grondwaterstand af naarmate de afstand tot de beek kleiner wordt.

In raai 1, 3 en 4 heerst een continue gradiënt in de grondwaterstand en daardoor een continue grondwaterstroming in de richting van de beek. Voor raai 2 geldt dat in afvoersituaties tot in de bufferstrook een gradiënt heerst in de richting van de beek. Bij diepe grondwaterstanden verandert de gradiënt in de bufferstrook van richting, wat betekent dat in deze laaggelegen bufferstrook infiltratie vanuit de beek kan optreden.

Het grondwaterregime staat in de buizen onderaan raai 3 sterk onder invloed van de helling en de geringe dikte van het doorlatend pakket.

De metingen van de grondwaterstanden hebben een goed beeld opgeleverd van het verloop van de grondwaterstanden in de tijd op de onderzoekslocatie. Daardoor bieden de gemeten grondwaterstanden een goede basis voor calibratie van het hydrologische model SWAP.

3.2.3 Oppervlaktewaterpeil

Het registreren van het oppervlaktewaterpeil is uitgevoerd om inzicht te verkrijgen in het niveau en de fluctuaties van het peil van de Mosbeek nabij de onderzoekslocatie.

3.2.3.1 Methode

Van 20 oktober 1994 tot 8 mei 1995 is het beekpeil gemeten. In de buurt van raai 3 is een drukcel in de beek geplaatst waarmee het beekpeil continu is gemeten. De referentiehoogte van de drukcel is niet bekend, waardoor alleen de veranderingen van het beekpeil bekend zijn. Naast de drukcel voor de continue metingen zijn vier buizen in de beek geplaatst die elk in het verlengde staan van een raai. De waterstanden in deze buizen zijn wekelijks handmatig gemeten.

3.2.3.2 Resultaten

In aanhangsel 7 zijn de fluctuaties van het beekpeil weergegeven. Als er vanuit wordt gegaan dat deze fluctuaties juist zijn geregistreerd, dan zijn verschillende patronen te onderscheiden. De beek heeft als geen neerslag optreedt een vrij constant peil. Het niveau van het constante peil wisselt enkele keren met een niveauverschil van ongeveer 0,20 m. Over deze constante peilen liggen de afvoerpieken die optreden bij heftige buien. De maximale hoogte van deze pieken is 0,40 m ten opzichte van het constante niveau.

De plotselinge veranderingen in het constante peil zijn waarschijnlijk het gevolg van het aanbrengen of verwijderen van balken in de overlaat die direct benedenstrooms van de onderzoekslocatie ligt. Deze overlaat wordt gebruikt voor het regelen van de waterstand in de vijver van de molen van Frans.

3.2.3.3 Conclusies

Op enkele momenten na heeft de opstelling voor het continu registreren van het beekpeil goed gefunctioneerd. Door het ontbreken van de referentiehoogte van de drukcel in de beek zijn slechts veranderingen van het beekpeil bekend en niet de absolute peilen. In de metingen is waarschijnlijk het aanbrengen en verwijderen van balken in de overlaat te zien.

3.2.4 Oppervlakkige afstroming

Oppervlakkige afstroming is de afvoer van water over het bodemoppervlak. Er zijn verschillende situaties waarin het optreden van oppervlakkige afstroming is te verwachten (Meinardi en Van der Valk, 1989):
- de infiltratiecapaciteit van de bodem is minder dan de intensiteit van de neerslag;
- het maaiveld ligt onder een helling;
- de ondiepe grondwaterstand komt tot aan maaiveld;
- in de ondiepe bodem is een bevroren laag aanwezig;
- het maaiveld heeft een gering vermogen tot berging.

Het was bekend dat oppervlakkige afstroming op de onderzoekslocatie optreedt. Dit gebeurt als gevolg van de afzonderlijke situaties of een combinatie van de situaties die hierboven zijn genoemd. Oppervlakkige afspoeling van meststoffen kan in hellende gebieden een belangrijke bijdrage leveren aan de belasting van het oppervlaktewater met nutriënten (Orleans et al., 1994). Bufferstroken kunnen het afstromende water en de afspoelende meststoffen afvangen en zo een belangrijke maatregel vormen tegen eutrofiëring van het oppervlaktewater. Om die reden was het belangrijk om inzicht te krijgen in de kwantiteit en de kwaliteit van de optredende oppervlakkige afstroming. De kwantiteit wordt in deze paragraaf besproken. De kwaliteit wordt behandeld bij de chemie van het bodemwater (3.3).

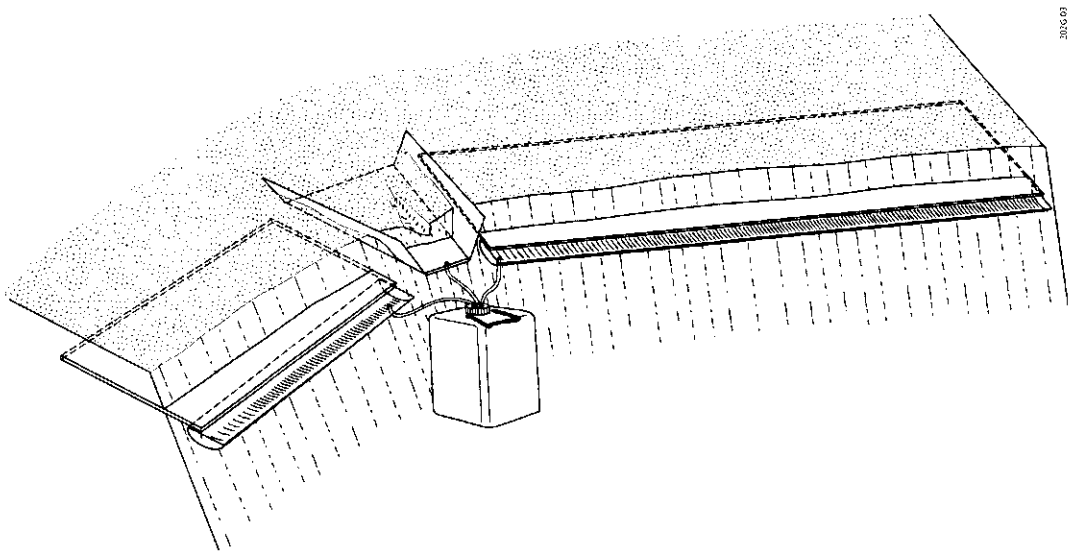


Fig. 3 Gebruikte opstelling voor het meten van oppervlakkige afstroming

3.2.4.1 Methode

Om de oppervlakkige afstroming te meten, is een opstelling gebouwd onderaan de steilrand bij raai 3, in een knik van het talud (zie fig. 2 voor de plaats van de opstelling). In figuur 3 is de opstelling weergegeven. Het water dat afstroomt, wordt opgevangen in twee onderscheppingsgoten. Deze goten zijn 4 en 10 m lang. Het met de goten opgevangen water wordt door een Y-vormig verbindingsstuk naar een verzamelvat geleid, dat in het talud van de beek is verankerd. Dit veroorzaakt een stijging van de waterstand in het vat. Het vat heeft een inhoud van circa 0,12 m^3. In het vat is op de bodem een drukcel gemonteerd. Door middel van deze drukcel is de waterstand in het vat continu waargenomen en daarmee de tijdstippen van het optreden van oppervlakkige afstroming. Als werd geconstateerd dat het vat vol was, werd het vat geleegd door een kraan aan de onderkant van het vat te openen. In een later stadium is tussen de twee meetgoten een extra meetgoot geplaatst die het water vanuit een erosiegeul naar het opvangvat leidt.

De toegepaste meetopstelling had een enigszins experimenteel karakter. Hierdoor was er bij deze meting meer kans op gebreken dan bij de andere onderdelen van het veldonderzoek. Door de randvoorwaarden van het onderzoek was het niet mogelijk een meer geavanceerde meetopstelling toe te passen.

3.2.4.2 Resultaten

In aanhangsel 7 zijn de gemeten vatwaterstanden van november 1994 tot juni 1995 weergegeven. In de figuren zijn naast kleine veranderingen in de vatwaterstand een aantal flinke stijgingen te zien. Vooral deze abrupte stijgingen in de vatwaterstand duiden op het optreden van oppervlakkige afstroming. Deze abrupte stijgingen zijn bijvoorbeeld te zien op 18 november 1994 en in datzelfde jaar enkele malen tussen 24 en 30 december. In 1995 is het optreden van oppervlakkige afstroming onder andere geregistreerd op 10 januari en rond 19 en 20 februari.

Er zijn momenten geweest dat een stijging in de vatwaterstand is gemeten en geen neerslag is geregistreerd. Data waarop dit plaatsvond, zijn 25 december 1994, en 8 en 21 januari in 1995. Hiervoor is geen duidelijke verklaring gevonden. Wel is opvallend dat op 25 december en 8 januari de grondwaterstand eveneens stijgt. Dit is een aanwijzing dat de neerslagregistratie mogelijk niet goed heeft gefunctioneerd op deze data.

Uit aanhangsel 7 blijkt dat op de momenten waarop oppervlakkige afstroming optreedt de grondwaterstand nabij het maaiveld staat. Er zijn ook momenten dat de grondwaterstand bij de continue registratie nabij het maaiveld staat en de vatwaterstand niet stijgt. Dit is bijvoorbeeld te zien op 2 februari 1995. Er hebben zich problemen voorgedaan met de aansluiting van de meetgoot op het vat. Dit zou een mogelijke verklaring kunnen zijn voor het niet registreren van oppervlakkige afvoer op momenten dat die, gezien een zeer hoge grondwaterstand, wel wordt verwacht.

De metingen met de opstelling zijn indicaties voor de momenten waarop oppervlakkige afstroming optreedt. Om verschillende redenen is geen uitspraak te doen over de hoeveelheid afgestroomd water. Ten eerste is het vat dat gebruikt is te klein voor de hoeveelheden afstroming die ter plekke kunnen voorkomen. Het vat is vol als over een strook van 8,5 m lengte bij 14 m breedte (lengte goten) 1 mm water over het oppervlak de goot instroomt. Het is te verwachten dat op de locatie van de meetgoot het optreden van oppervlakkige afstroming niet beperkt blijft tot een strook van 8,5 m lengte en een hoeveelheid van 1 mm. Er zou een groter vat of een andere meetmethode moeten zijn toegepast om de hoeveelheid afstromend water te meten.

Het tweede probleem bij de metingen is het bepalen van het oppervlak dat afwatert op de meetgoot. Het is moeilijk om op basis van de topografie van de onderzoekslocatie dit oppervlak te bepalen. Oppervlakkige afstroming gaat op het maïsperceel gepaard met het optreden van erosie. In de meetperiode zijn erosiegeulen waargenomen. In deze geulen is concentratie van water opgetreden. Het was niet duidelijk waar dit water precies vandaan kwam. Als op het niveau van erosiegeulen het optreden van oppervlakkige afstroming moet worden bestudeerd, is een erosieonderzoek vereist, met een andere meetopstelling en andere computermodellen. In de loop van het onderzoek is een extra meetgoot geïnstalleerd om het water dat werd afgevoerd door de erosiegeul naar het opvangvat te leiden (zie ook fig. 3).

In de meetreeksen zijn duidelijk geleidelijk dalende waterniveaus te zien. Dit heeft naar alle waarschijnlijkheid te maken met het lekken van de kraan aan de onderkant van het vat. Vanaf juni 1995 lijkt dit probleem te zijn verholpen aangezien hier duidelijk een

aanvulling van de hoeveelheid water in het vat is geregistreerd, gevolgd door een constant niveau tot de volgende aanvulling.

De kleine aanvullingen van het vat kunnen het gevolg zijn van het direct opvangen van neerslag. Het vat van 0,12 m^3 inhoud is ongeveer 0,80 m hoog. Elke 0,10 m stijging van de waterspiegel in het vat representeert een wateraanvulling van 0,015 m^3. Een deel van de goot met een breedte van 0,07 m vangt over de gehele lengte van de goot (14 m) direct neerslag op. Bij een bui van 7,5 mm is deze hoeveelheid neerslag reeds genoeg om de vatwaterstand met 0,05 m te laten stijgen. Het is dus zaak om voor correcte metingen van oppervlakkige afstroming de meetgoot volledig af te schermen tegen het direct opvangen van neerslag. Dit kan worden gedaan door over de hele lengte van de goot een afdakje te plaatsen.

Het probleem van de te kleine inhoud van het vat is te verhelpen door het afgestroomde water dat in de goot komt, af te voeren door een verzamelbak met een V-vormige overlaat. Door een drukcel op de bodem van de verzamelbak te plaatsen en een klein interval bij het registreren te gebruiken, kan de hoeveelheid oppervlakkige afstroming naar verwachting goed worden geregistreerd. Voor een goede monitoring van de kwaliteit van het afstromende water moet dit water, voordat het de overlaat is gepasseerd, debietproportioneel worden bemonsterd.

Voor het probleem van het afwaterende oppervlak is moeilijk een oplossing te vinden. De oplossingen die er zijn, zijn erg kwetsbaar en moeten regelmatig worden gecontroleerd op het juist functioneren. Een mogelijkheid zou kunnen zijn om een strook van 10 m breedte, loodrecht op de richting van de goot, van de waterscheiding tot de goot aan weerszijden te begrenzen met een scherm van kunststof dat is ingegraven en boven het maaiveld uitkomt. Op die manier kan het water dat tussen die schermen afstroomt naar de goot worden geleid.

3.2.4.3 Conclusies

Met de meetopstelling zijn verschillende momenten geregistreerd waarop oppervlakkige afstroming optreedt. Oppervlakkige afstroming gaat op het maïsperceel gepaard met erosie waardoor geulen ontstaan.

Uit de metingen is alleen af te leiden wanneer oppervlakkige afstroming is opgetreden. De hoeveelheid oppervlakkige afstroming is door beperkingen van de meetopstelling en het optreden van erosie niet vast te stellen. Wel zijn in de meetresultaten duidelijke verschillen in intensiteit van de oppervlakkige afstroming te zien.

Voor het meten van hoeveelheden oppervlakkige afstroming is een andere meetopstelling noodzakelijk. Het gebruikte vat was te klein om grote hoeveelheden afgestroomd water te meten. Regenbuien werden ook direct gesignaleerd in het vat door het opvangen van neerslag direct op de meetgoot. Verder was niet bekend welk oppervlak afwaterde op de goot. Manieren om deze problemen te ondervangen zijn bijvoorbeeld het gebruik van een V-vormige overlaat in combinatie met een debietproportionele monsternemer

waarmee continu de hoeveelheid oppervlakkige afstroming kan worden geregistreerd en debietproportioneel watermonsters kunnen worden genomen, het plaatsen van een afdak boven de meetgoot en het begrenzen van een afwateringsgebied met ingegraven schermen.

3.3 Chemie bodemwater

De nutriëntenconcentraties in het grondwater en in het oppervlakkig afgestroomde water zijn bepaald met het doel om deze te gebruiken bij de calibratie van het nutriëntenhuishoudingsmodel ANIMO; de nutriëntenbelasting van de beek bestaat immers uit een uitspoelings- en een afspoelingsdeel.

3.3.1 Methode

Grondwater
De peilbuizen zijn gebruikt voor de bemonstering van het grondwater (zie ook 3.2.2.1). De peilbuizen hadden een filterlengte van 0,5 m. Van de meeste buizen zat de onderkant van het filter op 1,5 tot 2,0 m diepte. Van buizen 2 en 3 in raai 3 zat de onderkant van het filter op circa 1 m diepte; dat is ongeveer de diepte van de onderkant van de doorlatende laag op deze plaatsen. Onderaan elke raai is tevens een peilbuis in de beek geplaatst, met de onderkant van het filter op 0,8 tot 1,45 m beneden de beekbodem.

Er zijn acht bemonsteringsronden geweest op de volgende tijdstippen:
1 27 december 1993;
2 8 februari 1994;
3 29 maart 1994;
4 19-20 juli 1994;
5 27 september 1994;
6 8-9 november 1994;
7 21-22 februari 1995;
8 17-18 juli 1995.

De analyses van de grondwatermonsters zijn uitgevoerd in het laboratorium van waterschap Regge en Dinkel. Ze waren vooral gericht op de nutriëntengehalten. De monsters zijn geanalyseerd op de volgende stoffen: nitraat (NO_3-N), nitriet (NO_2-N), ammonium (NH_4-N), opgelost organisch-stikstof plus ammonium (Kjeldahl-N), ortho-fosfaat (ortho-P), totaal-fosfaat (P-tot), chloride (Cl), sulfaat (SO_4) en kalium (K). Bovendien zijn het elektrisch geleidingsvermogen (EGV) en de zuurgraad (pH) van de monsters bepaald. De analyse van de monsters van de eerste ronde is beperkt tot nitraat. Vanaf de derde ronde is de analyse uitgebreid met totaal-ijzer (Fe^{2+} + Fe^{3+}). De zuurgraad van de monsters is gewoonlijk in het laboratorium gemeten; vanaf de vierde ronde is de zuurgraad tevens in het veld bepaald. De vijfde bemonsteringsronde is beperkt tot raai 2 en 3. Door droogstand tijdens het zomerseizoen en door het tijdelijk ontbreken van een aantal peilbuizen zijn de resultaten van een aantal bemonsterings-

ronden incompleet. De oorzaak van beschadiging of vermissing van peilbuizen houdt verband met de doorlopende bedrijfsvoering op de onderzoekslocatie.

Bij de monstername is zo veel mogelijk gewerkt volgens de voorschriften van het Nederlands Normalisatie Instituut voor bemonstering van grondwater ten behoeve van chemische analyse (NEN 5744). Het schoonpompen van de buizen, voorafgaand aan de monstername, is vanwege de lage toestroomsnelheden van het grondwater beperkt tot eenmaal de natte buisinhoud. Er is gestreefd naar een monstervolume van 1 liter grondwater, wat in de meeste gevallen ook is gelukt. Wanneer het bemonsterde volume niet voldoende was om alle bepalingen te kunnen doen, is voorrang gegeven aan de bepalingen van de stikstof- en fosforvormen.

Vanwege de hoge mate van troebelheid van de monsters zijn bij de eerste twee ronden de monsters een nacht gekoeld weggezet voor bezinking; dit in afwijking van het voorschrift om de monsters direct in het veld te filtreren. Bij deze ronden zijn de concentraties Kjeldahl-N en totaal-fosfaat bepaald in het ongefiltreerde watermonster, exclusief bezinksel. De overige stoffen zijn bepaald in het gefiltreerde monster. Bij de derde bemonsteringsronde is een dubbele analyse uitgevoerd; zowel na filtratie in het veld, als na filtratie in het laboratorium. Met ingang van de vierde bemonsteringsronde zijn de monsters voor de bepaling van ortho-fosfaat, totaal-fosfaat, ammonium, Kjeldahl-N en ijzer in het veld gefiltreerd en aangezuurd. De procedure voor de analyse van de overige componenten is direct na binnenkomst op het laboratorium van het waterschap Regge en Dinkel ingezet, waardoor alle analyses binnen 24 uur na het tijdstip van monstername zijn uitgevoerd. De aangezuurde, in het veld gefiltreerde monsters voor de bepaling van ortho-fosfaat, totaal-fosfaat, ammonium, Kjeldahl-N en ijzer, zijn bewaard in flessen van kunststof. De monsters voor de overige bepalingen zijn bewaard in glazen flessen. Alle monsters zijn zoveel mogelijk koel en in het donker opgeslagen en getransporteerd. De analyses zijn uitgevoerd volgens de voorschriften van het NEN.

Afstromend water
Het water dat bij het optreden van oppervlakkige afstroming ter hoogte van de meetgoot over de rand van het perceel stroomt, is in een verzamelvat geleid (zie 3.2.4). De inhoud van het vat is na menging bemonsterd. In de periode van juni 1994 tot en met juli 1995 is het vat tien keer bemonsterd. De monsters zijn geanalyseerd op de stikstof- en fosforvormen, kalium, chloride en sulfaat. De analyses zijn verricht volgens NEN in ongefiltreerde monsters; van de laatste drie monsters zijn tevens analyses na filtratie verricht.

3.3.2 Resultaten

De resultaten van de analyses van het grondwater zijn gegeven in aanhangsel 10a, die van de analyses van het oppervlakkig afstromende water in aanhangsel 10b. Door Kruijne (1996) worden deze resultaten besproken in relatie tot de modellering van de uit- en afspoeling van nutriënten.

3.3.3 Conclusies

De analyses van het grondwater en het oppervlakkig afstromende water hebben concentraties van voor het onderzoek relevante stoffen opgeleverd. Deze gegevens zijn belangrijk voor de calibratie van het nutriëntenhuishoudingsmodel ANIMO.

3.4 Tracerexperimenten

Ter ondersteuning van het hydrologische onderzoek zijn twee tracerexperimenten uitgevoerd. Het doel van deze experimenten was drieledig:

1 het traceren van de transportweg van water en stoffen door de bodem richting Mosbeek;
2 het verkrijgen van een indruk van de stroomsnelheid van het water richting Mosbeek;
3 het nagaan of water met daarin opgeloste stoffen ter hoogte van raai 2 door de bufferstrook stroomt.

In aanhangsel 20 is een uitgebreide beschrijving van de tracerexperimenten opgenomen. In deze paragraaf wordt een korte samenvatting van deze beschrijving gegeven, waarin de nadruk ligt op de conclusies van de experimenten.

3.4.1 Methode

Een eerste experiment is uitgevoerd op twee locaties in raai 3 in de periode november 1994 tot en met januari 1995. Dit experiment had vooral betrekking op de eerste twee doelen.

Een tweede experiment ter hoogte van raai 2 in de bufferstrook is uitgevoerd in maart-april 1995. Dit experiment diende vooral het derde doel: nagaan of water met daarin opgeloste stoffen bij uitstroming naar de Mosbeek de bufferstrook doorstroomt of daar onderdoor of langs stroomt.

In deze experimenten is via een aantal peilbuizen een hoeveelheid geconcentreerde KBr-oplossing in de bodem geïnfiltreerd. Benedenstrooms de injectiepunten zijn op verschillende afstanden tot de injectiepunten peilbuizen geplaatst. Aan deze buizen is op een aantal tijdstippen water onttrokken, waarin de bromideconcentratie is bepaald.

3.4.2 Resultaten en conclusies

Uit het eerste experiment blijkt dat de stroming van het grondwater in raai 3 tussen buis 2 en buis 6 globaal in de richting van de raai plaatsvindt. Lokaal kunnen echter afwijkingen van de hoofdrichting bestaan.

Een belangrijke conclusie uit het tracerexperiment is dat er sneltransport plaatsvindt via lagen met een hoge doorlatendheid die als preferente stroombanen fungeren. Doordat verschillende lagen met een verschillende doorlatendheid als transportbaan fungeren, treedt spreiding in de verblijftijd van water en stoffen op. Uit het experiment blijkt tevens dat dispersie en diffusie een belangrijke rol spelen bij het transport door de bodem.

De gemiddelde stroomsnelheid in het watervoerende profiel is geschat op 0,5 $m.d^{-1}$. De bijbehorende gemiddelde verzadigde doorlatendheid is ongeveer 5 $m.d^{-1}$.

Uit het tweede experiment blijkt dat water met daarin opgeloste stoffen dat bovenaan de steilrand ter hoogte van raai 2 tot uitstroming komt, door de bufferstrook naar de Mosbeek stroomt. Dit is op drie wijzen aangetoond:

1 overal onder de bufferstrook komen nagenoeg ondoorlatende tertiaire afzettingen voor op niet te grote diepte (gemiddeld 2 m - mv., maximaal 3 m - mv.);
2 de isohypsenbeelden geven een stroming in de richting van de beek aan;
3 op alle punten in de bufferstrook en in het beekwater is de bromide-tracer aangetroffen.

Verder blijkt dat de stromingsrichting van het water door de bufferstrook niet evenwijdig is aan raai 2, maar noordoostelijk. Oorzaak hiervan is vooral de loop van de beek die ten noorden en oosten van de raai stroomt. Preferente laterale stroming speelt waarschijnlijk ook een rol in de bufferstrook.

De gemiddelde stroomsnelheid van het water door de steilrand is geschat op 2,4 tot 6 $m.d^{-1}$. De gemiddelde stroomsnelheid door de bufferstrook in de langsrichting van raai 2 is geschat op 0,8 tot 1,9 $m.d^{-1}$.

Voor de modelberekeningen is op basis van de tracerexperimenten te concluderen dat de stroming naar de beek complex verloopt. Er zijn sterke aanwijzingen dat voor een belangrijk deel preferent transport plaatsvindt via lagen met een hoge doorlatendheid. Bij de interpretatie van de modeluitkomsten moet hiermee rekening worden gehouden.

4 Modelmatige analyse van de hydrologie

De metingen die zijn verricht in het veldonderzoek geven in grote lijnen een beeld van de hydrologie van de onderzoekslocatie. Om meer inzicht te krijgen in de waterstromingen en -balansen in de meetperiode en daarbuiten was het nodig de hydrologie te simuleren met modellen. Deze simulaties waren tevens nodig om de hydrologische invoer aan te leveren voor het nutriëntenhuishoudingsmodel ANIMO waarmee de nutriëntenuitspoeling op de onderzoekslocatie is gemodelleerd (zie Kruijne, 1996). De hydrologie vormt de basis voor de ANIMO-berekeningen. De hydrologie is sterk bepalend voor de nutriëntenhuishouding en is de drijvende kracht achter de uit- en afspoeling van nutriënten.

Voor dit onderzoek is uitgegaan van bestaande instrumenten. Het hydrologische model diende aan een aantal eisen te voldoen. Het moest de hydrologie van de onverzadigde zone kunnen modelleren, onder invloed van neerslag en verdamping en uitwisseling met de verzadigde zone. Daarnaast moest het in staat zijn oppervlakkige afstroming te simuleren. Het moest mogelijk zijn om niet-stationaire situaties door de rekenen voor een langere periode en het model moest de benodigde hydrologische invoer kunnen leveren voor het model ANIMO. Een model dat aan deze eisen voldoet is het dynamische eendimensionale model SWAP. Er is reeds ruime ervaring opgedaan met de koppeling tussen SWAP en ANIMO.

Het gebruik van modellen om de werkelijkheid te simuleren, vereist een bepaalde mate van schematisering van de werkelijkheid. De wijze waarop dit gebeurt, is afhankelijk van het gebruikte model. De gebruikte modellen zijn numerieke modellen voor de verticale dimensie. In deze modellen worden de berekeningen op knooppunt- of compartimentniveau uitgevoerd. Dit vereist een schematisering in de verticale richting.

Voor het onderzoek was, naast de verticale stroming tussen maaiveld en grondwatervlak, ook de tweedimensionale stroming over het maaiveld en door de verzadigde zone naar de Mosbeek van wezenlijk belang. Deze tweedimensionale stroming kan niet direct met de gebruikte eendimensionale modellen worden berekend. Door verticale berekeningen uit te voeren voor verschillende locaties achter elkaar in de horizontale richting (een raai), kan de tweedimensionale werkelijkheid op een pseudo-tweedimensionale wijze worden gesimuleerd. Dit vereist, naast een schematisering in de verticale richting, een schematisering in de horizontale richting.

Het model SWAP kent verschillende vormen van invoer:
- de modelparameters; deze zijn tijdsonafhankelijk en sturen de processen in het model;
- de initiële gegevens; deze geven de begintoestand van de modelvariabelen weer;
- de tijdsafhankelijke gegevens; deze vormen de randvoorwaarden waarbinnen de in het model beschreven processen plaatsvinden.

De waarden van de modelparameters hangen samen met drie aspecten:
- de procesbeschrijving in het model;
- de werkelijke situatie die moet worden doorgerekend;

- de manier waarop de werkelijkheid is geschematiseerd om met de procesbeschrijving van het model deze werkelijkheid zo goed mogelijk te simuleren.

Als deze drie aspecten op een samenhangende wijze zijn ingevuld, is het mogelijk buiten de meetperiode met tijdsafhankelijke parameters de hydrologie van de beschouwde locaties te simuleren binnen bepaalde randvoorwaarden.

De drie vormen van invoer kunnen algemeen zijn of gebiedsspecifiek. De algemeen geldende invoer kan uit de literatuur worden betrokken. De gebiedsspecifieke invoer moet worden gemeten of bepaald in het veld of in het laboratorium. Sommige gebiedsspecifieke parameters zijn niet te meten. Dit kan het gevolg zijn van het ontbreken van een geschikte methode. Het kan ook zijn dat dergelijke metingen niet haalbaar zijn binnen het onderzoek.

Voor gebiedsspecifieke modelparameters die niet zijn gemeten, kunnen waarden worden afgeleid in een calibratieproces. Op basis van gemeten waarden van toestandsgrootheden die ook door het model worden berekend, worden in de calibratie modelparameters zolang bijgesteld tot het vergelijken van berekende en gemeten waarden bevredigende resultaten oplevert. Uiteraard moeten gecalibreerde waarden van modelparameters binnen fysisch realistische grenzen liggen. Voor een juiste calibratie zijn voldoende correcte initiële en tijdsafhankelijke invoergegevens nodig. Daarnaast vereist een goede calibratie een goede set meetgegevens om de modeluitkomsten mee te vergelijken. Een dergelijk calibratieproces verloopt via trial-and-error, waardoor veel berekeningen nodig zijn.

Door dit proces te automatiseren en een statistisch criterium aan te leggen, kan de calibratie worden versneld en geformaliseerd. In dit onderzoek is het optimalisatieprogramma PEST ingezet ter ondersteuning van de calibratie.

Na calibratie worden de waarden van de gecalibreerde modelparameters meestal getoetst door een andere situatie met andere tijdsafhankelijke invoergegevens door te rekenen en de modelresultaten te vergelijken met gemeten waarden (validatie). Validatie is in dit onderzoek niet uitgevoerd, omdat hiervoor niet voldoende betrouwbare meetgegevens voorhanden waren.

Als de calibratie succesvol is verlopen, kunnen de gecalibreerde modellen worden gebruikt om voor de betreffende locatie met andere randvoorwaarden te rekenen. Deze berekeningen vormen de scenario's, die worden beschreven door de randvoorwaarden.

In dit hoofdstuk wordt eerst ingegaan op het gebruikte model SWAP en het optimalisatie-instrument PEST (4.1). Vervolgens wordt de hydrologische schematisering toegelicht (4.2) en wordt de benodigde invoer besproken (4.3). Ten slotte worden de calibratie (4.4) en de hydrologische berekeningen voor de bestaande situatie (4.5) en voor de hydrologische scenario's (4.6) beschreven.

4.1 Modelbeschrijving

In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de werking van het hydrologische model SWAP. De nadruk ligt hierbij op de aanpassingen die voor dit onderzoek zijn gedaan aan het model (4.1.1). Tevens wordt kort de werking en de toepassing van het optimalisatie-instrument PEST toegelicht (4.1.2).

4.1.1 SWAP

SWAP (Feddes en Kabat, in voorb.) is een dynamisch eendimensionaal model. Het model simuleert de onverzadigde grondwaterstroming in een verticale bodemkolom. Deze bodemkolom wordt hiervoor opgedeeld in compartimenten. Het model berekent onder invloed van randvoorwaarden onder andere de vochtgehalten en de drukhoogten in de compartimenten, en de waterfluxen voor alle compartimenten. De bovenrandvoorwaarde wordt gevormd door de neerslag en de verdamping en de onderrandvoorwaarde door een drukhoogte of een flux. Voor de vraagstelling van het onderzoek zijn enkele aanpassingen verricht aan het model.

In dit onderzoek is de oppervlakkige afstroming belangrijk. In de oorspronkelijke versie van SWAP werd deze al berekend, maar de manier van berekenen moest worden verbeterd. Zoals aangegeven in 3.2.4, zijn er verschillende omstandigheden die het optreden van oppervlakkige afstroming beïnvloeden. Een aantal van deze omstandigheden was al betrokken in de oude berekeningswijze van de oppervlakkige afstroming in SWAP.

Cruciaal voor het optreden van oppervlakkige afstroming is de relatie tussen de neerslagintensiteit en het vermogen van de bodem om (een deel van) de neerslag te laten infiltreren (de infiltratiecapaciteit). In de oorspronkelijke berekeningswijze wordt een grove benadering van de neerslagintensiteit gebruikt door de daghoeveelheid uit te smeren over de hele dag. Hiermee wordt de neerslagintensiteit meestal (sterk) onderschat. Gevolg hiervan is dat de infiltratie van neerslag wordt overschat en de oppervlakkige afstroming wordt onderschat. In de aangepaste berekeningswijze wordt de neerslag op kleinere tijdsbasis (twintig-minuten-intervallen) ingevoerd. Hierdoor, en door een gedetailleerdere modellering van de relatie tussen neerslagintensiteit en infiltratiecapaciteit, wordt de oppervlakkige afstroming op een meer realistische wijze gemodelleerd dan in de oorspronkelijke benadering.

De aanpassing van de berekeningsmethode van de oppervlakkige afstroming komt er in grote lijnen op neer dat het moment wordt berekend waarop plasvorming optreedt op basis van de vochttoestand van de bovenste bodemlaag en de neerslagintensiteit. Tot het moment van plasvorming infiltreert alle neerslag in de bodem. Vanaf dat moment infiltreert een deel van de neerslag en wordt het restant geborgen aan het maaiveld. De mogelijkheid om water aan het maaiveld te bergen, zeker in hellende gebieden, is beperkt. Als de maximale berging aan het maaiveld wordt overschreden, treedt oppervlakkige afstroming op. Voor een uitleg van de theoretische achtergronden van de aangepaste versie van de berekening van de oppervlakkige afstroming wordt verwezen naar aanhangsel 11.

Voor de aangepaste vorm van het berekenen van de oppervlakkige afstroming is het belangrijk de neerslagintensiteit meer gedetailleerd in te voeren. Daarom zijn metingen van de neerslag op basis van een veel kleiner tijdsinterval dan een dag noodzakelijk. Bij een kleiner meetinterval worden hogere intensiteiten gemeten dan bij het uitsmeren van de neerslag over de hele dag. Zoals uit de metingen is gebleken, kan de neerslagintensiteit sterk variëren (zie 3.2.4). Door de neerslag met intervallen van twintig minuten te registreren, is rekening gehouden met deze variatie en de benodigde invoer van het aangepaste model. Bij de modellering wordt de neerslag op twintig-minuten-basis ingevoerd.

Met de aangepaste versie van SWAP kan de oppervlakkige afstroming, die een belangrijke component vormt in dit onderzoek, beter worden berekend. Door de neerslagintensiteit op een kleinere tijdsbasis in te voeren, gecombineerd met een gedetailleerdere modellering van de relatie tussen neerslagintensiteit en infiltratie-capaciteit, wordt de oppervlakkige afstroming op een meer realistische wijze gemodelleerd dan in de oorspronkelijke versie.

4.1.2 PEST

In dit onderzoek is PEST (Watermark Computing, 1994) gebruikt ter ondersteuning van de calibratie. PEST is een optimalisatie-instrumentarium dat is gebasseerd op de Gauss-Marquardt-Levenberg methode van parameterschatting. Aan de hand van gesimuleerde waarden en gemeten waarden van een variabele, bepaalt PEST de beste combinatie van een set te optimaliseren parameters volgens de kleinste kwadraten methode.

De te optimaliseren parameters betroffen in dit onderzoek twee constanten van een vergelijking die de onderrandvoorwaarde vormt in de SWAP-berekeningen (zie verder 4.3.2 en 4.4). De gemeten waarden, aan de hand waarvan is geoptimaliseerd, zijn de grondwaterstanden.

PEST werkt als een schil rond SWAP en beïnvloedt slechts de parameterinvoer van SWAP. Het runnen van SWAP wordt aangestuurd door PEST. Binnen PEST is SWAP in eerste instantie gedraaid met een initiële set geschatte waarden voor de te optimaliseren parameters. Voor alle momenten in de calibratieperiode dat er een gemeten grondwaterstand bekend is, is binnen PEST de gemeten grondwaterstand vergeleken met de door SWAP berekende. De verschillen tussen de gemeten en gesimuleerde waarden zijn gekwadrateerd en gesommeerd voor de gehele doorgerekende periode. Deze som van de kwadraten is een maat voor de fout die SWAP maakt. Hoe groter de som van de kwadraten, hoe groter de fout.

PEST maakt vervolgens aan de hand van de optimalisatiemethode een nieuwe inschatting van de parameterwaarden en draait SWAP opnieuw met deze waarden. De nieuwe parameterwaarden leveren een nieuwe som van de kwadraten op. Op basis van het vergelijken van de verschillende sommen van de kwadraten bepaalt PEST een nieuwe set parameters en runt SWAP wederom. Deze procedure wordt herhaald tot de meest optimale set parameterwaarden is gevonden, waarbij de som van de kwadraten het kleinst is.

4.2 Schematisering

Om de werkelijkheid te kunnen simuleren met de modellen SWAP en ANIMO moet deze werkelijkheid tot op zekere hoogte worden geschematiseerd. In deze paragraaf worden de verschillende stappen van de schematisering behandeld. Een verantwoording van deze stappen wordt gegeven in aanhangsel 12.

De voor dit onderzoek relevante hydrologische werkelijkheid is de afstroming over het bodemoppervlak en de uitstroming door de verzadigde zone van water als basis voor de af- en uitspoeling van nutriënten vanaf en vanuit de onderzoekspercelen naar de Mosbeek. Deze hydrologische werkelijkheid is driedimensionaal.

De schematisering van deze driedimensionale hydrologische werkelijkheid heeft plaatsgevonden in vier stappen:
1 de driedimensionale hydrologie is geschematiseerd tot een tweedimensionale;
2 de tweedimensionale hydrologie is pseudo-tweedimensionaal benaderd;
3 de laterale (horizontale) stroming door de verzadigde zone is gemodelleerd als stroming door de onderrand van een verticale bodemkolom;
4 laterale stromingscomponenten van achter elkaar geplaatste verticale bodemkolommen zijn gekoppeld.

De hydrologie van het onderzoeksgebied kent twee belangrijke laterale stromingscomponenten: oppervlakkige afstroming en laterale uitstroming door de verzadigde zone over de tertiaire afzettingen, beide naar de Mosbeek. In het vervolg worden deze twee componenten kortweg 'afstroming' en 'uitstroming' genoemd.

Stap 1
In de eerste stap is de driedimensionale ruimte geschematiseerd tot een tweedimensionaal verticaal vlak ongeveer loodrecht op de Mosbeek. De stromingsrichting van water in dit vlak is opgebouwd uit twee componenten: een verticale, naar beneden gerichte en een horizontale, ongeveer loodrecht naar de beek gerichte. De stroming in dit vlak vertegenwoordigt daarmee de hellingafwaarts gerichte stroming, de af- en uitstroming, van water naar de beek.

De eerste stap is gerealiseerd door het uitzetten van raaien op de onderzoekspercelen, ongeveer loodrecht op de Mosbeek (zie 2.4 en fig. 2). Elke raai vertegenwoordigt een specifieke af- en uitstromingsroute door een onderzoeksperceel. Elke af- en uitstromingsroute is representatief voor (een deel van) het betreffende onderzoeksperceel. De raaien vormden de basis van de veldmetingen en de modelberekeningen. De resultaten voor een raai zijn representatief voor (het deel van) het onderzoeksperceel dat de raai vertegenwoordigt.

Stap 2
In de tweede stap is de tweedimensionale stroming beschreven op een pseudo-tweedimensionale wijze door de verticale en horizontale dimensie los te koppelen. Dit houdt in dat deze twee dimensies apart zijn geschematiseerd en benaderd in de modelbereke-

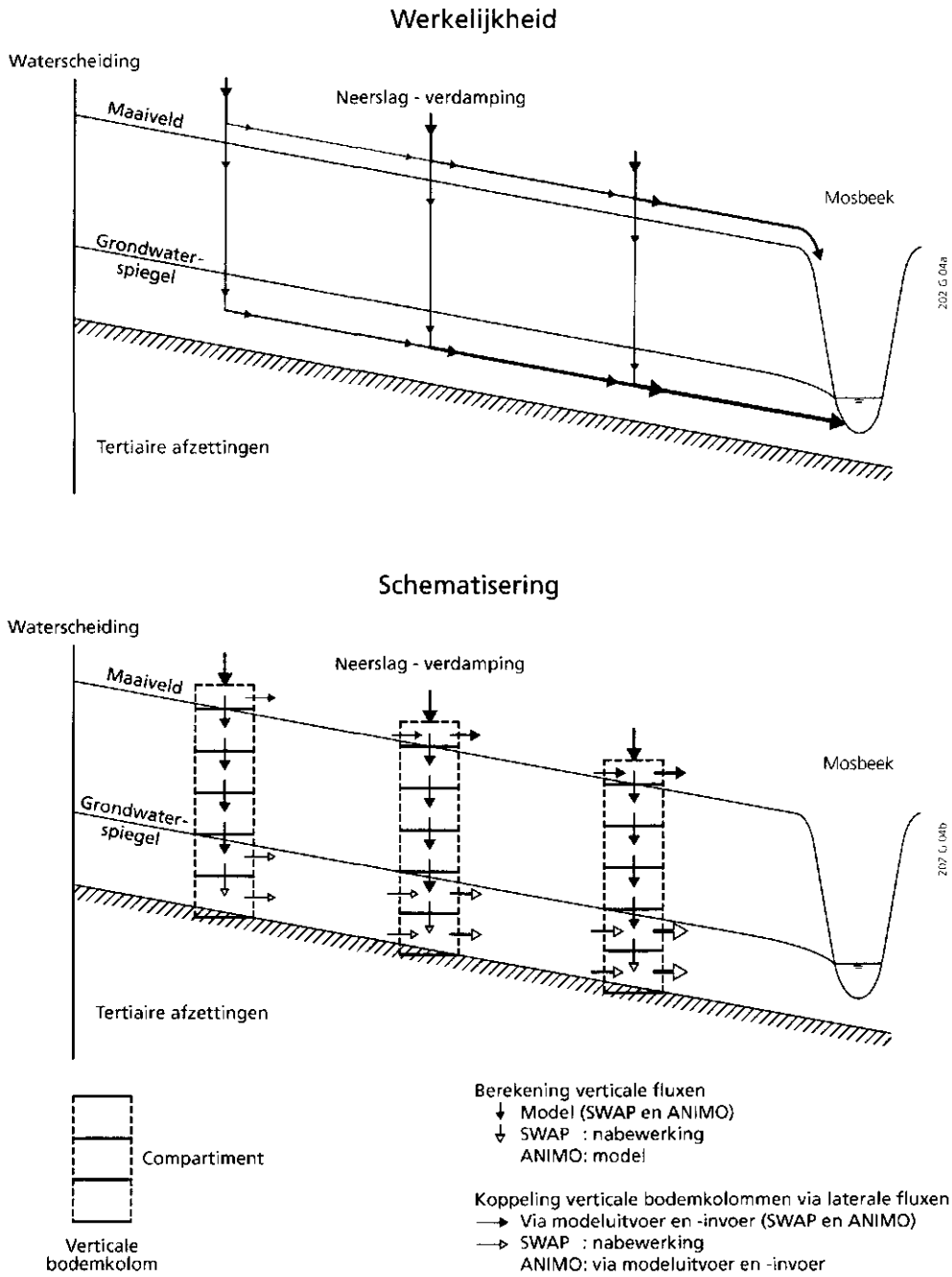


Fig. 4 Schematisering van de tweedimensionale stroming over en in de bodem van de onderzoekslocatie in een verticale en een laterale (horizontale) stromingscomponent

ningen (fig. 4). De verticale stroming is expliciet doorgerekend met de modellen, in de vorm van verticale bodemkolommen (SWAP: berekening verticale waterstroming in uitsluitend de onverzadigde zone; ANIMO: berekening verticaal stoftransport in de onverzadigde en verzadigde zone). De laterale (horizontale) stroming is niet expliciet doorgerekend met de modellen, maar verkregen door de modelresultaten van een aantal achter elkaar geplaatste verticale kolommen te koppelen. Hoe deze koppeling tot stand

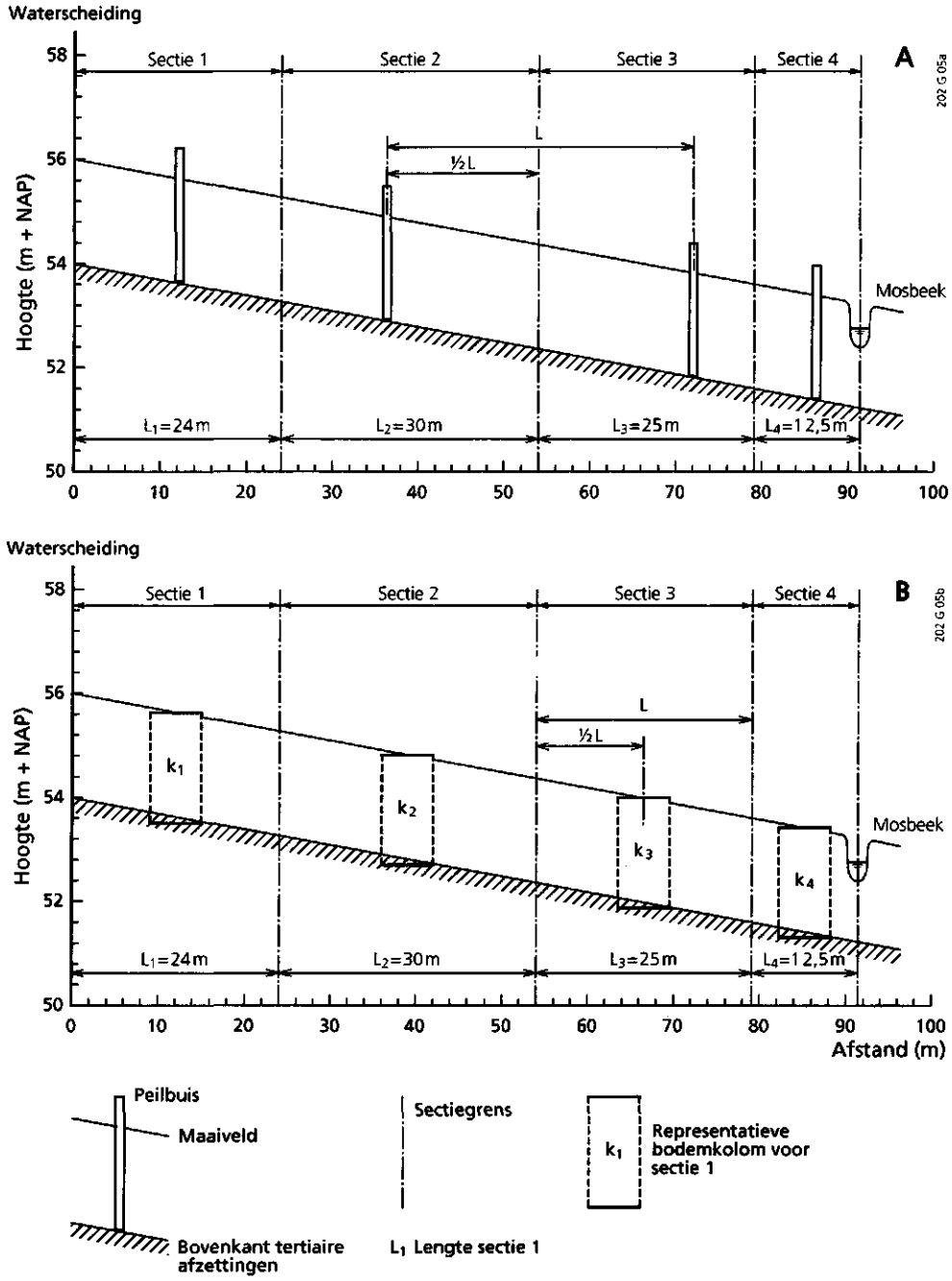


Fig. 5 Schematisering van een denkbeeldige raai met peilbuizen in secties (A) en representatie van de secties door verticale bodemkolommen (B)

is gekomen, wordt behandeld onder stap 4. Deze benadering is gebaseerd op de aanname dat laterale stroming in de onderzoekslocatie beperkt blijft tot stroming over het maaiveld en door de verzadigde zone. Deze aanname is in algemene zin gerechtvaardigd (zie aanhangsel 12 onder stap 2).

De tweede stap bestond concreet uit de schematisering van de horizontale dimensie gevolgd door de schematisering van de verticale dimensie. Met de horizontale schematisering zijn de eenheden verkregen die met de modellen zijn doorgerekend (bodemkolommen); met de verticale schematisering de rekeneenheden binnen de modellen (compartimenten) (fig. 5).

In de horizontale schematisering zijn de raaien met peilbuizen verdeeld in secties die min of meer uniform zijn voor de bepalende randvoorwaarden en bodemeigenschappen. De peilbuizen hebben als basis gediend voor de indeling van de raaien in rekensecties. Elke peilbuis vertegenwoordigt één sectie. De grenzen van de secties liggen halverwege de afstand tussen twee buizen, en op de veronderstelde waterscheiding en in het midden van de beek, en in de raaien 1 en 2 op de steilrand. In figuur 5A is de schematisering van een raai in secties geïllustreerd voor een denkbeeldige raai.

In de modelberekeningen wordt iedere sectie in een raai gerepresenteerd door een verticale bodemkolom (fig. 5B). Dit is een rekentechnische voorstelling van de driedimensionale werkelijkheid die geen strikte fysieke betekenis heeft, omdat alleen de verticale dimensie van de kolom is gedefinieerd. De horizontale dimensies zijn niet gedefinieerd, zodat de berekeningen gelden per eenheid van oppervlak.

Een kolom loopt van maaiveld tot aan de onderkant van het beschouwde bodemprofiel. In dit onderzoek is de onderkant van het profiel in de tertiaire afzettingen gelegd, zodat de kolommen het volledige deel van het profiel bevatten waarin de horizontale stroming naar de Mosbeek plaatsvindt (de zandlagen boven de tertiaire afzettingen). In de verticale schematisering zijn de kolommen opgedeeld in compartimenten. Op basis van deze compartimenten worden de numerieke berekeningen in de modellen uitgevoerd. Voor de beschrijving van de indeling in compartimenten wordt verwezen naar 4.3.1.1.

De hydrologie van een sectie is gesimuleerd met het model SWAP door de hydrologie in de representatieve kolom te modelleren. De hydrologie is in dit verband de stroming van water door de onverzadigde zone, en de waterbalans per compartiment en voor de gehele kolom, onder invloed van de processen aan de randen van de kolom. Voor de modellering van de hydrologie zijn twee soorten randvoorwaarden van belang (zie ook fig. 4):

1 voorwaarden aan de bovenrand. Dit zijn neerslag en verdamping, en afstroming over het maaiveld. De laterale afstroming over het maaiveld wordt bij de bovenrandvoorwaarden gerekend, omdat het model deze afstroming berekent afhankelijk van processen aan de bovenrand. De bovenrandvoorwaarden worden door het model berekend uit meteorologische invoergegevens, eigenschappen van het gewas, en de vochttoestand en bodemfysische eigenschappen van de compartimenten in de wortelzone;
2 voorwaarden aan de zijranden: laterale af- en aanvoer door de verzadigde zone van de kolom. Onder stap 3 wordt uitgelegd hoe deze laterale stroming is gemodelleerd.

Aan- en afvoer over de onderrand (kwel resp. wegzijging) spelen geen rol in de onderzoekspercelen, omdat de onderrand wordt gevormd door de nagenoeg ondoorlatende tertiaire afzettingen (zie 2.4 en 3.1.1.2).

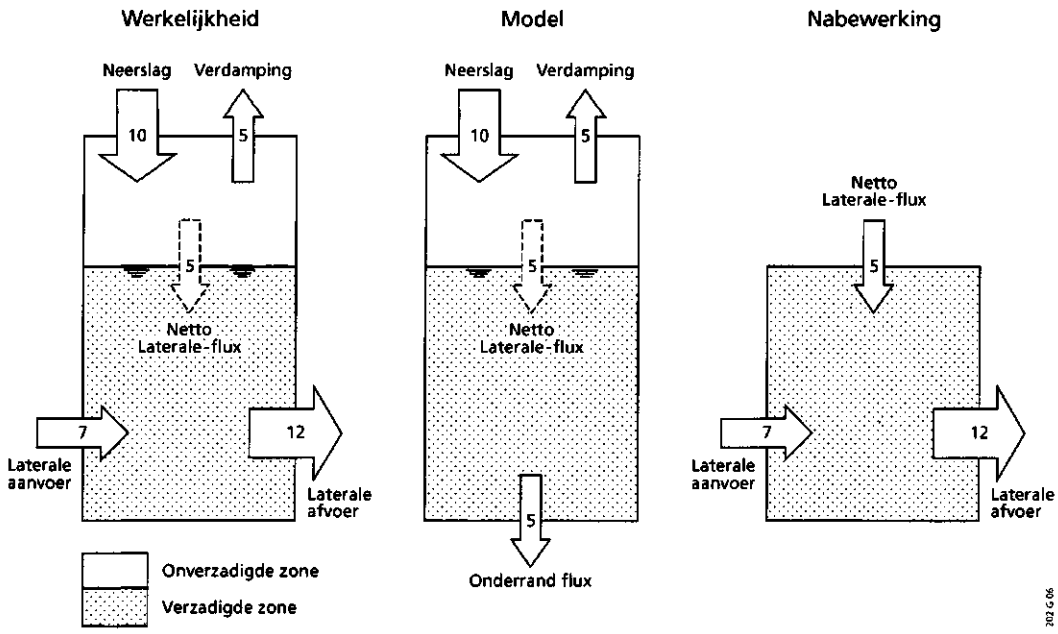


Fig. 6 Schematisering van de laterale stroming door de verzadigde zone van een kolom voor de berekeningen met het model SWAP. Het voorbeeld betreft een stationaire situatie (geen verandering in de berging).

Stap 3

De laterale stroming door de verzadigde zone is gemodelleerd als stroming door de onderrand van de kolom. Hiertoe zijn in de modellering de voorwaarden aan de zijranden vervangen door een onderrandvoorwaarde. Hierbij is gebruik gemaakt van de optie in SWAP om een grondwaterstand-afvoer-relatie in te voeren. Met deze relatie wordt de flux over de onderrand berekend afhankelijk van de grondwaterstand. Deze flux representeert in de modellering van dit onderzoek de netto laterale afvoer of aanvoer over de zijranden van de kolom bij een bepaalde grondwaterstand. Deze netto-laterale-flux staat voor het verschil tussen de aanvoer over de bovenstroomse en de afvoer over de benedenstroomse zijrand van de kolom (fig. 6).

De (bruto) afvoer door de benedenstroomse zijrand is berekend in een nabewerking, door de aanvoer door de bovenstroomse zijrand te verrekenen met de netto-laterale-flux (fig. 6). Op deze wijze zijn de modelresultaten van alle secties van een raai gekoppeld. Deze nabewerking wordt verder behandeld onder stap 4.

De grondwaterstand-afvoer-relatie is als exponentiële of als lineaire relatie in het model ingebracht (zie 4.3.2.2). De eerste relatie geeft onder alle omstandigheden een uitgaande flux over de onderrand die staat voor een netto afvoer over de zijranden. Deze relatie is gebruikt voor de secties op de helling waar het lateraal aangevoerde grondwater altijd door de verzadigde zone richting beek kan worden afgevoerd. De tweede relatie geeft bij hoge grondwaterstanden een uitgaande en bij lage grondwaterstanden een inkomende flux over de onderrand. De inkomende flux staat voor een netto aanvoer over de zijranden. Deze relatie is gebruikt voor de secties onderaan de helling in de nabijheid

van de beek en in de bufferstrook. Op deze locaties wordt het grondwaterregime sterk beïnvloed door de laterale aanvoer van grondwater (zie ook 3.2.2.2). Hierdoor kan de situatie ontstaan dat bij relatief diepe grondwaterstanden de afvoer van lateraal aangevoerd grondwater stagneert, omdat dan de verzadigde zone en/of de gradiënt in het grondwater te klein zijn om al het aangevoerde water te kunnen afvoeren naar de beek. Het deel van het aangevoerde water dat niet wordt afgevoerd, wordt dan geborgen in de bodem en/of gebruikt voor aanvulling van het neerslagtekort.

- Beide relaties worden door twee constanten vastgelegd. Gegeven de positie van de hydrologische basis (tertiaire afzettingen) bepalen deze constanten daarmee de eigenschap van de sectie om water af te voeren door de verzadigde zone afhankelijk van de grondwaterstand, die bepalend is voor de dikte van de verzadigde zone en de gradiënt in het grondwater. Deze eigenschap, en dus de waarden van beide constanten zijn sectie-specifiek. Ze zijn niet direct te meten en zijn daarom voor elke sectie via calibratie van het model afgeleid uit grondwaterstandsmetingen (zie 4.4).

Stap 4

De laatste stap van de schematisering betreft het berekenen van de stroming in horizontale richting uit de modelresultaten van de verticale kolommen. Dit is gedaan door de berekende laterale stromingscomponenten van de kolommen van een raai aan elkaar te koppelen. De afstroming en de uitstroming zijn op een verschillende manier gekoppeld binnen een raai (zie ook fig. 4):

- bij de afstroming is de koppeling tot stand gekomen door de uitvoer van een kolom te gebruiken als invoer voor de volgende kolom;
- bij de uitstroming is de koppeling in een nabewerking buiten de modelberekeningen om gerealiseerd.

Afstroming

Voor de koppeling van de afstroming is de berekende afstroming van een kolom als invoer doorgegeven aan de aangrenzende benedenstroomse kolom. In deze laatste kolom is deze inkomende afstroming als bovenrandvoorwaarde meegenomen in de modelberekeningen. Hiertoe is de inkomende afstroming opgeteld bij de neerslag die de bodem bereikt (neerslag na aftrek van de interceptie door het gewas). Op deze wijze zijn de vier raaien van boven (kolom bij de waterscheiding) naar beneden (kolom bij de beek) doorgerekend. Hierdoor is de afstroming van elke kolom via de benedenstroomse kolommen doorgegeven richting Mosbeek. Omdat de eerste kolom grenst aan de waterscheiding, is verondersteld dat deze kolom geen inkomende afstroming heeft.

De kolommen hebben geen horizontale dimensies. Invoer en uitvoer van de modelberekeningen worden daarom uitgedrukt per eenheid van oppervlak, in m waterschijf. In de werkelijkheid gaat het om de hoeveelheid water die afspoelt vanaf de secties in een raai. Voor de secties moet de waterschijf daarom worden omgezet in een hoeveelheid water. Daartoe moeten de invoer- en uitvoertermen van een kolom worden verrekend met de oppervlakte van de bijbehorende sectie. Omdat een sectie enkel een lengte heeft en geen breedte, en loodrecht op de beek staat, wordt deze oppervlakte uitgedrukt per m beeklengte. De oppervlakte is daarmee gelijk aan de lengte van de sectie.

Bij het doorgeven van de berekende afstroming van een kolom naar de volgende kolom is de uitvoer van de eerste kolom (i-1) omgerekend naar invoer voor de tweede kolom (i). Hierbij zijn twee berekeningsstappen te onderscheiden:

1 de uitvoer van kolom i-1 als uitgaande afstroming in m waterschijf ($q_{uit,i-1}$) is omgerekend naar een hoeveelheid water die vanaf sectie i-1 afstroomt in m^3 per m beeklengte ($Q_{uit,i-1}$) door vermenigvuldiging met de sectielengte (L_{i-1}):

$$Q_{uit,i-1} = q_{uit,i-1} \cdot L_{i-1} \tag{1}$$

2 de hoeveelheid water die vanaf sectie i-1 afstroomt naar sectie i in m^3 per m beeklengte ($Q_{uit,i-1}$) is omgerekend naar invoer voor kolom i als inkomende afstroming in m waterschijf ($q_{in,i}$) door deling door de lengte van sectie i (L_i):

$$q_{in,i} = \frac{Q_{uit,i-1}}{L_i} \tag{2}$$

De resulterende omrekening luidt voor sectie i:

$$q_{in,i} = q_{uit,i-1} \cdot \frac{L_{i-1}}{L_i} \tag{3}$$

Hierbij is de verhouding tussen de bovenstroomse en benedenstroomse sectielengte (L_{i-1}/L_i) de omrekeningsfactor.

Tabel 6 bevat een voorbeeldberekening van het doorgeven van afstroming in de denkbeeldige raai van figuur 5. De inkomende afstroming in m waterschijf van kolom i (q_{in}) is berekend met vergelijking 3 door de uitgaande afstroming van de vorige kolom i-1 (q_{uit}) te vermenigvuldigen met de omrekeningsfactor voor sectie i (L_{i-1}/L_i). De uitgaande afstroming van kolom i is gelijk aan de inkomende afstroming van kolom i plus de eigen bijdrage van kolom i aan de afstroming (q_{kol}):

$$q_{uit} = q_{in} + q_{kol} \tag{4}$$

De eigen bijdrage van de kolom aan de afstroming wordt door SWAP berekend op basis van de neerslag en de inkomende afstroming (zie 4.1.1 en 4.3.2.1). In sectie 4 is de eigen bijdrage aan de afstroming negatief waardoor de inkomende afstroming groter is dan de uitgaande. Hier vindt netto infiltratie plaats van water dat afstroomt vanaf sectie 3.

Tabel 6 bevat tevens de hoeveelheid water in m^3 per m beeklengte die afstroomt vanuit een sectie naar de volgende sectie, en bij sectie 4 naar de beek (vetgedrukt getal). Deze uitgaande hoeveelheid afstromend water (Q_{uit}) is berekend met vergelijking 1 door de

Tabel 6 Voorbeeldberekening van het doorgeven van afstroming in de denkbeeldige raai van figuur 5

Sectienr.	L_i	L_{i-1}/L_i	Kolom (m waterschijf)			Sectie (m^3 per m beeklengte)		
i	(m)	($m.m^{-1}$)	q_{in}	q_{uit}	q_{kol}	Q_{in}	Q_{uit}	Q_{sec}
1	24	-	-	0,05	0,05	-	1,2	1,2
2	30	0,8	0,04	0,10	0,06	1,2	3,0	1,8
3	25	1,2	0,12	0,16	0,04	3,0	4,0	1,0
4	12,5	2,0	0,32	0,28	-0,04	4,0	**3,5**	-0,5

L_i = lengte van sectie i;
L_{i-1}/L_i = omrekeningsfactor: verhouding tussen lengte bovenstroomse sectie i-1 en lengte beschouwde sectie i;
q_{in} = inkomende afstroming;
q_{uit} = uitgaande afstroming;
q_{kol} = bijdrage van kolom aan afstroming; negatief is netto infiltratie van inkomende afstroming;
Q_{in} = inkomende hoeveelheid afstromend water;
Q_{uit} = uitgaande hoeveelheid afstromend water;
Q_{sec} = bijdrage van sectie aan hoeveelheid afstromend water; negatief is netto infiltratie van inkomende hoeveelheid afstromend water;
3,5 = resulterende hoeveelheid afstromend water naar de beek voor deze raai.

uitgaande afstroming in m waterschijf van kolom i (q_{uit}) te vermenigvuldigen met de sectielengte (L_i). De inkomende hoeveelheid afstromend water (Q_{in}) en de eigen bijdrage van de sectie aan de hoeveelheid afstromend water (Q_{sec}) zijn berekend door q_{in} respectievelijk q_{kol} te vermenigvuldigen met L_i.

Uitstroming

De koppeling van de uitstroming is gerealiseerd in een nabewerking buiten de modelberekeningen met SWAP. Deze nabewerking was nodig voor de interpretatie van de hydrologische berekeningen met SWAP in termen van de laterale uitstroming naar de beek (zie 4.5) en voor het berekenen van de nutriëntenuitspoeling met ANIMO (zie Kruijne, 1996).

Het principe van de berekening van de koppeling van de uitstroming vanuit de verschillende secties is gelijk aan dat van de berekening van de koppeling van de afstroming: de inkomende uitstroming vermeerderd met de eigen bijdrage van de sectie aan de uitstroming geeft de uitgaande uitstroming. Dit wordt voor een kolom geïllustreerd door figuur 6 voor een stationaire situatie (geen bergingsverandering). De eigen bijdrage van de kolom aan de uitstroming is gelijk aan de netto-laterale-flux over de zijranden, door SWAP berekend als flux over de onderrand (zie onder stap 3). Voor een sectie moeten de fluxen in m waterschijf worden omgezet in hoeveelheden uitstromend water in m^3 per m beeklengte door vermenigvuldiging met de sectielengte (conform vergelijking 1). Koppelen van de hoeveelheid uitstromend water van de secties in een raai komt dan neer op het sommeren van de netto hoeveelheid uitstromend water van de secties, te beginnen bij de sectie aan de waterscheiding (sectie 1):

$$Q_{uit,n} = \sum_{i=1}^{n} L_i \cdot q_{kol,i} \qquad (5)$$

met:

$Q_{uit,n}$ = uitgaande hoeveelheid uitstromend water vanuit sectie n (m^3 per m beeklengte);

$q_{kol,i}$ = netto-laterale-flux over de zijranden (= flux over de onderrand) van kolom i (m);

L_i = lengte van sectie i (m).

Uit deze berekening volgt dat de uitstroming vanuit elke sectie die niet aan de beek grenst de volgende (benedenstroomse) secties passeert alvorens de beek te bereiken. Dit wordt verduidelijkt door de voorbeeldberekening van tabel 6 (onder 'sectie'). Omdat de getallen van deze tabel geen fysieke betekenis hebben, maar slechts ter illustratie dienen, zijn ze ook van toepassing op de uitstroming. Voor 'afstroming' en 'hoeveelheid afstromend water' moet dan 'uitstroming' respectievelijk 'hoeveelheid uitstromend water' worden gelezen. De bijdrage van de kolom aan de uitstroming (q_{kol}) staat daarbij voor de netto-laterale-flux over de zijranden. De uitgaande hoeveelheid uitstromend water (Q_{uit}) vanuit sectie 4 is de totale hoeveelheid uitstromend water vanuit de raai naar de beek.

Bij sectie 4 is de netto-laterale-flux over de zijranden negatief: de inkomende uitstroming is hier groter dan de uitgaande. Een deel van de inkomende uitstroming wordt geborgen in de bodem en/of gebruikt voor aanvulling van het neerslagtekort. SWAP berekent in zo'n situatie een aanvoerflux over de onderrand.

Bij het berekenen van de nutriëntenuitspoeling met ANIMO vormen de inkomende (bovenstroomse) en uitgaande (benedenstroomse) laterale uitstromingsflux van de kolommen invoer voor ANIMO. Hierbij is de inkomende flux berekend uit de uitgaande flux van de vorige kolom, omdat de inkomende uitstroming van de sectie gelijk is aan de uitgaande van de vorige sectie. Aangezien de laterale uitstromingsfluxen evenals de afstroming zijn uitgedrukt in m waterschijf is deze berekening gelijk aan de berekening van de inkomende afstroming van een kolom uit de uitgaande afstroming van de vorige kolom (vergelijking 1 t/m 3; hierbij moet voor 'afstroming' 'laterale uitstromingsflux' worden gelezen en voor 'hoeveelheid afstromend water' 'hoeveelheid uitstromend water'). De uitgaande laterale uitstromingsflux van de kolom is verkregen door de inkomende flux te vermeerderen met de netto-laterale-flux. In tabel 6 wordt deze berekeningswijze verduidelijkt door een voorbeeld.

Voor de berekeningen met ANIMO is het nodig dat de inkomende en uitgaande laterale uitstromingsflux worden verdeeld over de compartimenten van de verzadigde zone (zie fig. 4). Deze verdeling is uitgevoerd op basis van het doorlaatvermogen (dikte maal verzadigde doorlatendheid) van de betreffende compartimenten en wordt in detail besproken door Kruijne (1996). Kruijne bespreekt ook een aantal bijzonderheden die gelden in de situatie waarin de grondwaterstand in de ondoorlatende tertiaire laag zit, of in de situatie waarin de inkomende uitstroming te klein is om de met SWAP berekende netto-laterale-aanvoerflux van een kolom geheel te dekken.

4.3 Invoer SWAP

Nadat de werkelijkheid is geschematiseerd, moeten in het model SWAP de juiste gegevens worden ingevoerd om de geschematiseerde werkelijkheid modelmatig te beschrijven. Eerder zijn drie vormen van invoer onderscheiden: de modelparamete, de initiële gegevens en de tijdsafhankelijke gegevens. Voor dit onderzoek zijn vooral de (interne) modelparameters en de tijdsafhankelijke invoer van belang. De initiële gegevens zijn hier van minder belang, omdat de invloed van deze gegevens in de gesimuleerde periode binnen zeer korte tijd niet meer merkbaar is.

De voor dit onderzoek belangrijkste invoer wordt in deze paragraaf beschreven. Eerst worden de interne modelparameters (4.3.1) besproken gevolgd door de tijdsafhankelijke invoer in de vorm van de randvoorwaarden (4.3.2). Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de benodigde invoer van SWAP wordt verwezen naar Van den Broek et al. (1993).

4.3.1 Modelparameters

De modelparameters sturen de processen in de kolommen. Van deze modelparameters wordt allereerst de indeling van de kolommen in bodemlagen en compartimenten besproken (4.3.1.1). Strikt genomen is deze indeling onderdeel van de schematisering. Omdat de indeling en de daaruit voortvloeiende laag- en compartimentdikten sterk bepalend zijn voor de interne processen en voor de toekenning van waarden aan andere interne modelparameters, worden deze parameters hier als interne modelparameters besproken. Verder worden de parameters besproken die de bodemfysische karakteristieken beschrijven van de onderscheiden bodemlagen (4.3.1.2).

4.3.1.1 Indeling in bodemlagen en compartimenten

Om met het model SWAP te kunnen rekenen, moet de door te rekenen bodemkolom worden onderverdeeld in bodemlagen en compartimenten. Bodemlagen zijn uniforme eenheden die worden gekenmerkt door hun specifieke bodemfysische eigenschappen. Zij vallen meestal samen met de horizonten van het profiel. De bodemlagen vormen het niveau waarop de bodemfysische modelparameters worden ingevoerd.

De compartimenten vormen de rekeneenheden binnen het model. Indeling van het profiel in compartimenten is noodzakelijk voor de numerieke berekeningen met het model. De compartimenten zijn de ruimtelijke vertegenwoordiging van de knooppunten op basis waarvan de numerieke berekeningen worden uitgevoerd. Elke bodemlaag bestaat uit één of meer compartimenten.

De dikte van het door te rekenen profiel bepaalt de lengte van de kolom. De bovenrand van deze kolom wordt gevormd door het maaiveld en de onderrand door de onderkant van het door te rekenen profiel. De in dit onderzoek gehanteerde profieldikte is 2,50

m voor elke doorgerekende kolom. Deze dikte garandeert dat in alle kolommen de grondwaterstand, ook in zeer droge situaties, hoger is dan de onderrand van de kolom. Daarnaast is met deze dikte bereikt dat alle kolommen het deel van het profiel bevatten dat van belang is voor de horizontale stroming (de zandlagen boven de tertiaire afzettingen).

Om praktische redenen is de profieldikte gelijk genomen voor alle kolommen. Op basis van de bodemkartering zijn de kolommen opgedeeld in bodemlagen. De laagindeling komt in grote lijnen overeen met de horizontindeling van het bodemprofiel. In SWAP kunnen maximaal vijf bodemlagen worden onderscheiden. Bij een aantal kolommen zijn vanwege deze beperking twee horizonten van het bodemprofiel tot één bodemlaag samengevoegd.

Bij de indeling in compartimenten is in het bovenste deel van het profiel een fijnere indeling toegepast dan in het onderste deel. De reden hiervoor is dat bovenin het profiel meer dynamiek optreedt als gevolg van bodem- en gewasverdamping, en infiltratie van neerslagwater, eventueel met een hoge intensiteit (aangepaste berekening oppervlakkige afstroming). De numerieke berekening van deze dynamische processen vereist een fijne laagindeling.

Ten behoeve van de horizontale koppeling van de kolommen is voor elke kolom dezelfde indeling in 35 compartimenten toegepast. Van maaiveld tot aan de onderkant van de kolom is deze indeling:
- 5 compartimenten van 0,01 m;
- 2 compartimenten van 0,025 m;
- 8 compartimenten van 0,05 m;
- 20 compartimenten van 0,10 m.

Op basis van de compartimentindeling en de laagindeling zijn de compartimenten toegekend aan een bodemlaag.

4.3.1.2 Bodemfysische parameters

De processen in de kolom worden sterk bepaald door de bodemfysische karakteristieken van de bodemlagen. Dit zijn:
- de waterretentiekarakteristiek;
- de doorlatendheidskarakteristiek.

Deze karakteristieken worden beschreven door de Van Genuchten-parameters (zie 3.1.2). Deze vormen de in te voeren modelparameters. Ze worden op het niveau van de bodemlagen ingevoerd in het model. Binnen het model worden de parameters toegekend aan de compartimenten die bij de betreffende bodemlaag horen.

De Van Genuchten-parameters zijn samengevoegd in zogenaamde bodemfysische bouwstenen. De basis voor de toekenning van de bodemfysische bouwstenen aan de bodemlagen vormde de bodemkartering in combinatie met de bepaling van de

bodemfysische karakteristieken van de voorkomende lagen (zie 3.1.2). De belangrijkste criteria die hierbij golden, zijn:
- het onderscheid in bodemfysische bouwstenen voor de boven- en ondergrond;
- de verzadigde doorlatendheid van de bodemlaag;
- het landgebruik.

Voor de bovenste lagen van de kolom zijn bouwstenen van een bovengrondmonster gebruikt; voor de lagen hieronder bouwstenen van ondergrondmonsters. Daarnaast is voor de boven- en ondergrond gekeken naar de verzadigde doorlatendheid van de laag en het landgebruik waaronder de gekarakteriseerde laag zich bevond. Voor elke laag is een bodemfysische bouwsteen gebruikt die qua verzadigde doorlatendheid en landgebruik overeen kwam met de betreffende laag. In alle kolommen neemt de verzadigde doorlatendheid van de bodemlagen die deel uitmaken van het doorlatende zandpakket, toe met de diepte. In aanhangsel 13 is aangegeven uit welke bodemfysische bouwstenen de gemodelleerde kolommen zijn opgebouwd. Tevens bevat aanhangsel 13 voor alle compartimenten de verzadigde doorlatendheid en het vochtgehalte bij verzadiging.

4.3.2 Randvoorwaarden

Het numerieke model SWAP lost per tijdstap een set differentiaalvergelijkingen op. Bij het oplossen van deze differentiaalvergelijkingen spelen randvoorwaarden een belangrijke rol. Dit zijn de voorwaarden die gelden aan de randen van het gemodelleerde systeem. In het algemeen zijn twee catagorieën randvoorwaarden te onderscheiden:
- de drukhoogte langs de rand is bekend; er is sprake van een potentiaal-randvoorwaarde;
- de hoeveelheid water die langs een rand passeert is bekend, er is sprake van een flux-randvoorwaarde.

Het gevolg van de in dit onderzoek toegepaste schematisering (zie 4.2) is dat met twee randvoorwaarden is gerekend: de bovenrandvoorwaarden (4.3.2.1) en de onderrand-voorwaarde (4.3.2.2). Beide randvoorwaarden hebben de vorm van een flux-randvoorwaarde. Zij bepalen in de tijd hoeveel water in welke richting de bovenrand (maaiveld) respectievelijk de onderrand (onderkant gemodelleerde kolom) passeert.

4.3.2.1 Bovenrandvoorwaarden

De bovenrandvoorwaarden zijn onderscheiden in meteorologische gegevens, gewasparameters en oppervlakkige afstroming.

Meteorologische gegevens
De meteorologische gegevens zijn de neerslag en de verdamping. De neerslag en de verdamping zijn gebiedsspecifieke invoer. De neerslag is op de onderzoekslocatie gemeten en de verdampingswaarden zijn afkomstig van het weerstation Tubbergen dat ongeveer vijf km ten zuidwesten van de onderzoekslocatie ligt.

Voor zover de gemeten neerslag in twintig-minuten-intervallen beschikbaar was (18 juli 1994 tot 9 mei 1995), is de neerslag op twintig-minuten-basis ingelezen en meegenomen in de berekeningen. De hiaten in de meetreeks zijn voor de berekeningen opgevuld met dagneerslagen, gemeten op het weerstation van Tubbergen. Voor de berekeningen is de reeks voor de periode van 1 januari 1994 tot 18 juli 1994 ingevuld met dagneerslagen van hetzelfde weerstation. Daar waar alleen dagneerslagen bekend waren, zijn de neerslagen op dagbasis ingelezen en meegenomen in de berekeningen.

De verdamping is op dagbasis ingevoerd in de vorm van een referentie-gewasverdamping van Makkink.

Gewasparameters
De gewassen worden gekarakteriseerd met een aantal gewasparameters. Deze karakteriseren de waterhuishouding van de gewassen in de tijd. Zij bepalen daarmee de onttrekking van water aan de bodem voor gewas- en bodemverdamping.

Allereerst wordt de referentiegewasverdamping van Makkink vermenigvuldigd met een gewasfactor. Hiermee is de totale potentiële verdamping voor het betreffende gewas vastgelegd. Met de gewasparameters wordt de totale potentiële verdamping verdeeld in een interceptieterm, een potentiële gewasverdampingsterm (transpiratie) en een potentiële bodemverdampingsterm (evaporatie). Afhankelijk van de drukhoogte in de bewortelde compartimenten wordt uit de potentiële transpiratie een actuele berekend. Uit de potentiële evaporatie wordt afhankelijk van het vochtgehalte in het bovenste compartiment een actuele evaporatie berekend.

De interceptieterm betreft neerslagwater dat op plantendelen verdampt en dat nooit de bodem bereikt. Deze term wordt daarom in mindering gebracht op de totale neerslag. De transpiratieterm wordt onttrokken aan de compartimenten waarin zich de wortels bevinden. De evaporatieterm is een flux door de bovenrand van de kolom en wordt daarom aan het bovenste compartiment onttrokken. Voor een meer gedetailleerde beschrijving van de berekening van de verdamping in SWAP wordt verwezen naar Feddes en Kabat (in voorb.).

Op de onderzoekslocatie komen drie gewassoorten voor: gras, maïs en elzenbroekbos (zie ook fig. 2). Op basis van deze gebiedsspecifieke informatie is aan iedere sectie van de raaien een gewastype toegekend. De ontwikkelingsstadia van deze gewassen en de daaraan verbonden parameterwaarden zijn betrokken uit de literatuur (Hooghart en Lablans, 1988). In aanhangsel 14 worden de waarden van locatiegebonden parameters gegeven die betrekking hebben op het gewas. Dit zijn de bewortelbare diepte en dikte van de wortelzone.

Voor bos is afgeweken van de beschreven benadering om met de gewasfactoren de totale potentiële verdamping van het gewas te bepalen. De reden hiervoor is dat bij bos de interceptie relatief groot is. In de huidige versie van SWAP is de berekening van de interceptie gericht op gewassen als gras en maïs. Bij het toepassen van dit concept op bos valt de interceptieterm te laag uit. De totale potentiële verdamping van bos is relatief groot. Om de totale potentiële verdamping van bos te berekenen volgens de Makkink-methode moeten grote gewasfactoren worden ingevoerd. Met het berekenen van een relatief geringe interceptieterm, zoals met de huidige concepten gebeurt, komt een relatief groot deel van de neerslag op de bodem terecht. Hierdoor is er een vergrote kans op oppervlakkige afstroming. Tevens wordt de transpiratieterm onrealistisch hoog ter compensatie van de te geringe interceptieterm. De transpiratieterm is van groot belang voor de opname van nutriënten door de bomen. Hierdoor kan deze nutriënten-onttrekkingsterm worden overschat.

Om dit te voorkomen is voor bos het bepalen van de verschillende verdampingstermen aangepast. In deze veranderde aanpak is een scheiding aangebracht tussen de interceptieterm en de gecombineerde evaporatie- en transpiratieterm. In de literatuur (Moors et al., 1994; Dolman en Moors, 1994) worden verschillende concepten gegeven voor het berekenen van de interceptieterm. Binnen dit onderzoek was het niet mogelijk om deze concepten in SWAP in te bouwen. Er is gekozen voor een eenvoudige relatie tussen neerslag en interceptie. De interceptieterm is berekend als vast percentage van de neerslag. Voor het elzenbroekbos is een waarde van 20% gebruikt (pers. med. Dolman). De evaporatie en transpiratie zijn nog berekend met Makkink. Hiervoor zijn de gewasfactoren aangepast naar Moors et al. (1994).

Oppervlakkige afstroming

SWAP berekent oppervlakkige afstroming als de maximale berging aan maaiveld is overschreden. De gebruikte waarden voor de maximale berging aan maaiveld zijn gegeven in aanhangsel 14. De mogelijkheid om water aan het maaiveld te bergen is op de helling zeer gering. Daarom is voor de helling een maximale berging van 0,001 m gehanteerd. In de laaggelegen delen is de bergingsmogelijkheid meestal groter als gevolg van een vlakkere ligging. Hier zijn op basis van veldwaarneming hogere waarden voor de maximale berging ingeschat. In de bufferstrook is bij peilbuis 6 in raai 2 een extreem hoge waarden gebruikt, omdat hier een depressie aanwezig is (zie aanhangsel 20, fig. 20.7). De drempel van 0,05 m is gebaseerd op hoogtemetingen van het maaiveld. In raai 4 is vanaf peilbuis 3 richting beek onder natte omstandigheden een toenemende plasvorming in het veld waargenomen. Op deze waarneming zijn de in de richting van de beek toenemende waarden van de maximale berging gebaseerd.

De oppervlakkige afstroming die voor een kolom is berekend wordt doorgegeven aan de volgende kolom als inkomende oppervlakkige afstroming (zie 4.2 onder stap 4). De inkomende afstroming is in de eerste kolom van een raai nul en kan in volgende kolommen van een raai een waarde hebben. De afstroming die in een kolom is berekend, is per twintig minuten weggeschreven. Deze afstroming komt met een vertraging van twintig minuten in de benedenstroomse kolom terecht. Een hoeveelheid afstroming die bijvoorbeeld in kolom i tussen 11.20 en 11.40 uur op een bepaalde dag is berekend, wordt tussen 11.40 en 12.00 uur als inkomende oppervlakkige afstroming in kolom i+1

ingevoerd als een extra neerslagterm. Hiertoe is de inkomende oppervlakkige afstroming opgeteld bij het deel van de neerslag dat de bodem bereikt (neerslag na aftrek van de interceptie door het gewas).

4.3.2.2 Onderrandvoorwaarde

De onderrandvoorwaarde is evenals de bovenrandvoorwaarde een in de tijd fluctuerende randvoorwaarde. Deze onderrandvoorwaarde wordt beschreven met een vergelijking die de relatie aangeeft tussen de flux over de onderrand en de grondwaterstand. De variabele in deze vergelijking is de grondwaterstand. Deze fluctueert in de tijd onder invloed van de boven- en onderrandvoorwaarde(n) en de interne processen. Verder wordt de vergelijking aangestuurd door twee constanten. Deze bepalen de eigenschap van een gebied om water af te voeren door de verzadigde zone afhankelijk van de grondwaterstand (zie 4.2 onder stap 3). Deze eigenschap, en dus de waarden van beide constanten zijn gebiedsspecifiek. De constanten hebben niet een directe fysische betekenis en zijn daarmee niet direct te meten. Ze zijn daarom voor elke kolom bepaald in een calibratieproces (zie 4.4).

Om de hydrologie en de laterale grondwaterstroming van de verschillende secties in de raaien correct te modelleren, is het nodig twee verschillende relaties voor de onderrandvoorwaarde te gebruiken (zie 4.2 onder stap 3):
- een exponentiële relatie die onder alle omstandigheden een uitgaande flux over de onderrand geeft. Deze relatie is gebruikt voor de secties op de helling;
- een lineaire relatie die bij hoge grondwaterstanden een uitgaande en bij lage grondwaterstanden een inkomende flux over de onderrand geeft. Deze relatie is gebruikt voor de secties onderaan de helling in de nabijheid van de beek en in de bufferstrook.

De exponentiële relatie luidt:

$$q_o = \alpha_1 \cdot e^{\beta_1 \cdot gws} \qquad (6)$$

met:
q_o = flux over de onderrand ($m.d^{-1}$);
gws = grondwaterstand ten opzichte van maaiveld (m);
α_1 = constante ($m.d^{-1}$);
β_1 = constante (m^{-1}).

De constanten zijn beide negatief in de exponentiële relatie. De onderrandflux heeft daardoor altijd een negatieve waarde: de flux is altijd uitgaand. De absolute waarde van de flux is het grootst als de grondwaterstand aan maaiveld staat ($q_o = \alpha_1$) en neemt af naarmate de grondwaterstand dieper wordt.

De lineaire relatie is:

$$q_o = \alpha_2 + \beta_2 \cdot gws \qquad (7)$$

met:
α_2 = constante ($m.d^{-1}$);
β_2 = constante (d^{-1}).

In deze relatie heeft de α_2-constante een negatieve waarde en de β_2-constante een positieve waarde. De relatie geeft hierdoor een uitgaande flux (q_o negatief) bij ondiepe grondwaterstanden en een inkomende flux (q_o positief) bij diepe grondwaterstanden. De flux is gelijk aan 0 bij een grondwaterstand van $-\alpha_2/\beta_2$ m - mv.

De waarden voor de constanten α_1 en β_1, en α_2 en β_2 zijn verkregen door calibratie. In 4.4 worden de gecalibreerde waarden gegeven.

4.4 Calibratie

Door calibratie zijn in de modellering voor verschillende modelparameters waarden vastgesteld. Hierbij zijn onzekere waarden bijgesteld en onbekende waarden ingevuld. De calibratie is geschied op basis van het vergelijken van gemeten met berekende waarden van verschillende grootheden. Deze grootheden waren de grondwaterstand en de afstroming. De calibratie is uitgevoerd voor de periode 10 januari 1994 tot en met 25 april 1995. De calibratie bestond uit twee stappen.

In de eerst stap zijn onzekere bodemfysische parameters bijgesteld. Uit de initiële berekeningen met SWAP bleek dat met de bodemfysische invoer die op dat moment werd gebruikt niet de beoogde resultaten konden worden bereikt. De fluctuaties in de gesimuleerde grondwaterstanden waren structureel kleiner dan de fluctuaties in de gemeten grondwaterstanden, en het aantal momenten dat afstroming werd berekend, was te klein. Door calibratie zijn aangepaste waarden gevonden voor de bepalende bodemfysische parameters: de waterretentiekarakteristieken en de verzadigde doorlatendheid van de bovengrond (4.4.1).

In de tweede stap van het calibratieproces zijn waarden verkregen voor onbekende parameterwaarden (4.4.2). De onbekende waarden waren de constanten in de vergelijking die de onderrandvoorwaarde in het model beschrijft.

4.4.1 Bodemfysische parameters

4.4.1.1 Methode

Waterretentiekarakteristieken
Bij de modellering deed zich aanvankelijk het probleem voor dat de fluctuaties van de grondwaterstanden in het het gemeten verloop groter waren dan die in het berekende verloop. Dit is in andere studies ook gevonden (o.a. Van Walsum, 1994). Van Walsum (1994) geeft een verklaring voor dit fenomeen op basis van de techniek die wordt toegepast bij het bepalen van de waterretentiekarakteristieken in het laboratorium.

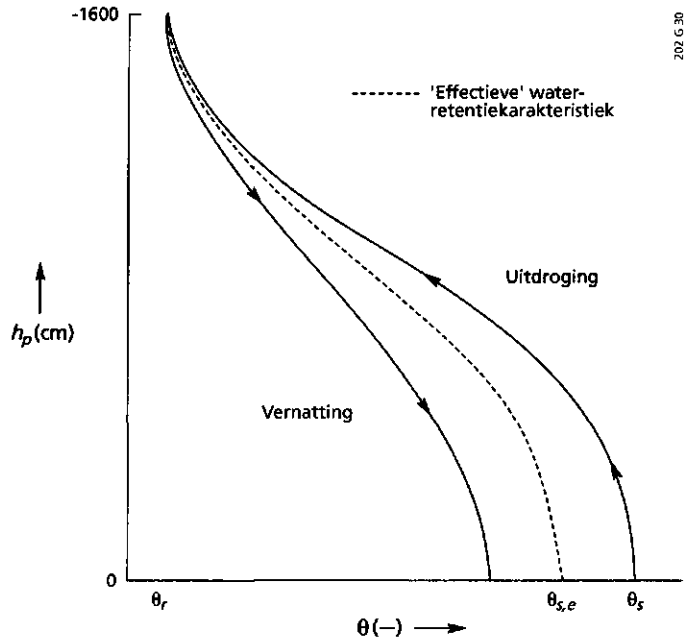


Fig. 7 Uitdrogings- en vernattings-waterretentiekarakteristiek van een grondmonster, en de daaruit samengestelde 'effectieve' waterretentiekarakteristiek. Verklaring van de symbolen: h_p = drukhoogte; θ = volumetrisch vochtgehalte; θ_r = residuele vochtgehalte; θ_s = verzadigde vochtgehalte; $\theta_{s,e}$ = effectieve verzadigde vochtgehalte (naar: van Walsum, 1994).

De waterretentiekarakteristieken zoals bepaald aan de bodemmonsters, zijn gebaseerd op uitdrogingsproeven. Er waren geen gegevens beschikbaar over het gedrag onder omstandigheden waarin vernatting plaatsvindt. Door hysteresiseffecten kan het vochtgehalte bij een bepaalde drukhoogte bij vernatting aanzienlijk lager zijn dan bij uitdroging, zelfs bij atmosferische druk (onderdruk van 0 atm) en een lichte overdruk (zie fig. 7). In het laatstgenoemde geval kan lucht worden ingesloten (Van Walsum, 1994). Dit fenomeen kan een rol spelen bij het verklaren van de grotere fluctuaties in de gemeten grondwaterstanden ten opzichte van de berekende. Door de ingesloten lucht reageert de gemeten grondwaterstand heftiger op infiltrerend neerslagwater.

Omdat in dit onderzoek geen gegevens beschikbaar waren over waterretentiekarakteristieken gebaseerd op vernattingsproeven, is de volgende werkwijze toegepast (naar Van Walsum, 1994). De vochtgehalten van de gemeten wateretentiekarakteristiek zijn vermenigvuldigd met een bergingsfactor F waarbij het residuele vochtgehalte gelijk is gehouden, waardoor een 'effectieve' waterretentiekarakteristiek is verkregen die min of meer het gemiddelde representeert van de uitdrogings- en de vernattings-karakteristiek (vergelijking (8) en fig. 7). De bergingsfactor F is hierbij door calibratie vastgesteld.

$$\theta_{eff}(h) = \theta_r + F \cdot (\theta_{ud}(h) - \theta_r) \qquad (8)$$

met:
θ_{eff} = vochtgehalte van effectieve waterretentiekarakteristiek ($m^3.m^{-3}$);

θ_{ud} = vochtgehalte van gemeten uitdrogings-waterretentiekarakteristiek ($m^3.m^{-3}$);
θ_r = residuele vochtgehalte ($m^3.m^{-3}$);
h = drukhoogte (m);
F = bergingsfactor (-).

Verzadigde doorlatendheid bovengrond

Het berekenen van afstroming was een belangrijk aspect van de modellering. De infiltratiecapaciteit van de bovengrond is een cruciale factor bij het optreden van afstroming. Door vertrapping, berijding en verslemping wordt de infiltratiecapaciteit gereduceerd. De infiltratiecapaciteit is geen invoerparameter van SWAP, maar wordt in het model berekend uit de verzadigde doorlatendheid van de toplaag, die wel een invoerparameter is. Door de verzadigde doorlatendheid van de toplaag van 0,10 m dikte te reduceren, wordt indirect het effect van een gereduceerde infiltratiecapaciteit in de berekeningen meegenomen.

Om de effecten van berijden, vertrappen en verslempen beter in de modellering te betrekken, zijn de orginele schattingen van de verzadigde doorlatendheid van de toplaag gereduceerd. Hierbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:
- op de intensief gebruikte delen van de onderzoekslocatie is een groot effect te verwachten van berijden, vertrappen en verslempen. Bij maïs gaat het hierbij vooral om berijden en verslempen, bij gras om vertrappen en berijden.;
- op de extensief gebruikte delen vindt vertrappen en berijden in mindere mate plaats, en is het effect kleiner dan op de intensief gebruikte delen;
- in het elzenbroekbos (bufferstrook) vindt vertrappen weinig of niet plaats. Hier is dus weinig effect op de infiltratiecapaciteit te verwachten.

Voor de reductie van de verzadigde doorlatendheid van de toplaag van de intensief gebruikte delen is gebruik gemaakt van de metingen van de momenten met oppervlakkige afstroming. De meetopstelling voor de oppervlakkige afstroming bevond zich onderaan de steilrand bij raai 3 en gaf daarmee informatie over het optreden van afstroming vanaf het intensief gebruikte maïsperceel (zie 3.2.4.1). De metingen waren slechts indicatief voor de momenten met afstroming, niet voor de hoeveelheden afstromend water (zie 3.2.4.2).

De verzadigde doorlatendheid van de toplaag van de secties in het maïsperceel (raai 2, sectie 1 t/m 5, en raai 3, alle secties) is aangepast in een (beperkte) 'trial and error'-procedure, waarbij de berekende momenten met afstroming zijn vergeleken met de gemeten. De op deze wijze bepaalde reductie van de verzadigde doorlatendheid is eveneens gebruikt voor raai 4, het intensieve grasland.

Voor het extensieve grasland (raai 1) waren geen metingen van het optreden van afstroming beschikbaar. Er is vanuit gegaan dat de infiltratiecapaciteit in veel mindere mate is beïnvloed door vertrapping en berijding dan bij de intensief gebruikte percelen. Voor raai 1 is de reductie daarom geschat op ⅔ van de reductie van de intensieve percelen. Voor het elzenbroekbos is geen reductie toegepast, omdat hier geen effecten van vertrapping, berijding en verslemping zijn.

4.4.1.2 Resultaten

Waterretentiekarakteristieken
In de literatuur worden verschillende waarden voor de bergingsfactor *F* gegeven. Hoge waarden (>1) komen voor bij gronden waarin scheuren zitten of in veengronden met grote macroporiën; lage waarden (<1) op plaatsen waar het hysteresiseffect meespeelt in de gebruikte bodemfysische schematisering (Knotters en Van Walsum, 1994). In dit onderzoek is hysteresis van belang en zijn de vochtgehalten verkleind. Op basis van gemeten en gesimuleerde grondwaterstanden is door 'trial and error' een bergingsfactor *F* van 0,8 vastgesteld. Deze factor is voor alle bodemfysische bouwstenen toegepast. Met de gecorrigeerde waterretentiekarakteristieken volgen de gesimuleerde grondwaterstanden beter de fluctuaties en de extremen van de gemeten grondwaterstanden.

Verzadigde doorlatendheid bovengrond
Bij de raaien 2 (sectie 1 t/m 5) en 3 wordt met de orginele verzadigde doorlatendheid van de bovengrond op één of twee momenten afstroming berekend. Dit zijn momenten dat de grondwaterstand aan maaiveld staat. Indien de doorlatendheid van de toplaag wordt gereduceerd tot 10% van de orginele doorlatendheid wordt op teveel momenten afstroming berekend. Een reductie tot 50% geeft te weinig momenten met afstroming. Bij een percentage van 25% van de orginele doorlatendheid komt het berekende aantal momenten met afstroming in grote lijnen overeen met het gemeten aantal. Voor de intensief gebruikte percelen is de verzadigde doorlatendheid van de toplaag daarom gereduceerd tot 25% van de orginele waarde.

Samenvattend is de verzadigde doorlatendheid van de bovengrond voor de vier raaien als volgt gereduceerd (zie aanhangsel 13):
- tot 25% van de orginele geschatte doorlatendheid (reductie van 75%): de intensief gebruikte percelen. Dit zijn het maïsperceel van raai 2 (sectie 1 t/m 5) en raai 3, en het intensief gebruikt grasland van raai 4. De gebruikte waarden bedragen 0,09 $m.d^{-1}$;
- tot 50% van de orginele geschatte doorlatendheid (reductie van 50%): het extensief gebruikte grasland van raai 1 (sectie 1 t/m 3 en 5). De gebruikte waarden bedragen 0,18 $m.d^{-1}$;
- géén reductie: raai 1, sectie 4 (voormalige houtwal) en de bufferstrook van raai 2 (sectie 6 t/m 8). De gebruikte waarden bedragen 0,35 $m.d^{-1}$ respectievelijk 0,18 $m.d^{-1}$.

In 4.4.2.2 wordt de definitieve berekende afstroming vergeleken met de momenten waarop afstroming is gemeten.

4.4.2 Onderrandvoorwaarde

De calibratie van de onderrandvoorwaarde vormde de eigenlijke calibratie van SWAP voor elke kolom. Waarden voor de twee constanten die de relatie tussen de grondwaterstand en de onderrandflux vastleggen, ontbraken omdat ze niet direct uit metingen zijn af te leiden (zie 4.3.2.2). Via calibratie is dat wel mogelijk door de set waarden te

zoeken waarmee het model het best de gemeten grondwaterstanden benadert, gegeven dat correcte waarden voor de bovenrandvoorwaarden zijn gebruikt.

De basis voor de calibratie vormden de modellen met de aangepaste waterretentiekarakteristieken en de aangepaste doorlatendheid van de bovengrond (zie 4.4.1). Met deze aangepaste modellen is naar de optimale waarden voor de constanten gezocht die de onderrand vastleggen. Eerst wordt ingegaan op de toegepaste methode (4.4.2.1). Vervolgens worden de resultaten besproken in termen van de verkregen waarden voor de constanten, de vergelijking van de berekende met de gemeten grondwaterstanden en de bijbehorende statistische criteria, en de vergelijking van de berekende met de gemeten momenten met afstroming (4.4.2.2). De resulterende hydrologie in termen van de waterbalansen en de naar de Mosbeek af- en uitstromende debieten wordt besproken in 4.5.1.

4.4.2.1 Methode

Eerst wordt de methode van de calibratie van SWAP aan de grondwaterstanden behandeld. Vervolgens wordt beschreven hoe de berekende afstroming is getoetst aan de gemeten afstroming.

Calibratie aan grondwaterstanden
Voor de calibratie van de onderrandvoorwaarde zijn initiële waarden voor de constanten nodig. Om deze te verkrijgen, is voor verschillende representatieve kolommen de hydrologie berekend met de gemeten grondwaterstanden als vaste potentiaalrandvoorwaarde aan de onderrand. Uit de waterbalansen zijn door SWAP de fluxtermen aan de onderrand berekend. De berekende onderrandfluxen zijn uitgezet tegen de gemeten grondwaterstanden. Uit deze puntenwolk zijn met regressieanalyse waarden verkregen voor de constanten van de relatie tussen grondwaterstand en onderrandflux.

Deze excercitie is gebaseerd op gemeten grondwaterstanden met een meetdichtheid van maximaal één meting per week. Voor de ontbrekende grondwaterstanden interpoleert SWAP tussen de metingen. Hierdoor ontstaat een verloop van de grondwaterstand dat sterk afwijkt van het werkelijke, omdat de dynamiek tussen de meetmomenten verloren is gegaan (zie voor deze dynamiek de continue registratie van de grondwaterstand in aanhangsel 7). Uit dit genivelleerde grondwaterstands-verloop berekent SWAP de onderrandflux. Deze onderrandflux vormt daarmee slechts een globale afspiegeling van de werkelijke flux en de bijbehorende waarden voor de twee constanten zijn niet de optimale waarden, maar vormen een eerste benadering. Deze waarden zijn daarom als startwaarden gebruikt bij de calibratie. Voor elke kolom zijn de startwaarden van een representatieve kolom gebruikt.

Voor een eerste optimalisatie van de constanten is gebruik gemaakt van het optimalisatie-instrumentarium PEST (zie 4.1.2). Numerieke problemen met SWAP hadden tot gevolg dat de automatische optimalisatieprocedure met PEST niet altijd even goed verliep. Voor de fine-tuning is daarom overgestapt op 'handmatig werken'. Hierbij is gebruik gemaakt van de ervaring die is opgedaan met PEST.

De 'handmatige' calibratie is uitgevoerd door via 'trial and error', waarbij de waarden van de twee constanten steeds iets zijn aangepast, de verschillen tussen de berekende en de gemeten grondwaterstanden te minimaliseren. Bij de beoordeling van de verschillen is gebruik gemaakt van zowel statistische toetsen als een grafische presentatie van de berekende grondwaterstanden. De statistische toetsen zijn uitgevoerd op de berekende en de gemeten grondwaterstanden voor de meetmomenten. De grafische beoordeling is gedaan door het berekende verloop van de grondwaterstand te vergelijken met de individuele metingen.

De statistische criteria die zijn gebruikt voor het beoordelen van de calibratieresultaten zijn de root mean square error (RMSE), de coefficient of determination (CD) en de coefficient of residual mass (CRM) (aanhangsel 15). De RMSE is als primair statistisch criterium gebruikt bij de calibratie. Als er nog slechts relatief kleine verbeteringen in de RMSE optraden, is voor het statistische deel van de optimalisering op basis van de CD en de CRM de meest optimale set gekozen.

Bij de grafische beoordeling is gekeken of de gemiddelde hoogte van de berekende en de gemeten grondwaterstanden overeenkwam en of de fluctuaties van de berekende grondwaterstanden de fluctuaties van de metingen volgden. Tevens is beoordeeld of het bereik van het berekende verloop overeenkwam met het bereik van de gemeten grondwaterstanden.

Bij alle modelberekeningen, dus ook bij de calibratie, is met het oog op het doorgeven van de berekende afstroming steeds met de eerste kolom in een raai begonnen (zie 4.2 onder stap 4). Deze eerste kolom representeert de sectie die grenst aan de waterscheiding. De afstroming die na calibratie voor deze kolom is berekend, is doorgegeven aan de tweede kolom. Met deze inkomende afstroming als invoer is de tweede kolom gecalibreerd. Op deze manier is de hele raai kolom voor kolom gecalibreerd.

Toetsing oppervlakkige afstroming

Na de calibratie is de berekende afstroming getoetst aan de gemeten. Omdat de metingen alleen uitsluitsel geven over de momenten met afstroming en niet over de hoeveelheden afstromend water, is deze toetsing beperkt gebleven tot een vergelijking van de momenten waarvoor afstroming is berekend met de momenten waarop in het veld afstroming is gemeten. De bespreking van deze vergelijking blijft beperkt tot de duidelijke stijgingen van de vatwaterstand, omdat niet elke stijging van de waterstand in het meetvat is toe te schrijven aan het optreden van afstroming (zie 3.2.4.2).

De meetopstelling voor de afstroming bevond zich onderaan de steilrand bij raai 3. De gemeten momenten met afstroming zijn daarom vergeleken met de berekende van raai 3. Tevens zijn de gemeten momenten vergeleken met de berekende voor de helling van raai 2 (kolom 1 t/m 5), omdat deze helling in hetzelfde maïsperceel ligt en tevens aan dezelfde steilrand grenst. In het veld is het optreden van erosie waargenomen, waarbij het afstromende water vanuit raai 2 naar de meetgoot stroomde.

4.4.2.2 Resultaten

De resultaten die hier worden besproken, zijn de berekeningsresultaten van de volledig gecalibreerde modellen. De modellen die het resultaat waren van de aanpassing van de waterretentiekarakteristieken en de verzadigde doorlatendheid van de bovenlaag vormden een tussenstap naar de uiteindelijke calibratie van de onbekende constanten van de onderrandvoorwaarde. Eerst worden de resultaten van de calibratie aan de grondwaterstanden besproken. Daarna wordt de toesting van de berekende afstroming behandeld.

Calibratie aan grondwaterstanden

In aanhangsel 16 zijn de gecalibreerde waarden van de constanten gegeven. Hier is tevens aangegeven welke relatie als onderrandvoorwaarde is gebruikt. Verder bevat dit aanhangsel de resultaten van de statistische toetsen in de vorm van waarden voor de gebruikte statistische criteria. Aanhangsel 17 bevat voor alle kolommen een grafische vergelijking van het berekende grondwaterstandsverloop met de metingen van de grondwaterstand.

Bij de meeste kolommen volgt het berekende grondwaterstandsverloop redelijk goed het verloop van de meetwaarden. Omdat de bovenrandvoorwaarden op metingen zijn gebaseerd en dus in principe correct zijn, betekent dit dat de onbekende onderrandvoorwaarde en daarmee de waterbalans van de kolommen realistisch met de gecalibreerde modellen worden gesimuleerd.

De waarden van de statistische criteria zijn niet altijd optimaal. De verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstanden zijn voor sommige momenten relatief groot. Er zijn verschillende verklaringen, algemene en locatiespecifieke, te geven voor de niet-optimale waarden van de statistische criteria.

Een algemene verklaring is dat het hydrologische systeem van de onderzoekslocatie zeer dynamisch is. Die dynamiek komt voort uit het zeer dunne doorstroomde pakket en de relatief grote hoeveelheden water die door dit pakket worden afgevoerd. Er kan niet worden verwacht dat dit zeer dynamische systeem tot in detail goed is te beschrijven met een algemeen, continu verband tussen de grondwaterstand en de onderrandflux, dat voor elke kolom is verkregen door calibratie, onafhankelijk van de hydrologie van de omgeving. In werkelijkheid wordt dit verband beïnvloed door de hydrologie van de boven- en benedenstroomse kolommen die weer een eigen dynamiek heeft, en veroorzaakt het geconstateerde optreden van preferente laterale stroming discontinuïteiten in dit verband (zie aanhangsel 12 onder stap 3).

Voor de doelstelling van het onderzoek voldoet een algemeen verband. Voor het onderzoek is het van belang dat de modellen de waterbalans en de af- en uitstroming naar de Mosbeek afhankelijk van neerslag en verdamping realistisch simuleren. Hierbij gaat het om het algemene beeld van de hydrologische dynamiek en niet om elk gebiedsspecifiek detail dat afwijkt van het algemene beeld. Temeer omdat het een scenariostudie betreft waarin effecten van ingrepen worden vergeleken met het doel algemene uitspraken te doen.

Omdat de gemeten grondwaterstanden gemiddeld gezien goed worden benaderd door de berekende, beschrijven de gecalibreerde relaties het algemene verband tussen afvoer en grondwaterstand realistisch voor de calibratie-periode (10-1-1994 tot 25-4-1995). Hierbij is de natte periode beter vertegenwoordigd in de relaties dan de droge, enerzijds omdat de calibratieperiode negen hydrologische wintermaanden tegen zeven hydrologische zomermaanden bevat, anderzijds doordat het jaar 1995 een relatief zeer nat jaar was (1012 mm neerslag). De relaties zijn daarom in principe beter in staat de afvoer onder natte omstandigheden te beschrijven dan die onder droge omstandigheden. Dit is van wezenlijk belang voor het onderzoek, omdat de vraagstelling van het onderzoek zich richtte op de water- en stoffenbelasting van de Mosbeek die voornamelijk optreedt in de afvoerperiode.

Dat de dynamiek in de grondwaterafvoer in principe kan worden gesimuleerd met de gecalibreerde relaties is te zien in aanhangsel 17, waarin het gesimuleerde verloop van de onderrandflux grafisch is weergegeven. Dit verloop vertoont pieken bij pieken in de grondwaterstand. Omdat geen afvoermetingen zijn gedaan, kan niet worden aangegeven inhoeverre dit berekende verloop overeenstemt met het werkelijke afvoerverloop.

Voor enkele kolommen zijn specifieke verklaringen te geven voor de relatief sterke discrepantie tussen het berekende grondwaterstandsverloop en het verloop van de gemeten grondwaterstanden. Bij kolom 1 van raai 2 valt op dat de gemeten grondwaterstanden in de winter van 1995 beduidend hoger zijn dan in de winter van 1994. Dit in afwijking van de andere kolommen. De oorzaak van dit afwijkende gedrag is niet duidelijk, maar kan het gevolg zijn van een veranderde referentiehoogte bij de metingen. Het model kan met één onderrandvoorwaarde voor de gehele calibratieperiode niet beide winters goed simuleren. In de winter van 1995 liggen de berekende grondwaterstanden vrijwel de gehele periode onder de gemeten. Dit leidt tot een hoge waarde van de RMSE en een negatieve waarde van de CRM.

Bij kolom 2 van raai 3 is het verschil tussen de gemeten winter- en zomergrondwaterstanden extreem groot ten opzichte van de andere kolommen. Het model is niet goed in staat dit extreme verschil met één relatie voor de onderrandflux te beschrijven. In de zomer liggen de berekende waarden duidelijk hoger dan de gemeten waarden. Desondanks heeft de CRM een negatieve waarde, wat wijst op gemiddeld lagere berekende dan gemeten grondwaterstanden.

Verder zijn de waarden van de RMSE van raai 4 aan de hoge kant. De herplaatste buizen in de lager gelegen delen van deze raai (buis 3 t/m 5) vertonen in de winter van 1994/'95 een ander gedrag dan de orginele buizen in de winter van 1993/'94: de herplaatste buizen geven een vlakker verloop van de grondwaterstand. In januari 1995 is geconstateerd dat water langs de buizen in de gaten kon stromen. Met de grote kans op plasvorming aan het maaiveld in de natte periode is het waarschijnlijk dat het water op het maaiveld langs de buizen in de boorgaten is gestroomd. Dit kan hebben geleid tot een vlakker verloop van de grondwaterstanden in 1995. Dit kan (tijdelijk) te hoge meetwaarden tot gevolg hebben gehad. De grote afwijkingen tussen berekende en gemeten grondwaterstand zouden hiervan het gevolg kunnen zijn. Omdat voor deze raai vrijwel geen metingen uit de zomerperiode beschikbaar zijn, hebben deze afwijkende meetwaarden een relatief groot aandeel in de berekening van de statistische criteria.

Als indicatie voor het bereik van de ontbrekende zomer-grondwaterstanden in raai 4 is de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) van de grondwatertrap genomen. Bij de calibratie is getracht de laagst berekende waarde van de grondwaterstand in de buurt van de GLG te laten liggen. Tevens zijn de metingen na 15 april 1995 gebruikt als indicatie voor het verloop aan het begin van het groeiseizoen.

Toetsing van de oppervlakkige afstroming

De berekende oppervlakkige afstroming is voor de vier raaien grafisch weergegeven in aanhangsel 18a. In tabel 7 en aanhangsel 18b wordt de berekende afstroming van kolom 6 van raai 3 en kolom 5 van raai 2 vergeleken met de gemeten afstroming. Beide kolommen representeren de laatste sectie bovenaan de steilrand in de respectievelijke raaien. De afstroming van sectie 3-6 vormt de totale afstroming van raai 3 naar de Mosbeek, die van sectie 2-5 de totale afstroming van raai 2 naar de bufferstrook (zie ook 4.2 onder stap 4). Tabel 7 bevat een kwalitatieve vergelijking tussen de momenten waarvoor afstroming is berekend en de momenten waarop een duidelijke stijging van de waterstand in het opvangvat is geconstateerd. In aanhangsel 18b is de berekende afstroming grafisch vergeleken met het verloop van de vatwaterstand.

Voor drie momenten waarop een stijging van de vatwaterstand is gemeten, is bij beide kolommen afstroming berekend (tabel 7). Voor twee momenten waarop een stijging van de vatwaterstand is gemeten, is bij één van beide kolommen afstroming berekend. Voor vijf momenten is wel afstroming berekend, maar zijn geen vatwaterstanden gemeten. Voor zeven momenten is wel een stijging van de vatwaterstand gemeten, maar is geen afstroming berekend. De genoemde momenten worden besproken aan de hand van aanhangsel 18a en 18b.

Het duidelijkste voorbeeld van een moment waarvoor afstroming is berekend en waarop tevens een stijging van de vatwaterstand is gemeten, is 18 november 1994 (aanhangsel 18b). Er is afstroming berekend voor een aantal uren waarop in het veld ook afstroming is gemeten. Andere dagen waarvoor bij beide kolommen afstroming is berekend en waarop de vatwaterstand stijgt, zijn 1, 2 en 19 februari 1995. De berekende afstroming voor 19 februari zijn bij beide kolommen kleiner dan 1 mm (2-5: 0,16 mm; 3-6: 0,017 mm). Toch zijn het hoeveelheden die te traceren zijn met de gebruikte meetmethode, want een afstroming van 1 mm komt voor de secties 2-5 en 3-6 overeen met een hoeveelheid afstromend water van 0,014 respectievelijk 0,021 m^3 per m beeklengte. Elke 0,015 m^3 wateraanvulling in het opvangvat veroorzaakt een stijging van de vatwaterstand met 0,10 m (zie 3.2.4.2). Uitgaande van de lengte van de meetgoot van 14 m betekent dit dat de hoeveelheid afstromend water van sectie 3-6 op 19 februari een stijging van de vatwaterstand van 0,035 m veroorzaakt.

Voor 29 december 1994 is bij kolom 3-6 wel en bij kolom 2-5 geen afstroming berekend. Bij kolom 2-4 is voor deze datum echter wel afstroming berekend (zie aanhangsel 18a). Deze afstroming infiltreert volledig in kolom 2-5. Op deze datum is wel een substantiële stijging van de vatwaterstand gemeten. Voor 27 maart 1995 is bij kolom 2-5 wel, een zeer geringe, afstroming berekend en bij kolom 3-6 niet. Op deze datum stijgt de vatwaterstand. Bij kolom 3-4 is voor deze datum echter wel afstroming berekend, die volledig infiltreert in kolom 3-5. Een verklaring hiervoor kan het optreden

Tabel 7 Kwalitatieve vergelijking van de momenten waarvoor afstroming is berekend bij de kolommen 3-6 en 2-5 met de momenten waarop een duidelijke stijging van de waterstand in het opvangvat is geregistreerd

Nr.	Datum	Berekening afstroming		Stijging	Opmerkingen
		3-6	2-5	vatwaterstand	
1	3 sep. 1994	ja	ja	-	geen metingen
2	7 sep. 1994	ja	ja	-	geen metingen
3	8 sep. 1994	ja	ja	-	geen metingen
4	14 t/m 16 sep. 1994	ja	ja	-	geen metingen
5	18 nov. 1994	ja	ja	ja	o.k.
6	25 dec. 1994	nee	nee	ja	geen neerslag gemeten en ingevoerd, grondwaterstand stijgt
7	27 dec. 1994	nee	nee	ja	gevolg van 6?
8	29 dec. 1994	ja	nee	ja	o.k.
9	8 jan. 1995	nee	nee	ja	geen neerslag gemeten en ingevoerd, grondwaterstand stijgt
10	9 en 10 jan. 1995	nee	nee	ja	mogelijk gevolg van 8
11	21 jan. 1995	nee	nee	ja	geen neerslag gemeten en ingevoerd
12	22 jan. 1995	nee	nee	ja	gevolg van 11?
13	1 en 2 feb. 1995	ja	ja	ja	o.k.
14	9 en 10 feb. 1995	ja	ja	-	geen metingen
15	19 feb. 1995	ja	ja	ja	o.k.
16	27 mrt. 1995	nee	ja	ja	o.k.
17	17 apr. 1995	nee	nee	ja	

van erosie zijn, waardoor afstromend water geconcentreerd wordt afgevoerd door erosiegeulen (zie 3.2.4.2). In de schematisering en de modellering wordt er vanuit gegaan dat de afstroming evenredig verdeeld over het gehele oppervlak plaatsvindt. Hierdoor kan het voorkomen dat in de modelberekeningen eerder en meer inkomende afstroming infiltreert dan in de werkelijkheid.

Voor 3, 7, 8 en 14 tot en met 16 september 1994, en 9 en 10 februari 1995 is ook afstroming berekend. Voor die perioden ontbreken de vatwaterstanden.

Er zijn momenten dat geen neerslag is geregistreerd, terwijl wel een stijging in de vatwaterstand is gemeten (zie 3.2.4.2). Omdat er geen aanwijzing was dat de neerslag-registratie niet heeft gewerkt, is voor deze momenten een waarde nul voor de neerslag ingevoerd. Voor deze momenten is uiteraard geen afstroming berekend. Dit geldt voor 25 december 1994, en 8 en 21 januari 1995. Op 25 december en 8 januari stijgt de grondwaterstand eveneens, terwijl geen neerslag is geregistreerd. Dit is een aanwijzing dat de neerslagregistratie mogelijk toch niet goed heeft gefunctioneerd op deze data.

Ten slotte is voor 27 december 1994, 9, 10 en 22 januari en 17 april 1995 geen afstroming berekend, terwijl op die data wel een stijging van de vatwaterstand is geregistreerd. Bij 27 december en 22 januari is dit mogelijk een gevolg van het invoeren van een waarde nul voor de neerslag van 25 december respectievelijk 21 januari. In werkelijkheid is op deze data wellicht wel neerslag gevallen. Op 27 december en 22 januari was hierdoor het profiel in werkelijkheid initieel natter dan in het model.

Samenvattend kan worden gesteld dat de momenten waarop afstroming optreedt op een redelijke wijze worden berekend door de modellen. Wanneer de gemeten en berekende momenten waarop afstroming optreedt niet overeenkomen, is dit het gevolg van het ontbreken van neerslag als invoer of kan de discrepantie worden verklaard uit het optreden van erosie in het veld.

4.4.3 Conclusie

Met de gecalibreerde modellen worden op basis van de toegepaste schematisering de waterbalansen van de kolommen en de laterale grondwaterstroming in de richting van de Mosbeek realistisch gesimuleerd. Voor de oppervlakkige afstroming geldt dit in mindere mate, omdat op de onderzoekslocatie erosie optreedt. De modellering van de afstroming vormt een globale benadering van de werkelijke afstroming.

4.5 Hydrologie van de bestaande situatie

Het doel van de modelmatige analyse van de hydrologie was het verkrijgen van inzicht in de hydrologie van de onderzoekslocatie en het aanleveren van hydrologische invoer voor het nutriëntenhuishoudingsmodel ANIMO. Daartoe zijn verschillende hydrologische berekeningen uitgevoerd met de gecalibreerde hydrologische modellen. Dit zijn in de eerste plaats berekeningen voor de bestaande situatie. In de tweede plaats zijn dat berekeningen voor enkele scenario's waarin de bestaande situatie is veranderd door een bufferstrook in te richten aan het einde van twee raaien (4.6). De bestaande situatie is voor twee verschillende jaren doorgerekend: het jaar 1994 als representatief jaar voor de meetperiode en de calibratieperiode, en een 'gemiddeld' meteorologisch jaar. De scenario's zijn doorgerekend voor het 'gemiddelde' meteorologische jaar.

In deze paragraaf worden de hydrologische berekeningen voor de bestaande situatie besproken in termen van de waterbalansen en de naar de Mosbeek uit- en afstromende debieten. Eerst wordt een aantal uitgangspunten van deze berekeningen toegelicht (4.5.1) waarna de resultaten worden besproken (4.5.2).

4.5.1 Methode

De bestaande situatie is doorgerekend voor het jaar 1994 en voor een 'gemiddeld' meteorologisch jaar. De hydrologische berekeningen voor het jaar 1994 dienden als basis voor de calibratie van ANIMO. Dit jaar was het enige volledige kalenderjaar binnen de meetperiode en de calibratieperiode van SWAP. Voor de ANIMO-berekeningen bood het voordelen om voor de rekenperiode een volledig kalenderjaar te gebruiken. De hydrologische berekeningen voor het 'gemiddelde' jaar dienden als basis voor de ANIMO-berekeningen betreffende de 'historie' en de nutriëntenscenario's waarin de bestaande situatie niet is veranderd door het aanleggen van bufferstroken (zie Kruijne, 1996).

De bestaande situatie is doorgerekend met de gecalibreerde modellen, op basis van de schematisering die is toegepast bij de calibratie. Voor het jaar 1994 is het betreffende deel van de meteorologische invoer uit de calibratieperiode genomen.

Het 'gemiddelde' meteorologisch jaar is een kunstmatig samengesteld meteorologisch jaar met een gemiddelde jaarsom voor de neerslag. Voor de uit- en afstroming is de neerslag de belangrijkste meteorologische parameter. Daarom is aangenomen dat op basis van een dergelijk jaar de gemiddelde uit- en afstroming redelijk kunnen worden benaderd.

De reden om een kunstmatig jaar samen te stellen, is dat het voor de berekening van de afstroming met SWAP van cruciaal belang is om te beschikken over neerslaggegevens op twintig-minuten-basis (zie 4.1.1). Deze gegevens waren voor de onderzoekslocatie alleen beschikbaar uit de metingen vanaf 18 juli 1994. Daarom zijn de neerslaggegevens van 1994 als basis genomen voor het creëeren van een kunstmatige neerslagreeks met een gemiddelde jaarsom. De gemiddelde jaarsom is verkregen door de neerslagen van 1994 te vermenigvuldigen met een factor die gelijk is aan de verhouding tussen de gemiddelde jaarsom en de jaarsom van 1994. De gemiddelde jaarsom is berekend uit de neerslaggegevens van een reeks van 30 jaar (1959 t/m 1988) van weerstation Twente en bedraagt 803 mm. De jaarsom van 1994 is 1012 mm, zodat de vermenigingsvuldigingsfactor 803/1012 (79%) bedraagt. Door deze vermenigvuldiging is de intensiteit van de neerslag afgenomen met dezelfde factor.

Voor de overige meteorologische invoer (de referentie-gewasverdamping) zijn de gegevens van 1994 ongewijzigd gebruikt.

4.5.2 Resultaten

De resultaten van de hydrologische berekeningen voor de bestaande situatie worden besproken in termen van de waterbalansen (4.5.2.1) en de naar de Mosbeek uit- en afstromende debieten (4.5.2.2).

4.5.2.1 Waterbalansen

Aanhangsel 19 bevat de berekende waterbalansen van de kolommen van de vier raaien voor het jaar 1994 en het 'gemiddelde' jaar. In deze balansen is de netto uitgaande onderrandflux het verschil tussen de uitgaande onderrandflux en de inkomende onderrandflux (zie 4.3.2.2). Deze netto flux representeert de netto-laterale-flux die staat voor het verschil tussen de uitgaande en de inkomende laterale flux over de zijranden van de kolom (zie 4.2 onder stap 3). De inkomende afstroming van kolom *i* is berekend uit de uitgaande afstroming van kolom *i*-1 door vermenigvuldiging met de omrekeningsfactor van kolom *i* (zie 4.2 vergelijking (3)).

In het navolgende wordt kort ingegaan op een aantal aspecten van de waterbalansen. Bij deze bespreking moet goed worden bedacht dat het gaat om berekende balanstermen uitgedrukt in mm waterschijf. De afstroming en de onderrandflux (uitstroming) krijgen relatief weinig aandacht, omdat deze termen uitgebreid worden behandeld onder 'Uit- en afstromende debieten' (4.5.2.2).

Er zijn verschillende trends te zien die voor beide jaren gelden. De balansafwijkingen zijn voor beide jaren acceptabel klein: maximaal 0,9% van de neerslagsom in 1994 en maximaal 0,7% van de neerslagsom in het 'gemiddelde' jaar. Vergelijken van de waterbalansen van de drie landgebruiksvormen gras, maïs en bos geeft een eenduidige trend te zien in de grootte van de interceptie, de actuele gewasverdamping (transpiratie), de actuele bodemverdamping (evaporatie) en het daaruit resulterende neerslagoverschot, afhankelijk van het landgebruik:

- interceptie:	bos	>>	gras	>	maïs;
- actuele transpiratie:	gras	>	bos	>	maïs;
- actuele evaporatie:	maïs	>	gras	>	bos;
- neerslagoverschot:	bos	<	gras	<	maïs.

De veel grotere interceptie en de kleinere bodemverdamping van bos zijn het gevolg van een grotere bodembedekking bij bos dan bij gras en maïs. Bij gras zijn de interceptie en de gewasverdamping groter dan bij maïs vanwege de hogere bedekkingsgraad van gras en het kortere groeiseizoen van maïs. Om dezelfde redenen is de bodemverdamping groter bij maïs dan bij gras. De gewasverdamping is bij gras groter dan bij bos vanwege het langere groeiseizoen van gras, en bij bos groter dan bij maïs door het langere groeiseizoen van bos. Het neerslagoverschot is het kleinst bij bos door de relatief grote interceptie van bos en het grootst bij maïs vanwege de lange periode dat de bodem bij deze landgebruiksvorm onbedekt is.

De netto uitgaande onderrandflux wordt voornamelijk bepaald door het neerslagoverschot. Deze flux vertoont daarom in grote lijnen dezelfde trend in de grootte afhankelijk van het landgebruik als het neerslagoverschot: de flux is bij maïs duidelijk groter dan bij gras en bos. De bijdrage aan de laterale uitstroming is daarmee het grootst bij de kolommen met maïs. Uitzondering hierop vormt kolom 2-6 met bos, waar een aanzienlijke hoeveelheid inkomende afstroming infiltreert, wat een extra aanvoer van water betekent.

Het verschil in netto uitgaande onderrandflux tussen gras en bos is niet eenduidig. Hier speelt de invloed van de netto uitgaande afstroming (uitgaande minus inkomende afstroming) een belangrijke rol. Deze is relatief groot bij de kolommen onderaan raai 4 (4-3 t/m 4-5), waardoor het deel van het neerslagoverschot dat naar het grondwater percoleert hier in belangrijke mate is gereduceerd. De netto uitgaande onderrandflux is bij deze kolommen dan ook het kleinst.

Bij het vergelijken van de waterbalansen van de twee jaren valt vooral op dat 1994 een nat jaar was: de neerslagsom van 1994 is 26% groter dan die van het 'gemiddelde' jaar. Het algemene gevolg hiervan is dat de gemiddelde grondwaterstanden in 1994 hoger zijn en alle inkomende en bijna alle uitgaande termen in 1994 groter zijn dan in het 'gemiddelde' jaar.

Bij de uitgaande termen vormen de gewasverdamping en de bodemverdamping de uitzondering. De referentie-gewasverdamping, die de relevante modelinvoer voor de verdamping vormt, is voor beide jaren gelijk. De berekende potentiële gewasverdamping en bodemverdamping zijn daardoor eveneens gelijk voor beide jaren. Het gevolg hiervan is dat de berekende actuele gewasverdamping weinig en de berekende actuele bodemverdamping nauwelijks verschilt tussen de beide jaren. Bij de relatief diepe grondwaterstanden is de actuele gewasverdamping in het algemeen hoger in 1994, omdat de droogteschade in dit natte jaar kleiner is. Bij de relatief ondiepe grondwaterstanden is het omgekeerde het geval als gevolg van grotere waterschade in het natte jaar 1994.

4.5.2.2 Uit- en afstromende debieten

Voor het onderzoek zijn vooral de uit- en afstromende hoeveelheden water van belang. Deze debieten zijn voor de vier raaien per sectie berekend uit de waterbalanstermen 'netto onderrandflux' respectievelijk 'uitgaande afstroming' (zie aanhangsel 19) en de sectielengte. De berekeningswijze is beschreven in 4.2 onder stap 4. De resultaten zijn voor 1994 en het 'gemiddelde' jaar gegeven in tabel 8 als uitgaande uitstroming en afstroming voor de secties van de vier raaien, uitgedrukt in m^3 per m beeklengte. In figuur 8 zijn voor beide jaren de berekende uitstroming en afstroming in m^3 per m beeklengte voor de vier raaien uitgezet tegen de afstand vanaf de waterscheiding (let op het verschil in schaal tussen uitstroming en afstroming).

Bij tabel 8 geldt dat de uitgaande stroming van een sectie gelijk is aan de ingaande stroming van de volgende sectie. De uitgaande stroming van de laatste sectie is gelijk aan de totale stroming vanuit en vanaf de raai naar de Mosbeek.

Uitstroming

De uitstroming neemt consequent toe met de afstand vanaf de waterscheiding (tabel 8 en fig. 8). Elke sectie draagt bij aan de uitstroming, omdat voor elke sectie geldt dat op jaarbasis een neerslagoverschot bestaat dat moet worden afgevoerd richting drainagemiddel (de Mosbeek) (zie de waterbalansen van aanhangsel 19). De uitstroming naar de beek is daardoor het grootst bij de langste raai (raai 4) en het kleinst bij de

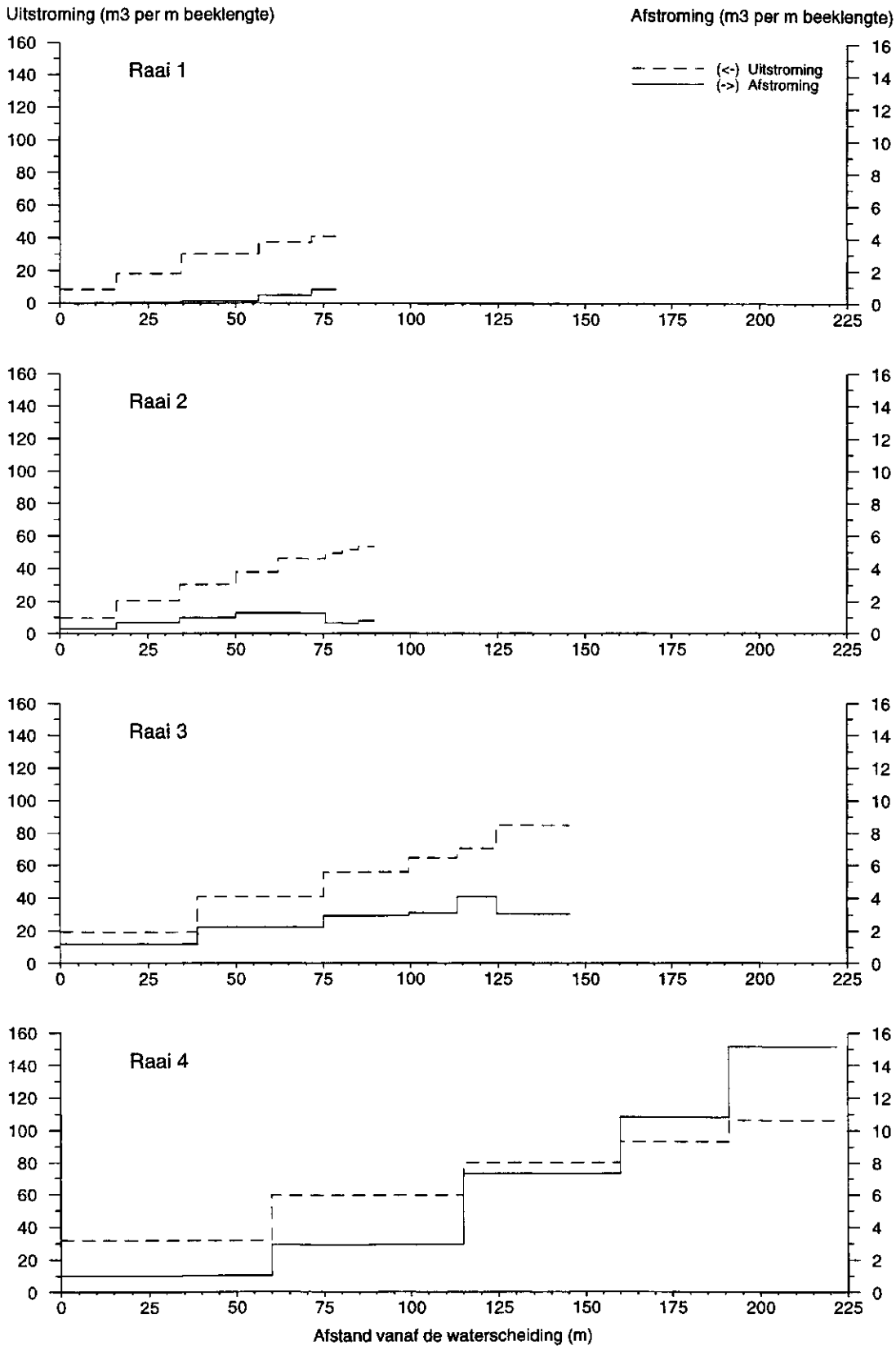


Fig. 8a Berekende uitstroming en afstroming in m^3 per m beeklengte voor de vier raaien uitgezet tegen de afstand vanaf de waterscheiding, voor 1994.
Let op het verschil in schaal voor de uitstroming en de afstroming.

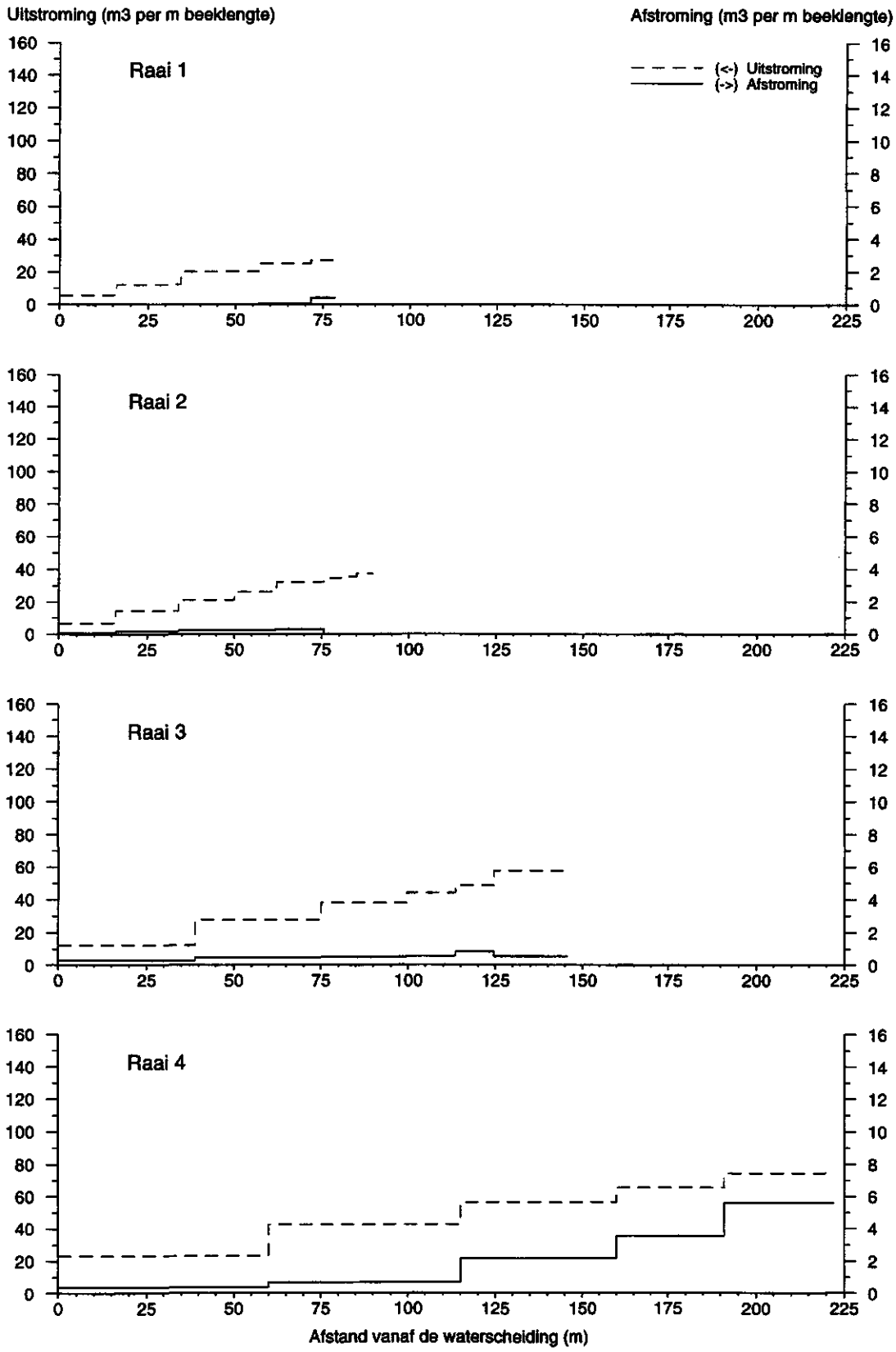


Fig. 8b Berekende uitstroming en afstroming in m^3 per m beeklengte voor de vier raaien uitgezet tegen de afstand vanaf de waterscheiding, voor het 'gemiddelde' jaar. Let op het verschil in schaal voor de uitstroming en de afstroming.

Tabel 8 Berekende uitgaande uitstroming (uitstr.) en afstroming (afstr.) voor de secties van de vier raaien in m^3 per m beeklengte voor 1994 en het 'gemiddelde' jaar

Sectie[1]	1994			Gemiddeld jaar			Lengte	
	uitstr. ($m^3.m^{-1}$)	afstr. ($m^3.m^{-1}$)		uitstr. ($m^3.m^{-1}$)	afstr. ($m^3.m^{-1}$)		sectie (m)	cum. (m)
1-1 gras ext.	8,4	0,05	(0,6)[2]	5,5	0,00	(0,0)	16,0	16,0
1-2 gras ext.	18,3	0,09	(0,5)	12,1	0,00	(0,0)	18,5	34,5
1-3 gras ext.	29,9	0,13	(0,4)	19,7	0,00	(0,0)	22,0	56,5
1-4 gras ext.	37,5	0,50	(1,3)	24,6	0,05	(0,2)	15,0	71,5
1-5 bos	**41,0**[3]	**0,86**	(2,1)	**26,6**	**0,39**	(1,4)	7,0	78,5
2-1 maïs	9,7	0,29	(2,9)	6,9	0,08	(1,1)	16,0	16,0
2-2 maïs	20,5	0,70	(3,3)	14,3	0,18	(1,2)	18,0	34,0
2-3 maïs	30,3	0,99	(3,2)	21,1	0,24	(1,1)	16,0	50,0
2-4 maïs	37,6	1,27	(3,3)	26,1	0,28	(1,0)	12,0	62,0
2-5 maïs	46,1	1,27	(2,7)	32,0	0,30	(0,9)	13,5	75,5
2-6 bos	49,3	0,65	(1,3)	34,0	0,00	(0,0)	5,0	80,5
2-7 bos	51,5	0,63	(1,2)	35,4	0,00	(0,0)	4,5	85,0
2-8 bos	**53,7**	**0,80**	(1,5)	**36,9**	**0,00**	(0,0)	4,6	89,6
3-1 gras int.	19,1	1,17	(5,8)	12,2	0,27	(2,2)	39,0	39,0
3-2 maïs	41,0	2,20	(5,1)	27,6	0,47	(1,7)	36,0	75,0
3-3 maïs	55,8	2,92	(5,0)	38,1	0,51	(1,3)	24,5	99,5
3-4 maïs	64,5	3,09	(4,6)	44,1	0,55	(1,2)	14,0	113,5
3-5 maïs	70,6	4,08	(5,5)	48,6	0,83	(1,7)	11,0	124,5
3-6 maïs	**84,8**	**3,05**	(3,5)	**57,7**	**0,53**	(0,9)	21,0	145,5
4-1 gras int.	31,9	1,02	(3,1)	23,2	0,36	(1,5)	60,0	60,0
4-2 gras int.	59,8	2,92	(4,6)	42,7	0,66	(1,5)	55,0	115,0
4-3 gras int.	79,8	7,29	(8,4)	56,5	2,16	(3,7)	45,0	160,0
4-4 gras int.	93,0	10,82	(10,4)	65,6	3,53	(5,1)	31,0	191,0
4-5 gras int.	**106,0**	**15,16**	(12,5)	**74,5**	**5,61**	(7,0)	31,0	222,0

[1] 1-2 = raai 1, sectie 2;
[2] getallen tussen haakjes geven de afstroming als % van de totale stroming (uitstroming + afstroming);
[3] vetgedrukte getallen geven de stroming naar de Mosbeek.

kortste raai (raai 1). Omdat de uitstroming verreweg de belangrijkste stromingscomponent is (87,5 tot 100% van de totale stroming), geldt dit ook voor de totale stroming naar de beek.

Om de raaien onderling te kunnen vergelijken, is in tabel 9 de uitstroming uitgedrukt per m raailengte. Deze uitdrukkingswijze geeft het gemiddelde voor elke raai in m waterschijf als het gemiddelde van de secties gewogen naar sectielengte. Bij alle vier de raaien is dit gedaan voor de gehele raai en voor een specifiek deel van de raai (deelraai). Bij de raaien 1 en 2 is de deelraai het deel tot aan de steilrand tussen sectie 1-4 en 1-5, respectievelijk 2-5 en 2-6. Het deel onder de steilrand wijkt voor beide raaien af van de rest van de raai, omdat daar bos groeit en (vooral bij raai 2) het maaiveld daar veel lager ligt. Het deel tot de steilrand is vergelijkbaar met de andere twee raaien. Bij raai 3 loopt de deelraai tot aan sectie 6; sectie 6 heeft een relatief diepe gemiddelde grondwaterstand die afwijkt van de trend in het overige deel van de raai (zie aanhangsel 19). Bij raai 4 bevat de deelraai de benedenste helft van de raai (sectie 4-3 t/m 4-5) waar de gemiddelde grondwaterstanden relatief hoog zijn.

Tabel 9 Berekende gemiddelde uitgaande uitstroming, afstroming en totale stroming voor de vier raaien in m^3 per m beeklengte per m raailengte en voor een specifiek deel (deelraai) van de vier raaien in m^3 per m beeklengte per m deelraailengte, voor 1994 en het 'gemiddelde' jaar

Raai				1994			Gemiddeld jaar		
nr.	soort	secties	gewas	uitstrom.	afstrom.	totaal	uitstrom.	afstrom.	totaal
1	deel	1-4*	gras (ext.)	0,524	0,007	0,531	0,345	0,001	0,346
	gehele	1-5	gras + bos	0,522	0,011	0,533	0,338	0,005	0,343
2	deel	1-5	maïs	0,611	0,017	0,628	0,424	0,004	0,428
	gehele	1-8	maïs + bos	0,599	0,009	0,608	0,412	0,000	0,412
3	deel	1-5	maïs	0,567	0,033	0,600	0,390	0,007	0,397
	gehele	1-6	maïs	0,583	0,021	0,604	0,397	0,004	0,401
4	gehele	1-5	gras (int.)	0,478	0,068	0,546	0,336	0,025	0,361
	deel	3-5	gras (int.)	0,432	0,114	0,546	0,297	0,047	0,344

* 1-4 = 1 t/m 4

Voor beide jaren geldt dat de gemiddelde uitstroming per m (deel)raailengte vanuit de raaien met maïs (deelraai 2 en raai 3) consequent groter is dan die vanuit de raaien met gras. Dit komt overeen met de bevinding uit de bespreking van de waterbalansen dat de bijdrage aan de uitstroming het grootst is bij de kolommen met maïs. De gemiddelde uitstroming is het geringst bij raai 4, vanwege het relatief grote deel van het neerslagoverschot dat afstroomt bij deze raai. Bij raai 1 en 2 is de gemiddelde uitstroming van de totale raai geringer dan die van de deelraai: het deel van de raai met bos heeft een reducerend effect op de uitstroming vanuit de helling (reductie: 2 resp. 3% in 1994 resp. het 'gemiddeld' jaar). De oorzaak hiervan is het relatief geringe neerslagoverschot als gevolg van de grote interceptie bij bos (zie bespreking van de waterbalansen). De bestaande bufferstrook in raai 2 heeft hierdoor een bufferende effect op de uitstroming vanuit de helling naar de Mosbeek.

Afstroming

De afstroming neemt niet consequent toe met de afstand vanaf de waterscheiding (tabel 8 en fig. 8). In enkele secties (2-6, 2-7 en 3-6) neemt de afstroming af. Hier infiltreert netto (een deel van) de afstroming vanaf de aangrenzende bovenstroomse sectie. De afstroming wordt sterk bepaald door specifieke eigenschappen van de sectie zoals de verzadigde doorlatendheid van de bovengrond, de maximale berging aan maaiveld en de grondwaterstand.

De invloed van de verzadigde doorlatendheid van de bovengrond wordt zichtbaar door de afstroming van deelraai 1 (sectie 1-1 t/m 1-4) te vergelijken met die van de overige raaien (bij raai 2 eveneens de deelraai). De gemiddelde afstroming is bij deelraai 1 veel kleiner dan bij de overige raaien (tabel 9), omdat voor raai 1 een hogere verzadigde doorlatendheid in het model is ingevoerd dan voor de overige raaien. Hierdoor infiltreert meer neerslagwater in de bodem van deze raai. Aangenomen is dat bij het extensieve grasland van raai 1 de verzadigde doorlatendheid van de bovengrond minder is gereduceerd door berijding, vertrapping en verslemping dan bij de intensieve

landgebruiksvormen van de andere raaien (zie ook 4.4.1 en aanhangsel 13). Ook bij de bufferstrook van raai 2 (sectie 2-6 t/m 2-8) is een grotere waarde voor de verzadigde doorlatendheid van de bovengrond ingevoerd dan bij de overige raaien.

De maximale berging aan maaiveld speelt vooral een rol in de bufferstrook van raai 2 en dan vooral bij sectie 2-6. De maximale berging is hier relatief zeer groot (0,05 m), omdat sectie 2-6 in een depressie ligt (zie aanhangsel 20, fig. 20.7). Water dat vanaf de helling van raai 2 (deelraai 2) afstroomt over de steilrand wordt geborgen in deze depressie, totdat de maximale berging is overschreden. Omdat een deel van het geborgen water infiltreert in de bodem, wordt de maximale berging alleen overschreden bij relatief grote hoeveelheden afstromend water onder natte omstandigheden. Hetzelfde geldt in mindere mate voor sectie 2-7 en 2-8 waar de berging ook relatief groot is (0,01 m). Hierdoor heeft de bufferstrook, en dan vooral sectie 2-6, een reducerend effect op de afstroming, ondanks de relatief hoge grondwaterstand. Dit effect wordt versterkt door de grote interceptie van neerslagwater door de bosbegroeiing waardoor relatief weinig neerslagwater de bodem bereikt. In het natte jaar 1994 wordt de hoeveelheid afstroming vanaf de helling van raai 2 met 50% gereduceerd in sectie 2-6 (tabel 8). De hoeveelheid water die in totaal afstroomt vanaf de bufferstrook naar de beek bedraagt in 1994 60% van de hoeveelheid die vanaf de helling afstroomt naar de bufferstrook. In het 'gemiddelde' jaar wordt de afstroming vanaf de helling volledig afgevangen door sectie 2-6 in de bufferstrook en bereikt geen afstroming vanaf raai 2 de beek.

De invloed van de grondwaterstand wordt duidelijk bij vergelijking van de afstroming van deelraai 2, raai 3 en raai 4. De gemiddelde grondwaterstand is bij deelraai 2 iets dieper dan bij raai 3 (zie aanhangsel 19). Bij deelraai 2 kan daardoor iets meer water worden geborgen in het profiel en zal minder snel afstroming optreden. De gemiddelde afstroming van deelraai 2 en raai 3 liggen in dezelfde orde van grootte (tabel 9). In het natte jaar 1994 is de gemiddelde afstroming bij raai 3 20% groter dan bij deelraai 2. Hier doet zich het effect gelden van de hogere grondwaterstanden bij raai 3. In het 'gemiddelde' jaar is de gemiddelde afstroming echter iets groter bij deelraai 2. Dit is het gevolg van de relatief diepe grondwaterstand in de laatste sectie van raai 3 (3-6), waardoor vooral in het drogere 'gemiddelde' jaar in deze sectie verhoudingsgewijs een groot deel van de afstroming van raai 3 infiltreert (tabel 8). Wordt deze sectie buiten de berekening van de gemiddelde afstroming van raai 3 gelaten, dan is de resulterende gemiddelde afstroming van deelraai 3 in beide jaren bijna twee keer zo groot als de gemiddelde afstroming van deelraai 2 (tabel 9).

In raai 4 zijn in de benedenste helft van de raai (sectie 4-3 t/m 4-5) de gemiddelde grondwaterstanden relatief hoog. De laatste sectie van de raai heeft een relatief zeer hoge gemiddelde grondwaterstand. De afstroming neemt hierdoor vanaf sectie 4-3 sterk toe in de richting van de beek (tabel 8 en fig. 8). Dit is de oorzaak van de relatief grote absolute en gemiddelde afstroming van deze raai (tabel 8 en 9). De grote absolute afstroming (m^3 per m beeklengte) wordt uiteraard ook bepaald door de relatief grote lengte van deze raai. De gemiddelde afstroming van de natte, benedenste helft van de raai (deelraai 4) is in beide jaren bijna twee keer zo groot als de gemiddelde afstroming van de gehele raai. De waarden van 0,114 m (1994) en 0,047 m ('gemiddelde' jaar) voor het natte deel van de raai liggen in dezelfde orde van grootte als de waarden van

60-100 mm die Meinardi en Van der Valk (1989) geven voor de afstroming vanaf natte zandgronden onder gemiddelde omstandigheden.

Ook in de laatste twee secties van raai 1 (1-4 en 1-5) zijn de gemiddelde grondwaterstanden relatief hoog, waardoor de afstroming hier relatief sterk toeneemt (tabel 8 en fig. 8). Vooral bij sectie 1-5 blijkt de invloed van de hoge grondwaterstand: ondanks de hoge verzadigde doorlatendheid van de bovengrond en de grote interceptie door de bosbegroeiing neemt hier de afstroming verhoudingsgewijs het meest toe.

De afstroming neemt, met uitzondering van die van raai 4, slechts een zeer klein aandeel in in de totale stroming naar de beek (tabel 8). In absolute termen kan het echter om niet te verwaarlozen hoeveelheden afstromend water gaan. Vooral ook omdat het gaat om piek-bijdragen aan de totale afvoer naar de beek (zie aanhangsel 18b). Voor de vraagstelling van het onderzoek is het van groot belang welke nutriëntenconcentraties het afstromende water bevat. Zijn deze concentraties relatief hoog dan kan de afspoeling van nutriënten wezenlijk bijdragen aan de totale nutriëntenbelasting van de beek en zeker aan de momentane piekbelastingen.

Totale stroming

De gemiddelde totale stroming verschilt nauwelijks tussen een raai en de bijbehorende deelraai, met uitzondering van raai 2 in beide jaren en raai 4 in het 'gemiddelde' jaar (tabel 9). In raai 2 heeft de bufferstrook een duidelijk reducerend effect op de totale stroming (reductie: 3 resp. 4% in 1994 resp. het 'gemiddeld' jaar). Dit effect is het gevolg van de reductie van de uitstroming èn de afstroming door het relatief geringe neerslagoverschot bij de bosbegroeiing, en van de reductie van de afstroming door de grote bergingscapaciteit voor water dat van de helling afstroomt.

Bij raai 4 is in het 'gemiddelde' jaar de gemiddelde totale stroming van de raai groter dan de gemiddelde totale stroming van de natte benedenste helft van de raai. De hogere gemiddelde afstroming van deze deelraai compenseert de lagere gemiddelde uitstroming niet. In 1994 is dat wel het geval. Oorzaak hiervan is het verschil in verdamping tussen de bovenste en de benedenste helft van de raai in beide jaren. In 1994 is de verdamping van de droge bovenste helft groter dan in het 'gemiddelde' jaar, omdat de droogteschade dan geringer is. De verdamping van de natte benedenste helft is in 1994 iets kleiner dan in het 'gemiddelde' jaar vanwege een iets grotere waterschade in het natte jaar (aanhangsel 19). Het gevolg hiervan is dat in het 'gemiddelde' jaar de verdamping van de benedenste helft van de raai relatief groot is ten opzichte van de gemiddelde verdamping van de gehele raai. Voor 1994 geldt dat in veel mindere mate. Hierdoor blijft in het 'gemiddelde' jaar de gemiddelde uitstroming van de benedenste helft relatief sterker achter bij die van de gehele raai dan in 1994.

Vergelijking 1994 met het 'gemiddelde' jaar

Vergelijking van de resultaten van 1994 met die van het 'gemiddelde' jaar leert dat de uit- en afstroming en daarmee de totale stroming in het natte jaar 1994 groter zijn (tabel 8). Dit is het gevolg van het grotere neerslagoverschot dat moet worden afgevoerd in

1994. De totale stroming in het 'gemiddelde' jaar bedraagt 62 tot 72% van die in 1994. Voor de uitstroming zijn deze verhoudingspercentages iets hoger (64-73%).

De afstroming blijft in het 'gemiddelde' jaar sterk achter bij die van 1994; de verhoudingspercentages liggen tussen 0 en 45%. Niet alleen in absolute zin is de afstroming in het 'gemiddelde' jaar veel geringer, maar ook in relatieve zin: de bijdrage aan de totale stroming is (veel) minder dan in 1994. In drie secties op de helling van raai 1 en in de drie secties van de bufferstrook van raai 2 is deze bijdrage zelfs 0%. De oorzaak hiervan is dat aan een aantal voorwaarden moet zijn voldaan voor afstroming optreedt. De infiltratiecapaciteit van de bovengrond en de bergingscapaciteit aan maaiveld moeten zijn overschreden. Hierdoor is het optreden van afstroming, zowel in het veld als in het model, een 'aan-uit-proces'. In een situatie met minder neerslag, zoals in het 'gemiddelde' jaar ten opzichte van 1994, wordt minder vaak aan de voorwaarden voldaan. Hierdoor zijn er minder momenten waarop afstroming optreedt. Op de momenten dat afstroming optreedt, is de hoeveelheid afstromend water geringer dan in een situatie met meer neerslag.

Het verschil in totale stroming tussen beide jaren is niet 100% gelijk aan het verschil in neerslag. Een deel van de extra neerslag van 1994 (209 mm) bereikt de bodem niet, maar verdampt op het gewas (extra interceptie; zie aanhangsel 19). Een deel van de extra neerslag die de bodem bereikt, wordt aangewend voor extra gewasverdamping op de drogere delen van de helling, een klein deel verlaat de bodem als extra bodemverdamping en een deel wordt in de bodem geborgen en veroorzaakt de hogere gemiddelde grondwaterstanden in 1994. Het overige deel vormt de extra uit- en afstroming. De verhouding tussen de extra totale uitgaande stroming en de extra neerslag is duidelijk groter bij de raaien met maïs dan bij de raaien met gras: circa 96% tegen circa 86%. De betekenis hiervan is dat de uit- en afstroming vanuit de raaien met maïs sterker reageren op veranderingen in de neerslag. De reden hiervan is dat de raaien met maïs een geringere hydrologische buffercapaciteit bezitten door het kortere groeiseizoen van maïs. Bij gras zijn de extra interceptie, de extra gewasverdamping en de extra grondwaterberging groter dan bij maïs door het langere groeiseizoen van gras. Bij bos in vergelijking met maïs geldt dat vooral voor de extra interceptie. De bufferstrook met bos heeft daardoor eveneens een bufferende werking op de stroming bij een veranderende neerslaghoeveelheid. De verhouding tussen stromingsverschil en neerslagverschil neemt af in de bufferstrook.

4.5.3 Conclusies

Van de totale waterstroming vanuit en vanaf de percelen op de onderzoekslocatie naar de Mosbeek is de uitstroming kwantitatief de belangrijkste component. De uitstroming bedraagt 87,5% (raai 4 in 1994) tot 100% (raai 2 in het'gemiddelde' jaar) van de totale stroming.

De uitstroming en daarmee de totale stroming nemen op jaarbasis consequent toe richting beek: elke sectie van de raaien draagt bij aan de uitstroming en de totale stroming, omdat op jaarbasis in elke sectie een neerslagoverschot moet worden afgevoerd.

De gemiddelde uitstroming per m raailengte is groter voor de (delen van de) raaien met maïs dan voor de raaien met gras. Oorzaak hiervan is het grotere neerslagoverschot bij maïs ten opzichte van gras door het kortere groeiseizoen van maïs.

Bij maïs reageren de uit- en afstroming vanuit de raaien sterker op veranderingen in de neerslag dan bij gras en bos. De raaien met maïs bezitten een geringere hydrologische buffercapaciteit door het kortere groeiseizoen van maïs. Door het kortere groeiseizoen zijn bij maïs de interceptie, de gewasverdamping en de grondwaterberging geringer dan bij gras en bos.

De afstroming heeft een relatief klein aandeel in de totale stroming naar de beek (0 tot 12,5%). Zowel in absolute als in relatieve zin is dit aandeel veel groter in het natte jaar 1994 dan in 'gemiddelde' jaar. De reden hiervan is dat aan een aantal voorwaarden moet zijn voldaan voor afstroming optreedt, waardoor het optreden van afstroming een 'aan-uit-proces' is. In een situatie met meer neerslag wordt vaker aan de voorwaarden voldaan èn is de hoeveelheid afstromend water groter.

In absolute termen kan de afstroming een niet te verwaarlozen bijdrage aan de afvoer naar de beek betekenen, vooral in de vorm van piekafvoeren. Voor de vraagstelling van het onderzoek is dit van groot belang. Als de afstroming gepaard gaat met hoge nutriëntenconcentraties kan deze afspoeling van nutriënten wezenlijk bijdragen aan de totale nutriëntenbelasting van de beek en zeker aan de momentane piekbelastingen.

De afstroming neemt op jaarbasis niet consequent toe richting beek: in sommige secties infiltreert netto (een deel van) de inkomende afstroming vanaf de aangrenzende bovenstroomse sectie. Bij deze secties wordt niet of in mindere mate voldaan aan de voorwaarden voor het optreden van afstroming.

De gemiddelde afstroming per m raailengte is het grootst bij het benedenste deel van de raai in het intensieve grasperceel. Oorzaak hiervan is de geringe infiltratiecapaciteit door de gemiddeld hoge grondwaterstand en de lage verzadigde doorlatendheid van de bovengrond.

De bestaande bufferstrook met bos heeft een reducerend effect op zowel de uitstroming als de afstroming naar de beek. Deze reductie is in absolute termen het grootst voor de uitstroming. Relatief gezien is de reductie het grootst voor de afstroming: een reductie van 50% in het natte jaar 1994 en van 100% in het 'gemiddelde' jaar. Voor de uitstroming bedragen deze percentages 2 respectievelijk 3%. De oorzaak hiervan is het relatief geringe neerslagoverschot door de grote interceptie bij bos, en voor de afstroming tevens het grote bergend vermogen aan maaiveld door het voorkomen van een depressie in de bufferstrook. De bufferstrook heeft hierdoor eveneens een bufferende werking op de stroming bij een veranderende neerslaghoeveelheid.

4.6 Hydrologische scenario's

Om het effect van een bufferstrook op de afspoeling en uitspoeling van nutriënten naar de Mosbeek te kunnen bepalen, is een aantal extra hydrologische berekeningen uitgevoerd. Voor deze scenarioberekeningen is de bestaande situatie van twee raaien (raai 3 en 4) veranderd door een bufferstrook in te richten aan het einde van de raaien. Deze hydrologische scenario's vormden de basis voor de nutriëntenscenario's met bufferstroken. De scenario's zijn doorgerekend voor het 'gemiddelde' jaar.

In deze paragraaf worden de berekeningen voor de hydrologische scenario's besproken in termen van de waterbalansen en de naar de Mosbeek uit- en afstromende debieten. Eerst worden een aantal uitgangspunten bij de aanpassing van de schematisering en de modelinvoer toegelicht (4.6.1). Vervolgens worden de resultaten van de hydrologische scenarioberekeningen besproken (4.6.2). Voor een beschrijving van de nutriënten-scenario's die in dit onderzoek zijn doorgerekend, wordt verwezen naar Kruijne (1996).

4.6.1 Methode

Als uitgangspunten voor de hydrologische scenarioberekeningen golden de calibratie van de vier raaien op de onderzoekslocatie en de door te rekenen nutriëntenscenario's. Aanpassing van het talud van de in te richten bufferstroken, bijvoorbeeld in de vorm van het aanbrengen van een wal langs de beek, is in dit onderzoek niet meegenomen. Ook zonder deze aanpassingen leidt het inrichten van een bufferstrook tot wijzigingen in de hydrologische omstandigheden van de betreffende locatie. Een verandering van de vegetatie heeft invloed op de hoeveelheid interceptie en de evapotranspiratie (de som van de gewasverdamping en de bodemevaporatie). Door een meer permanente begroeiing van de bufferstrook kan de berging van afstromend water verbeteren en de infiltratie toenemen. Extensivering van het gebruik kan leiden tot een verbetering van de structuur van de bovenlaag en een verbetering van de doorlatendheid. Deze processen beïnvloeden elkaar en leiden tot een gewijzigde vochthuishouding en een andere fluxverdeling in zowel de onverzadigde als de verzadigde zone.

4.6.1.1 Schematisering

De scenario's hebben betrekking op intensief gebruikt maïsland (raai 3) en intensief gebruikt grasland (raai 4). Berekeningen zijn uitgevoerd voor bufferstroken met twee gewassen (gras en bos) en twee breedten (1 en 10 m). De belangrijkste aanpassing in de schematisering betreft de indeling van de raai in secties en kolommen. Bij beide raaien is de sectie die grenst aan de beek onderverdeeld in een viertal subsecties. Hierdoor stijgt het aantal door te rekenen kolommen bij raai 3 van zes naar negen en bij raai 4 van vijf naar acht. De lengte van de laatste drie subsecties is 6, 3 en 1 m. De lengte van de eerste subsectie is gelijk aan de lengte van de sectie min 10 m (de som van de lengte van de laatste drie subsecties); bij raai 3 is dit 11 m en bij raai 4 21 m. Hierdoor is de totale lengte van de raai onveranderd. Afhankelijk van de door

te rekenen breedte van de bufferstrook zijn één (de laatste) of drie (de laatste drie) subsecties via de modelinvoer ingericht als bufferstrook.

De combinatie van twee buffertypen (gras en bos) en twee breedten (1 en 10 m) geeft voor elke raai 11 extra uit te voeren hydrologische berekeningen (tabel 10). In totaal zijn dus 22 extra hydrologische berekeningen uitgevoerd. Hiervoor zijn per raai vier subkolommen doorgerekend die de subsecties representeren.

Tabel 10 Extra berekeningen voor de hydrologische scenario's, uitgevoerd voor vier typen bufferstroken in raai 3 en raai 4

Nummer	Subsectie (subkolom)			Type bufferstrook	
berekening	nummer	lengte (m)	status	begroeiing	breedte (m)
1	1	11/21*	landbouwperceel	-	-
2	2	6	landbouwperceel	-	-
3	3	3	landbouwperceel	-	-
4	4	1	bufferstrook	gras	1
5	2	6	bufferstrook	gras	10
6	3	3	bufferstrook	gras	10
7	4	1	bufferstrook	gras	10
8	4	1	bufferstrook	bos	1
9	2	6	bufferstrook	bos	10
10	3	3	bufferstrook	bos	10
11	4	1	bufferstrook	bos	10

* raai 3/raai 4

4.6.1.2 Invoer

De berekeningen voor de subsecties zijn uitgevoerd met de gecalibreerde onderrandvoorwaarde van de betreffende sectie, ongeacht het type bufferstrook (gras of bos). Omdat de nieuw ingerichte bufferstroken een denkbeeldige situatie vormden, waren geen gegevens beschikbaar voor calibratie van de onderrandvoorwaarde van de subsecties. Het bezwaar hiervan is klein, aangezien het gewas geen grote invloed heeft op de relatie tussen grondwaterstand en laterale uitstroming.

De berekeningen voor de eerste subsectie zijn uitgevoerd met dezelfde invoer voor de bovenrandvoorwaarden en dezelfde modelparameters als de calibratie. Uitzondering hierop vormt de inkomende afstroming vanuit de aangrenzende bovenstroomse kolom. Deze is berekend uit de afstroming van deze aangrenzende kolom op basis van de verhouding tussen de lengte van de bijbehorende sectie en de lengte van de eerste subsectie (zie 4.2 vergelijking (3)).

Bij een bufferstrook van 1 m breedte worden de tweede en derde subsectie van 6 en 3 m breedte op dezelfde wijze behandeld als de eerste. De bufferstrook bestaat dan uit de vierde (= laatste) subsectie van 1 m. De brede bufferstrook van 10 m bevat de laatste drie subsecties van 6, 3 en 1 m.

Bij de subsecties die als bufferstrook zijn gemodelleerd, zijn voor de bovenste bodemlaag (0-0,10 m) andere bodemfysische karakteristieken gekozen dan de oorspronkelijke van de betreffende sectie. Bij een met gras begroeide bufferstrook zijn dat de karakteristieken van de bovenste laag van het perceel met extensief gebruikt grasland (raai 1). Bij een met bos begroeide bufferstrook zijn dat de karakteristieken van de bovenste laag van de bestaande bufferstrook van raai 2. Bij al deze karakteristieken bedraagt de verzadigde doorlatendheid 0,18 $m.d^{-1}$ (zie aanhangsel 13). De oorspronkelijke waarden voor beide raaien zijn 0,09 $m.d^{-1}$.

Voor de in te richten bufferstroken is een waarde voor de maximale berging aan het maaiveld ingeschat die groter is dan die van het perceel: voor de subsecties van 6, 3 en 1 m breedte is deze waarde respectievelijk 0,010, 0,020 en 0,030 m. Deze waarden zijn enigzins arbitrair, maar bevinden zich binnen het bereik van waarden die in de literatuur worden genoemd voor de gemiddelde bergingscapaciteit aan het oppervlak van landbouwpercelen met uiteenlopende hellingpercentages en gewassen (Gayle en Skaggs, 1978). De toenemende maximale berging richting de beek is gebaseerd op de aanname dat door de inrichting de helling in de bufferstrook afneemt richting de beek zodanig dat in de laatste subsectie het maaiveld enigszins de andere kant uithelt, waardoor direct langs de oever van de beek een minimale barrière van enkele cm's ontstaat. De inrichting van de laatste subsectie is identiek voor een bufferstrook van 1 en van 10 m breedte.

Voor de begroeiing van de bufferstrook is een globaal onderscheid gemaakt tussen grasachtige soorten enerzijds, en struiken of diverse boomsoorten anderzijds, zonder nadere aanduiding van de soort. Voor gras als begroeiing van de bufferstrook is een aantal van de eigenschappen van het gewas aangepast ten opzichte van de situatie op het graslandperceel. Omdat de bufferstrook niet wordt beweid en er daardoor geen vertrapping van het gras plaatsvindt, zijn een grotere gewaslengte en een betere bodembedekking aangenomen, wat in de modelinvoer wordt vertaald in een verhoging van de gewasfactor met gemiddeld 10% en in een hogere bodembedekkingsgraad. De eerste aanpassing leidt tot een grotere potentiële evapotranspiratie van het gewas. De tweede aanpassing leidt tot een stijging van de hoeveelheid interceptie en een andere verdeling van de potentiële evapotranspiratie over de potentiële gewasverdamping en potentiële evaporatie. De overige gewasparameters, die betrekking hebben op de reductie van de gewasverdamping en van de evaporatie, en op de verdeling van de gewasverdamping over de wortelzone, hebben dezelfde waarden als die voor de graspercelen (bij gras) en de bestaande bufferstrook (bij bos) zijn gebruikt.

4.6.2 Resultaten

Van de berekeningsresultaten worden de waterbalansen (4.6.2.1) en de uit- en afstromende debieten (4.6.2.2) in het kort besproken. Hierbij liggen de accenten op de onderlinge vergelijking tussen de typen bufferstroken, en op eventuele veranderingen ten opzichte van de berekeningen voor de bestaande situatie van de betreffende sectie (zie 4.5.2).

4.6.2.1 Waterbalansen

De waterbalansen van de subkolommen voor de hydrologische scenario's zijn gegeven in aanhangsel 19. Bij de subkolommen die zich buiten de bufferstrook bevinden, zijn voornamelijk wijzigingen opgetreden in de afstroming. De inkomende en uitgaande afstroming zijn sterk gestegen als gevolg van de gehanteerde grotere omrekeningsfactoren. Het verschil tussen beide termen, de eigen bijdrage van de subkolom aan de afstroming, is echter relatief weinig veranderd. De infiltratie aan het maaiveld is op het maïsperceel wat gestegen en op het grasperceel wat gedaald. De gemiddelde grondwaterstand is vrijwel gelijk gebleven.

Bij de subkolommen die binnen de bufferstroken liggen, bedraagt de interceptie op gras 71 mm en op bos 163 mm. Dit betekent een substantiële stijging ten opzichte van de 19 en 55 mm die voor het maïsperceel en het grasperceel zijn berekend.

In de situatie met een bufferstrook begroeid met gras is de berekende actuele evapotranspiratie bij beide percelen duidelijk gestegen: met circa 100 mm bij het maïsperceel en circa 120 mm op het grasperceel. De actuele evapotranspiratie in de situatie met een bufferstrook begroeid met gras is bij het maïsperceel lager dan bij het grasperceel. Dit verschil wordt veroorzaakt door een vochttekort in de bovengrond bij het maïsperceel (sectie 3-6; Gt Vad). Bij het grasperceel (sectie 4-5; Gt II) doet zich dit niet voor.

In de situatie met een bufferstrook begroeid met bos is bij beide percelen de berekende actuele evapotranspiratie ongeveer gelijk aan die van de bestaande bufferstrook met bos. Voor het grasperceel betekent dit een afname met circa 90 mm ten opzichte van de situatie zonder bufferstrook. Voor het maïsperceel is deze reductie slechts circa 20 mm. Oorzaak van deze afname is de grotere interceptie van bos.

Het gevolg van de veranderde interceptie en actuele evapotranspiratie in de situatie met een bufferstrook ten opzichte van de oorspronkelijke situatie is een reductie van het neerslagoverschot dat moet worden afgevoerd en geborgen in de bodem. Voor het maïsperceel bedraagt deze reductie circa 150 mm bij een grasbuffer en circa 120 mm bij een bosbuffer; voor het grasperceel is deze reductie circa 140 mm bij een grasbuffer en circa 20 mm bij een bosbuffer.

Bij de subkolommen die zich buiten de bufferstrook bevinden, is het verloop van de grondwaterstand in de tijd vrijwel gelijk gebleven. Bij de subsecties die binnen de bufferstrook liggen, doet zich een aantal veranderingen in het verloop van de grondwaterstand voor ten opzichte van de situatie zonder bufferstrook. In een situatie met piekafvoer is de grondwaterstand hoger, doordat de infiltratie aan het maaiveld groter is. Vooral bij het grasperceel stijgt het aantal dagen waarop het profiel geheel verzadigd is, vooral in de subkolom grenzend aan de beek.

Door een grotere gewasverdamping kan de grondwaterstand wat lager zijn. Bij het maïsperceel hangt dit deels samen met de introductie van een permanent gewas. Verder is voor dit perceel het verschil met de situatie zonder bufferstrook bij een begroeiing met gras wat groter dan bij een begroeiing met bos. Voor het grasperceel is het beeld

van de wijziging in het grondwaterstandsverloop bij een bufferstrook begroeid met gras min of meer gelijk aan dat voor het maïsperceel. In de situatie met een bufferstrook begroeid met bos blijft de grondwaterstand juist wat hoger, doordat de gewasverdamping is afgenomen.

4.6.2.2 Uit- en afstromende debieten

De verschillen in de uitstroming naar de beek tussen de situatie mèt en de situatie zonder een bufferstrook zijn voor de twee raaien minimaal. Alleen bij een grasbuffer van 10 m breedte vermindert de uitstroming bij beide raaien met iets meer dan 1%. Bij alle andere scenario's is het verschil in uitstroming minder dan 1%. Algemeen geldt dat bij een zelfde bufferbreedte de uitstroming bij de grasbuffer iets meer wordt gereduceerd dan bij de bosbuffer.

De afstroming naar de beek is in alle berekeningen voor de scenario's met een bufferstrook gedaald ten opzichte van de bestaande situatie zonder bufferstrook (tabel 11). Deze reductie is relatief gezien minder op het grasperceel dan op het maïsperceel. Dit hangt samen met de hoeveelheid afstromend water: in absolute termen bedraagt de afname van de afstroming bij het grasperceel 2,5 à 4,5 maal de afname van de afstroming bij het maïsperceel. Uit de resultaten blijkt tevens een duidelijk effect van de breedte van de bufferstrook: een bredere bufferstrook heeft een groter reducerend effect op de afstroming.

De reductie van de afstroming is het gevolg van een grotere maximale berging aan maaiveld, een grotere infiltratiecapaciteit door een grotere waarde voor de verzadigde doorlatendheid van de toplaag en een gemiddeld lagere grondwaterstand, en een verminderde neerslag op de bodem door een grotere interceptie. Het reductiepercentage verschilt weinig voor een grasbuffer en een bosbuffer. Alleen bij het grasperceel is bij een bufferstrook van 10 m breedte de reductie bij de bosbuffer duidelijk groter dan bij de grasbuffer. De oorzaak hiervan is de grotere interceptie bij bos. Bij het maïsperceel wordt dit effect gedeeltelijk teniet gedaan door de hogere gemiddelde grondwaterstand bij de bosbuffer dan bij de grasbuffer.

Omdat de uitstroming de belangrijkste stromingscomponent naar de beek is en deze relatief minder wordt gereduceerd door een bufferstrook dan de afstroming, wordt de totale stroming naar de beek relatief weinig beïnvloed door het aanleggen van een bufferstrook, ondanks de substantiële reductie van de afstroming. De verschillen in de totale stroming naar de beek tussen de situatie mèt en de situatie zonder een bufferstrook zijn voor de twee raaien minimaal. Bij de grasbuffer van 10 m breedte vermindert de totale stroming bij beide raaien met circa 2%. Bij de bosbuffer van 10 m breedte bedraagt de reductie van de totale stroming bij beide raaien circa 1%. Bij een bufferbreedte van 1 m is in alle scenario's de afname van de totale stroming minder dan 1%. Algemeen geldt dat bij een zelfde bufferbreedte de totale stroming bij de grasbuffer iets meer wordt gereduceerd dan bij de bosbuffer.

Tabel 11 Berekende afstroming in m^3 per m beeklengte vanaf een maïs- en een grasperceel voor de bestaande situatie (geen buffer) en bij vier typen bufferstroken, voor het 'gemiddelde' jaar (reductiepercentages t.o.v. bestaande situatie tussen haakjes)

Buffer-	Maïsperceel (raai 3)			Grasperceel (raai 4)		
breedte	geen buffer	buffer (Gt Vad)		geen buffer	buffer (Gt IIa)	
(m)		gras	bos		gras	bos
-	0,53	-	-	5,61	-	-
1	-	0,42 (21)	0,41 (22)	-	5,12 (9)	5,09 (9)
10	-	0,17 (68)	0,17 (68)	-	4,75 (15)	4,47 (20)

Voor de vraagstelling van het onderzoek kan de hydrologische buffering in de vorm van de reductie van de afstroming wel van wezenlijk belang zijn. Als de afstroming gepaard gaat met hoge nutriëntenconcentraties in het afstromende water (afspoelende meststoffen) kan het (gedeeltelijk) afvangen van deze afstroming een substantiële vermindering van de nutriëntenbelasting van de beek en zeker van de momentane piekbelastingen betekenen.

Voor het maïsperceel heeft de bosbufferstrook van 10 m breedte in raai 3 relatief gezien een geringer reducerend effect op de uitstroming en afstroming dan de bestaande bosbufferstrook in raai 2 (tabel 12). De oorzaken hiervan zijn in de eerste plaats het verschil in breedte van beide bufferstroken en het verschil in lengte van het landbouwdeel van beide raaien. In raai 2 bedraagt de breedte van de bufferstrook 19% van de lengte van de landbouwraai, in raai 3 is dit percentage slechts 7. In raai 2 worden daardoor de geringere hoeveelheden uit- en afstroming relatief sterker afgevangen door de bredere bufferstrook.

Bij de uitstroming speelt daarnaast het verschil in ligging ten opzichte van de beek een belangrijke rol. De bestaande bufferstrook ligt laag in een vrijwel vlakke strook langs de beek, onderaan de steilrand. De nieuwe bufferstrook van raai 3 ligt hoog boven de beek, bovenaan de steilrand op de helling. Door de lagere en vlakkere ligging is de gradiënt van het grondwatervlak veel geringer in de bestaande bufferstrook. Het water komt daardoor, vooral in de zomerperiode, langzamer tot uitstroming in deze bufferstrook dan in de nieuwe bufferstrook. Op jaarbasis wordt hierdoor in de bestaande bufferstrook minder water door de verzadigde zone afgevoerd naar de Mosbeek dan in de nieuwe bufferstrook van raai 3.

Tabel 12 Vergelijking van het relatieve reducerend effect op de stroming naar de Mosbeek van de bestaande bosbufferstrook van raai 2 en van de nieuwe bosbufferstrook (10 m breed) van raai 3, voor het 'gemiddelde' jaar

Raai	Reductie (%)			Breedte bufferstrook	Lengte landbouwraai
	uitstroming	afstroming	totale stroming	(m)	(m)
2	3	100	4	14	75,5
3	0,5	68	1	10	135,5

Bij de afstroming is nog van belang dat in de bestaande bufferstrook een depressie in het maaiveld voorkomt waardoor de oppervlakkige berging hier veel groter is dan in de nieuwe bufferstrook van raai 3. In het 'gemiddelde jaar' wordt hierdoor de afstroming vanaf het maïsperceel van raai 2 volledig afgevangen door de bestaande bufferstrook. In absolute termen is deze afgevangen hoeveelheid afstroming wel iets kleiner dan de hoeveelheid afstroming die door de nieuwe bufferstrook van raai 3 wordt afgevangen (0,30 tegen 0,36 m^3 per m beeklengte). De potentie van de bestaande bufferstrook voor het afvangen van afstroming in het 'gemiddelde jaar' is echter groter dan 0,47 m^3 per m beeklengte, aangezien deze hoeveelheid al wordt afgevangen in het veel nattere jaar 1994 (zie tabel 8).

4.6.3 Conclusies

Het reducerende effect van de bufferstroken op de uit- en afstroming naar de beek is groter bij een bufferbreedte van 10 m dan bij een breedte van 1 m.

De uitstroming wordt relatief minder gereduceerd door de bufferstroken dan de afstroming. Omdat de uitstroming de belangrijkste stromingscomponent naar de beek is, wordt de totale stroming naar de beek relatief weinig beïnvloed door de ingerichte bufferstroken. Voor de vraagstelling van het onderzoek kan de hydrologische buffering in de vorm van de reductie van de afstroming wel van wezenlijk belang zijn als de afstroming gepaard gaat met hoge nutriëntenconcentraties in het afstromende water.

De reductie van de uitstroming is iets groter bij de grasbuffer door de grotere reductie van het neerslagoverschot bij de grasbuffer dan bij de bosbuffer.

De reductie van de afstroming is iets groter bij de bosbuffer door de grotere interceptie bij de bosbuffer dan bij de grasbuffer.

Bij het maïsperceel heeft de nieuwe bosbufferstrook van 10 m breedte relatief gezien een geringer reducerend effect op de uitstroming en afstroming dan de bestaande bosbufferstrook onderaan dit perceel, door de grotere relatieve breedte en de lagere ligging van de bestaande bufferstrook, en het voorkomen van een depressie in het maaiveld van deze bufferstrook.

5 Conclusies

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies van het onderzoek gegeven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen conclusies op doelstellingsniveau (5.1), op het niveau van het veldonderzoek (5.2) en op het niveau van de modelmatige analyse van de hydrologie (5.3). Bij de laatste conclusies moet worden gerealiseerd dat het conclusies over berekeningsresultaten betreft.

5.1 Doelstellingen

Het uitgevoerde onderzoek heeft voldaan aan de algemene doelstellingen van het veldonderzoek en de modelmatige analyse van de hydrologie: het verkrijgen van inzicht in de hydrologie en de nutriëntenhuishouding van de hellende percelen op de onderzoekslocatie die grenzen aan de Mosbeek.

In het veldonderzoek zijn essentiële gegevens verzameld voor de modellering van de hydrologie en de nutriëntenhuishouding van de percelen op de onderzoekslocatie.

De modelmatige analyse van de hydrologie heeft hydrologische invoer opgeleverd, die de basis vormt van de modellering van de nutriëntenhuishouding van de percelen op de onderzoekslocatie.

5.2 Veldonderzoek

Met de onderzoekslocatie is een representatieve locatie voor het hellende deel van het stroomgebied van de Mosbeek gekozen waar de belangrijkste landgebruiksvormen aanwezig zijn. De hellende percelen en de aanwezigheid van een bufferstrook met elzenbroekbos bieden de mogelijkheid om inzicht te krijgen in de processen die zich in deze situaties voordoen.

Op de onderzoekslocatie komen op de hogere delen veldpodzolen en laarpodzolen voor met de grondwatertrappen Gt V en VI. Op de lagere delen grenzend aan de Mosbeek komen moerige eerdgronden en beekeerdgronden met Gt II en III voor.

Op de onderzoekslocatie komt op een relatief geringe diepte een slecht doorlatend tertiair pakket voor. Deze tertiaire laag vormt de nagenoeg ondoorlatende basis voor de grondwaterstroming in het bovenliggende zandpakket. De diepte van de bovenkant van het tertiaire pakket varieert van 0,70 tot 3,15 m - mv.

De bodem van de aanwezige bufferstrook is vrij heterogeen voor het gehalte aan organische stof. Plaatselijk en op wisselende diepten kan dit gehalte zeer hoog zijn. Dit geldt vooral voor de bovenste 0,1 m die uit venig zand tot veen bestaat.

De continue neerslagmetingen met een interval van twintig minuten geven een goed inzicht in de variatie van de neerslag op de onderzoekslocatie over de dag. De intensiteit kan sterk variëren. De gemeten neerslagintensiteiten variëren van 0 tot 5,8 mm per twintig minuten.

De metingen van de grondwaterstanden op de onderzoekslocatie onderschrijven de indeling in grondwatertrappen uit de bodemkartering. Analyse van de meetreeksen heeft meer inzicht gegeven in de overgang in grondwaterregime van de hoger gelegen delen van de raaien naar de lager gelegen delen.

In alle raaien op de onderzoekslocatie nemen de fluctuaties van de grondwaterstand af en wordt de gemiddelde grondwaterstand ten opzichte van maaiveld ondieper naarmate de afstand tot de beek kleiner wordt.

Op de onderzoekslocatie heerst een continue gradiënt in de grondwaterstand en daardoor een continue grondwaterstroming in de richting van de beek. Alleen in de bufferstrook verandert bij diepe grondwaterstanden de gradiënt van richting, wat betekent dat in deze laaggelegen bufferstrook infiltratie vanuit de beek kan optreden.

Naast de grondwaterstroming is oppervlakkige afstroming van belang op de onderzoekslocatie. Met de meetopstelling voor de oppervlakkige afstroming zijn verschillende momenten geregistreerd waarop oppervlakkige afstroming optreedt. Oppervlakkige afstroming gaat op het maïsperceel gepaard met erosie waardoor geulen ontstaan.

Uit de metingen is alleen af te leiden wanneer oppervlakkige afstroming is opgetreden. Het was moeilijk de afstroming te kwantificeren vanwege het optreden van erosie bij de meetopstelling en omdat de meetopstelling verschillende beperkingen had. Er zijn verschillende mogelijkheden aangegeven om de meetopstelling te verbeteren.

Uit de tracerexperimenten blijkt dat de stromingsrichting van het grondwater globaal loodrecht op de Mosbeek is. Lokaal kunnen afwijkingen van de hoofdrichting bestaan.

Een belangrijke conclusie uit de tracerexperimenten is dat er sneltransport plaatsvindt via lagen met een hoge doorlatendheid die als preferente stroombanen fungeren. Doordat verschillende lagen met een verschillende doorlatendheid als transportbaan fungeren, treedt spreiding in de verblijftijd van water en stoffen op. Tevens blijkt dat dispersie en diffusie een belangrijke rol spelen bij het transport door de bodem.

De gemiddelde stroomsnelheid in het watervoerende profiel is geschat op 0,5 $m.d^{-1}$. De bijbehorende gemiddelde verzadigde doorlatendheid bedraagt ongeveer 5 $m.d^{-1}$.

Uit de tracerexperimenten blijkt dat water met daarin opgeloste stoffen dat bovenaan de steilrand ter hoogte van raai 2 tot uitstroming komt, door de bufferstrook naar de Mosbeek stroomt. Preferente laterale stroming speelt waarschijnlijk ook een rol in de bufferstrook.

Voor de modelberekeningen is op basis van de tracerexperimenten te concluderen dat de stroming naar de beek complex verloopt. Bij de interpretatie van de modeluitkomsten zal hiermee rekening moeten worden gehouden.

5.3 Modelmatige analyse van de hydrologie

Met de aangepaste versie van SWAP kan de oppervlakkige afstroming, die een belangrijke component vormt in dit onderzoek, beter worden berekend. Door de neerslag op een kleinere tijdsbasis in te voeren, gecombineerd met een gedetailleerdere modellering van de relatie tussen neerslagintensiteit en infiltratiecapaciteit, wordt de oppervlakkige afstroming op een meer realistische wijze gemodelleerd dan in de oorspronkelijke versie.

De toegepaste schematisering van de hydrologie van de onderzoekslocatie vormt een goede basis voor de modellering van de laterale uitstroming door de verzadigde zone naar de Mosbeek. Dit geldt in mindere mate voor de oppervlakkige afstroming, omdat op de onderzoekslocatie erosie optreedt. De modellering van de afstroming met SWAP op basis van de toegepaste schematisering vormt een globale benadering van de werkelijke afstroming.

Met de gecalibreerde modellen worden op basis van de toegepaste schematisering de waterbalansen van de kolommen en de laterale grondwaterstroming in de richting van de Mosbeek (de uitstroming) realistisch gesimuleerd. Voor de oppervlakkige afstroming geldt dit in mindere mate, omdat op de onderzoekslocatie erosie optreedt. De modellering van de afstroming vormt een globale benadering van de werkelijke afstroming.

Van de totale waterstroming vanuit en vanaf de percelen op de onderzoekslocatie naar de Mosbeek is de uitstroming kwantitatief de belangrijkste component (87,5 tot 100% van de totale stroming).

De uitstroming en daarmee de totale stroming nemen op jaarbasis consequent toe richting beek: overal langs de raaien bestaat op jaarbasis een neerslagoverschot dat moet worden afgevoerd.

De gemiddelde uitstroming per m raailengte is groter voor de (delen van de) raaien met maïs dan voor de raaien met gras. Oorzaak hiervan is het grotere neerslagoverschot bij maïs ten opzichte van gras door het kortere groeiseizoen en de lagere bedekkingsgraad van maïs.

Bij maïs reageren de uit- en afstroming vanuit de raaien sterker op veranderingen in de neerslag dan bij gras en bos. De raaien met maïs bezitten een geringere hydrologische buffercapaciteit door het kortere groeiseizoen van maïs. Door het kortere groeiseizoen zijn bij maïs de interceptie, de gewasverdamping en de grondwaterberging geringer dan bij gras en bos.

De afstroming heeft een relatief klein aandeel in de totale stroming naar de beek (0 tot 12,5%). Zowel in absolute als in relatieve zin is dit aandeel veel groter in het natte jaar 1994 dan in het 'gemiddelde' jaar. De reden hiervan is dat aan een aantal voorwaarden moet zijn voldaan voor afstroming optreedt, waardoor het optreden van afstroming een 'aan-uit-proces' is. In een situatie met meer neerslag wordt vaker aan de voorwaarden voldaan èn is de hoeveelheid afstromend water groter.

In absolute termen kan de afstroming een niet te verwaarlozen bijdrage aan de afvoer naar de beek betekenen, vooral in de vorm van piekafvoeren. Voor de vraagstelling van het onderzoek is dit van groot belang. Als de afstroming gepaard gaat met hoge nutriëntenconcentraties kan deze afspoeling van nutriënten wezenlijk bijdragen aan de totale nutriëntenbelasting van de beek en zeker aan de momentane piekbelastingen.

De afstroming neemt op jaarbasis niet consequent toe richting beek: in sommige delen van de raai infiltreert netto (een deel van) de inkomende afstroming vanaf het aangrenzende bovenstroomse deel van de raai. Hier wordt niet of in mindere mate voldaan aan de voorwaarden voor het optreden van afstroming.

De gemiddelde afstroming per m raailengte is het grootst bij het benedenste deel van de raai in het intensieve grasperceel. Oorzaak hiervan is de geringe infiltratiecapaciteit door de gemiddeld hoge grondwaterstand en de lage verzadigde doorlatendheid van de bovengrond.

De bestaande bufferstrook met bos heeft een reducerend effect op zowel de uitstroming als de afstroming naar de beek. Deze reductie is in absolute termen het grootst voor de uitstroming. Relatief gezien is de reductie het grootst voor de afstroming: een reductie van 50% in het natte jaar 1994 en van 100% in het 'gemiddelde' jaar. De oorzaak hiervan is het relatief geringe neerslagoverschot door de grote interceptie bij bos, en voor de afstroming tevens het grote bergend vermogen aan maaiveld door het voorkomen van een depressie in de bufferstrook. De bufferstrook heeft hierdoor eveneens een bufferende werking op de stroming bij een veranderende neerslaghoeveelheid.

Het reducerende effect van de in de scenarioberekeningen nieuw ingerichte bufferstroken op de uit- en afstroming naar de beek is groter bij een bufferbreedte van 10 m dan bij een breedte van 1 m.

De uitstroming wordt relatief minder gereduceerd door de nieuwe bufferstroken dan de afstroming. Omdat de uitstroming de belangrijkste stromingscomponent naar de beek is, wordt de totale stroming naar de beek relatief weinig beïnvloed door deze bufferstroken. Voor de vraagstelling van het onderzoek kan de hydrologische buffering in de vorm van de reductie van de afstroming wel van wezenlijk belang zijn als de afstroming gepaard gaat met hoge nutriëntenconcentraties in het afstromende water.

De reductie van de uitstroming is iets groter bij de grasbuffer door de grotere reductie van het neerslagoverschot bij de grasbuffer dan bij de bosbuffer.

De reductie van de afstroming is iets groter bij de bosbuffer door de grotere interceptie bij de bosbuffer dan bij de grasbuffer.

Bij het maïsperceel heeft de nieuwe bosbufferstrook van 10 m breedte relatief gezien een geringer reducerend effect op de uitstroming en afstroming dan de bestaande bosbufferstrook onderaan dit perceel, door de grotere relatieve breedte en de lagere ligging van de bestaande bufferstrook, en het voorkomen van een depressie in het maaiveld van deze bufferstrook.

Literatuur

Berg, M.W. van den en C. den Otter, 1993. *Toelichting bij de geologische kaart van Nederland 1:50.000. Blad Almelo Oost/ Denekamp (28O/29).* Rijks Geologische Dienst. Haarlem.

Clothier B.E., I. White and G.J. Hamilton, 1981. Constant-rate rainfall infiltration: field experiments. *Soil Science Soc. Am. J.* 45: 245-249.

Dolman, A.J. en E.J. Moors, 1994. *Hydrologie en waterhuishouding van bosgebieden in Nederland. Fase 1: Toetsing instrumenten.* Rapport 333. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Ebbers, G. en H. van het Loo, 1992. *Bodemkaart van Nederland, schaal 1:50 000. Blad 28 Oost - 29. Almelo - Denekamp.* DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Gayle, G.A. and R.W. Skaggs, 1978. Surface storage on bedded cultivated lands. *Transactions of the ASAE* 21, no. 1: 101-104.

Genuchten, M.Th. van, F.J. Leij and S.R. Yates, 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.* USDA, US Salinity Laboratory, Riverside, CA.

Genuchten, M.Th. van and F.J. Leij, 1992. *On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils.* pp. 1-14. In M.Th. van Genuchten, F.J. Leij and L.J. Lund (ed.), Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Proc. of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. Riverside, California, 11-13 October 1989.

Hooghart, J.C. en W.N. Lablans, 1988. *Van Penman naar Makkink. Een nieuwe berekeningswijze voor klimatologische verdampingscijfers.* Rapporten en Nota's 19. Commissie voor Hydrologisch Onderzoek. Den Haag.

Knotters, M. en P.E.V. van Walsum, 1994. *Uitschakeling van weersinvloeden bij de karakterisering van het grondwaterstandsverloop.* Rapport 350. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Kruijne, R. 1996. *Perceelsonderzoek naar het effect van beekbegeleidende bufferstroken op de stikstof- en fosforbelasting van de Mosbeek. Nutriëntenonderzoek en scenarioberekeningen.* Rapport 420.2. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Meinardi, C.R. en J.P. van der Valk, 1989. *Het stikstofgehalte in beken en waterlopen van het Nederlandse zandgebied.* Rapport 728472016. RIVM. Bilthoven.

Orleans, A.B.M., F.L.T. Mugge, T. van der Mey, P. Vos en W.J. ter Meurs, 1994. *Minder nutriënten in het oppervlaktewater door bufferstroken? Een literatuurstudie.* Milieubiologie R.U.L. Leiden.

Osborne L.L. and D.A. Kovacic, 1993. Riparian vegetated buffer strips in waterquality restoration and stream management. *Freshwater biology* 29.

Parlange, J.Y and R.E. Smith, 1976. Ponding time for variable rainfall rates. *Canadian Journal of Soil Science* 56: 121-123.

Perroux K.M., D.E. Smiles and I. White, 1981. Water movement in uniform soils during constant-flux infiltration. *Soil Science Soc. Am. J.* 45: 237-240.

Schoumans, O.F., 1994. *Relatie tussen de fosfaattoestand van de bodem en de fosfaatconcentratie in oplossing van een onderzoekslocatie aan de Mosbeek.* Rapport 348. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Smith, R.E. and J.Y. Parlange, 1977. Optimal prediction of ponding. *TRANSACTIONS of the ASAE* 20, no. 3: 493-496.

Stolte, J., G.J. Veerman en M.C.S. Wopereis, 1992. *Manual soil physical measurments, version 2.* Technical Document 2. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Stroosnijder L., 1976. *Infiltratie en herverdeling van vocht in de grond.* Proefschrift Landbouwhogeschool. Wageningen.

Walsum, P.E.V. van, 1994. *Gebruik van SWATRE voor de berekening van afvoerkenmerken.* Rapport 366. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Watermark Computing, 1994. *PEST, Model-Independent Parameter Estimation.* Oxley, Australia.

Wösten, J.H.M., G.J. Veerman en J. Stolte, 1994. *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks.* Technisch document 18. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Niet-gepubliceerde bronnen

Berghuis-van Dijk, J.T., P.E. Rijtema and C.W.J. Roest, 1985. *ANIMO - Agricultural Nitrogen Model.* Note 1671. ICW. Wageningen.

Broek B.J. van den, J.A. Elbers, J. Huygen, P. Kabat, J.G. Wesseling, J. van Dam and R.A. Feddes, 1993. *SWAP 1993. Input instructions manual.* Interne mededeling 291. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Broks, 1991. *Geohydrologisch onderzoek winplaatsen 'Manderveen' en 'Manderheide'.* Projectnr 11.337. BRoks ONderzoek en ONtwerp, concept-rapport. 's-Hertogenbosch.

Drost, J.J.P, 1990. *RETC 2.0. Een gebruikershandleiding bij een niet-lineair optimalisatieprogramma van bodemfysische parameters.* Interne mededeling 99. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Feddes, R.A. en P. Kabat, (in voorb.). *Simulation model soil-water-atmosphere-plant (SWAP). Theory and model description.*

IWACO, 1995. *Modelonderzoek nutriëntenhuishouding stroomgebied Mosbeek.* Werkdocument 22.2184.0. IWACO. Groningen.

Molen, W.H. van der, 1984. *Agrohydrologie.* Collegedictaat. Landbouwuniversiteit Wageningen.

Moors, E.J., A.J. Dolman, W. Bouten en A.W.L. Veen, 1994. *De verdamping van bossen.* Interne mededeling 323. DLO-Staring Centrum. Wageningen.

Peerboom J.M.P.M., 1987. *Aanpassingen aan het model SWATRE ten behoeve van de simulatie van het gedrag van zwellende en krimpende kleigronden.* Nota 1807. ICW. Wageningen.

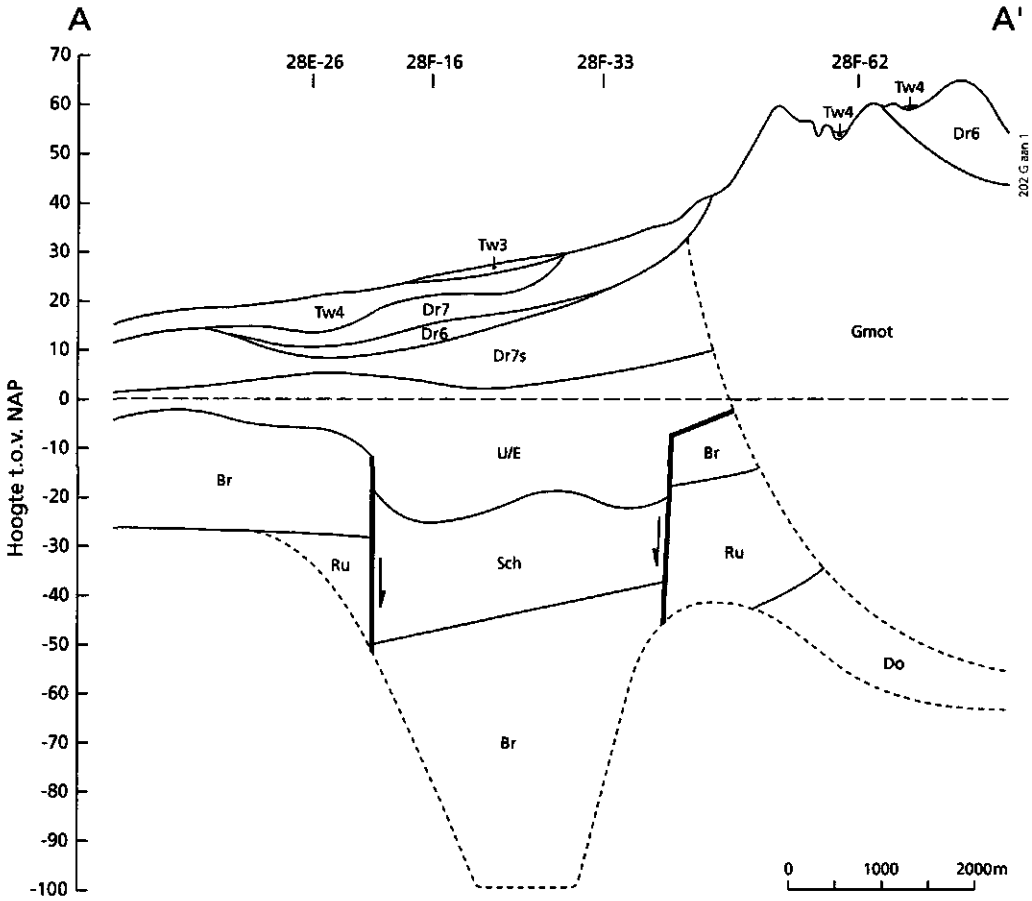
Vermulst, J.A.P.H., 1994. *Toepassing van DEMGEN op het stroomgebied van de Mosbeek.* Werkdocument 93.160X. RIZA. Lelystad.

AANHANGSELS

1 Geologische doorsnede langs raai A-A' 107
2 Topografie maaiveld en bovenkant tertiaire afzettingen in de raaien 109
3 Resultaten van de bodemkartering 111
4 Van Genuchten-parameters van de gestoken monsters 119
5 Gemeten gehalten aluminium, ijzer en fosfaat, en de fosfaat-bezettingsfractie 121
6 Gemeten gehalten organische stof 125
7 Resultaten van de continue registratie van de grondwaterstand, het beekpeil, de neerslag en de waterstand in het opvangvat van de oppervlakkige afstroming 127
8 Tabel met grondwaterstandswaarnemingen 139
9 Figuren met grondwaterstandswaarnemingen 143
10 Resultaten van de analyse van bodemwater en afstromend water 149
11 Theoretische beschrijving van de aangepaste berekening van de oppervlakkige afstroming in SWAP 157
12 Verantwoording van de schematisering 161
13 Bodemfysische schematisering 167
14 Enkele locatiegebonden invoergegevens betreffende de bovenrandvoorwaarden 171
15 Statistische criteria gebruikt bij de calibratie 173
16 Resultaten van de calibratie in de vorm van de gecalibreerde waarden van de constanten van de onderrandvoorwaarde en de waarden van de statistische criteria 175
17 Grafische weergave van het berekende grondwaterstandsverloop, de gemeten grondwaterstanden en het verloop van de berekende onderrandflux in de calibratieperiode 177
18 Berekende oppervlakkige afstroming 185
19 Berekende waterbalansen voor de bestaande situatie en de hydrologische scenario's 193
20 Tracerexperimenten 197

Aanhangsel 1 Geologische doorsnede langs raai A-A'

Doorsnede naar Broks (1991). Voor de ligging van raai A-A', zie figuur 1 in de hoofdtekst.

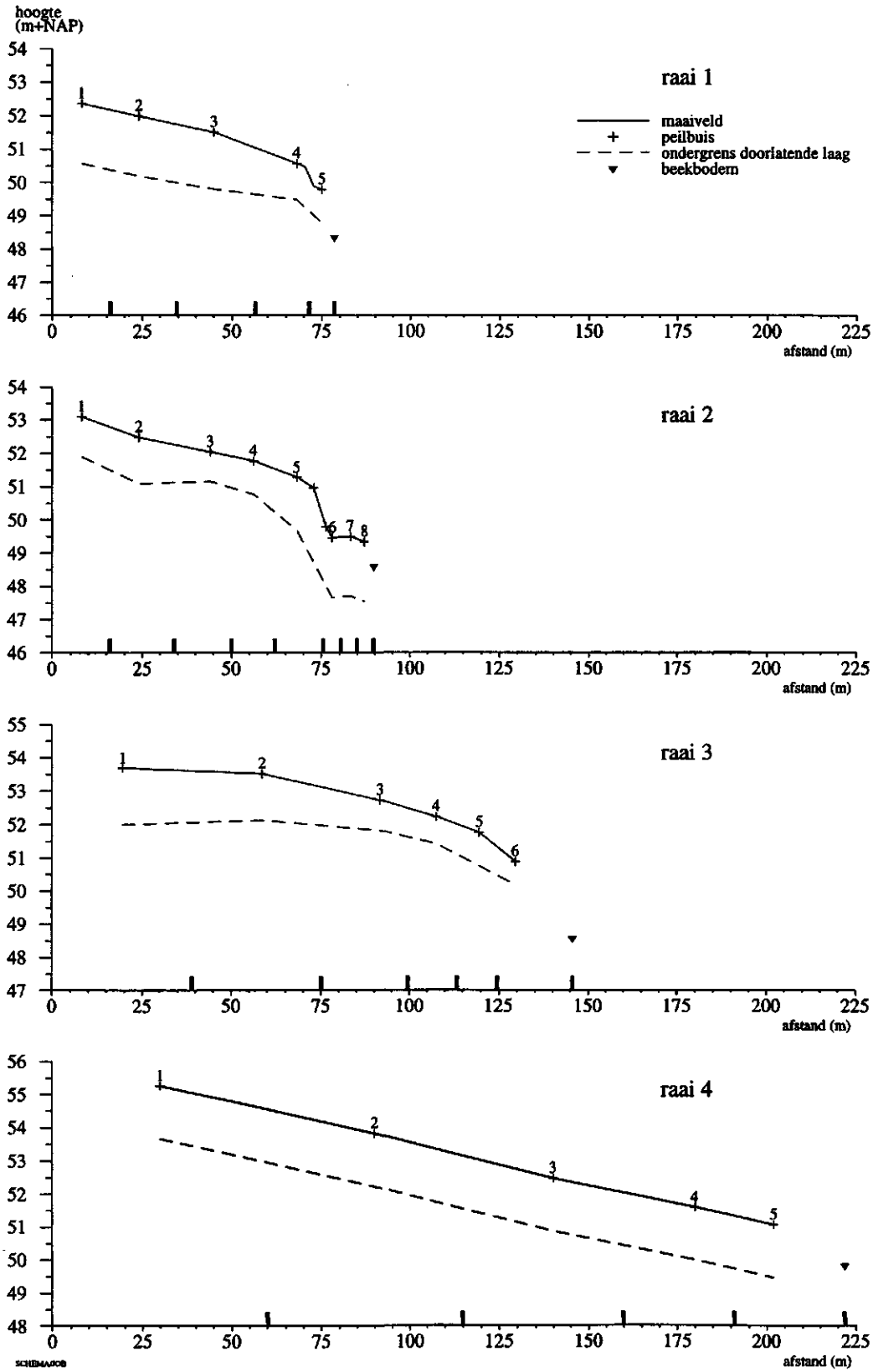


KWARTAIR
Pleistoceen
Tw3 : Dekzand
Tw4 : Formatie van Twente, fluvioperiglaciale afzettingen
Dr6 : Formatie van Drenthe, grondmorene
Dr7 : Formatie van Drenthe, fluvioglaciale afzettingen
Dr7s: Formatie van Drenthe, sandr
U/E : Formatie van Urk en Enschede

TERTIAIR
Sch: Formatie van Scheemda
Br : Formatie van Breda
Ru : Formatie van Rupel
Do : Formatie van Dongen

GESTUWDE FORMATIES
Gmot: Midden- en onderpleistocene formaties en tertiaire formaties, gestuwd
: Breuk

Aanhangsel 2 Topografie maaiveld en bovenkant tertiaire afzettingen in de raaien



Aanhangsel 3 Resultaten van de bodemkartering

In de resultaten van de bodemkartering worden per profiel een bodemprofielcode en de grondwatertrap gegeven. Hieronder worden de betekenis van de gebruikte codes en grondwatertrappen gegeven.

Bodemprofielcodes

Code	Betekenis
Hn21	Veldpodzol, leemarm en zwaklemig fijn zand
cHn21	Laarpodzol, leemarm en zwaklemig fijn zand
vWz	Moerige eerdgrond, moerige bovengrond op zand
pZg23	Beekeerdgrond, lemig fijn zand
---- g	Grof zand en/of grind beginnend tussen 0,40 en 1,20 m
---- t	Andere oude klei dan keileem beginnend tussen 0,40 en 1,20 m
g ----	Grind, ondieper dan 0,40 m beginnend

Grondwatertrappen (Gt)

Gt	Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand (m - mv.)	Gemiddeld Laagste Grondwaterstand (m - mv.)
IIa	<0,25	0,50-0,80
IIIa	<0,25	0,80-1,20
Vao	<0,25	1,20-1,80
Vad	<0,25	>1,80
Vbd	0,25-0,40	>1,80
VIo	0,40-0,80	1,20-1,80
VId	0,40-0,80	>1,80

raai, locatie	profiel code	horizont-code	laagdiepte		organische stof	lutum	leem	M50	k_{sat}	Gt	GHG	GLG	bewortelbare diepte
			cm	cm	%	%	%	µm	$cm.d^{-1}$		cm	cm	cm
1-1	Hn21	1A/Ep	0	25	4,0		12	170	40	VIo	55	160	50
		1Bhs	25	70	2,0		12	170	50				
		1Bc	70	90			12	170	30				
		1BC	90	110			8	170	80				
		1Cg	110	135			8	170	150				
		1Cgr	135	160			<5	170	200				
		1Cr	160	180			<5	170	200				
1-2	Hn21	1A/Ep	0	30	5,0		14	160	40	VIo	50	170	40
		1B/E	30	45	2,0		11	160	80				
		1A/Bg	45	60	4,0		11	160	80				
		1Bhs	60	110	2,0		15	160	80				
		1BCg	110	140			<6	170	150				
		1Cgr	140	180			<8	170	150				
1-3	Hn21	1Ap	0	20	6,0		15	160	40	Vao	20/25	160	40
		1A/E	20	35	4,0		14	160	40				
		1Bhs	35	50	1,5		14	160	60				
		1Cc	50	80			11	170	25				
		1Cg	80	130			<6	170	480				
		2Cgr	130	170			<6	200	250				
1-4	Hn21t	1A/E/B	0	30	3,0		12	160	40	Vao	20	<150	25/30
		1BC	30	50	0,5		12	160	60				
		1Cg1	50	70			12	160	80				
		1Cg2	70	100			18	160	70				
		2Cgr	100	110			22	200	80				
		3Cgr	110	170	4,0	46			3				
		4Cr	>170										

raai, locatie	profiel code	horizont-code	laagdiepte		organische stof	lutum	leem	M50	k_{sat}	Gt	GHG	GLG	bewortelbare diepte
			cm	cm	%	%	%	µm	$cm.d^{-1}$		cm	cm	cm
1-5	vWzt	Oh	+5	0									
		1Ah	0	20	2,0	5	26	130	30	IIa	5	60	20
		1A/Cgr1	20	50	10,0		16	160	45				
		1A/Cgr2	50	80	3,0		12	180	60				
		2Cr	80	100			6	200	250				
		3Cgr	100	120		48	80		3				
2-1	CHn21	1Aa1	0	25	8,0		14	160	35	VId	65	>180	45
		1Aa2	25	40	6,5		14	160	40				
		1Bhs	40	60	1,0		12	170	70				
		1BC	60	70	0,5		12	170	90				
		2Cg	70	120			6	195	300				
		3Cg	120	180		38/40			5				
2-2	Hn21(g)	1Ap	0	25	5,0		13	170	35	Vbd	35	>180	40
		1A/B/E	25	40	3,0		13	170	50				
		1Bhs	40	60	1,0		11	170	60				
		1BC	60	90			8	170	100				
		2Cg1	90	120			6	190	300				
		2Cgr	120	140			30	190	100				
		3Cgr	140	190		40	56		5				
2-3	Hn21(g/t)	1Ap	0	25	6,0		14	170	45	Vad	20	>180	40
		1A/B/C	25	40	4,0		12	170	45				
		1Bhs	40	75	1,5		10	170	80				
		2Cg	75	90			22	190	150				
		3Cg	90	190		48			5				

raai, locatie	profiel code	horizont-code	laagdiepte		organische stof	lutum	leem	M50	k_{sat}	Gt	GHG	GLG	bewortelbare diepte
			cm	cm	%	%	%	µm	$cm.d^{-1}$		cm	cm	cm
2-4	Hn21(g)	1Ap	0	25	7,0		14	160	40	Vad	20/25	>180	45
		1A/B/E	25	45	5,0		12	160	40				
		1B/E	45	60	3,0		12	170	75				
		1Bhs	60	80	1,5		11	170	80				
		2Cg	80	100			<5	400	400				
		3Cgr	100	180		44/48			5				
		4Cg	180	200		6	26	300	400				
2-5	Hn21(g)	1Ap	0	25	6,0		15	160	40	Vad	20	>180	40
		1A/B	25	35	5,0		12	160	45				
		1Bhs	35	55	2,0		12	160	45				
		1Cg	55	75			12	160	200				
		2Cg	75	160			<6	200	400				
2-6	pZg23(g)	Oh	+5	0	5,0								
		1Ah	0	10	6,0		22	160	30	IIa	5	65	40
		2Cg	10	40			11	180	150				
		1Cgr	40	70	2,0		20	160	60				
		3Cr	70	180	4,0		20	180	80				
2-7	pZg23	Oh	+5	0	6,0								
		1Ah1	0	5	6,0		20	160	30	IIa	5	70	40
		1Ah2	5	25	3,0		22	160	30				
		1Cg	25	40	-		22	160	35				
		1Cg2	40	60	6,0		30	160	40				
		1Cr1	60	140	4,0		20	160	50				
		1Cgr	140	180	4,0		16	200	80				

raai, locatie	profiel code	horizont-code	laagdiepte		organische stof	lutum	leem	M50	k_{sat}	Gt	GHG	GLG	bewortelbare diepte
			cm	cm	%	%	%	µm	$cm.d^{-1}$		cm	cm	cm
2-8	pZg23	Oh	+9	0	7,0								
		1Ah	0	15	8,0	8,0	38	140	30	Ha	5	50	40
		1Cg1	15	40	3,0		20	170	50				
		1Cg2	40	50	1,0		20	170	50				
		1Cr1	50	80	6,0		36	140	35				
		1Cr2	80	120	6,0		20	180	35				
		1Cr3	120	180	3,0		14	200	80				
3-1	cHn21(g)	1Aa1	0	30	6,5		16	165	35	Vbd	35	>180	50
		1Aa2	30	45	5,0		16	165	35				
		1Ahb/Bhs	45	55	10,0		15	155	35				
		1Bhs	55	65	2,0		16	160	80				
		2BC	65	95			6	190	200				
		3Cg	95	170			20	180	150				
		3Cgr	170	200		7,0	36	200	85				
3-2	cHn21(g)	1Aa1	0	25	6,0		17	160	40	VId	70	>180	50
		1Aa2	25	40	5,0		16	160	40				
		1Bs	40	50	1,0		12	165	70				
		2Cg1	50	100	0,5		6	190	80				
		2Cg2	100	140			<5	250	300				
		3Cgr1	140	160		11	40	110	5/8				
		3Cgr2	160	200		30	60		5				
3-3	Hn21(g)	1Ap	0	30	7,0		16	160	35	Vbd	30/35	>180	40
		1Bhs	30	45	2,0		15	170	60				
		1BCg	45	60	0,5		15	170	70				
		2Cg	60	90			16	190	200				
		3Cg	90	160		38			5				
		3Cgr1	160	180		20			5/10				
		3Cgr2	180	200	6,0	34			5				

raai, locatie	profiel code	horizont-code	laagdiepte		organische stof	lutum	leem	M50	k_{sat}	Gt	GHG	GLG	bewortelbare diepte
			cm	cm	%	%	%	µm	$cm.d^{-1}$		cm	cm	cm
3-4	Hn21(t)	1Ap	0	25	6,0		16	170	35	Vad	15	>180	40
		1A/Bsg	25	40	4,0		14	170	40				
		1A/B/Eg	40	60	2,0		8	170	80				
		2Cg	60	80		28	40		50				
		3Cgr1	80	160		38			5				
		3Cgr2	160	190		40			5				
3-5	Hn21(g/t)	1Ap	0	25	5,0		14	170	35	Vad	15	>180	40
		1AEB	25	50	3,0		8	170	50				
		1Bhs	50	60	0,5		8	170	80				
		2Cg	60	95			<5	200	300				
		3Cgr1	95	110	5,0	36			3				
		3Cgr2	110	170		40			5				
3-6	Hn21(g/t)	1Ap	0	25	7,0		16	170	35	Vad	20	>180	40
		1ABE	25	40	5,5		16	170	45				
		1Bhs	40	55	1,5		12	170	70				
		2Cg	55	70			<8	200	300				
		3Cg1	70	110		25			5				
		3Cg2	110	200		40			5				
4-1	gHn21	1Ap	0	25	5,0		16	170	50	Vbd	35	>180	30
		1E/Bs	25	45	3,0		14	200	75				
		1Bs	45	60	1,0		11	300	200				
4-2	gHn21	1A/Bp	0	30	3,0		14	170	50	Vao	20/30	<180	30
		1BCg	30	60	1,5		18	180	70				
		1Cg	60	80			11	200	255				
4-3	Hn21	1A/Bp	0	20	4,0		14	170	40	Vao	15	140	25
		1B/C	20	40	2,0		12	170	40				
		1A/B	40	60	5,0		16	170	70				
		1B/C	60	85	1,0		11	180	90				
		1Cg	85	160			<8	170	350				

raai, locatie	profiel code	horizont-code	laagdiepte		organische stof	lutum	leem	M50	k_{sat}	Gt	GHG	GLG	bewortelbare diepte
			cm	cm	%	%	%	µm	$cm.d^{-1}$		cm	cm	cm
4-4	Hn21	1Ap	0	25	6,0		15	160	30	IIIa	15	100	20
		1A/Bs	25	60	2,0		13	160	30				
		2A/Cbg	60	85	5,0		20	160	60				
		1Cr	85	160			<8	170	350				
4-5	pZg23	1Ap	0	25	7,0		26	160	15/20	IIa	5	70	10
		1A/C1	25	60	5,0		22	170	10				
		2C/Cr1	60	80	3,0		12	200	30				
		2Cr1	80	120	3,0		20	170	30				
		2Cr2	120	160	1,0		11	190	300				

Aanhangsel 4 Van Genuchten-parameters van de gestoken monsters

Nr. bouwst.	Raai	Lo-katie	Laagdiepte (m)	B/O	θ_r ($m^3.m^3$)	θ_s ($m^3.m^3$)	K_s ($cm.d^{-1}$)	α (cm^{-1})	n (-)	l (-)	Code org.	Code hor.
1	1	3	0,30-0,40	B	0,05	0,33	40,0	0,0175	2,027	1,500	1a	1Bhs
2	1	3	0,80-1,00	O	0,01	0,32	100,0	0,0222	2,073	8,000	2a	1Cg1
3	2	3	0,40-0,80	O	0,05	0,34	80,0	0,0213	2,940	1,413	4	1Bhs
4	2	6/7	0,40-0,70	O	0,01	0,45	70,0	0,0250	1,732	2,500	5b	1Cgr
5	3	2	0,00-0,40	B	0,02	0,40	35,0	0,0287	1,348	-0,809	6a	1Aa1/ 1Aa2
5a	3	2	0,00-0,40	B	0,02	0,40	9,0	0,0211	1,436	-1,504	6a2	1Aa1/ 1Aa2
5b	3	2	0,00-0,40	B	0,02	0,40	18,0	0,0246	1,388	-1,147	6a3	1Aa1/ 1Aa2
6	3	2	0,50-1,00	O	0,04	0,36	80,0	0,0234	2,027	1,352	7b	2Cg1
7	3	2	1,00-1,40	O	0,02	0,29	200,0	0,0299	1,783	5,233	8a	2Cg2
8	3	4	0,70-1,60	O	0,33	0,48	5,0	0,0725	1,134	-7,605	9b	3Cgr1
9	4	3	0,30-0,40	B	0,02	0,44	40,0	0,0224	1,454	2,750	10a	1B/C
10	4	3	0,80-1,00	O	0,05	0,32	300,0	0,0150	4,044	4,389	11b	1Cg

B/O = bovengrond-/ondergrond-bouwsteen
θ_r, θ_s, K_s, α, n, l = Van Genuchten-parameters
θ_s = vochtgehalte bij verzadiging
K_s = verzadigde doorlatendheid
Code: - org. = orgineel
- hor. = horizont

Aanhangsel 5 Gemeten gehalten aluminium en ijzer (a) en fosfaat (b), en de fosfaatbezettingsfractie (c)

Aanhangsel 5a Gemeten gehalten aluminium en ijzer (mmol.kg^{-1})

Diepte	locatie in raai 1							
(m - mv.)	1	2	3	4	5			
0,0-0,2	69,4	72,8	55,5	50,2	237,4			
0,2-0,4	46,1	45,0	52,6	52,1	47,2			
0,4-0,6	62,2	32,9	75,3	54,1	69,2			
	locatie in raai 2							
(m - mv.)	1	2	3	4	5	6	7	8
0,0-0,2	62,0	53,5	57,7	43,6	71,1	77,9	254,1	193,1
0,2-0,4	62,7	54,9	35,8	64,7	44,0	70,6	164,9	91,0
0,4-0,6	62,1	89,0	36,4	18,9	56,5	47,2	105,0	113,2
	locatie in raai 3							
(m - mv.)	1	2	3	4	5	6		
0,0-0,2	86,6	74,7	68,8	44,9	30,9	52,4		
0,2-0,4	85,7	76,7	80,8	45,9	25,5	41,4		
0,4-0,6	82,0	93,6	70,8	38,1	23,6	38,5		
	locatie in raai 4							
(m - mv.)	1	2	3	4	5			
0,0-0,2	73,1	87,0	67,9	71,8	105,7			
0,2-0,4	96,9	82,6	50,0	71,0	121,9			
0,4-0,6	88,8	53,2	44,9	86,3	91,9			

Aanhangsel 5b Gemeten fosfaatgehalten (mmol.kg^{-1})

Diepte	locatie in raai 1							
(m - mv.)	1	2	3	4	5			
0,0-0,2	19,1	18,9	12,0	10,0	8,4			
0,2-0,4	8,7	10,2	8,8	3,9	2,7			
0,4-0,6	6,0	3,6	3,5	2,8	3,7			
	locatie in raai 2							
(m - mv.)	1	2	3	4	5	6	7	8
0,0-0,2	41,1	41,8	46,2	32,9	39,5	4,0	16,9	10,4
0,2-0,4	10,7	30,0	16,4	24,1	15,5	10,6	39,4	8,0
0,4-0,6	6,7	20,6	15,1	3,9	9,7	5,6	22,4	14,5
	locatie in raai 3							
(m - mv.)	1	2	3	4	5	6		
0,0-0,2	46,2	46,0	51,8	35,3	32,5	30,2		
0,2-0,4	31,3	38,1	28,5	35,4	17,0	20,3		
0,4-0,6	17,5	24,6	9,8	17,3	4,0	9,5		
	locatie in raai 4							
(m - mv.)	1	2	3	4	5			
0,0-0,2	23,6	27,9	36,5	30,7	27,2			
0,2-0,4	27,5	14,3	18,4	17,8	29,2			
0,4-0,6	21,1	6,9	14,4	15,0	27,1			

Aanhangsel 5c Gemeten fosfaatbezettingsfractie (-)

Diepte	locatie in raai 1							
(m - mv.)	1	2	3	4	5			
0,0-0,2	0,275	0,259	0,217	0,199	0,035			
0,2-0,4	0,189	0,227	0,167	0,076	0,056			
0,4-0,6	0,097	0,109	0,046	0,051	0,053			
	locatie in raai 2							
(m - mv.)	1	2	3	4	5	6	7	8
0,0-0,2	0,663	0,781	0,802	0,755	0,556	0,052	0,066	0,054
0,2-0,4	0,170	0,546	0,457	0,372	0,351	0,150	0,239	0,087
0,4-0,6	0,108	0,232	0,415	0,205	0,171	0,118	0,213	0,128
	locatie in raai 3							
(m - mv.)	1	2	3	4	5	6		
0,0-0,2	0,533	0,616	0,753	0,785	1,051	0,577		
0,2-0,4	0,365	0,497	0,353	0,771	0,668	0,490		
0,4-0,6	0,213	0,263	0,139	0,453	0,170	0,248		
	locatie in raai 4							
(m - mv.)	1	2	3	4	5			
0,0-0,2	0,323	0,321	0,537	0,427	0,257			
0,2-0,4	0,283	0,173	0,368	0,251	0,239			
0,4-0,6	0,238	0,129	0,321	0,173	0,295			

Aanhangsel 6 Gemeten gehalten organische stof

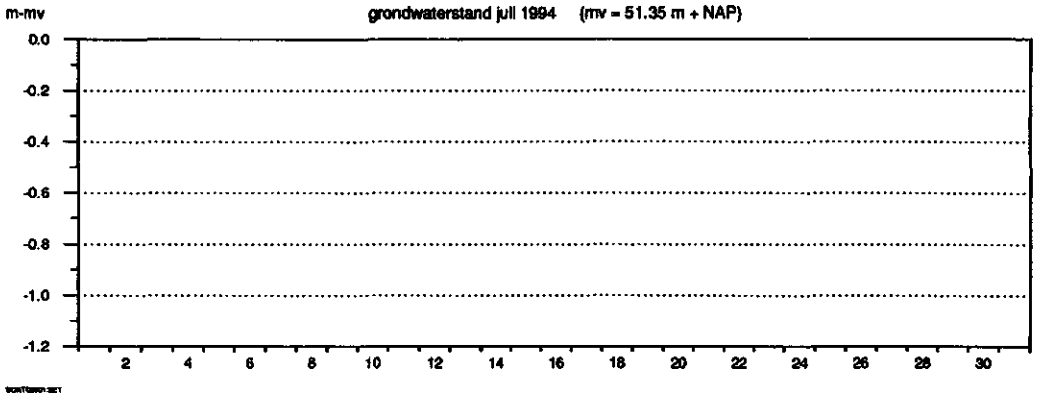
Gemeten gehalten organische stof (%)

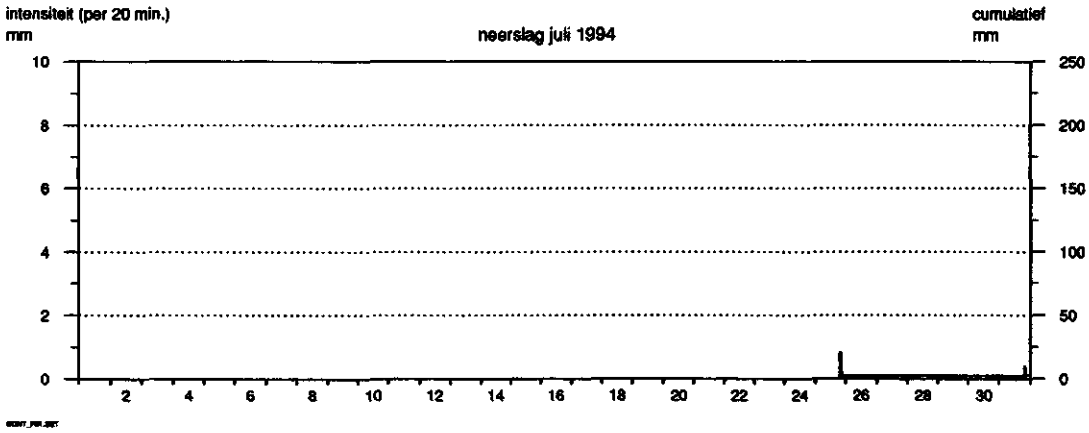
Diepte	locatie in raai 1							
(m - mv.)	1	2	3	4	5			
0,0-0,2	3,5		3,2	2,8	27,4			
0,2-0,4	1,8		2,0	1,1	4,7			
0,4-0,6	1,3		3,5	0,8	3,7			
	locatie in raai 2							
(m - mv.)	1	2	3	4	5	6	7	8
0,0-0,2	4,4		3,3	3,3	2,6	4,3		9,6
0,2-0,4	4,1		1,4	2,3	1,5	1,7		4,8
0,4-0,6	1,5		1,8	0,9	1,0	2,7		4,9
	locatie in raai 3							
(m - mv.)	1	2	3	4	5	6		
0,0-0,2	5,0		1,1		2,3	2,4		
0,2-0,4					1,6	2,8		
0,4-0,6					0,9	1,8		
	locatie in raai 4							
(m - mv.)	1	2	3	4	5			
0,0-0,2	4,4	4,1		3,7	3,3			
0,2-0,4	2,5	1,8		2,2	3,4			
0,4-0,6	1,5	0,5		2,4	2,3			

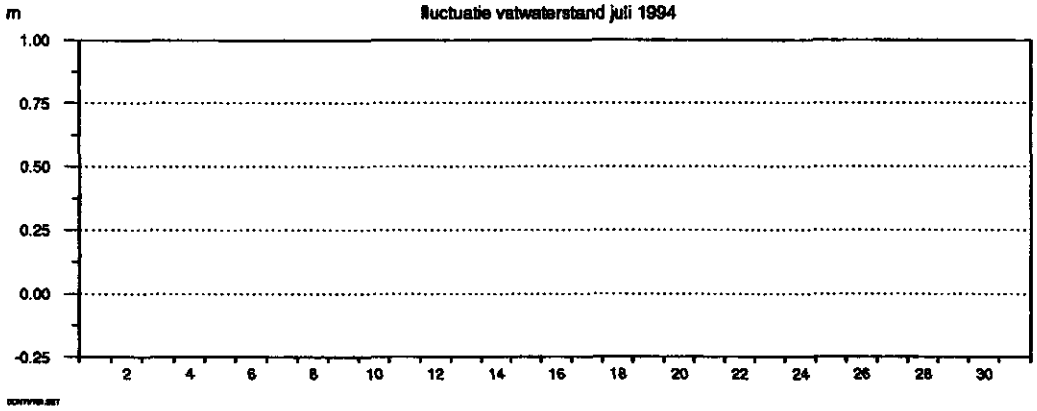
Extra bodemmonsters in raai 2, ter hoogte van locatie 8

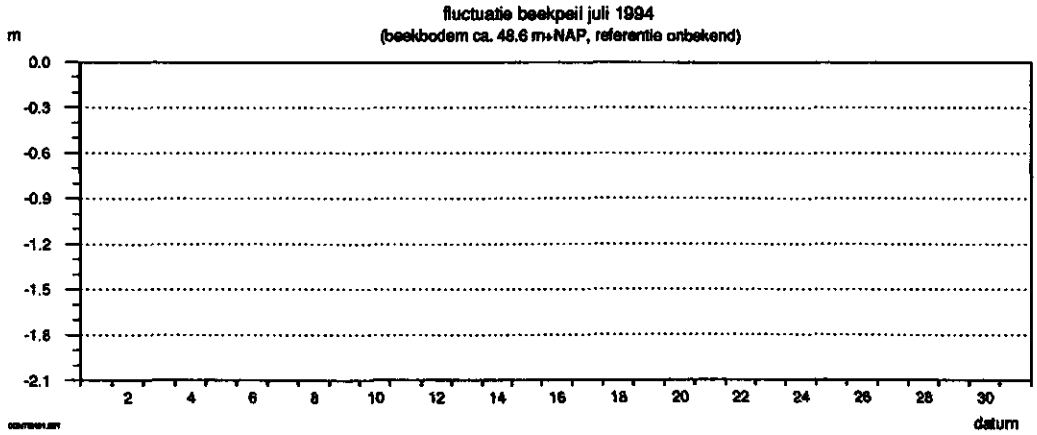
(m - mv.)	(%)
0,0-0,1	40,0
0,2-0,3	1,4
0,5-0,6	1,6
1,5-1,6	2,0

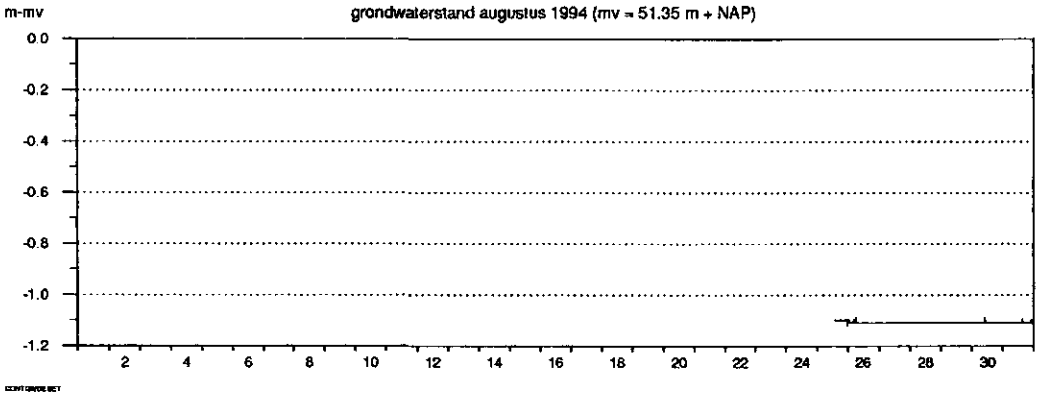
Aanhangsel 7 Resultaten van de continue registratie van de grondwaterstand, het beekpeil, de neerslag en de waterstand in het opvangvat van de oppervlakkige afstroming

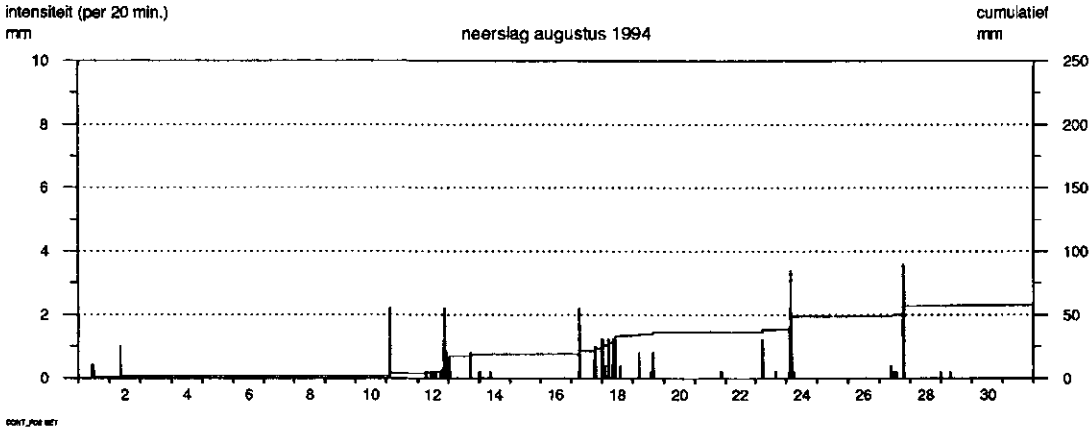


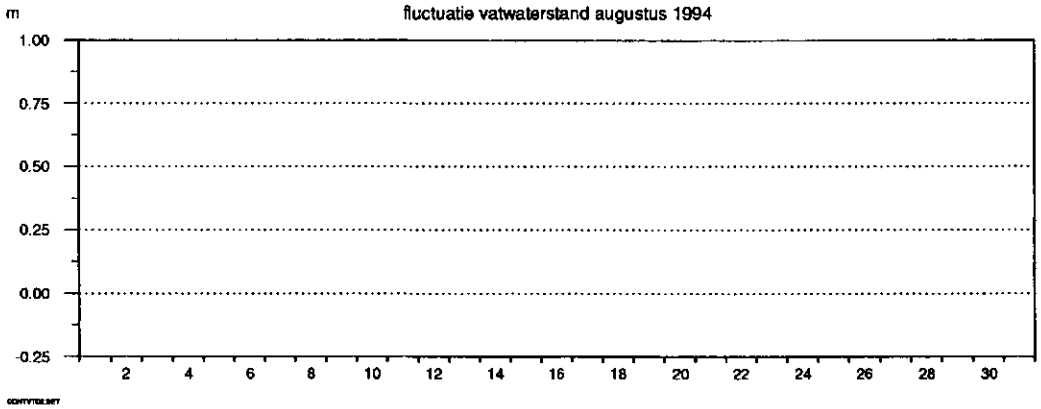


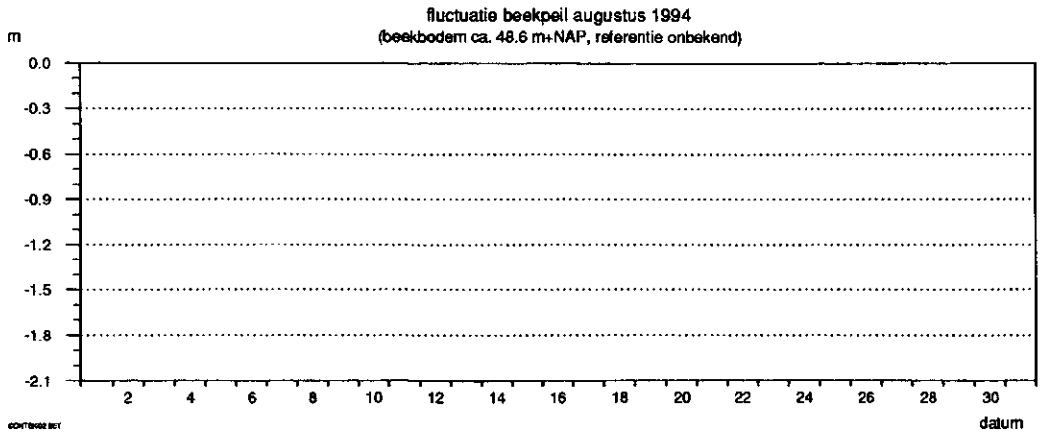


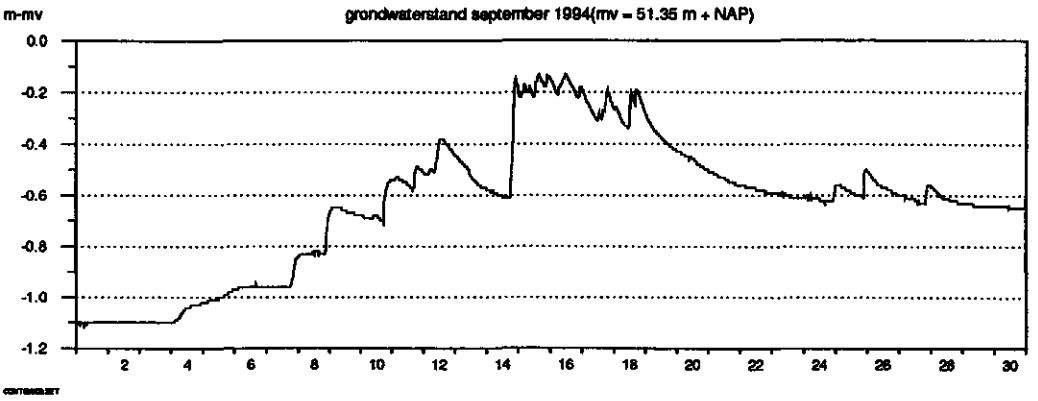


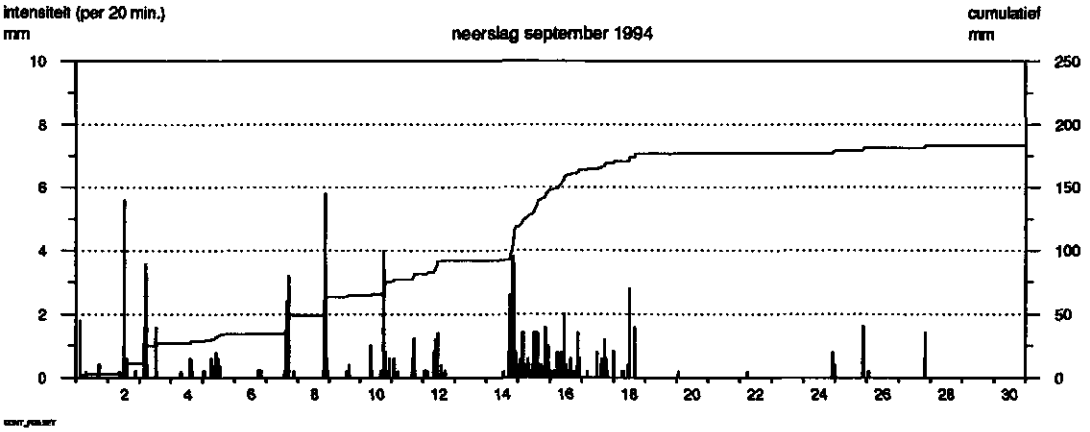

m-mv
grondwaterstand augustus 1994 (mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

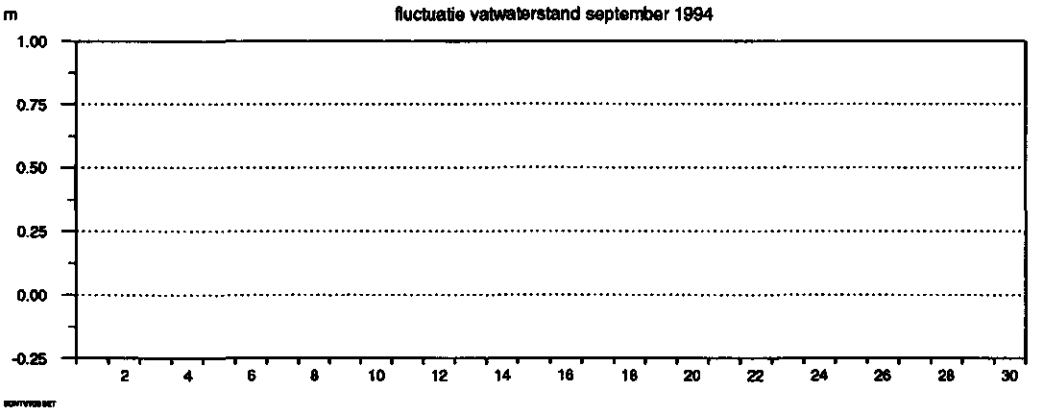

intensiteit (per 20 min.)
mm
neerslag augustus 1994
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

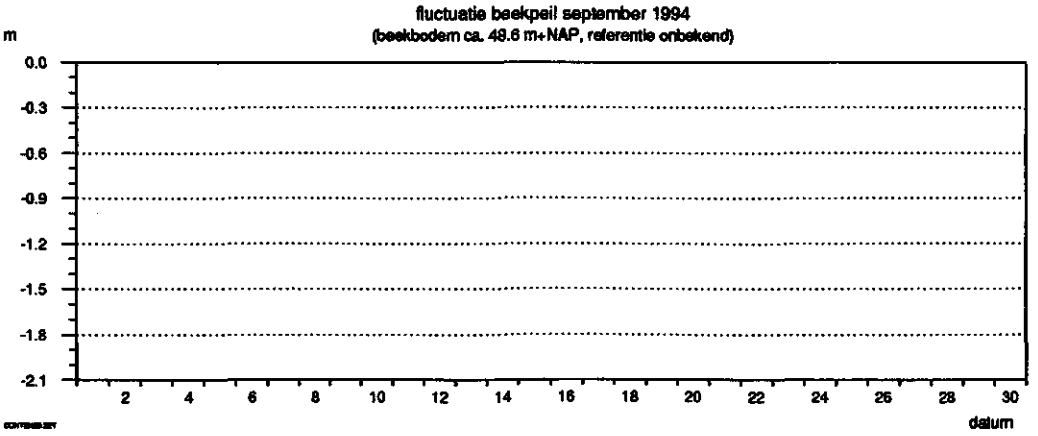

m
fluctuatie vatwaterstand augustus 1994
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

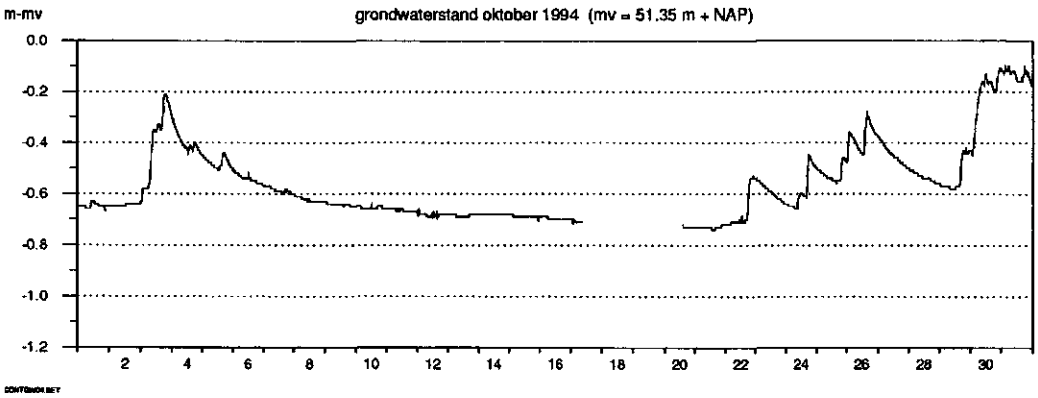

fluctuatie beekpeil augustus 1994
(beekbodem ca. 48.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
datum

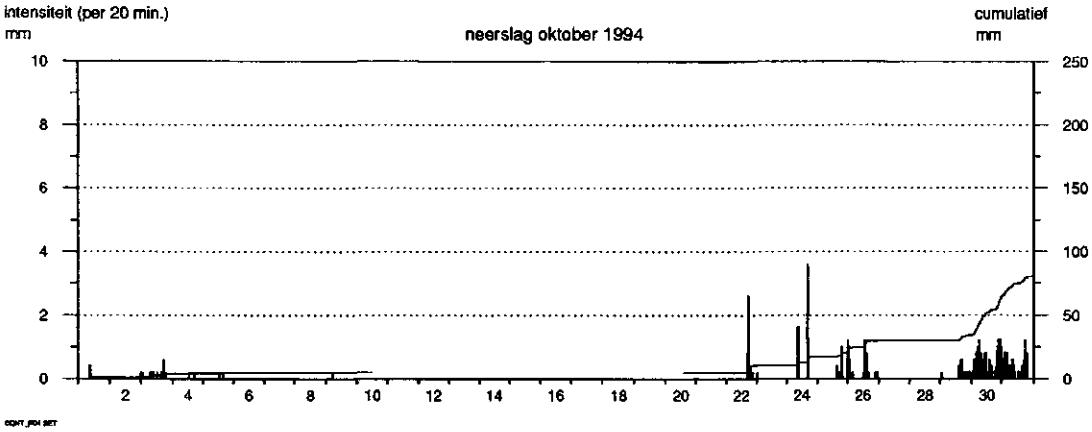

m-mv
grondwaterstand september 1994(mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

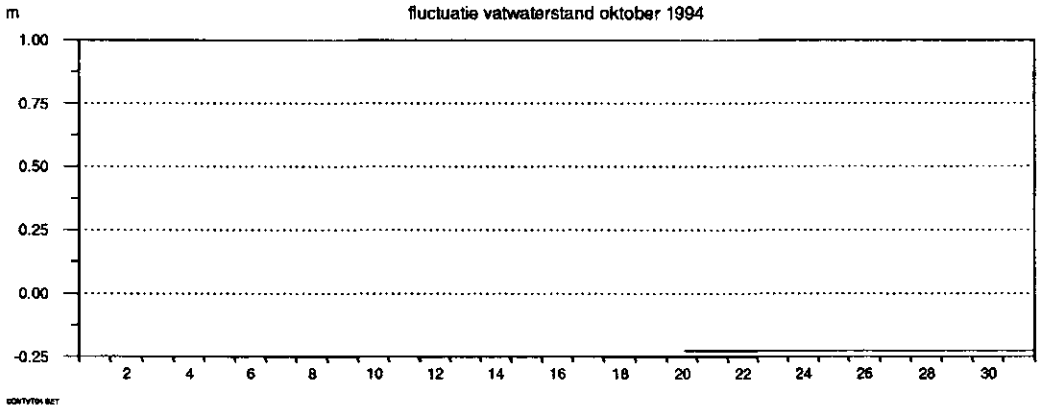

intensiteit (per 20 min.)
mm
neerslag september 1994
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

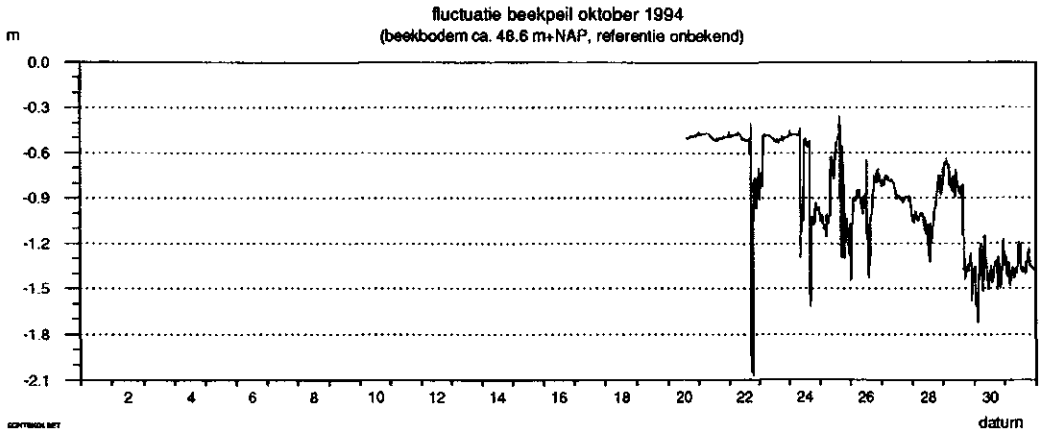

m
fluctuatie vatwaterstand september 1994
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

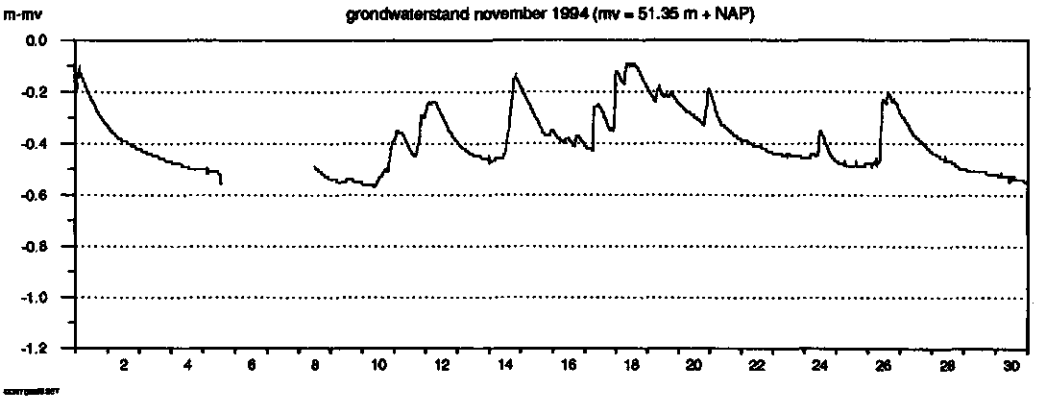

fluctuatie beekpeil september 1994
(beekbodem ca. 49.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
datum

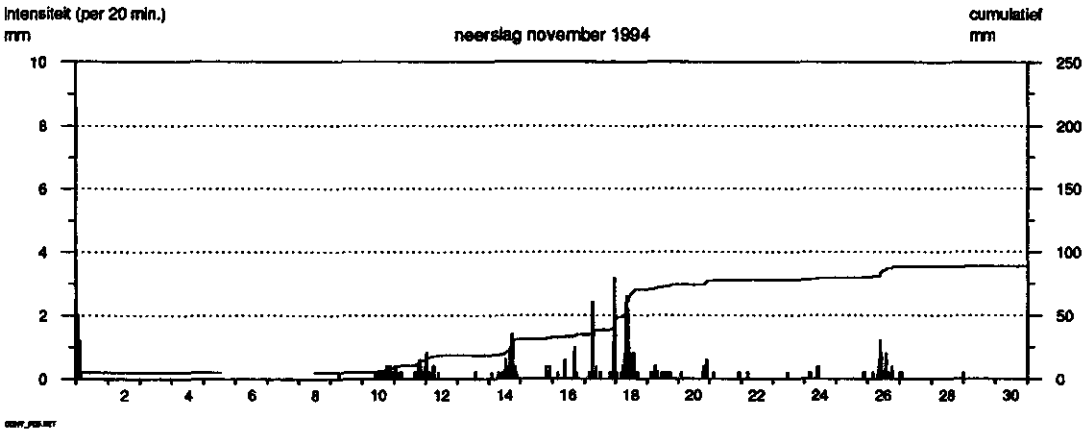

m-mv
grondwaterstand oktober 1994 (mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

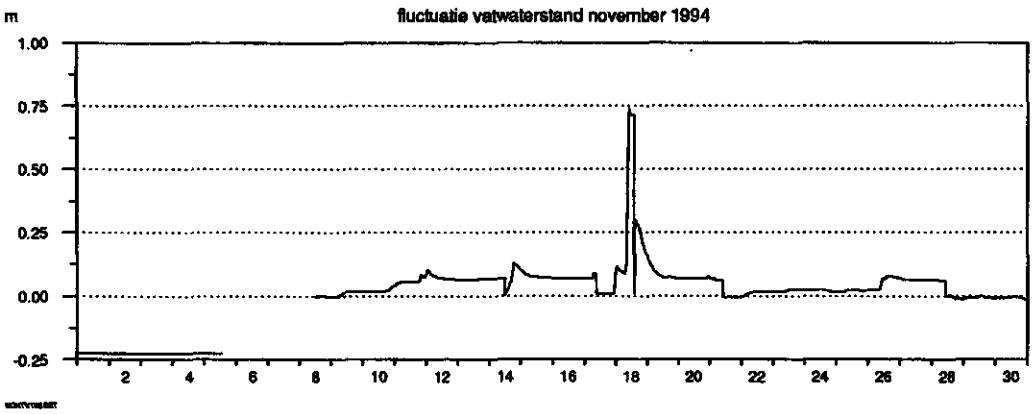

intensiteit (per 20 min.)
mm
neerslag oktober 1994
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

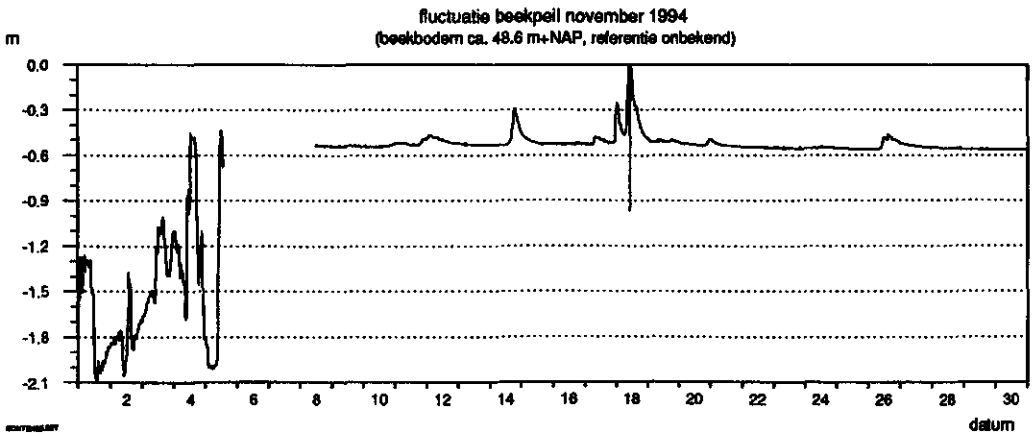

m
fluctuatie vatwaterstand oktober 1994
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

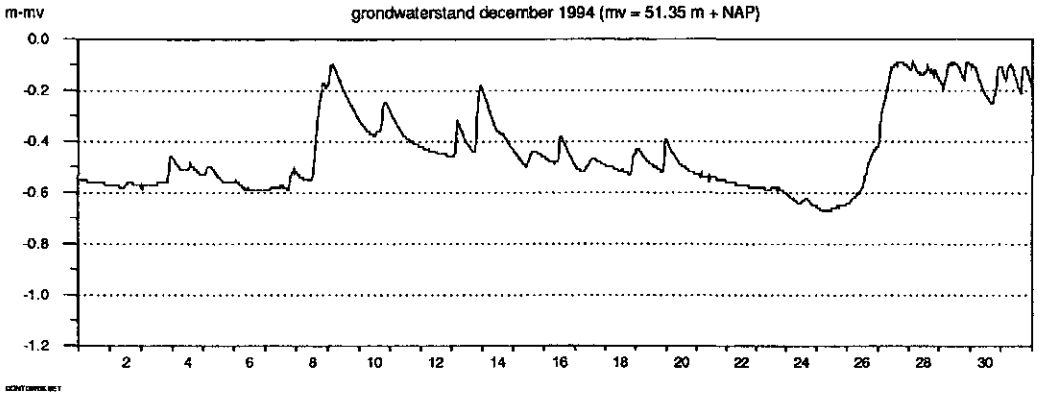

fluctuatie beekpeil oktober 1994
(beekbodem ca. 48.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
datum

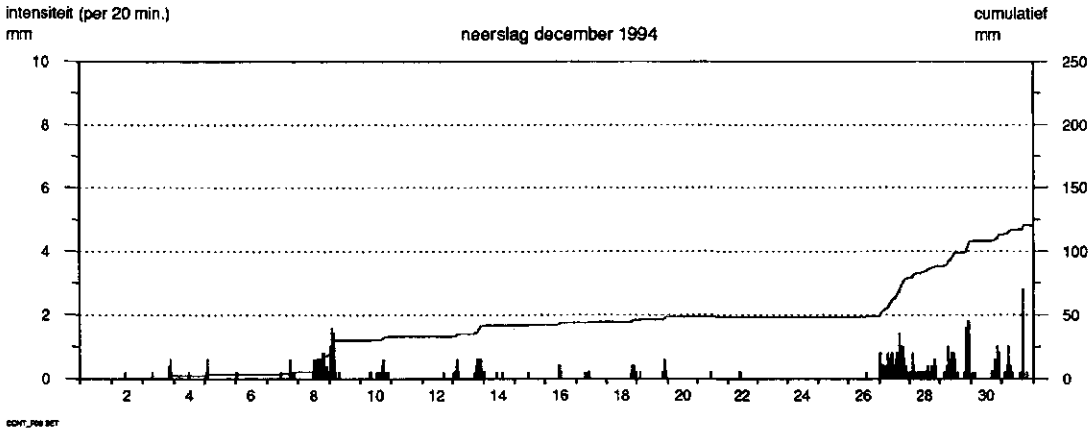

m-mv
grondwaterstand november 1994 (mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

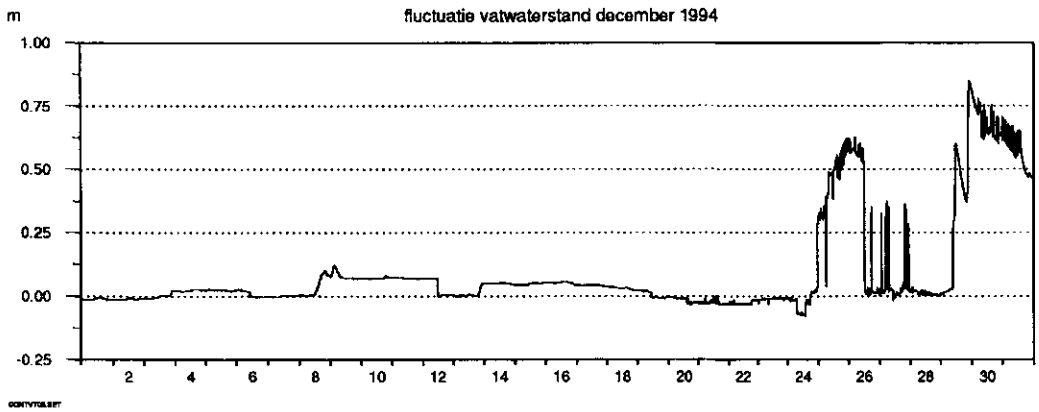

intensitek (per 20 min.)
mm
neerslag november 1994
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

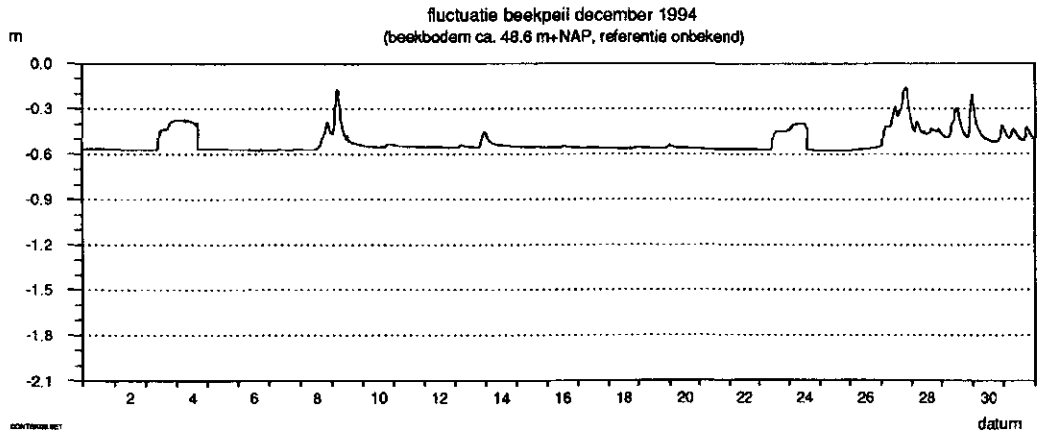

m
fluctuatie vatwaterstand november 1994
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

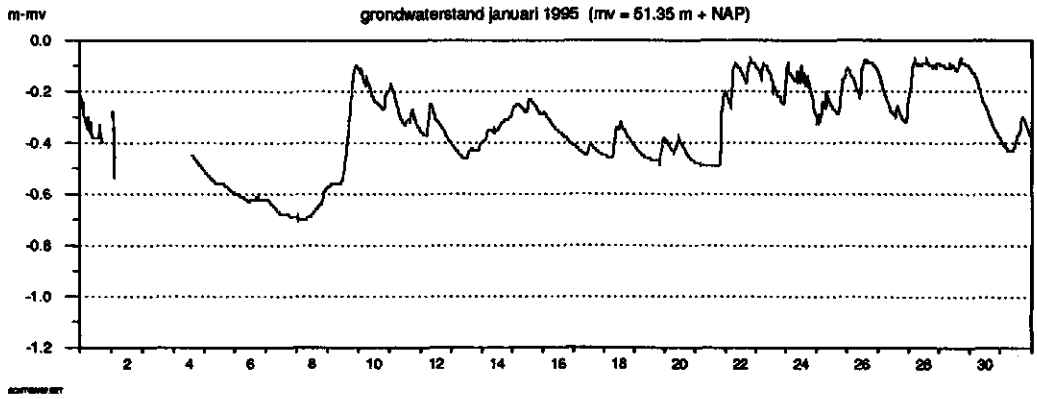

fluctuatie beekpeil november 1994
(beekbodem ca. 48.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
datum

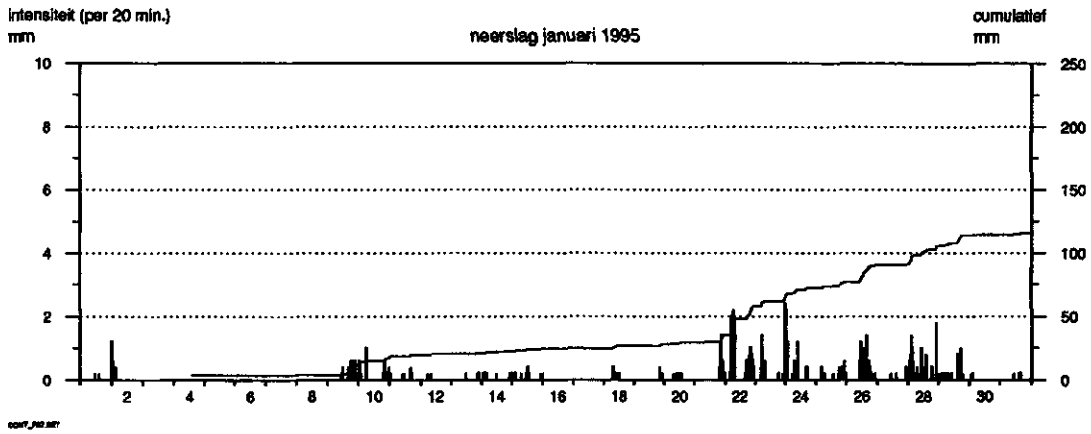

m-mv
grondwaterstand december 1994 (mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

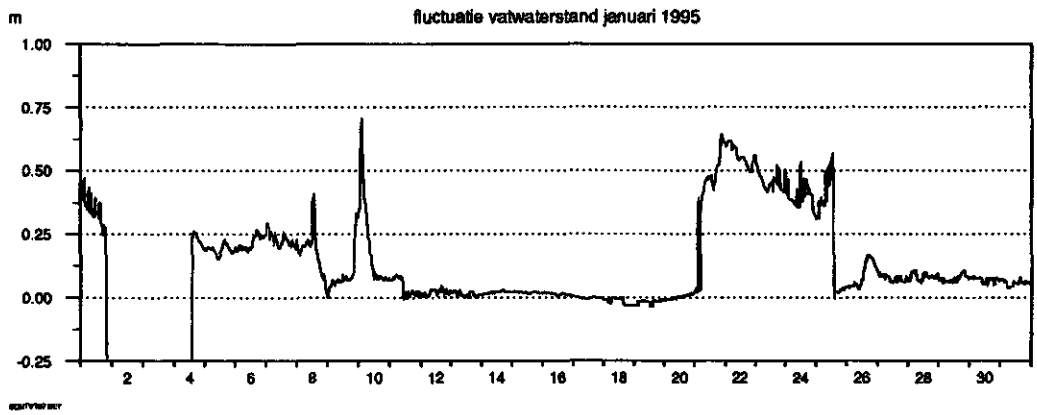

intensiteit (per 20 min.)
mm
neerslag december 1994
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

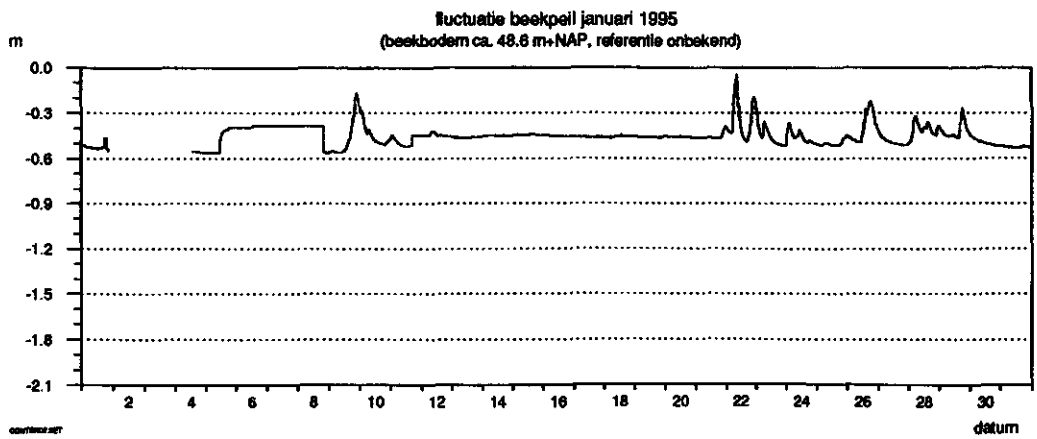

m
fluctuatie vatwaterstand december 1994
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

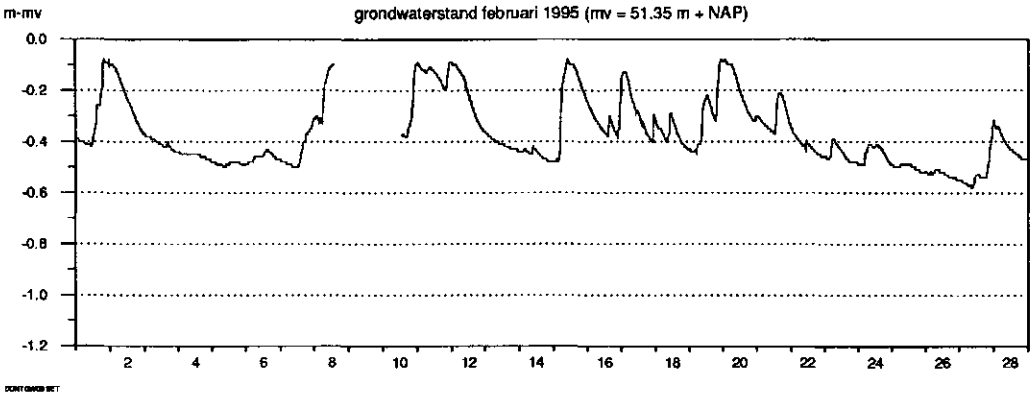

fluctuatie beekpeil december 1994
(beekbodem ca. 48.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
datum

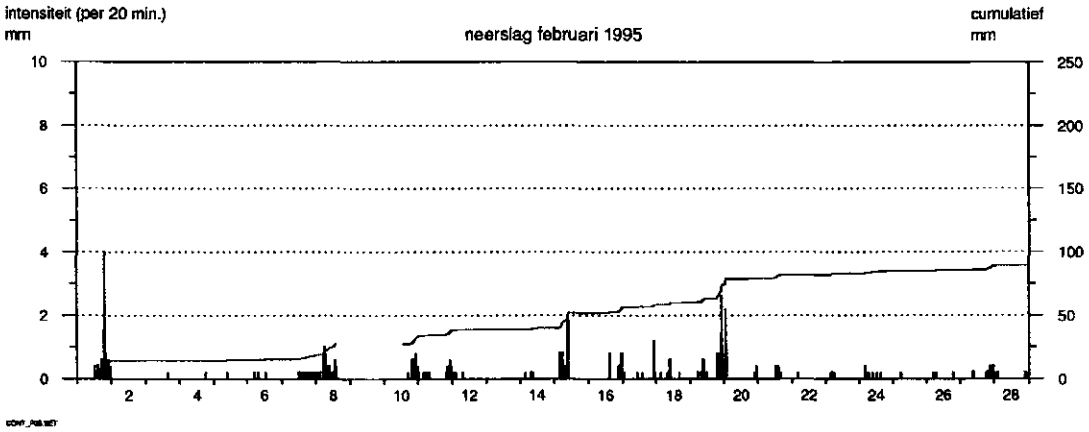

m-mv
grondwaterstand januari 1995 (mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

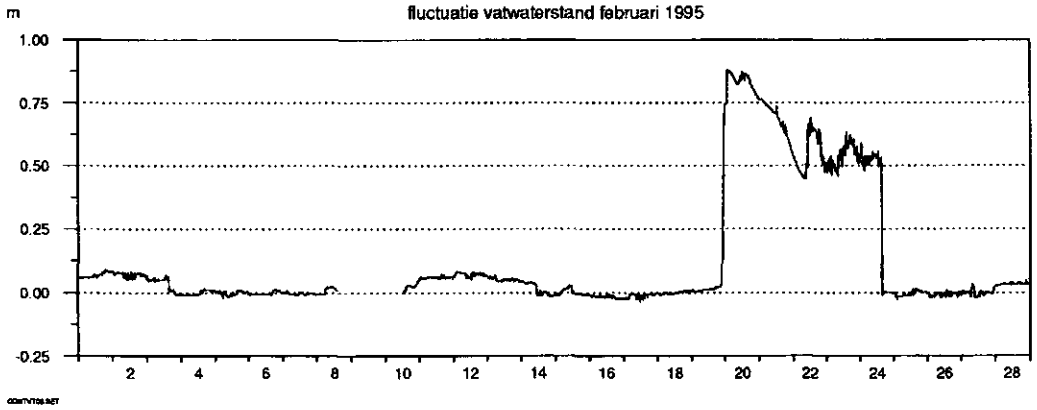

intensiteit (per 20 min.)
mm
neerslag januari 1995
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

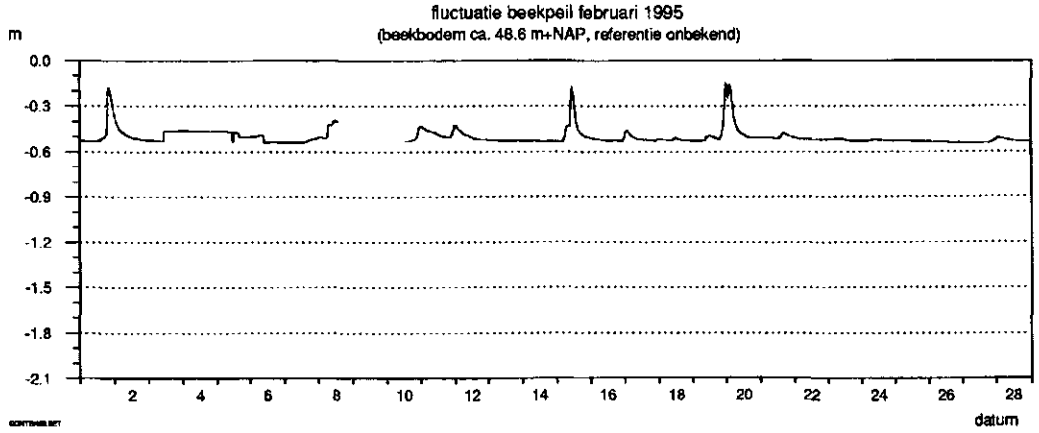

m
fluctuatie vatwaterstand januari 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

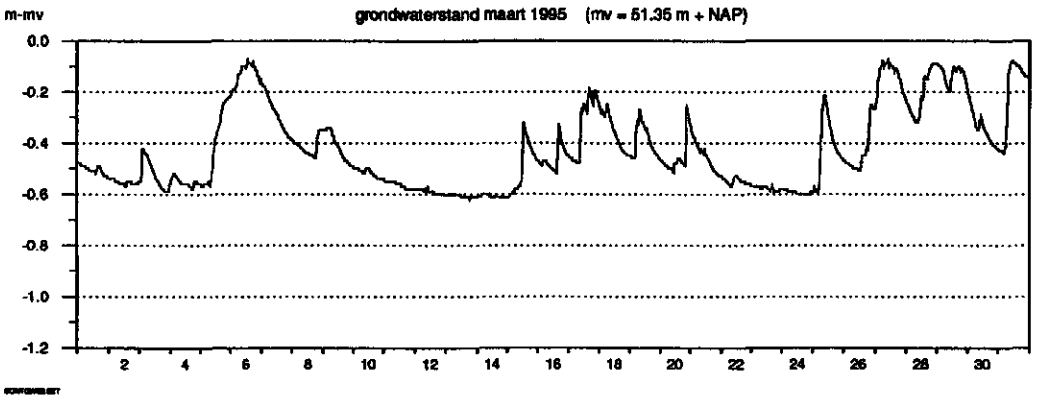

fluctuatie beekpeil januari 1995
(beekbodem ca. 48.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
datum

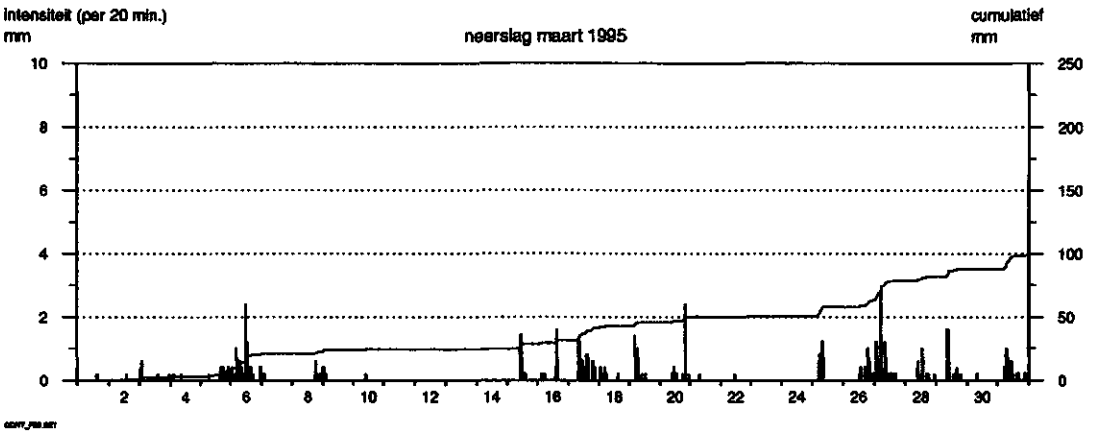

m-mv
grondwaterstand februari 1995 (mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28

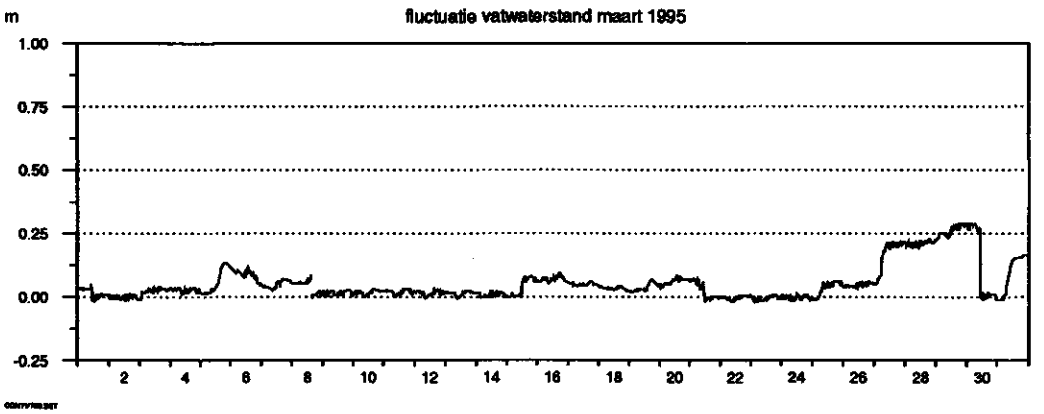

intensiteit (per 20 min.)
mm
neerslag februari 1995
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28

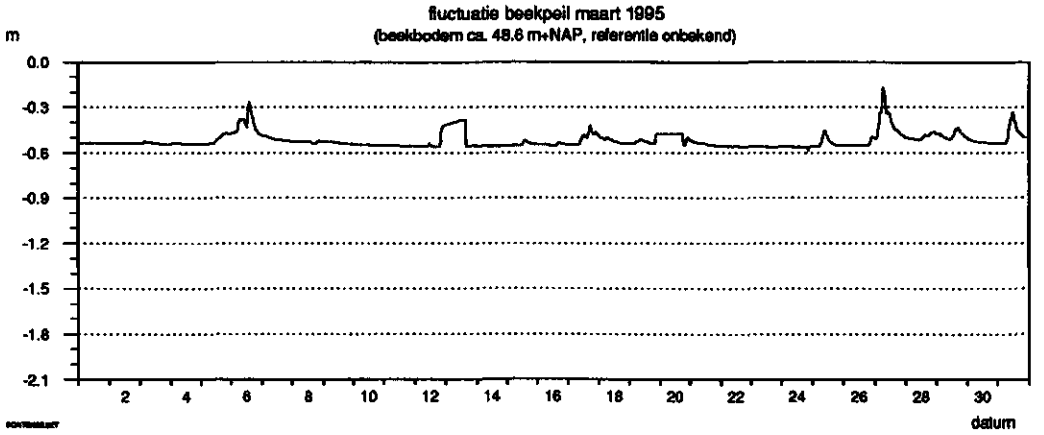

m
fluctuatie vatwaterstand februari 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28

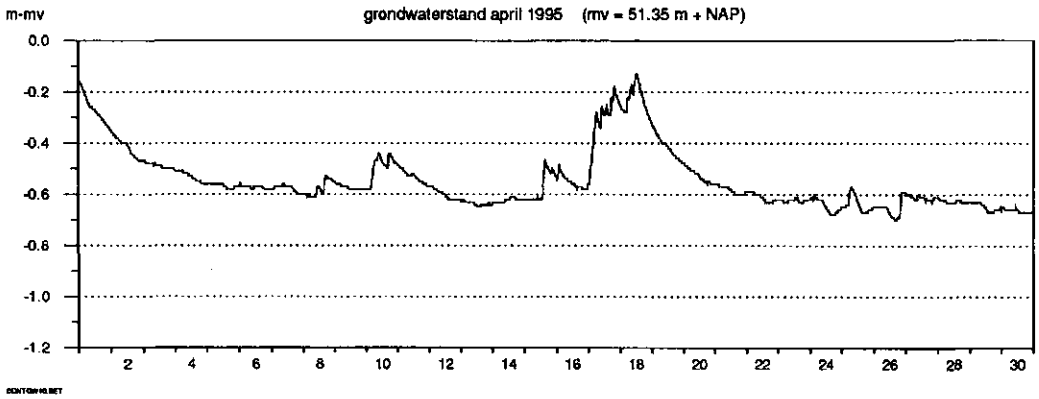

fluctuatie beekpeil februari 1995
(beekbodem ca. 48.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28
datum

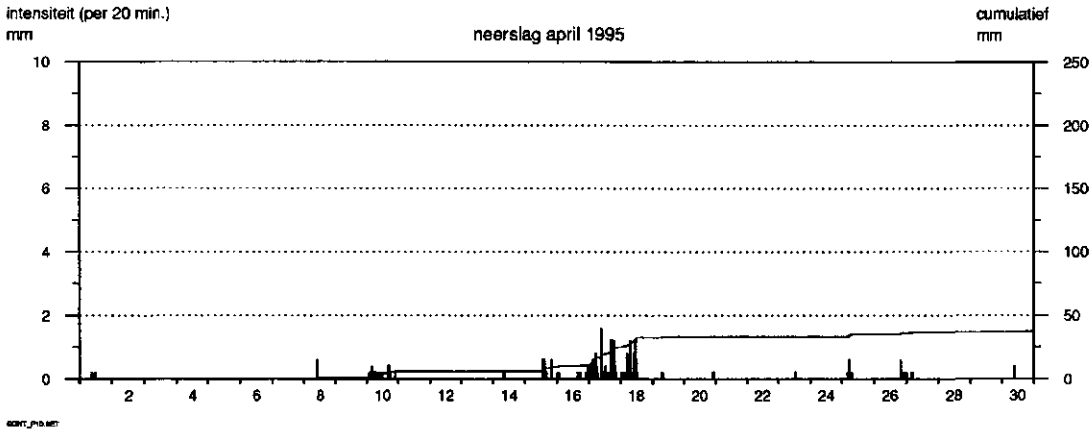

m-mv
grondwaterstand maart 1995 (mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

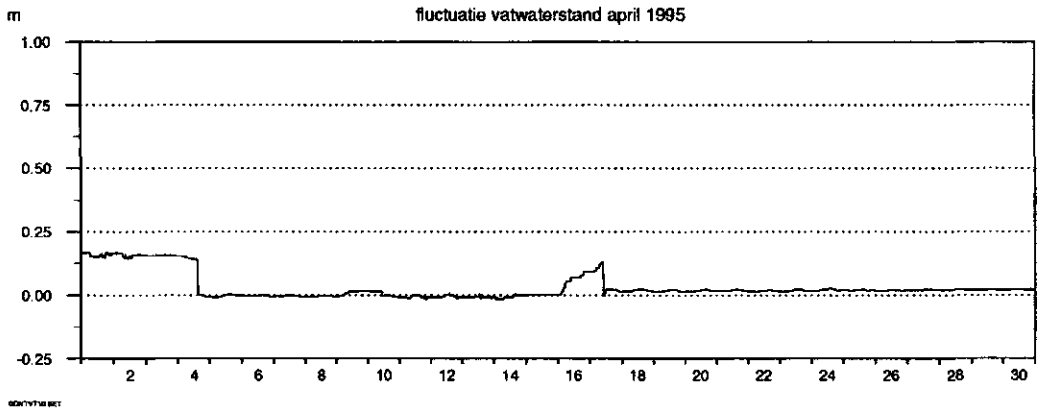

intensiteit (per 20 min.)
mm
neerslag maart 1995
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

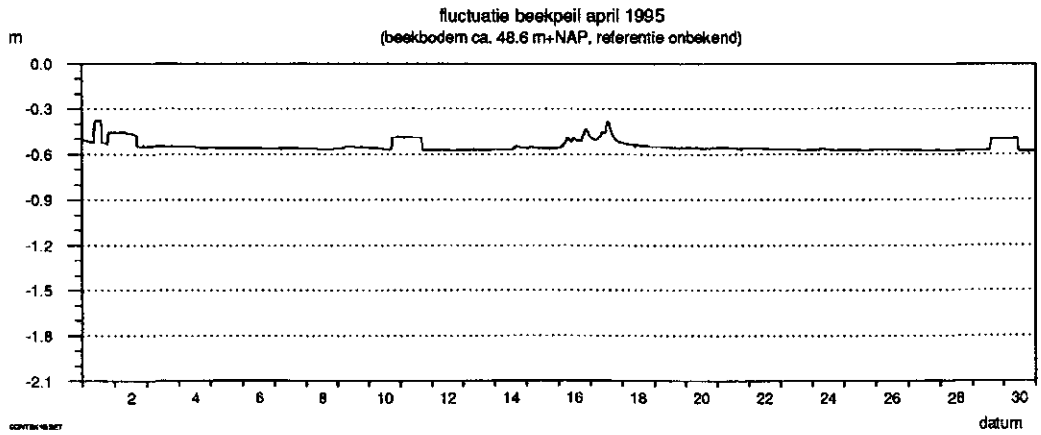

m
fluctuatie vatwaterstand maart 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

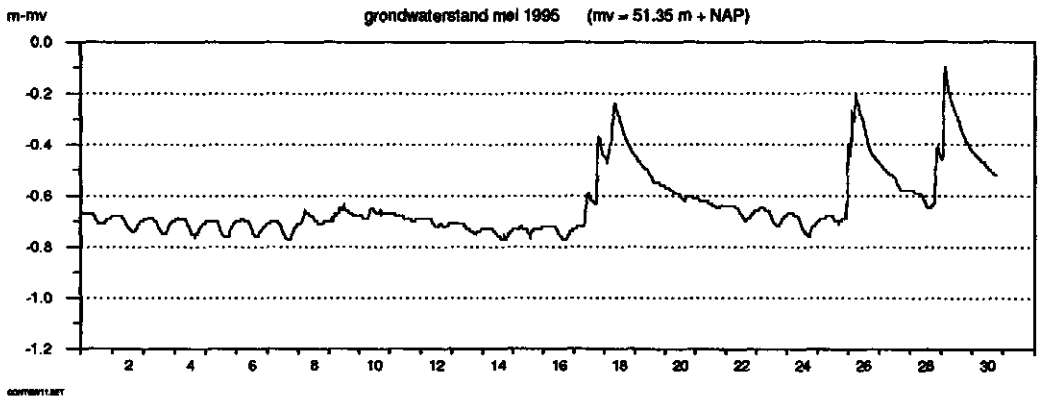

fluctuatie beekpeil maart 1995
(beekbodem ca. 48.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
datum

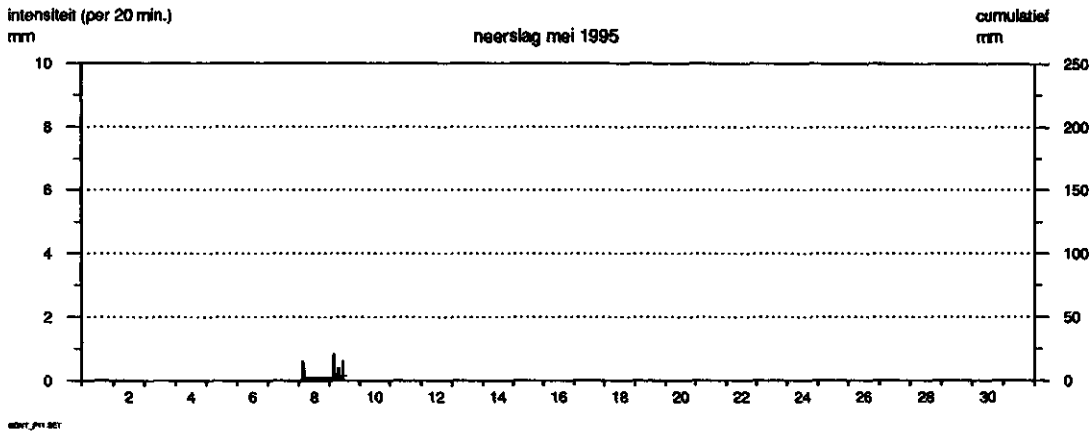

m-mv
grondwaterstand april 1995 (mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

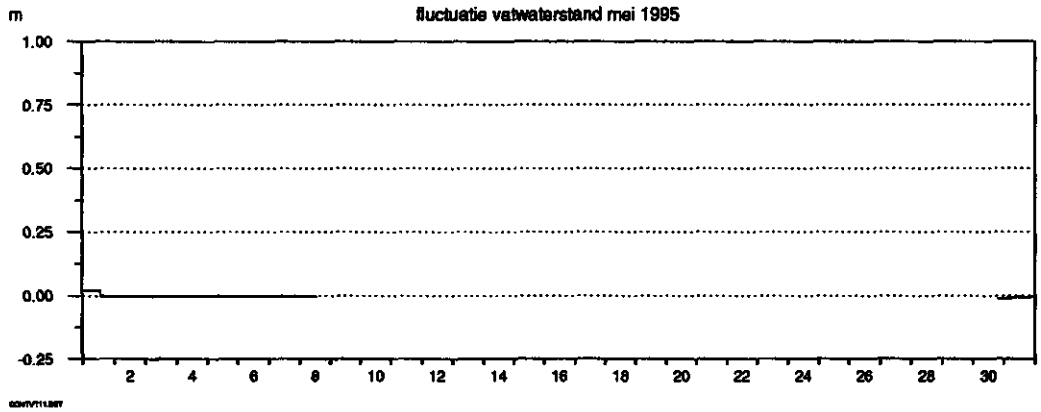

intensiteit (per 20 min.)
mm
neerslag april 1995
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

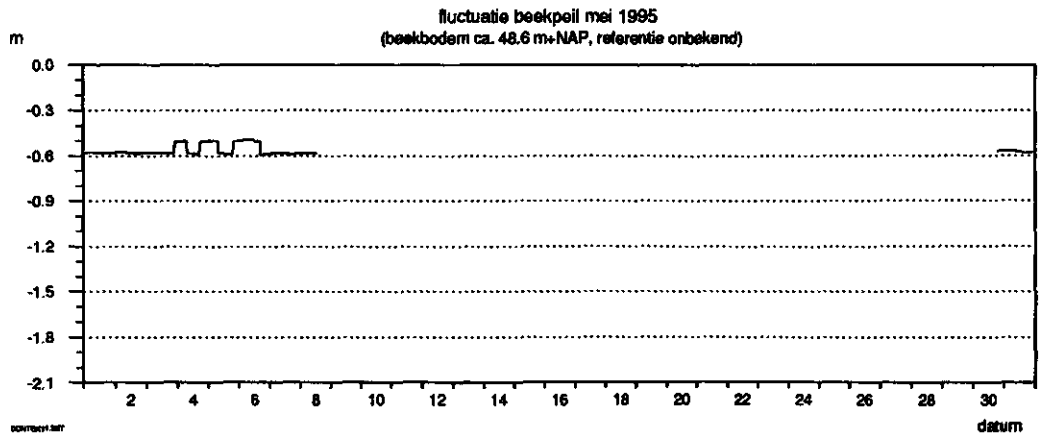

m
fluctuatie vatwaterstand april 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

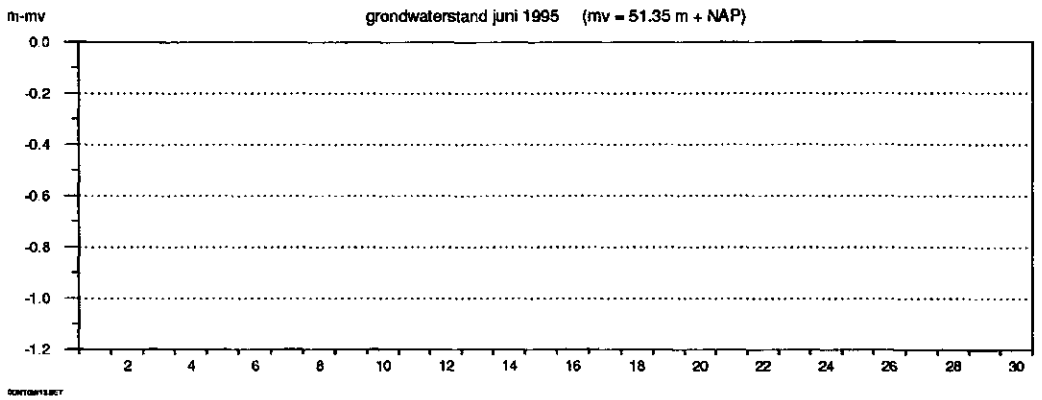

fluctuatie beekpeil april 1995
(beekbodem ca. 48.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
datum

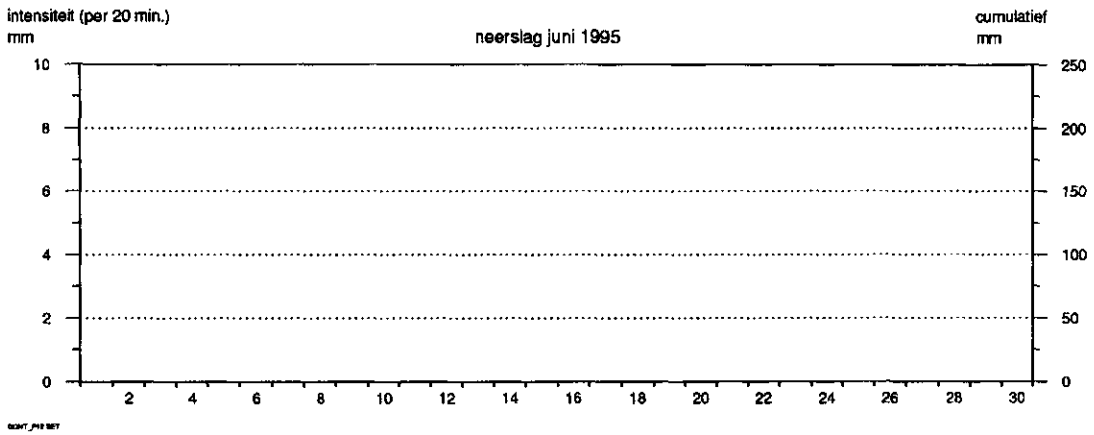

m-mv
grondwaterstand mei 1995 (mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

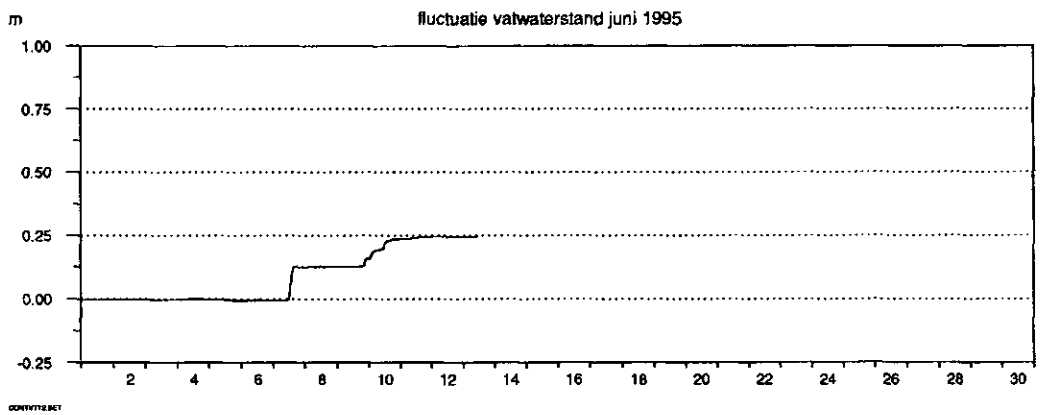

intensiteit (per 20 min.)
mm
neerslag mei 1995
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

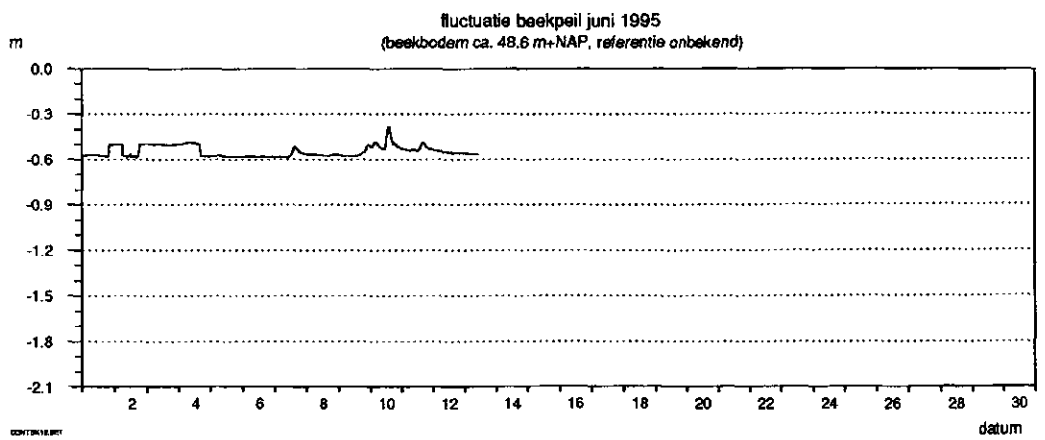

m
fluctuatie vatwaterstand mei 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30


fluctuatie beekpeil mei 1995
(beekbodem ca. 48.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
datum


m-mv
grondwaterstand juni 1995 (mv = 51.35 m + NAP)
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
-1.2
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30


intensiteit (per 20 min.)
mm
neerslag juni 1995
cumulatief
mm
10
8
6
4
2
0
250
200
150
100
50
0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30


m
fluctuatie vatwaterstand juni 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30


fluctuatie beekpeil juni 1995
(beekbodem ca. 48.6 m+NAP, referentie onbekend)
m
0.0
-0.3
-0.6
-0.9
-1.2
-1.5
-1.8
-2.1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30
datum

Aanhangsel 8 Tabel met grondwaterstandswaarnemingen

De volgende tabel bevat de grondwaterstandswaarnemingen voor de vier raaien in cm ten opzichte van mv.

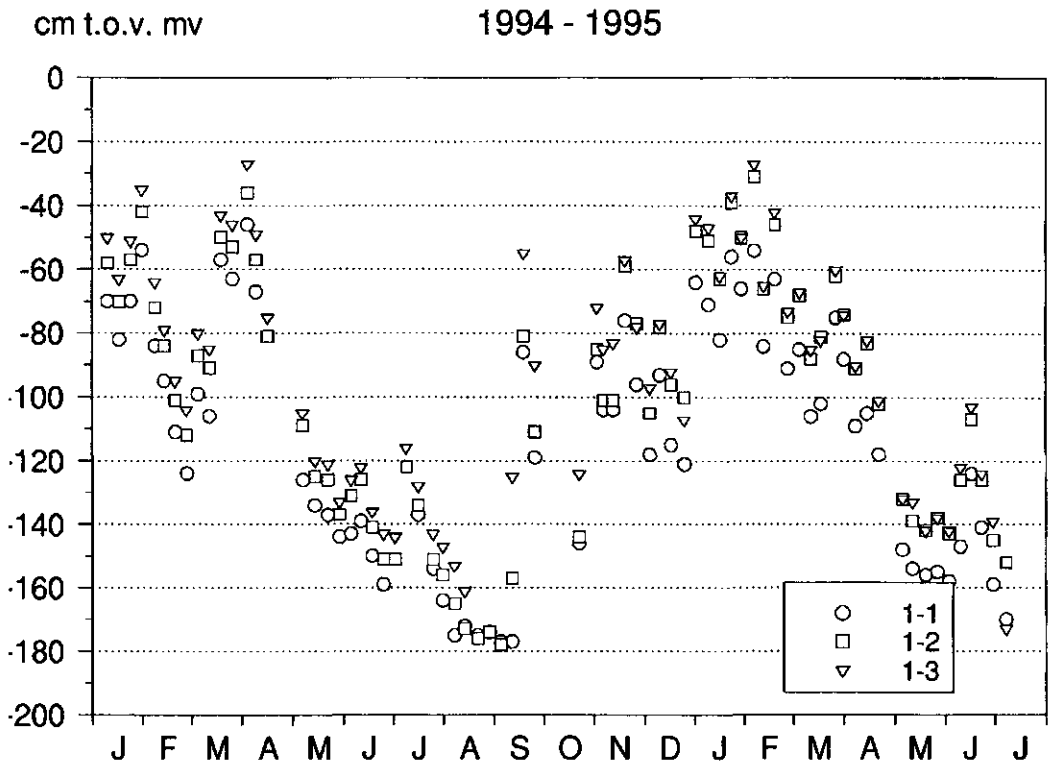
Verklaring van de symbolen:

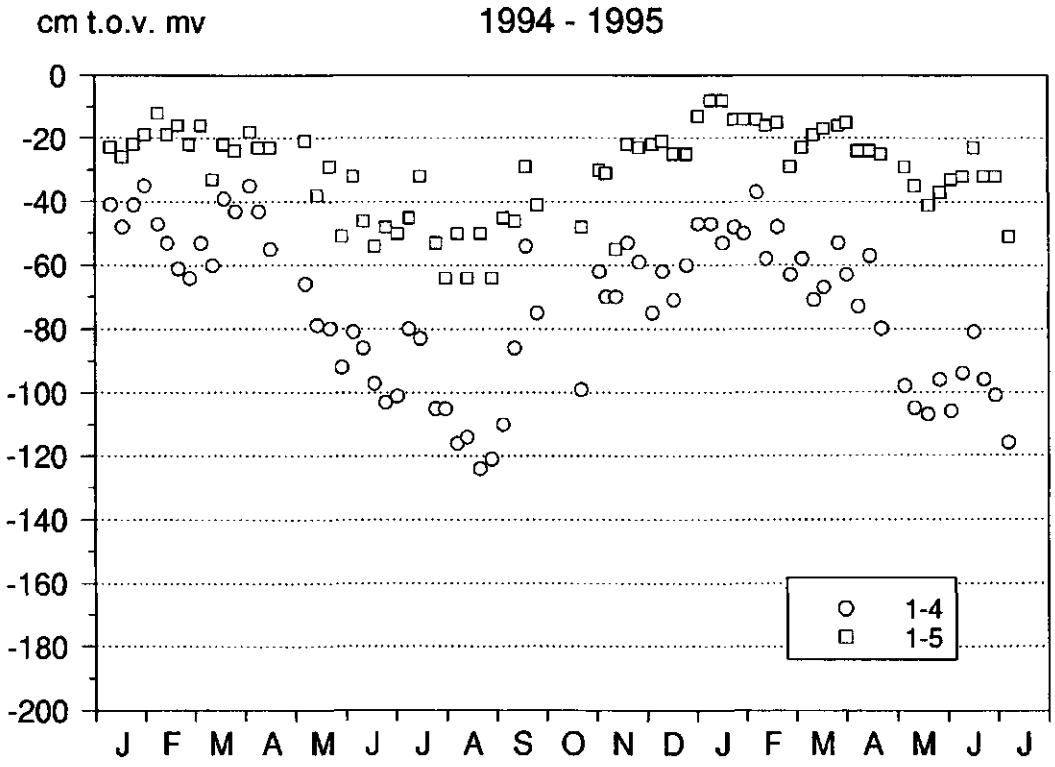
dagnr.	= dagnummer gerekend vanaf 1-1-1994 (negatieve waarden: dagen in 1993);
2-1	= raai 2, buis 1;
beek-1	= buis onder de beekbodem in raai 1;
2-3-li	= raai 2, buis 3, links;
2-3-re	= raai 2, buis 3, rechts;
NA	= niet aanwezig.

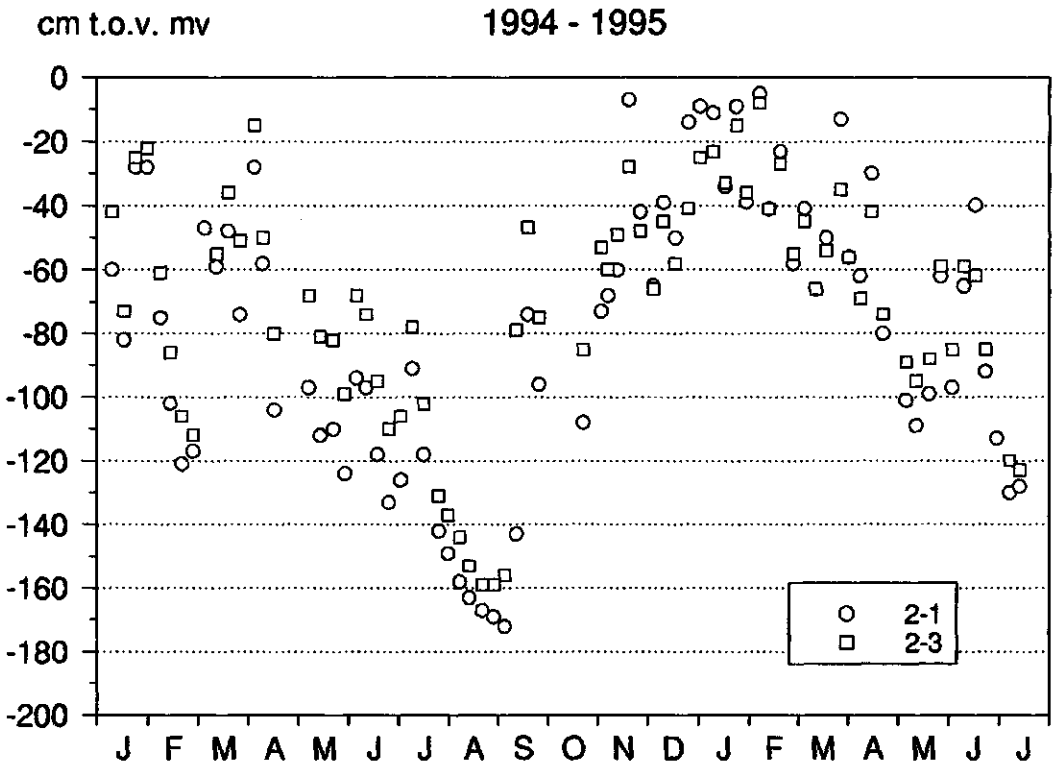
Datum	Dagnr.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	beek-1	2-1	2-2	2-3-li	2-3-re	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	beek-2
29-Nov-93	-32	-114	-108	-106	-65	-20	57	-114	-92	-99	-98	-106	-99	-43	-44	-30	50
06-Dec-93	-25	-124	-111	-107	-62	-15	63	-62	-86	-51	-55	-73	-87	-37	-42	-27	45
13-Dec-93	-18	-79	-67	-58	-43	-22	29	-27	-86	-1	-8	-13	-6	-25	-38	-35	42
20-Dec-93	-11	-55	-44	-40	-34	-19	29	-23	-86	-9	-15	-12	-22	-30	-38	-35	36
27-Dec-93	-4	-55	-43	-37	-35	-11	64	-25	-85	-10	-17	-17	-40	-30	-34	-22	50
03-Jan-94	3	-39	-31	-20	-25	-8	67	-23	-84	-6	-12	-9	-17	-26	-29	-20	50
10-Jan-94	10	-70	-58	-50	-41	-23	25	-60	-86	-42	-47	-52	-58	-40	-48	-41	30
17-Jan-94	17	-82	-70	-63	-48	-26	NA	-82	-86	-73	-78	-73	-67	-43	-50	-43	50
24-Jan-94	24	-70	-57	-51	-41	-22	28	-28	-85	-25	-30	-26	-37	-38	-44	-39	35
31-Jan-94	31	-54	-42	-35	-35	-19	27	-28	-86	-22	-26	-26	-37	-38	-44	-40	33
08-Feb-94	39	-84	-72	-64	-47	-12	62	-75	-86	-61	-65	-66	-66	-36	-39	-28	46
14-Feb-94	45	-95	-84	-79	-53	-19	NA	-102	-86	-86	-90	-88	-82	-41	-43	-31	50
21-Feb-94	52	-111	-101	-95	-61	-16	NA	-121	-99	-106	NA	-108	-104	-41	-42	-30	50
28-Feb-94	59	-124	-112	-104	-64	-22	49	-117	-91	-112	-98	-116	-115	-44	-49	-40	36
07-Mar-94	66	-99	-87	-80	-53	-16	24	-47	-85	NA	-56	-64	-55	-40	-42	-39	35
14-Mar-94	73	-106	-91	-85	-60	-33	25	-59	-86	-55	-61	-62	-60	-46	-51	-45	30
21-Mar-94	80	-57	-50	-43	-39	-22	26	-48	-86	-36	-41	-40	-43	-41	-47	-44	33
28-Mar-94	87	-63	-53	-46	-43	-24	19	-74	-87	-51	-56	-54	-54	-42	-50	-45	30
06-Apr-94	96	-46	-36	-27	-35	-18	20	-28	-87	-15	-20	-20	-28	-36	-40	-37	35
11-Apr-94	101	-67	-57	-49	-43	-23	25	-58	-88	-50	-55	-51	-56	-42	-49	-42	30
18-Apr-94	108	NA	-81	-75	-55	-23	23	-104	-90	-80	-86	-82	-78	-48	-55	-47	27
25-Apr-94	115	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
02-May-94	122	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
09-May-94	129	-126	-109	-105	-66	-21	36	-97	-84	-68	-93	-87	-107	-50	-52	-47	30
16-May-94	136	-134	-125	-120	-79	-38	21	-112	-87	-81	-98	-96	-113	-57	-60	-51	25
24-May-94	144	-137	-126	-121	-80	-29	23	-110	-87	-82	-99	-92	-107	-56	-59	-49	26
31-May-94	151	-144	-137	-133	-92	-51	21	-124	-90	-99	NA	-106	-120	-64	-65	-52	21
07-Jun-94	158	-143	-131	-126	-81	-32	22	-94	-86	-68	-86	-82	-98	-55	-57	-49	30
13-Jun-94	164	-139	-126	-122	-86	-46	24	-97	-86	-74	-93	-79	-91	-61	-61	-50	27
20-Jun-94	171	-150	-141	-136	-97	-54	22	-118	-88	-95	NA	-100	-115	-65	-64	-50	24
27-Jun-94	178	-159	-151	-143	-103	-48	30	-133	-97	-110	NA	-113	-128	-70	-69	-54	20
04-Jul-94	185	NA	-151	-144	-101	-50	19	-126	-96	-106	NA	-113	-124	-70	-70	-54	20
11-Jul-94	192	NA	-122	-116	-80	-45	20	-91	-87	-78	-96	-83	-92	-62	-65	-55	20
18-Jul-94	199	-137	-134	-128	-83	-32	58	-118	-95	-102	NA	-108	-120	-65	-60	-41	50
27-Jul-94	208	-154	-151	-143	-105	-53	29	-142	-117	-131	NA	-130	-141	-85	-80	-62	-1
02-Aug-94	214	-164	-156	-147	-105	-64	28	-149	-125	-137	NA	-133	-142	-82	-80	-62	1
09-Aug-94	221	-175	-165	-153	-116	-50	19	-158	-129	-144	NA	-141	NA	-89	-80	-63	1
15-Aug-94	227	-172	-173	-161	-114	-64	15	-163	-135	-153	NA	-149	NA	-81	-80	-62	10
23-Aug-94	235	-175	-176	NA	-124	-50	25	-167	-141	-159	NA	-153	NA	-83	-80	-64	1
30-Aug-94	242	-174	-174	NA	-121	-64	16	-169	-141	-159	NA	-158	NA	-80	-80	-60	9
06-Sep-94	249	-177	-178	NA	-110	-45	17	-172	-122	-156	NA	-161	NA	-72	-69	-58	16
13-Sep-94	256	-177	-157	-125	-86	-46	24	-143	-86	-79	-94	-125	-135	-63	-64	-52	26
20-Sep-94	263	-86	-81	-55	-54	-29	23	-74	-85	-47	-68	-52	-59	-52	-57	-46	30
27-Sep-94	270	-119	-111	-90	-75	-41	23	-96	-86	-75	-93	-82	-87	-62	-54	-54	0
03-Oct-94	276	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10-Oct-94	283	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
17-Oct-94	290	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
24-Oct-94	297	-146	-144	-124	-99	-48	21	-108	-85	-85	-101	-105	-116	-64	-67	-54	24
04-Nov-94	308	-89	-85	-72	-62	-30	23	-73	-86	-53	-70	-61	-64	-50	-53	-47	28
08-Nov-94	312	-104	-101	-85	-70	-31	23	-68	-85	-60	-76	-65	-77	-49	-53	-47	29
14-Nov-94	318	-104	-101	-83	-70	-55	25	-60	-85	-49	-75	-58	-69	-50	-55	-46	31
21-Nov-94	325	-76	-59	-57	-53	-22	25	-7	-86	-28	-29	-37	-58	-46	-46	-43	34
28-Nov-94	332	-96	-77	-78	-59	-23	27	-42	-85	-48	-50	-47	-62	-50	-51	-46	31
06-Dec-94	340	-118	-105	-97	-75	-22	25	-65	-83	-66	-68	-77	-88	-53	-56	-49	26
12-Dec-94	346	-93	-78	-77	-62	-21	25	-39	-83	-45	-49	-56	-66	-47	-54	-47	32
19-Dec-94	353	-115	-96	-92	-71	-25	25	-50	-93	-58	-59	-67	-76	-51	-54	-49	29
27-Dec-94	361	-121	-100	-107	-60	-25	35	-14	-80	-41	-35	-53	-83	-35	-49	-34	46
03-Jan-95	368	-64	-48	-44	-47	-13	28	-9	-83	-25	-27	-34	-48	-41	-46	-42	35
11-Jan-95	376	-71	-51	-47	-47	-8	48	-11	-84	-23	-25	-46	-51	-39	-39	-37	40
18-Jan-95	383	-82	-63	-62	-53	-8	63	-34	-85	-33	-35	-44	-57	-39	-41	-30	46
25-Jan-95	390	-56	-39	-37	-48	-14	24	-9	-85	-15	-17	-23	-37	-42	-43	-41	37
31-Jan-95	396	-66	-50	-50	-50	-14	25	-39	-85	-36	-36	-48	-50	-42	-44	-44	34
08-Feb-95	404	-54	-31	-27	-37	-14	31	-5	-83	-8	-11	-17	-47	-39	-49	-34	29
14-Feb-95	410	-84	-66	-65	-58	-16	28	-41	-84	-41	-43	-50	-65	-47	-50	-46	31
21-Feb-95	417	-63	-46	-42	-48	-15	26	-23	-84	-27	-30	-35	-47	-42	-44	-42	34
01-Mar-95	425	-91	-75	-73	-63	-29	25	-58	-84	-55	-57	-62	-72	-49	-56	-46	27
08-Mar-95	432	-85	-68	-67	-58	-23	27	-41	-84	-45	-49	-53	-66	-47	-51	-47	31
15-Mar-95	439	-106	-88	-85	-71	-19	24	-66	-84	-66	-68	-76	-86	-52	-53	-48	27
21-Mar-95	445	-102	-81	-82	-67	-17	24	-50	-84	-54	-54	-62	-75	-50	-52	-49	31
30-Mar-95	454	-75	-62	-60	-53	-16	25	-13	-82	-35	-37	-45	-58	-45	-50	-45	32
04-Apr-95	459	-88	-74	-74	-63	-15	23	-56	-84	-56	-59	-64	-72	-46	-52	-46	29
11-Apr-95	466	-109	-91	-90	-73	-24	25	-62	-84	-69	-70	-75	-89	-49	-50	-57	28
18-Apr-95	473	-105	-83	-82	-57	-24	28	-30	-82	-42	-45	-52	-76	-44	-51	-43	36
25-Apr-95	480	-118	-102	-101	-80	-25	25	-80	-83	-74	-82	-86	-93	-55	-58	-50	24
02-May-95	487	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	50
09-May-95	494	-148	-132	-132	-98	-29	21	-101	-129	-89	NA	-102	-116	-67	-67	-54	22
15-May-95	500	-154	-139	-133	-105	-35	10	-109	-76	-95	NA	-112	-123	-66	-68	-57	20
23-May-95	508	-156	-142	-142	-107	-41	11	-99	-76	-88	NA	-101	-118	-67	-67	-57	20
30-May-95	515	-155	-138	-138	-96	-37	25	-62	-72	-59	NA	-75	-92	-59	-62	-53	NA
06-Jun-95	522	-158	-143	-142	-106	-33	20	-97	-72	-85	NA	-101	-111	-72	-70	-57	27
13-Jun-95	529	-147	-126	-122	-94	-32	20	-65	-71	-59	NA	-71	-77	-61	-63	-52	31
20-Jun-95	536	-124	-107	-103	-81	-23	21	-40	-73	-62	NA	-71	-77	-64	-63	-53	29
26-Jun-95	542	-141	-126	-124	-96	-32	22	-92	-74	-85	NA	-93	-100	-68	-69	-55	26
03-Jul-95	549	-159	-145	-139	-101	-32	21	-113	-83	NA	NA	-120	-126	-66	-65	-49	31
11-Jul-95	557	-170	-152	-173	-116	-51	20	-130	-93	-120	NA	-132	-138	-84	-78	-60	15
17-Jul-95	563	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-128	-88	-123	NA	-142	-146	-70	-68	-55	22

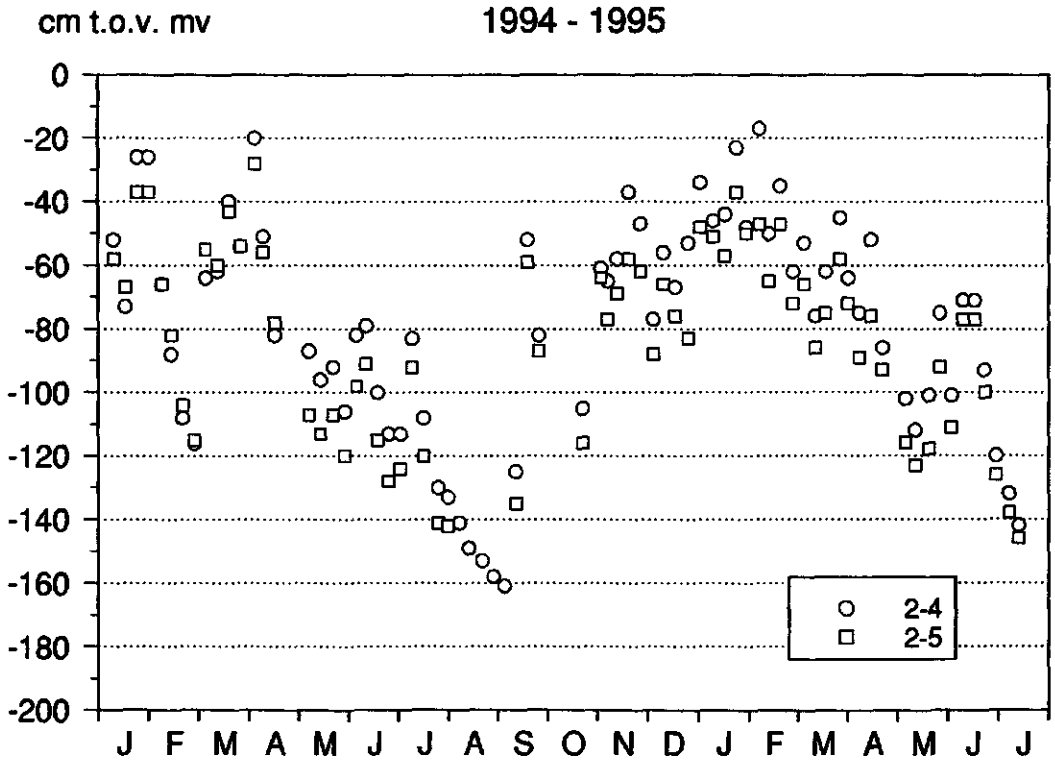
3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	beek-3	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	beek-4	Datum
-102	-97	-100	-80	-80	-112	37	-89	-99	-63	-59	-37	23	29-Nov-93
-77	-40	-55	-25	-34	-75	44	-57	-59	-7	-8	-9	25	06-Dec-93
-6	-8	-7	-7	-12	-53	48	-15	-15	-6	1	4	54	13-Dec-93
-11	-9	-22	-9	-16	-67	40	-37	-15	-3	2	-3	33	20-Dec-93
-26	-8	-18	-5	-16	-74	46	-44	-16	-5	1	-6	30	27-Dec-93
-6	-6	-18	-8	-16	-66	47	-31	-13	-4	-5	-2	35	03-Jan-94
-57	-23	-41	-19	-42	-84	36	-61	-47	-11	-20	-10	27	10-Jan-94
-67	-52	-73	-53	-55	-86	35	-66	-58	-17	-23	NA	25	17-Jan-94
-23	-10	-26	-12	-23	-73	38	-43	-18	-5	-5	-4	31	24-Jan-94
-23	-10	-26	-12	-26	-76	36	-46	-20	-5	-6	-4	32	31-Jan-94
-68	-39	-55	-29	-49	-88	42	-67	-55	-9	-19	-10	26	08-Feb-94
-85	-79	-90	-74	-72	-95	85	-77	-78	-45	-51	NA	NA	14-Feb-94
-111	-107	-108	-92	-89	-108	85	-97	-102	-68	-75	-55	22	21-Feb-94
-111	-106	-109	-90	-61	-95	35	-88	-106	-58	-59	-31	25	28-Feb-94
-54	-23	-48	-18	-23	-75	38	-38	-38	-6	-6	-4	27	07-Mar-94
-62	-30	-54	-35	-38	-78	36	-50	-42	-9	-11	-8	25	14-Mar-94
-35	-17	-37	-26	-36	-75	36	-54	-30	-8	-9	NA	30	21-Mar-94
-45	-29	-48	-37	-47	-83	36	-59	-43	-13	-15	NA	28	28-Mar-94
-14	-12	-21	-14	-87	-72	38	-38	-17	-7	NA	NA	31	06-Apr-94
-46	-25	-44	-33	-43	-84	35	-59	-40	-11	NA	NA	25	11-Apr-94
-88	-83	-82	-71	-66	-84	34	-83	-81	-60	NA	NA	23	18-Apr-94
NA	NA	NA	NA	NA	NA	85	NA	NA	NA	NA	NA	95	25-Apr-94
NA	NA	NA	NA	NA	NA	85	NA	NA	NA	NA	NA	95	02-May-94
-118	-90	-83	-45	-52	-88	36	-85	-98	-46	-43	-16	24	09-May-94
-134	-107	-95	-63	-60	-90	33	-101	-112	-68	-62	-36	20	16-May-94
-135	-110	-95	-64	-64	-86	32	-96	-112	-63	-53	-29	20	24-May-94
NA	-125	NA	-83	-74	-94	32	NA	NA	NA	NA	NA	95	31-May-94
NA	-94	-82	-48	-49	-78	85	NA	NA	NA	NA	NA	95	07-Jun-94
NA	-94	-89	-58	-55	-81	34	NA	NA	NA	NA	NA	95	13-Jun-94
NA	-118	-108	-80	-72	-93	32	NA	NA	NA	NA	NA	95	20-Jun-94
NA	-133	-110	-95	-82	-101	32	NA	NA	NA	NA	NA	95	27-Jun-94
NA	-124	NA	-87	-79	-95	29	NA	NA	NA	NA	NA	15	04-Jul-94
NA	-86	-89	-54	-59	-77	29	NA	NA	NA	NA	NA	15	11-Jul-94
NA	-122	NA	-87	-78	-95	85	NA	NA	NA	NA	NA	15	18-Jul-94
NA	-150	NA	NA	-100	-109	25	NA	NA	NA	NA	NA	15	27-Jul-94
NA	-159	NA	NA	-109	-116	25	NA	NA	NA	NA	NA	15	02-Aug-94
NA	-168	NA	NA	-115	-123	24	NA	NA	NA	NA	NA	14	09-Aug-94
NA	-174	NA	NA	-119	-124	25	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15-Aug-94
NA	-184	NA	NA	-121	-125	25	NA	NA	NA	NA	NA	12	23-Aug-94
NA	-188	NA	NA	-123	-124	25	NA	NA	NA	NA	NA	14	30-Aug-94
NA	-188	NA	NA	-100	-113	38	NA	NA	NA	NA	NA	15	06-Sep-94
NA	-188	-101	-68	-57	-80	30	NA	NA	NA	NA	NA	17	13-Sep-94
NA	-51	-56	-32	-39	-65	35	NA	NA	NA	NA	NA	20	20-Sep-94
NA	-74	-82	-54	-54	-80	34	NA	NA	NA	NA	NA	14	27-Sep-94
NA	NA	NA	NA	NA	NA	85	NA	NA	NA	NA	NA	95	03-Oct-94
NA	NA	NA	NA	NA	NA	85	NA	NA	NA	NA	NA	95	10-Oct-94
NA	NA	NA	NA	NA	NA	85	NA	NA	NA	NA	NA	95	17-Oct-94
NA	-105	-102	-71	NA	-90	32	-133	-163	-63	-64	-35	17	24-Oct-94
NA	-28	-58	-33	NA	-71	33	-117	-120	-43	-42	-22	19	04-Nov-94
-43	-39	-61	-36	-18	-74	34	-121	-122	-35	-38	-19	20	08-Nov-94
-34	-24	-50	-28	-12	-73	33	-107	-103	-27	-25	-13	20	14-Nov-94
-24	-6	-21	-12	-27	-69	35	-53	-9	-9	-12	-12	26	21-Nov-94
-55	-20	-35	-27	-44	-77	34	-62	-27	-11	-11	-13	23	28-Nov-94
-81	-59	-57	-44	-57	-102	32	-78	-64	-19	-30	-25	19	06-Dec-94
-50	-22	-37	-25	-43	-72	33	-62	-30	-9	-13	-14	22	12-Dec-94
-67	-30	-41	-32	-46	-82	34	-60	-36	-8	-13	-16	23	19-Dec-94
-37	-17	-34	-10	-6	-78	52	-32	-3	-8	-11	-7	61	27-Dec-94
NA	NA	NA	-15	-26	-60	34	-53	-10	-7	-15	-15	28	03-Jan-95
NA	NA	NA	-31	-38	-56	36	-45	-11	NA	-14	-16	28	11-Jan-95
NA	NA	NA	-21	-31	-71	45	-55	-19	-8	-13	-16	27	18-Jan-95
-64	-5	-14	-15	-22	-63	34	-45	-13	-8	-12	-12	27	25-Jan-95
-34	-36	-40	-34	-43	-69	35	-64	-31	-15	-20	NA	27	31-Jan-95
-23	-7	-7	-6	-4	-64	46	-32	-5	-6	-9	-8	48	08-Feb-95
-50	-22	-38	-27	-43	-77	35	-63	-27	-9	-18	-18	26	14-Feb-95
-25	-7	-24	-19	NA	-66	35	-53	-13	-6	-11	-13	28	21-Feb-95
-70	-42	-49	-37	-53	-79	35	-72	-49	-13	-19	-17	25	01-Mar-95
-46	-28	-44	-47	-45	-76	35	-62	-31	-15	-23	-19	25	08-Mar-95
-84	-51	-57	-31	-52	-89	33	-80	-67	-31	-45	-33	25	15-Mar-95
-67	-37	-45	-32	-45	-79	34	NA	NA	NA	NA	NA	27	21-Mar-95
NA	-10	-20	-16	-29	-69	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	30-Mar-95
NA	-41	-49	-39	-51	-79	31	NA	NA	NA	NA	NA	NA	04-Apr-95
NA	-52	-53	-34	-66	-86	32	NA	NA	NA	NA	NA	NA	11-Apr-95
NA	-15	-27	-18	-51	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	18-Apr-95
NA	-78	-78	-63	-66	-87	30	NA	NA	NA	NA	NA	NA	25-Apr-95
NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	02-May-95
-97	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-110	-97	-49	15	09-May-95
-105	-110	-124	-73	-117	-107	27	-117	NA	-119	-104	-55	15	15-May-95
-113	-108	-121	-70	-109	-95	28	-101	NA	-105	-86	-41	19	23-May-95
-93	-75	-85	-49	-77	-71	33	-81	NA	-175	-53	-7	17	30-May-95
-102	-106	-122	-74	-110	-94	28	-103	NA	-101	-82	-39	14	06-Jun-95
-70	-75	-82	-51	-87	-77	30	-72	NA	-59	-36	-2	15	13-Jun-95
-60	-63	-82	-54	-92	-86	27	-75	NA	-60	-38	-4	16	20-Jun-95
-81	-91	-119	-70	-110	-94	31	-86	NA	-95	-77	-37	15	26-Jun-95
-106	-120	NA	-90	-105	-106	36	-85	NA	-34	-74	-10	27	03-Jul-95
-110	-139	NA	-102	-137	NA	25	-104	NA	-129	-101	-56	14	11-Jul-95
NA	-139	NA	-103	-120	NA	29	NA	NA	NA	NA	NA	1	17-Jul-95

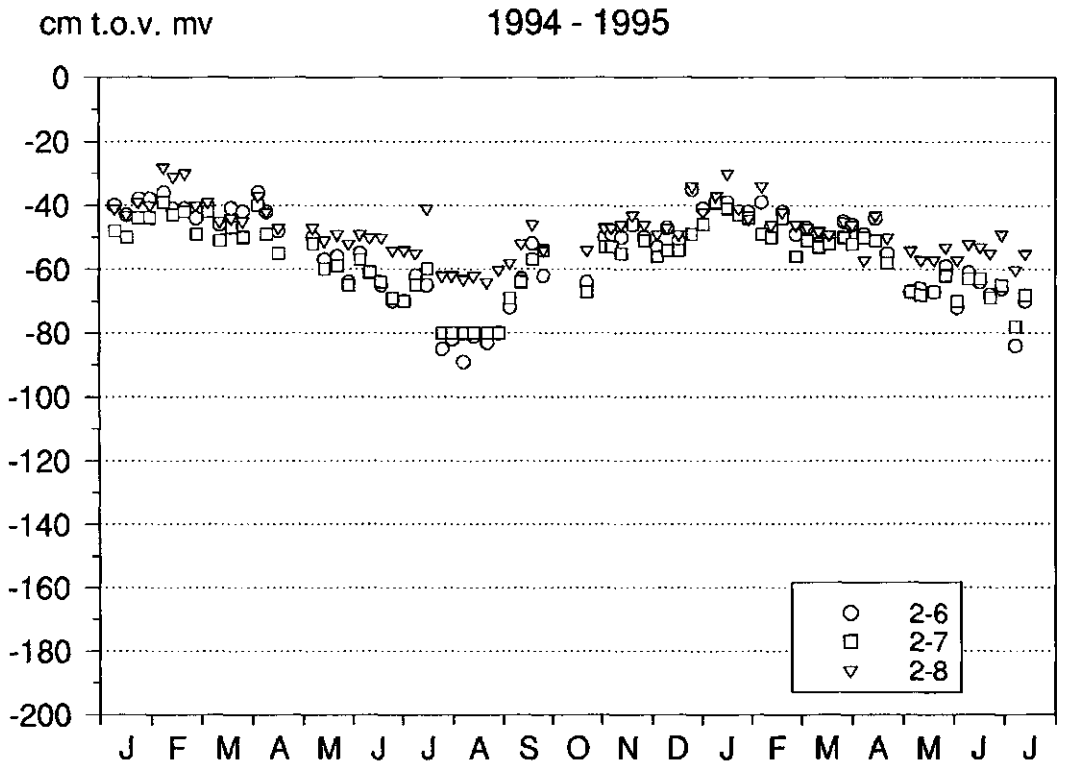
Aanhangsel 9 Figuren met grondwaterstandswaarnemingen

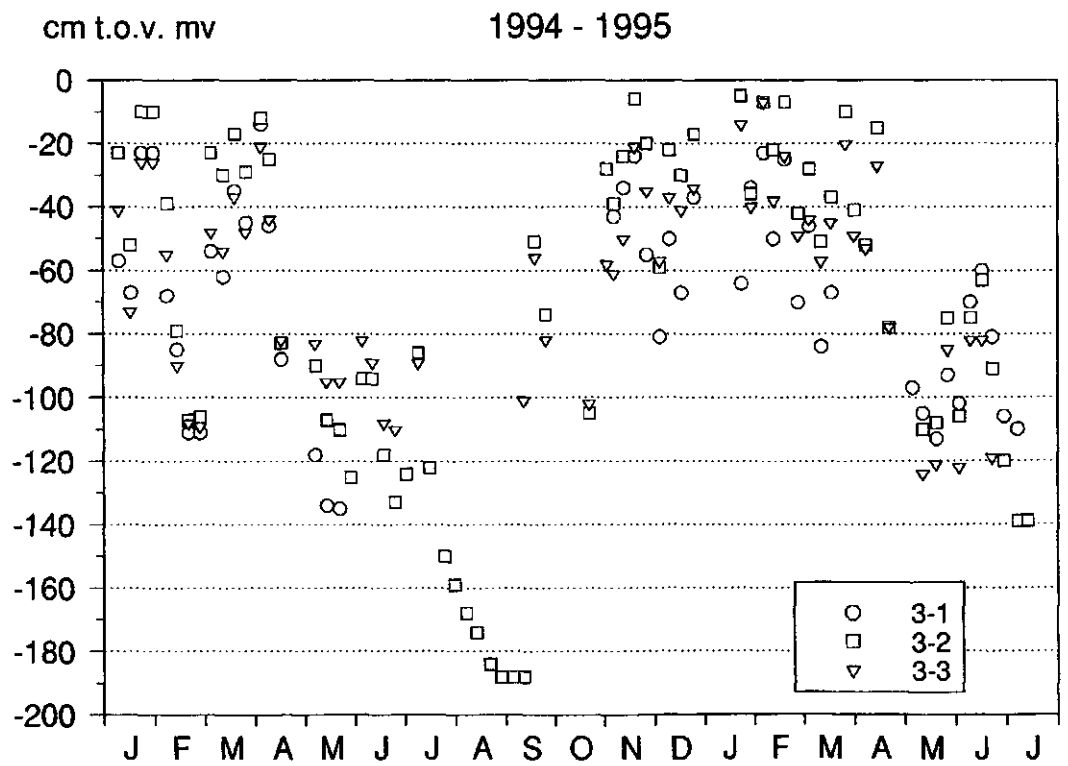

cm t.o.v. mv
1994 - 1995
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J
1-1
1-2
1-3

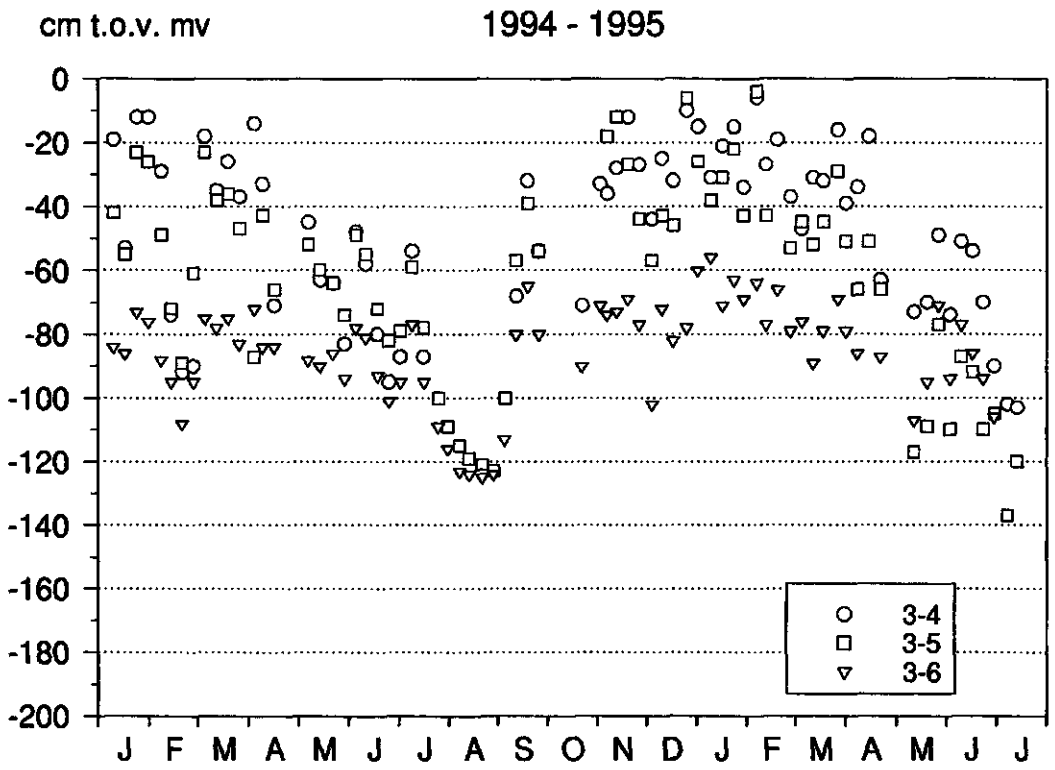

cm t.o.v. mv
1994 - 1995
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J
1-4
1-5

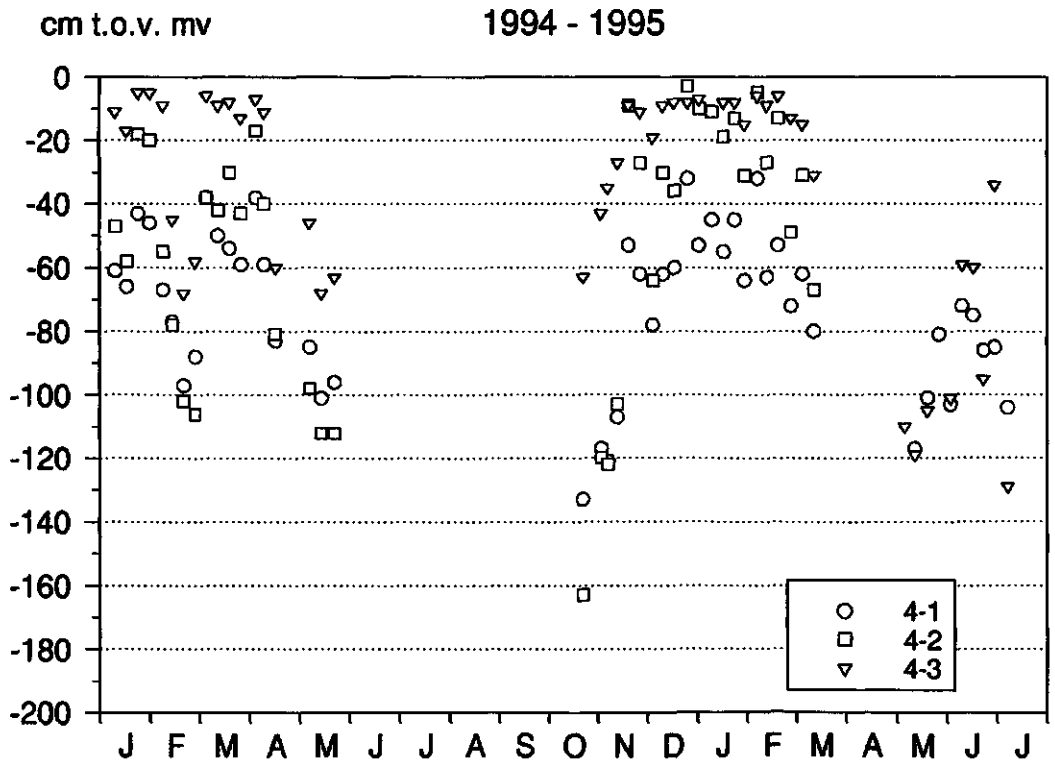

cm t.o.v. mv
1994 - 1995
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J
2-1
2-3

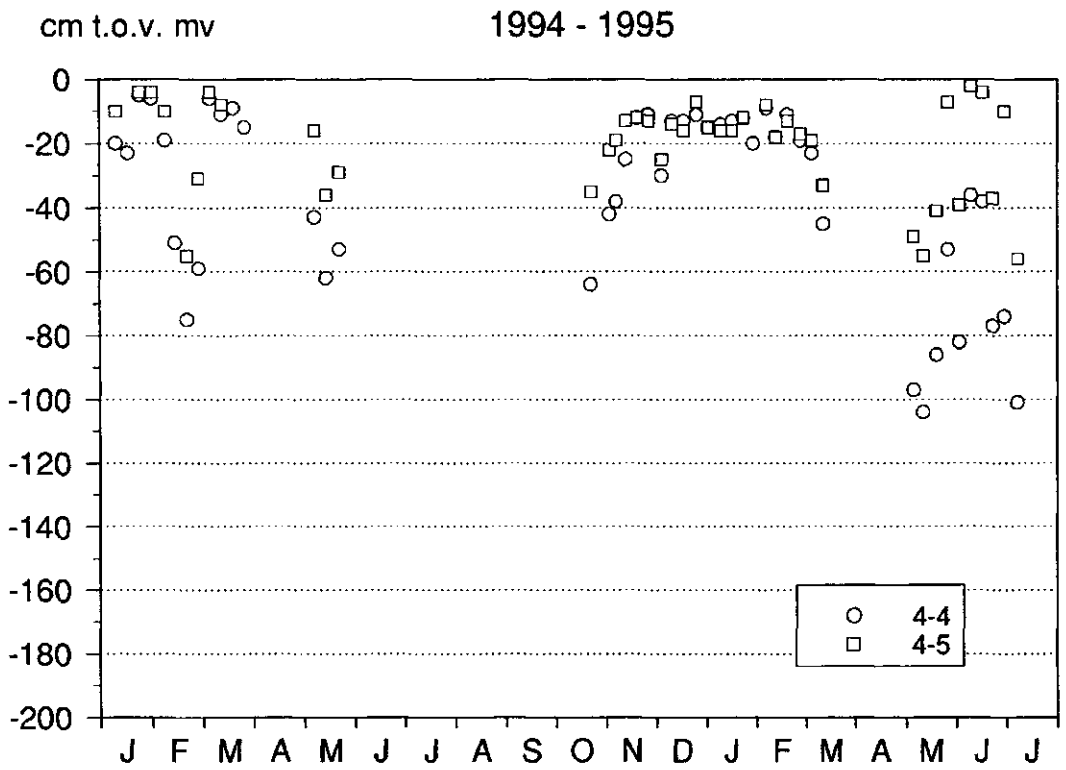

cm t.o.v. mv
1994 - 1995
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J
2-4
2-5


cm t.o.v. mv
1994 - 1995
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J
2-6
2-7
2-8


cm t.o.v. mv
1994 - 1995
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J
3-1
3-2
3-3


cm t.o.v. mv
1994 - 1995
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J
3-4
3-5
3-6


cm t.o.v. mv
1994 - 1995
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J
4-1
4-2
4-3


cm t.o.v. mv
1994 - 1995
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-140
-160
-180
-200
J F M A M J J A S O N D J F M A M J J
4-4
4-5

Aanhangsel 10 Resultaten van de analyse van bodemwater en afstromend water

Aanhangsel 10a Analyseresultaten van bodemwater

1-6, 2-9, 3-7 en 4-6: betreft monsters uit de filters onder de beekbodem van de resperctievelijke raaien

raai	locatie	ronde	datum [dd/mm/jj]	Ca [mg/l]	EGV [mS/m]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Kj.-N [mg/l]	NH4-N [mg/l]	NO2+NO3 [mg/l]	NO2-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	SO4 [mg/l]	Chloride [mg/l]	N-tot [mg/l]	ortho-P [mg/l]	P-tot [mg/l]	pH (lab)	pH (veld)
1	1	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	2.6	M	M	M	M	M	M	M
1	1	2	08/02/94	8.9	6	M	1.9	1.3	0.1	1.82	0.02	1.8	22	6	3.12	0.08	0.26	5.3	M
1	1	3	29/03/94	8.7	6	0.22	2.4	1.1	0.1	1.61	0.01	1.6	24	6	2.71	0.01	0.08	5.3	M
1	1	4	20/07/94	10.0	11	0.34	3.3	1.0	0.1	2.42	0.02	2.4	30	9	3.42	0.09	0.09	M	4.3
1	1	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1	6	08/11/94	54.0	38	0.40	6.5	0.7	0.1	41.01	0.01	41.0	21	22	41.71	0.01	0.08	5.7	4.7
1	1	7	22/02/95	24.0	18	0.06	4.4	0.7	0.1	19.01	0.01	19.0	18	24	19.71	0.04	0.04	5.2	M
1	1	8	17/07/95	31.0	-	0.17	6.4	1.0	0.1	M	-	-	-	-	M	0.04	0.04	M	4.9
1	2	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	4.0	M	M	M	M	M	M	M
1	2	2	08/02/94	15.0	11	M	3.3	0.8	0.1	3.01	0.01	3.0	36	10	3.81	0.01	0.08	5.1	M
1	2	3	29/03/94	14.0	10	0.08	3.3	0.9	0.1	2.31	0.01	2.3	30	9	3.21	0.01	0.04	5.2	M
1	2	4	20/07/94	81.0	13	0.21	3.2	0.6	0.1	2.31	0.01	2.3	34	11	2.91	0.01	0.01	M	4.0
1	2	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2	6	08/11/94	14.0	12	0.07	3.2	0.6	0.1	4.91	0.01	4.9	28	13	5.51	0.01	0.04	5.0	4.0
1	2	7	22/02/95	30.0	22	0.09	3.8	2.1	0.1	23.01	0.01	23.0	22	14	25.11	0.05	0.05	4.7	M
1	2	8	17/07/95	24.0	21	0.07	3.4	1.0	0.1	17.01	0.01	17.0	24	8	18.01	0.04	0.04	M	4.7
1	3	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	3.3	M	M	M	M	M	M	M
1	3	2	08/02/94	17.0	13	M	2.9	0.9	0.1	2.81	0.01	2.8	42	15	3.71	0.01	0.08	4.8	M
1	3	3	29/03/94	14.0	13	0.40	2.7	0.9	0.1	2.31	0.01	2.3	42	11	3.21	0.01	0.04	4.9	M
1	3	4	20/07/94	9.1	9	0.16	2.6	0.9	0.1	1.71	0.01	1.7	28	9	2.61	0.01	0.01	M	4.0
1	3	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	3	6	08/11/94	21.0	20	0.34	2.6	0.8	0.1	18.03	0.03	18.0	23	14	18.83	0.01	0.04	4.6	3.8
1	3	7	22/02/95	24.0	15	0.13	3.7	0.7	0.1	14.01	0.01	14.0	20	11	14.71	0.04	0.04	5.2	M
1	3	8	17/07/95	34.0	27	1.60	7.0	0.9	0.1	23.01	0.01	23.0	26	13	23.91	0.04	0.04	M	4.9
1	4	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.9	M	M	M	M	M	M	M
1	4	2	08/02/94	16.0	14	M	3.2	0.4	0.1	1.02	0.02	1.0	52	19	1.42	0.01	0.04	4.8	M
1	4	3	29/03/94	14.0	14	4.20	3.6	0.5	0.1	0.81	0.01	0.8	45	15	1.31	0.01	0.04	4.9	M
1	4	4	20/07/94	12.0	18	15.00	3.8	0.8	0.1	0.31	0.01	0.3	44	17	1.11	0.04	0.04	M	4.8
1	4	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	4	6	09/11/94	21.0	26	3.20	5.0	1.5	0.1	17.03	0.03	17.0	39	21	18.53	0.05	0.15	7.4	4.7
1	4	7	22/02/95	26.0	22	0.10	3.5	0.4	0.1	16.01	0.01	16.0	41	17	16.41	0.04	0.04	4.6	M
1	4	8	17/07/95		22		6.9	1.8	0.8	2.94	0.04	2.9	63	-	4.74	0.06	0.06	M	6.2
1	5	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.4	M	M	M	M	M	M	M
1	5	2	08/02/94	371.0	113	M	13.0	1.6	1.0	0.13	0.03	0.1	650	16	1.73	0.01	0.04	7.3	M
1	5	3	29/03/94	459.0	94	26.00	16.0	1.4	0.7	0.11	0.01	0.1	460	13	1.51	0.01	0.04	6.3	M
1	5	4	20/07/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	5	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	5	6	09/11/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	5	7	22/02/95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	5	8	17/07/95	-	35	-	-	3.0	1.4	4.63	0.03	4.6	68	-	7.63	0.04	1.30	M	7.3

raai	locatie	ronde	datum [dd/mm/jj]	Ca [mg/l]	EGV [mS/m]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Kj.-N [mg/l]	NH4-N [mg/l]	NO2+NO3 [mg/l]	NO2-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	SO4 [mg/l]	Chloride [mg/l]	N-tot [mg/l]	ortho-P [mg/l]	P-tot [mg/l]	pH (lab)	pH (veld)
1	6	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	3.0	M	M	M	M	M	M	M
1	6	2	08/02/94	21.0	14	M	2.9	1.2	0.1	0.69	0.09	0.6	48	14	1.89	0.19	0.45	6.1	M
1	6	3	29/03/94	29.0	21	13.00	6.3	1.4	0.3	4.73	0.03	4.7	48	23	6.13	0.01	0.08	6.0	M
1	6	4	20/07/94	18.0	20	2.60	4.1	0.9	0.2	1.41	0.01	1.4	43	21	2.31	0.07	0.08	M	5.6
1	6	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	6	6	08/11/94	20.0	21	3.00	2.8	0.6	0.2	1.12	0.02	1.1	54	18	1.72	0.06	0.06	6.5	5.7
1	6	7	22/02/95	33.0	23	2.40	2.9	0.6	0.2	5.01	0.01	5.0	74	16	5.61	0.08	0.08	5.9	M
1	6	8	17/07/95	28.0	28	2.80	7.8	0.8	0.1	1.91	0.01	1.9	70	25	2.71	0.07	0.07	M	6.0
2	1	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	7.5	M	M	M	M	M	M	M
2	1	2	08/02/94	82.0	40	M	20.0	2.7	0.1	4.18	0.08	4.1	53	27	6.88	0.13	0.30	6.6	M
2	1	3	29/03/94	59.0	44	20.00	24.0	2.7	0.1	1.53	0.03	1.5	41	24	4.23	0.01	0.22	6.4	M
2	1	4	19/07/94	39.0	40	3.10	20.0	2.3	0.2	5.95	0.05	5.9	60	23	8.25	0.16	0.41	M	6.1
2	1	5	27/09/94	68.0	43	0.30	21.0	1.6	0.1	4.61	0.01	4.6	88	29	6.21	0.09	0.09	6.6	6.2
2	1	6	09/11/94	45.0	42	7.50	17.0	1.8	0.1	4.36	0.06	4.3	80	31	6.16	0.07	0.08	7.1	6.1
2	1	7	21/02/95	54.0	38	0.23	16.0	1.5	0.1	3.61	0.01	3.6	53	23	5.11	0.02	0.04	6.6	6.2
2	1	8	17/07/95	37.0	-	0.84	15.0	1.9	0.1	M	-	-	-	-	M	0.08	0.08	M	6.0
2	2	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	11.0	M	M	M	M	M	M	M
2	2	2	08/02/94	31.0	26	M	14.0	1.8	0.1	7.18	0.18	7.0	72	25	8.98	0.56	0.79	5.8	M
2	2	3	29/03/94	29.0	26	9.70	15.0	1.2	0.1	5.65	0.05	5.6	67	25	6.85	0.28	0.30	5.7	M
2	2	4	19/07/94	25.0	35	0.54	18.0	1.5	0.1	4.22	0.02	4.2	55	31	5.72	0.27	0.15	M	6.3
2	2	5	27/09/94	27.0	31	0.17	16.0	1.3	0.1	5.01	0.01	5.0	65	28	6.31	0.17	0.19	6.1	5.7
2	2	6	09/11/94	25.0	33	4.70	14.0	1.3	0.1	6.30	0.10	6.2	71	39	7.60	0.43	0.45	6.9	5.6
2	2	7	21/02/95	23.0	24	0.73	11.0	0.8	0.1	5.41	0.01	5.4	67	27	6.21	0.04	0.08	5.4	5.1
2	2	8	17/07/95	-	-	-	21.0	2.5	0.1	9.25	0.05	9.2	65	-	11.75	0.14	0.15	M	5.9
2	3	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	15.0	M	M	M	M	M	M	M
2	3	2	08/02/94	47.0	37	M	17.0	1.6	0.1	15.16	0.16	15.0	68	29	16.76	1.60	1.80	6.5	M
2	3	3	29/03/94	41.0	36	8.60	19.0	1.7	0.1	12.10	0.10	12.0	58	25	13.80	1.60	1.60	6.0	M
2	3	4	19/07/94	M	31	M	M	1.6	M	1.84	0.14	1.7	70	32	3.44	M	M	M	5.3
2	3	5	27/09/94	28.0	36	2.50	18.0	1.3	0.1	12.03	0.03	12.0	69	28	13.33	1.00	1.00	6.4	5.9
2	3	6	09/11/94	26.0	69	0.99	17.0	1.2	0.1	9.93	0.03	9.9	67	135	11.13	0.85	0.90	6.5	5.7
2	3	7	21/02/95	22.0	26	0.55	16.0	0.9	0.1	9.01	0.01	9.0	60	23	9.91	0.59	0.64	5.8	5.4
2	3	8	17/07/95	-	-	-	10.0	1.4	0.2	M	-	-	-	-	M	0.93	0.93	M	5.6
2	4	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	23.0	M	M	M	M	M	M	M
2	4	2	08/02/94	35.0	31	M	13.0	1.0	0.1	16.04	0.04	16.0	56	38	17.04	0.03	0.11	5.3	M
2	4	3	29/03/94	34.0	33	5.50	17.0	1.2	0.1	18.02	0.02	18.0	56	31	19.22	0.07	0.08	5.4	M
2	4	4	19/07/94	M	32	M	M	1.4	M	12.07	0.07	12.0	56	22	13.47	M	M	M	5.7
2	4	5	27/09/94	28.0	36	1.90	18.0	1.3	0.1	19.02	0.02	19.0	54	32	20.32	0.11	0.11	5.4	5.1
2	4	6	09/11/94	29.0	35	0.22	17.0	1.0	0.1	16.01	0.01	16.0	54	39	17.01	0.08	0.08	7.0	4.8
2	4	7	21/02/95	33.0	32	0.25	15.0	0.9	0.1	16.01	0.01	16.0	60	31	16.91	0.06	0.08	5.3	5.0
2	4	8	17/07/95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

raai	loca-tie	ron-de	datum [dd/mm/jj]	Ca [mg/l]	EGV [mS/m]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Kj.-N [mg/l]	NH4-N [mg/l]	NO2+NO3 [mg/l]	NO2-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	SO4 [mg/l]	Chloride [mg/l]	N-tot [mg/l]	ortho-P [mg/l]	P-tot [mg/l]	pH (lab)	pH (veld)
2	5	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	44.0	M	M	M	M	M	M	M
2	5	2	08/02/94	57.0	45	M	26.0	2.3	0.1	36.06	0.06	36.0	45	41	38.36	0.52	0.94	6.1	M
2	5	3	29/03/94	46.0	41	1.40	20.0	2.5	0.1	29.07	0.07	29.0	42	34	31.57	0.36	0.38	6.0	M
2	5	4	19/07/94	32.0	36	0.21	27.0	1.6	0.1	22.02	0.02	22.0	44	27	23.62	0.20	0.22	M	4.9
2	5	5	27/09/94	45.0	53	0.11	28.0	1.6	0.1	39.01	0.01	39.0	41	39	40.61	0.37	0.38	6.1	5.6
2	5	6	09/11/94	46.0	43	0.52	23.0	2.5	0.1	31.01	0.01	31.0	42	36	33.51	0.35	0.38	6.7	5.3
2	5	7	21/02/95	36.0	32	0.07	18.0	1.9	0.1	18.01	0.01	18.0	42	30	19.91	0.69	0.75	6.0	5.5
2	5	8	17/07/95	-	-	-	-	2.8	0.1	M	-	-	-	-	M	0.14	0.38	M	5.1
2	6	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.8	M	M	M	M	M	M	M
2	6	2	08/02/94	27.0	31	M	16.0	3.0	2.7	0.21	0.01	0.2	25	41	3.21	0.42	2.60	6.6	M
2	6	3	29/03/94	31.0	36	43.00	17.0	2.4	1.6	0.81	0.01	0.8	57	34	3.21	0.16	0.22	6.2	M
2	6	4	19/07/94	22.0	32	34.00	16.0	2.0	1.2	0.11	0.01	0.1	25	30	2.11	2.80	2.90	M	6.3
2	6	5	27/09/94	30.0	39	41.00	17.0	2.1	1.5	0.11	0.01	0.1	31	39	2.21	3.00	3.00	6.4	6.2
2	6	6	09/11/94	30.0	41	41.00	17.0	2.0	1.4	0.31	0.01	0.3	30	46	2.31	3.00	3.00	6.7	6.1
2	6	7	21/02/95	26.0	34	37.00	14.0	1.4	0.9	0.21	0.01	0.2	54	33	1.61	3.00	3.20	6.6	6.2
2	6	8	17/07/95	27.0	31	30.00	16.0	1.7	1.1	0.11	0.01	0.1	30	32	1.81	3.10	3.10	M	6.1
2	7	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.1	M	M	M	M	M	M	M
2	7	2	08/02/94	30.0	32	M	16.0	3.8	2.8	0.21	0.01	0.2	53	41	4.01	0.60	1.20	6.8	M
2	7	3	29/03/94	25.0	35	43.00	17.0	4.3	2.5	0.11	0.01	0.1	62	38	4.41	1.80	1.80	6.3	M
2	7	4	19/07/94	9.1	28	10.00	14.0	2.8	2.2	0.11	0.01	0.1	45	32	2.91	1.00	1.10	M	6.4
2	7	5	27/09/94	21.0	27	-	15.0	2.3	1.8	0.11	0.01	0.1	45	35	2.41	1.20	1.20	6.8	6.4
2	7	6	09/11/94	18.0	M	23.00	14.0	2.2	1.7	M	M	M	M	M	M	0.85	0.94	M	M
2	7	7	21/02/95	24.0	29	25.00	15.0	3.2	1.4	0.11	0.01	0.1	50	33	3.31	0.39	1.00	6.8	6.5
2	7	8	17/07/95	18.0	27	22.00	14.0	2.2	1.5	0.11	0.01	0.1	46	29	2.31	1.10	1.10	M	6.2
2	8	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.1	M	M	M	M	M	M	M
2	8	2	08/02/94	23.0	27	M	6.4	6.0	4.9	0.21	0.01	0.2	31	35	6.21	0.87	1.20	6.5	M
2	8	3	29/03/94	24.0	32	32.00	7.0	5.9	4.4	0.11	0.01	0.1	43	34	6.01	0.81	0.82	6.3	M
2	8	4	19/07/94	20.0	28	31.00	6.4	4.2	4.0	0.11	0.01	0.1	33	28	4.31	1.10	1.10	M	6.4
2	8	5	27/09/94	28.0	32	29.00	7.7	3.2	3.2	0.11	0.01	0.1	39	31	3.31	1.00	1.00	6.4	6.4
2	8	6	09/11/94	23.0	30	26.00	7.0	4.2	4.1	0.11	0.01	0.1	41	36	4.31	0.89	0.89	6.8	6.1
2	8	7	21/02/95	21.0	29	27.00	6.4	5.2	5.2	0.11	0.01	0.1	32	32	5.31	1.00	1.00	6.7	6.3
2	8	8	17/07/95	25.0	29	22.00	6.9	2.6	2.3	0.11	0.01	0.1	29	29	2.71	0.88	0.88	M	6.0
2	9	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.1	M	M	M	M	M	M	M
2	9	2	08/02/94	50.0	41	M	6.1	1.9	1.4	0.72	0.02	0.7	160	36	2.62	0.11	0.22	6.2	M
2	9	3	29/03/94	56.0	48	47.00	5.7	2.3	1.6	0.11	0.01	0.1	170	35	2.41	0.13	0.15	6.1	M
2	9	4	19/07/94	42.0	45	35.00	5.5	1.6	1.2	0.11	0.01	0.1	160	28	1.71	0.29	0.30	M	5.9
2	9	5	27/09/94	43.0	40	13.00	6.2	1.3	1.0	0.11	0.01	0.1	110	31	1.41	0.06	0.08	6.0	5.9
2	9	6	09/11/94	38.0	39	27.00	4.9	1.3	1.0	0.21	0.01	0.2	120	30	1.51	0.13	0.13	6.8	5.8
2	9	7	21/02/95	39.0	36	29.00	4.4	1.3	0.9	0.11	0.01	0.1	131	24	1.41	0.20	0.22	6.2	5.9
2	9	8	17/07/95	31.0	32	20.00	5.6	1.5	0.9	0.11	0.01	0.1	89	24	1.61	0.16	0.16	M	5.6

raai	loca-tie	ron-de	datum [dd/mm/jj]	Ca [mg/l]	EGV [mS/m]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Kj.-N [mg/l]	NH4-N [mg/l]	NO2+NO3 [mg/l]	NO2-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	SO4 [mg/l]	Chloride [mg/l]	N-tot [mg/l]	ortho-P [mg/l]	P-tot [mg/l]	pH (lab)	pH (veld)
3	1	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	27.0	M	M	M	M	M	M	M
3	1	2	08/02/94	46.0	30	M	7.6	2.2	0.4	26.14	0.14	26.0	35	20	28.34	0.12	0.22	6.0	M
3	1	3	29/03/94	39.0	29	1.50	8.1	2.3	0.5	21.02	0.02	21.0	35	16	23.32	0.02	0.11	5.9	M
3	1	4	19/07/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1	6	09/11/94	22.0	23	0.46	4.4	1.5	0.1	11.02	0.02	11.0	28	24	12.52	0.05	0.05	6.9	5.3
3	1	7	21/02/95	27.0	23	0.22	4.8	1.1	0.1	19.01	0.01	19.0	22	20	20.11	0.04	0.04	5.6	5.3
3	1	8	17/07/95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	2	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	25.0	M	M	M	M	M	M	M
3	2	2	08/02/94	56.0	35	M	13.0	2.0	0.1	25.12	0.12	25.0	47	30	27.12	0.23	0.45	6.2	M
3	2	3	29/03/94	56.0	40	8.10	17.0	1.9	0.1	27.02	0.02	27.0	44	28	28.92	0.02	0.04	6.0	M
3	2	4	19/07/94	52.0	50	1.20	18.0	1.4	0.1	36.02	0.02	36.0	40	34	37.42	0.10	0.10	M	5.7
3	2	5	27/09/94	48.0	42	1.20	15.0	1.4	0.1	30.01	0.01	30.0	48	25	31.41	0.13	0.15	6.3	5.8
3	2	6	09/11/94	69.0	55	0.36	19.0	2.5	0.1	30.02	0.02	30.0	46	39	32.52	0.13	0.13	6.6	6.2
3	2	7	21/02/95	58.0	41	0.21	14.0	1.7	0.2	21.01	0.01	21.0	37	24	22.71	0.29	0.29	6.7	6.4
3	2	8	17/07/95	-	-	-	16.0	2.6	0.5	13.29	0.29	13.0	40	-	15.89	0.14	0.15	M	5.9
3	3	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	7.2	M	M	M	M	M	M	M
3	3	2	08/02/94	50.0	28	M	9.4	2.2	0.1	3.97	0.07	3.9	24	10	6.17	0.32	0.49	7.1	M
3	3	3	29/03/94	73.0	36	34.00	13.0	2.5	0.1	3.63	0.03	3.6	25	9	6.13	0.15	0.15	6.5	M
3	3	4	19/07/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	3	5	27/09/94	84.0	66	0.14	21.0	2.4	0.1	34.53	0.03	34.5	61	60	36.93	0.23	0.23	7.0	6.3
3	3	6	09/11/94	112.0	883	0.26	2100.0	4.3	0.4	18.38	0.38	18.0	74	2940	22.68	0.83	0.83	6.2	6.7
3	3	7	21/02/95	48.0	29	0.11	13.0	1.4	0.1	0.81	0.01	0.8	15	11	2.21	0.62	0.62	7.1	6.6
3	3	8	17/07/95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	5.6	M	M	M	M	M	M	M
3	4	2	08/02/94	89.0	55	M	33.0	3.6	0.4	5.24	0.14	5.1	37	35	8.84	0.19	0.30	7.0	M
3	4	3	29/03/94	91.0	56	45.00	40.0	4.1	0.4	4.49	0.09	4.4	43	34	8.59	0.12	0.15	6.4	M
3	4	4	19/07/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4	6	09/11/94	97.0	68	0.50	96.0	3.5	0.2	8.74	0.04	8.7	110	49	12.24	0.38	0.38	7.4	6.8
3	4	7	21/02/95	53.0	41	0.75	25.0	1.8	0.1	4.41	0.01	4.4	51	32	6.21	0.54	0.54	6.9	6.4
3	4	8	17/07/95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	5	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	7.9	M	M	M	M	M	M	M
3	5	2	08/02/94	-	33	M	-	2.4	0.1	6.95	0.65	6.3	78	31	9.35	1.50	1.80	6.8	M
3	5	3	29/03/94	45.0	35	2.30	11.0	1.7	0.1	7.05	0.05	7.0	74	31	8.75	0.12	0.15	6.2	M
3	5	4	19/07/94	42.0	35	1.90	11.0	1.1	0.1	3.55	0.05	3.5	68	21	4.65	0.20	0.22	M	6.3
3	5	5	27/09/94	36.0	40	0.23	13.0	0.9	0.1	9.22	0.02	9.2	79	34	10.12	0.15	0.15	6.4	5.9
3	5	6	09/11/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	5	7	21/02/95	75.0	42	0.12	24.0	1.5	0.1	0.81	0.01	0.8	14	12	2.31	0.08	0.08	7.4	6.8
3	5	8	17/07/95	-	-	-	20.0	2.6	0.4	8.68	0.08	8.6	50	-	11.28	1.60	1.60	M	6.2

raai	loca-tie	ron-de	datum [dd/mm/jj]	Ca [mg/l]	EGV [mS/m]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Kj.-N [mg/l]	NH4-N [mg/l]	NO2+NO3 [mg/l]	NO2-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	SO4 [mg/l]	Chloride [mg/l]	N-tot [mg/l]	ortho-P [mg/l]	P-tot [mg/l]	pH (lab)	pH (veld)
3	6	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	12.0	M	M	M	M	M	M	M
3	6	2	08/02/94	57.0	34	M	13.0	2.9	0.1	4.71	0.31	4.4	63	23	7.61	0.85	1.10	6.6	M
3	6	3	29/03/94	48.0	34	6.90	18.0	2.9	0.2	4.97	0.07	4.9	48	22	7.87	0.22	0.30	6.3	M
3	6	4	19/07/94	91.0	71	11.00	23.0	2.1	0.5	37.09	0.09	37.0	91	58	39.19	0.40	0.40	M	5.7
3	6	5	27/09/94	41.0	41	2.20	19.0	2.7	0.2	12.04	0.04	12.0	61	21	14.74	0.30	0.30	6.6	6.1
3	6	6	09/11/94	58.0	44	0.33	18.0	2.4	0.1	16.02	0.02	16.0	62	26	18.42	0.20	0.20	7.5	6.1
3	6	7	21/02/95	51.0	35	0.76	17.0	1.6	0.1	2.31	0.01	2.3	46	14	3.91	0.14	0.15	6.9	6.5
3	6	8	17/07/95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	7	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.1	M	M	M	M	M	M	M
3	7	2	08/02/94	64.0	42	M	22.0	1.6	0.6	0.24	0.04	0.2	51	25	1.84	0.31	0.52	6.9	M
3	7	3	29/03/94	64.0	45	8.50	25.0	2.4	0.6	0.21	0.01	0.2	47	24	2.61	0.28	0.28	6.4	M
3	7	4	19/07/94	50.0	43	5.00	24.0	1.7	0.6	0.11	0.01	0.1	47	20	1.81	0.70	0.72	M	6.1
3	7	5	27/09/94	41.0	45	4.50	28.0	1.6	0.6	0.11	0.01	0.1	34	26	1.71	0.84	0.84	6.9	6.9
3	7	6	09/11/94	62.0	50	4.20	25.0	1.5	0.5	1.11	0.01	1.1	44	32	2.61	0.58	0.58	7.3	6.3
3	7	7	21/02/95	60.0	44	4.90	20.0	1.5	0.5	0.11	0.01	0.1	36	25	1.61	0.64	0.64	6.8	6.4
3	7	8	17/07/95	41.0	37	1.20	24.0	1.7	0.3	0.41	0.01	0.4	32	24	2.11	0.46	0.46	M	6.2
4	1	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.8	M	M	M	M	M	M	M
4	1	2	08/02/94	47.0	30	M	12.0	1.4	0.2	0.24	0.04	0.2	54	18	1.64	0.18	0.38	6.5	M
4	1	3	29/03/94	43.0	31	11.00	13.0	2.1	0.2	0.41	0.01	0.4	37	21	2.51	0.09	0.26	6.2	M
4	1	4	19/07/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1	6	08/11/94	32.0	38	1.80	14.0	1.4	0.7	0.11	0.01	0.1	63	27	1.51	0.19	0.19	6.8	5.6
4	1	7	22/02/95	31.0	29	3.20	11.0	1.3	0.6	0.11	0.01	0.1	49	22	1.41	0.34	0.34	6.2	M
4	1	8	18/07/95	31.0	37	8.50	16.0	2.5	1.7	0.12	0.02	0.1	72	29	2.62	1.60	1.60	M	5.9
4	2	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	27.0	M	M	M	M	M	M	M
4	2	2	08/02/94	54.0	60	M	20.0	1.1	0.1	33.14	0.14	33.0	50	68	34.24	0.22	0.38	6.7	M
4	2	3	29/03/94	59.0	62	9.50	21.0	1.8	0.1	30.02	0.02	30.0	46	62	31.82	0.02	0.19	6.3	M
4	2	4	19/07/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2	6	08/11/94	38.0	53	1.40	14.0	2.1	0.4	19.03	0.03	19.0	39	50	21.13	0.14	0.14	6.9	5.7
4	2	7	22/02/95	34.0	35	3.90	9.5	1.5	0.4	5.01	0.01	5.0	36	40	6.51	0.16	0.16	6.3	M
4	2	8	18/07/95																
4	3	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	23.0	M	M	M	M	M	M	M
4	3	2	08/02/94	91.0	56	M	33.0	3.6	0.1	18.10	0.10	18.0	57	41	21.70	0.10	0.19	6.6	M
4	3	3	29/03/94	74.0	57	1.30	37.0	4.0	0.1	14.16	0.16	14.0	48	37	18.16	0.01	0.19	6.2	M
4	3	4	19/07/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	3	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	3	6	08/11/94	107.0	75	0.13	34.0	3.5	0.1	21.06	0.06	21.0	52	75	24.56	0.10	0.10	7.3	6.0
4	3	7	22/02/95	108.0	65	0.07	31.0	2.6	0.1	16.01	0.01	16.0	37	78	18.61	0.12	0.12	6.7	M
4	3	8	18/07/95	90.0	61	4.70	40.0	4.8	1.4	1.15	0.05	1.1	33	36	5.95	2.30	2.30	M	6.4

raai	locatie	ronde	datum [dd/mm/jj]	Ca [mg/l]	EGV [mS/m]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Kj.-N [mg/l]	NH4-N [mg/l]	NO2+NO3 [mg/l]	NO2-N [mg/l]	NO3-N [mg/l]	SO4 [mg/l]	Chloride [mg/l]	N-tot [mg/l]	ortho-P [mg/l]	P-tot [mg/l]	pH (lab)	pH (veld)
4	4	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.2	M	M	M	M	M	M	M
4	4	2	08/02/94	83.0	64	M	19.0	6.1	2.2	0.17	0.07	0.1	63	45	6.27	0.24	0.45	6.6	M
4	4	3	29/03/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	4	4	19/07/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	4	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	4	6	08/11/94	59.0	58	19.00	24.0	5.1	3.7	1.11	0.01	1.1	55	46	6.21	0.35	0.35	6.9	5.5
4	4	7	22/02/95	55.0	46	18.00	20.0	4.0	2.6	0.31	0.01	0.3	47	40	4.31	0.36	0.40	6.4	M
4	4	8	18/07/95	39.0	52	8.70	70.0	8.8	4.4	0.79	0.09	0.7	46	44	9.59	2.90	3.10	M	6.0
4	5	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.1	M	M	M	M	M	M	M
4	5	2	08/02/94	61.0	62	M	11.0	9.3	5.6	0.11	0.01	0.1	37	51	9.41	0.69	2.20	6.5	M
4	5	3	29/03/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	5	4	19/07/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	5	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	5	6	08/11/94	63.0	59	38.00	14.0	9.7	6.6	0.21	0.01	0.2	32	50	9.91	0.85	0.85	7.0	6.1
4	5	7	22/02/95	55.0	53	66.00	13.0	7.2	5.4	0.11	0.01	0.1	39	45	7.31	2.00	2.10	6.5	M
4	5	8	18/07/95	67.0	79	36.00	77.0	18.0	13.0	11.12	0.12	11.0	63	66	29.12	4.90	4.90	M	6.2
4	6	1	27/12/93	M	M	M	M	M	M	M	M	0.1	M	M	M	M	M	M	M
4	6	2	08/02/94	46.0	39	M	9.1	4.4	3.6	0.11	0.01	0.1	29	42	4.51	0.75	1.60	6.5	M
4	6	3	29/03/94	41.0	44	41.00	11.0	5.3	3.3	0.11	0.01	0.1	47	42	5.41	0.29	0.45	6.2	M
4	6	4	20/07/94	22.0	30	26.00	8.5	2.4	1.9	0.11	0.01	0.1	28	33	2.51	0.29	1.80	M	6.0
4	6	5	27/09/94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	6	6	08/11/94	37.0	40	39.00	10.0	3.3	2.7	0.11	0.01	0.1	29	38	3.41	1.70	1.70	6.8	4.7
4	6	7	22/02/95	40.0	39	40.00	9.8	4.0	3.4	0.11	0.01	0.1	28	33	4.11	2.90	2.90	6.5	M
4	6	8	18/07/95	21.0	25	19.00	8.8	2.1	1.6	0.11	0.01	0.1	31	29	2.21	1.80	1.80	M	5.9

Aanhangsel 10b Analyseresultaten van tien bemonsteringen van afstromend water ($mg.l^{-1}$)

		datum	N-Kj.	NH_4-N	NO_2-N	NO_3-N	NO_2+NO_3	N_{tot}	o-P	P_{tot}	K	Cl	SO_4
1	a	06/29/94	19,0	4,3	0,53	8,7	9,23	28,23	4,0	36,0	23	7	29
2	a	09/02/94	13,0	7,8	0,17	3,0	3,17	16,17	2,2	2,9	29	13	36
3	a	09/08/94	5,8	2,6	0,12	2,9	3,02	8,82	1,7	2,2	16	10	22
4	a	09/13/94	5,2	1,7	0,14	1,3	1,44	6,64	1,4	2,0	13	10	26
5	a	09/16/94	2,9	1,3	0,08	1,0	1,08	3,98	0,9	1,1	10	7	22
6	a	11/18/94	1,0	0,1	0,02	0,7	0,72	1,72	1,0	1,1	7	8	13
7	a	02/15/95	9,4	0,9	<0,01	1,5	1,51	10,91	3,8	5,5	2	<5	16
8	a	07/03/95	36,0	11,0	0,66	11,0	11,66	47,66	5,4	15,0	30	42	37
9	a	07/24/95	18,0	9,4	0,50	12,0	12,50	30,50	3,9	4,5	-	41	-
10	a	07/27/95	20,0	5,6	1,60	11,0	12,60	32,60	3,2	4,7	-	30	-
8	b	07/03/95	26,0	12,0	0,68	12,0	12,68	38,68	6,2	7,3	-	-	-
9	b	07/24/95	19,0	9,2	0,60	12,0	12,60	31,60	4,0	4,2	-	43	-
10	b	07/27/95	13,0	5,1	0,39	13,0	13,39	26,39	3,2	3,3	-	32	-

a: ongefiltreerd, b: na filtratie

Aanhangsel 11 Theoretische beschrijving van de aangepaste berekening van de oppervlakkige afstroming in SWAP

De theoretische beschrijving van de aangepaste berekening van de oppervlakkige afstroming in SWAP is ontleend aan Peerboom (1987). Hieronder worden de aspecten beschreven die in de aangepaste versie van SWAP zijn doorgevoerd.

Een belangrijk aspect bij het optreden van oppervlakkige afstroming is het vermogen van de bodem om neerslag te laten infiltreren. Deze verticale infiltratie in de bodem wordt bepaald door twee krachten: de zwaartekracht en de capillaire kracht die de bodem op het water uitoefent. Deze laatste kracht wordt bepaald door de drukhoogte van het bodemwater. In droge bodems overheersen de capillaire krachten en in natte bodems overheerst de zwaartekracht.

De verticale infiltratie in de bodem is maximaal indien er zich een laag water op het maaiveld bevindt. Deze maximale infiltratie I_m wordt bepaald door de zwaartekracht die steeds constant is, en de gradiënt in de drukhoogte van het bodemwater tussen het bodemoppervlak en het infiltrerende vochtfront. In natte gronden is deze gradiënt kleiner dan in droge gronden, zodat in droge gronden de maximale bodeminfiltratie groter is dan in natte gronden. In een volkomen verzadigde grond is de drukhoogte gelijk aan 0. De maximale bodeminfiltratie wordt dan volledig bepaald door de zwaartekracht en is gelijk aan de verzadigde doorlatendheid k_s.

Voor het berekenen van oppervlakkige afstroming is het belangrijk te weten wanneer de neerslag niet meer in de bodem kan infiltreren. Als dit het geval is, wordt het water aan het maaiveld geborgen en treedt plasvorming op. Indien er meer water aan het maaiveld moet worden geborgen dan de maximale berging die mogelijk is aan het maaiveld, wordt het overtollige water afgevoerd door oppervlakkige afstroming. Het optreden van plasvorming is sterk afhankelijk van de neerslagintensiteit. In de relatie tussen neerslagintensiteit en plasvorming zijn drie situaties te onderscheiden:

- indien de neerslagintensiteit p kleiner is dan de verzadigde doorlatendheid k_s van de bodem zal nooit plasvorming optreden, aangezien k_s de minimale infiltatie beschrijft in de situatie dat de capillaire krachten geen invloed meer hebben;
- indien p groter is dan de maximale infiltratie van de bodem bij een bepaald vochtgehalte, treedt onmiddelijk plasvorming op;
- indien p groter is dan k_s maar kleiner dan de maximale infiltratie bij een bepaald vochtgehalte, treedt na verloop van tijd plasvorming op. Het met constante flux infiltrerende water maakt het bodemprofiel steeds natter. Hierdoor wordt de maximale infiltratiesnelheid steeds kleiner. Wanneer deze snelheid uiteindelijk wordt overschreden door p, treedt plasvorming op.

De tijd totdat plasvorming optreedt in de laatste situatie, wordt aangeduid met het begrip 'tijd tot plasvorming' (t_p). Deze tijd is gedefinieerd als de tijd tussen het tijdstip waarop een neerslagperiode met constante neerslag aanvangt en het tijdstip waarop plasvorming begint op het maaiveld. In de tijd tot de plasvorming, infiltreert alle neerslag met een constante flux die gelijk is aan de neerslagflux: er is sprake

van een constante-flux-infiltratie. In de praktijk wordt voor de berekening van t_p vaak gebruik gemaakt van vergelijkingen volgens Perroux et al. (1981), Clothier et al. (1981) en Smith en Parlange (1977). Zij geven een benaderende formule voor het tijdstip waarop plasvorming optreedt in een constante-flux-situatie.

Volgens Perroux et al. (1981) en Clothier et al. (1981) wordt t_p berekend als:

$$t_p = \frac{S(\theta)^2}{2p \cdot (p - k_s)} \tag{12.1}$$

met:

t_p = tijd tot aan plasvorming (d);
$S(\theta)$ = sorptiviteit ($m.d^{-1/2}$);
p = constante flux, neerslag ($m.d^{-1}$);
k_s = verzadigde doorlatendheid ($m.d^{-1}$).

Volgens Smith en Parlange (1977) wordt t_p berekend als:

$$t_p = \frac{A}{k_s \cdot p} \cdot \ln\left(\frac{p}{p - k_s}\right) \tag{12.2}$$

De constante A kan ruwweg worden ingeschat uit (Parlange en Smith, 1976):

$$A = \frac{S(\theta)^2}{2} \tag{12.3}$$

Om beide formules te vergelijken is een aantal berekeningen uitgevoerd voor verschillende waarden van k_s en verschillende neerslagintensiteiten. Het blijkt dat voor het beschouwde traject de resultaten van beide relaties praktisch identiek zijn. In de aangepaste versie van SWAP wordt de formule van Perroux et al. (1981) en Clothier et al. (1981) gebruikt om de tijd tot aan plasvorming te berekenen.

Vanaf het moment dat plasvorming optreedt, is er sprake van een constante potentiaal infiltratie. De grootte van de infiltratie $i(t)$ wordt gegeven door Stroosnijder (1976):

$$i(t) = 0{,}5 \cdot S(\theta) \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot e^{-b(\theta) \cdot \sqrt{t}} + k_s \tag{12.4}$$

waarin:

$$S(\theta) = \sqrt{2 \cdot \sum_{\theta=\theta_i}^{\theta_s} (\theta - \theta_i) \cdot D(\theta) \cdot \Delta\theta} \tag{12.5}$$

en

$$b(\theta) = 4 \cdot \frac{k_s}{3 \cdot S(\theta)} \tag{12.6}$$

met:
$i(t)$ = infiltratie ($m.d^{-1}$);
t = tijd (d);
θ = vochtgehalte ($m^3.m^{-3}$);
θ_i = initiële vochtgehalte ($m^3.m^{-3}$);
θ_s = vochtgehalte bij verzadiging ($m^3.m^{-3}$);
$b(\theta)$ = constante ($d^{-1/2}$);
$D(\theta)$ = diffusiviteit (d^{-1}).

Door $k(h)$-relaties om te zetten in $k(\theta)$-relaties met pF-relaties zijn $D(\theta)$-waarden berekend als:

$$D(\theta) = k(\theta) \cdot \frac{d\theta}{dh} \tag{12.7}$$

met:
h = drukhoogte (m).

De berekende infiltratie volgens vergelijking (12.4) wordt vergeleken met de maximale infiltratiecapaciteit op basis van de wet van Darcy. Als de berekende infiltratie de infiltratiecapaciteit op basis van Darcy overschreidt, wordt de infiltratie gelijkgesteld aan de maximale infiltratiecapaciteit. Het deel van de neerslag dat niet kan infiltreren, wordt aan de berging op het maaiveld toegevoegd. Als de berging de maximale berging aan het maaiveld overschreidt, wordt het overschot afgevoerd als oppervlakkige afstroming.

Aanhangsel 12 Verantwoording van de schematisering

In dit aanhangsel wordt een verantwoording van de schematisering gegeven. Dit gebeurt voor de verschillende stappen in de schematisering die in de hoofdtekst zijn behandeld.

Stap 1: schematisering van de driedimensionale hydrologie tot een tweedimensionale
De grondslag voor deze schematisering vormde de aanname dat de stroming van water over en door de bodem naar de beek verloopt in de lengterichting van de uitgezette raaien. Uit de uitgevoerde tracerexperimenten is gebleken dat deze aanname in grote lijnen gerechtvaardigd is voor de stroming door de bodem (zie 3.4). De uitstroming kan daarom bevredigend tweedimensionaal worden beschreven. Voor de oppervlakkige afstroming is deze aanname niet correct gezien het in het veld waargenomen grillige patroon van erosiegeulen (zie 3.2.4). Voor de afstroming vormt de tweedimensionale beschrijving slechts een globale benadering van de driedimensionale werkelijkheid.

Stap 2: pseudo-tweedimensionale benadering van de tweedimensionale hydrologie
De pseudo-tweedimensionale benadering was noodzakelijk, omdat de gebruikte modellen SWAP en ANIMO eendimensionale modellen zijn. Voor de numerieke berekeningen in de modellen wordt de verticale dimensie geschematiseerd in compartimenten. De interne berekeningen in de modellen hebben daardoor betrekking op stroming en transport in verticale richting. Horizontale stromings- en transportcomponenten worden in de modellen als laterale randvoorwaarden meegenomen, in de vorm van invoer en uitvoer aan de zijranden van de gemodelleerde bodemkolom. De horizontale schematisering heeft daarom plaatsgevonden buiten de modellen en voorafgaand aan de verticale schematisering. Met de horizontale schematisering zijn de eenheden verkregen die met de modellen zijn doorgerekend (kolommen); met de verticale schematisering de rekeneenheden binnen de modellen (compartimenten).

In de pseudo-tweedimensionale benadering geschiedt de koppeling van achter elkaar geplaatste kolommen via stroming en transport over het maaiveld en door de verzadigde zone in hellingafwaartse richting. Deze benadering is gebaseerd op de aanname dat in de onverzadigde zone uitsluitend stroming en transport in verticale richting plaatsvinden, en dat stroming en transport in horizontale richting beperkt blijven tot stroming en transport over het maaiveld en door de verzadigde zone. Deze aanname is in algemene zin gerechtvaardigd. In de onverzadigde zone percoleert het neerslagoverschot dat niet over het maaiveld afstroomt onder invloed van de zwaartekracht verticaal naar beneden. Hierdoor wordt het grondwater aangevuld. In de verzadigde zone wordt het neerslagoverschot afgevoerd naar het drainagemiddel (de Mosbeek) onder invloed van de gradiënt tussen grondwaterstand en drainageniveau. In de hellende onderzoekspercelen met hun relatief dunne goed doorlatende zandpakket op de nagenoeg ondoorlatende tertiaire laag wordt de gradiënt in sterke mate bepaald door de helling van deze laag. Deze helling bedraagt gemiddeld 3%,

zodat de stroming door de verzadigde zone, en ook de afstroming over het maaiveld, voornamelijk in horizontale richting zijn.

De noodzaak om de horizontale dimensie te schematiseren door achter elkaar geplaatse verticale kolommen in een raai komt vooral voort uit de verschillen in randvoorwaarden en bodemeigenschappen binnen een raai. In de modellen zijn de processen beschreven op het niveau van uniforme systemen. Indien de hydrologische randvoorwaarden en bodemeigenschappen langs een beschouwde raai uniform zouden zijn, zou kunnen worden volstaan met het doorrekenen van één kolom voor het verkrijgen van een goede benadering van de gemiddelde hydrologie van die raai in de vorm van balanstermen als het naar de Mosbeek af- en uitstromende neerslagoverschot. De hydrologische randvoorwaarden en bodemeigenschappen zijn niet uniform langs de raaien. De helling van het maaiveld, de dikte en samenstelling, en daarmee de hydraulische eigenschappen van het zandpakket, en eventueel het landgebruik verschillen binnen de raaien. Dit resulteert in verschillende hydrologische omstandigheden, wat zich uit in locaties met verschillende grondwatertrappen binnen een raai (zie fig. 2 in de hoofdtekst). Deze niet-uniformiteit moet in de modelberekeningen worden betrokken voor een correcte simulering van de af- en uitstroming van water.

Voor de simulering van de af- en uitspoeling van nutriënten geldt dit in nog sterkere mate. Hiervoor zijn niet alleen de af- en uitstroming van water als transportmedium van belang, maar tevens hydrologische randvoorwaarden die processen in de nutriëntenhuishouding sturen als vochtgehalte, gewasverdamping enz. Daarnaast zijn verschillen in andere dan hydrologische randvoorwaarden binnen een raai belangrijk voor de simulering van de af- en uitspoeling van nutriënten, zoals verschillen in bemesting als gevolg van verschil in landgebruik.

Dat delen van een raai met een afwijkend landgebruik apart worden beschouwd bij de modelberekeningen is van groot belang voor de scenarioberekeningen. De scenario's zijn erop gericht de effecten van bufferstroken op de af- en uitspoeling van nutriënten vanaf en vanuit landbouwpercelen naar de Mosbeek vast te stellen. Deze nieuw in te richten bufferstroken wijken per definitie qua landgebruik en inrichting af van de landbouwpercelen en moeten met de modellen als zodanig kunnen worden doorgerekend.

De niet-uniformiteit van de raaien is in de modelberekeningen gebracht door de raaien - de horizontale dimensie - te schematiseren in secties die min of meer uniform zijn voor de bepalende randvoorwaarden en bodemeigenschappen. De modelberekeningen zijn uitgevoerd voor de bodemkolommen die deze secties representeren.

De peilbuizen hebben als basis gediend voor de indeling van de raaien in secties. Elke peilbuis vertegenwoordigt één sectie. De peilbuizen zijn zodanig geplaatst dat ter plekke van alle langs de raai voorkomende bodemsoorten, grondwatertrappen en landgebruiksvormen minstens één buis staat (zie fig. 2 in de hoofdtekst). De peilbuizen representeren daarmee de verschillende delen waarin een raai kan worden opgedeeld op grond van bodemsoort, grondwatertrap en landgebruiksvorm. De metingen van grondwaterstanden en stoffenconcentraties in een peilbuis zijn representatief voor het deel van de raai waarin de buis staat.

Stap 3: modellering van de laterale stroming door de verzadigde zone als stroming door de onderrand

In de modellering zijn de netto laterale afvoertermen en netto laterale aanvoertermen over de zijranden van de bodemkolommen (netto-laterale-flux) gemodelleerd als onderrandvoorwaarde in de vorm van een grondwaterstand-afvoer-relatie. Deze schematisering van de werkelijkheid berust op de aanname dat een strikt verband bestaat tussen de grondwaterstand en de netto-laterale-flux over de zijranden, en dat dit verband door een wiskundige relatie kan worden beschreven.

In principe is deze aanname gerechtvaardigd, omdat de grondwaterstand bepalend is voor de dikte van het doorstroomde pakket en het verschil in stijghoogte tussen het grondwater en de drainagebasis. De dikte (D) vermenigvuldigd met de verzadigde doorlatendheid (k) van het doorstroomde pakket geeft het doorlaatvermogen (kD-waarde) van het pakket. Deze laatste grootheid en het verschil in stijghoogte bepalen volgens de wet van Darcy de verzadigde grondwaterstroming.

De werkelijkheid is iets genuanceerder en complexer. Bovenstaande aanname is gebaseerd op twee veronderstellingen die niet volledig overeenstemmen met de werkelijkheid:

1 de grondwaterstand-afvoer-relatie voor een kolom is onafhankelijk van de hydrologie van de overige kolommen in de raai;
2 de grondwaterstand-afvoer-relatie kan worden beschreven door een continue wiskundige vergelijking.

<u>ad 1</u>

In werkelijkheid wordt de relatie beïnvloed door de hydrologie van zowel de bovenstroomse als de benedenstroomse kolommen. De hydrologie van de bovenstroomse kolommen bepaalt de laterale aanvoer over de bovenstroomse zijrand van de kolom en is daardoor mede bepalend voor de totale, bruto laterale afvoer over de benedenstroomse zijrand. De wet van Darcy geldt feitelijk voor de totale laterale stroming door de verzadigde zone. Dit impliceert dat strikt genomen een verband bestaat tussen de grondwaterstand en de bruto laterale stroming. In het veronderstelde verband tussen grondwaterstand en netto-laterale-flux is de invloed van de bovenstroomse aanvoer impliciet besloten. Deze laatste benadering is correct als een vast verband bestaat tussen de grondwaterstand van de kolom en de bovenstroomse aanvoer, die weer wordt bepaald door de grondwaterstand in de bovenstroomse kolommen. De aanname van stap 3 veronderstelt dus een strikte relatie tussen de grondwaterstand van alle kolommen onderling in een raai.

Dit laatste geldt ook voor de beïnvloeding door de benedenstroomse kolommen. De grondwaterstand in deze kolommen bepaalt mede het doorlaatvermogen van het deel van de raai waardoor de laterale afvoer vanuit de beschouwde kolom moet worden afgevoerd naar de beek. Ook deze beïnvloeding is impliciet besloten in de relatie tussen grondwaterstand en netto-laterale-flux, en wordt correct beschreven door deze relatie als een strikt verband bestaat tussen de grondwaterstand van alle kolommen ondering in een raai.

In algemene zin bestaat er een relatie tussen de reactie van de grondwaterstand van de verschillende kolommen. De aard van de bovenrandvoorwaarde is meestal identiek voor de kolommen: als bij een kolom een neerslagoverschot of neerslagtekort bestaat, is dat bij de andere kolommen meestal ook zo. De grondwaterstand stijgt en daalt meestal ongeveer gelijktijdig in alle kolommen (zie aanhangsel 9). Omdat de grondwaterstand tevens wordt beïnvloed door de bovenstroomse laterale aanvoer is de reactie in de kolommen niet volledig gelijk: de grondwaterstand in de benedenstroomse kolommen reageert vertraagd op veranderingen in de laterale afvoer van de bovenstroomse kolommen. Dit naijleffect wordt ondersteund door de correlaties tussen de grondwaterstanden van de buizen van een raai die afnemen naarmate de afstand tussen de buizen groter wordt (zie 3.2.2.2, tabel 2 t/m 5).

Het naijlen van de benedenstroomse grondwaterstand heeft hysteresis van de grondwaterstand-afvoer-relatie tot gevolg: de relatie tussen grondwaterstand en netto-laterale-flux is anders voor een situatie met een dalende grondwaterstand dan voor een situatie met een stijgende grondwaterstand. Omdat de correlatie tussen twee aangrenzende buizen meestal hoog is, is de verwachting dat deze hysteresis niet onacceptabel groot is.

ad 2

Het is onwaarschijnlijk dat de werkelijke grondwaterstand-afvoer-relatie gedetailleerd kan worden beschreven door continue wiskundige vergelijkingen zoals gebruikt in dit onderzoek. Deze continue vergelijkingen zijn gebaseerd op de aanname dat er een continue relatie bestaat tussen de grondwaterstand en het doorlaatvermogen van de verzadigde zone. In de werkelijkheid is het zeer waarschijnlijk dat deze relatie discontinuïteiten vertoont door de afwisseling van lagen met sterk verschillende doorlatendheid. Een verandering van de grondwaterstand die bijvoorbeeld tot gevolg heeft dat een relatief zeer goed doorlatende laag deel gaat nemen aan de grondwaterstroming, veroorzaakt een sprongsgewijze verandering in het doorlaatvermogen die niet door een continue wiskundige vergelijking kan worden beschreven. Dat deze discontinuïteit een rol van betekenis kan spelen op de onderzoekslocatie wordt bevestigd door de tracerexperimenten waaruit blijkt dat preferente stroming door lagen met een hoge doorlatendheid optreedt op de onderzoekslocatie (zie 3.4).

In dit onderzoek is voor elke kolom de grondwaterstand-afvoer-relatie vastgelegd door via calibratie de optimale waarden voor twee constanten van een wiskundige vergelijking te bepalen (zie 4.4). Hierbij is gefit op gemeten grondwaterstanden van een periode van ongeveer 16 maanden (10 jan 1994 tot 25 april 1995). De gefitte relaties beschrijven daarmee het algemene verband tussen afvoer en grondwaterstand voor deze periode. Hierbij is de natte periode beter vertegenwoordigd in de relaties dan de droge, enerzijds omdat de calibratieperiode negen hydrologische wintermaanden tegen zeven hydrologische zomermaanden bevat, anderzijds doordat het jaar 1995 een relatief zeer nat jaar was (1012 mm neerslag). De relaties zijn daarom in principe beter in staat de afvoer onder natte omstandigheden te beschrijven dan die onder droge omstandigheden. Dit is van wezenlijk belang voor het onderzoek,

omdat de vraagstelling van het onderzoek zich richtte op de water- en stoffenbelasting van de Mosbeek die voornamelijk optreedt in de afvoerperiode.

Door de onder ad 1 en ad 2 beschreven discrepanties tussen werkelijkheid en modellering kan niet worden verwacht dat met de gefitte grondwaterstand-afvoer-relaties de dynamiek in de afvoer en het grondwaterstandsverloop tot in grote mate van detail kunnen worden beschreven. Temeer omdat deze dynamiek groot kan zijn doordat relatief grote hoeveelheden water moeten worden afgevoerd door een relatief zeer dun doorstroomd pakket. Het algemene beeld van de dynamiek kan wel goed worden beschreven met de relaties, omdat in de relaties de afvoer toeneemt met een stijgende grondwaterstand. Op de helling, waar exponentiële relaties zijn gebruikt, is deze toename exponentieel. Pieken in de afvoer kunnen daardoor goed worden gesimuleerd met de relaties (zie ook 4.4.2.2). Deze afvoerpieken kunnen van essentieel belang zijn voor de vraagstelling van het onderzoek.

Concluderend kan worden gesteld dat met de toegepaste modellering van de laterale stroming door de verzadigde zone het algemene beeld van de afvoer van grondwater naar de beek, afhankelijk van de bovenrandvoorwaarden en hydrologische processen in de onverzadigde zone, goed kan worden beschreven.

Stap 4: koppeling van laterale stromingscomponenten van achter elkaar geplaatste verticale kolommen

Bij de berekening van de af- en uitstroming is uitgegaan van de lengte van de secties gemeten in horizontale richting. Strikt genomen gaat het om de afstanden tussen de sectiegrenzen gerekend langs de helling van het maaiveld en de bovenkant van de tertiaire afzettingen. Deze afstanden vormen de transportafstand voor afstroming respectievelijk uitstroming. De gemiddelde helling bedraagt 3%. De gebruikte sectie-lengten zijn hierdoor gemiddeld 0,04% te klein ten opzichte van de werkelijke transportafstanden. De fout die hiermee is geïntroduceerd in de berekeningen is verwaarloosbaar.

Conclusie

De toegepaste schematisering van de hydrologie van de onderzoekslocatie vormt een goede basis voor de modellering van de laterale uitstroming door de verzadigde zone naar de Mosbeek. Dit geldt in mindere mate voor de oppervlakkige afstroming, omdat op de onderzoekslocatie erosie optreedt. De modellering van de afstroming met SWAP op basis van de toegepaste schematisering vormt een globale benadering van de werkelijke afstroming.

Aanhangsel 13 Bodemfysische schematisering

In dit aanhangsel wordt in drie tabellen de bodemfysische schematisering voor de berekeningen met SWAP gegeven:

- de eerste tabel bevat de gebruikte bodemfysische bouwstenen per compartiment van elke locatie. De betekenis van de gebruikte codering is te vinden in aanhangsel 4 (orginele codering);
- de tweede tabel bevat voor alle compartimenten de verzadigde doorlatendheid in $cm.d^{-1}$;
- de derde tabel bevat voor alle compartimenten het vochtgehalte bij verzadiging ($cm^3.cm^3$).

Betekenis van de gebruikte codes:

nr. = nummer van het compartiment;
dz = dikte van het compartiment (cm);
z = diepte onderkant van het compartiment (cm - mv.);
1-1 = raainummer gevolgd door locatienummer.

nr.	dz	z	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5
1	1	1	6a3	6a3	6a3	6a	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	b3	b3	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2
2	1	2	6a3	6a3	6a3	6a	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	b3	b3	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2
3	1	3	6a3	6a3	6a3	6a	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	b3	b3	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2
4	1	4	6a3	6a3	6a3	6a	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	b3	b3	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2
5	1	5	6a3	6a3	6a3	6a	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	b3	b3	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2
6	2.5	7.5	6a3	6a3	6a3	6a	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	b3	b3	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2
7	2.5	10	6a3	6a3	6a3	6a	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	b3	b3	b3	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2	6a2
8	5	15	6a	6a	6a	6a	b3	6a	6a	6a	6a	6a	7b	b3	b3	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a
9	5	20	6a	6a	6a	6a	b3	6a	6a	6a	6a	6a	7b	b3	5b	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a
10	5	25	6a	6a	6a	6a	5b	6a	6a	6a	6a	6a	7b	b3	5b	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a	6a
11	5	30	6a	6a	6a	6a	5b	6a	6a	6a	6a	6a	7b	5b	5b	6a	6a	6a	6a	6a	6a	7b	6a	6a	6a	6a
12	5	35	6a	7b	6a	7b	5b	6a	6a	6a	6a	6a	7b	5b	5b	6a	6a	6a	6a	6a	6a	7b	7b	6a	6a	6a
13	5	40	6a	7b	7b	7b	5b	6a	6a	6a	6a	6a	7b	5b	5b	6a	6a	6a	6a	6a	6a	7b	7b	6a	6a	6a
14	5	45	6a	7b	7b	7b	5b	7b	7b	7b	6a	6a	5b	5b	5b	6a	7b	6a	7b	6a	7b	7b	7b	7b	6a	6a
15	5	50	6a	7b	7b	7b	5b	7b	7b	7b	7b	6a	5b	5b	5b	6a	7b	7b	7b	6a	7b	8a	7b	7b	6a	6a
16	10	60	6a	7b	7b	7b	5b	7b	7b	7b	7b	8a	5b	5b	5b	6a	7b	7b	7b	7b	7b	8a	7b	7b	6a	6a
17	10	70	6a	7b	7b	7b	5b	7b	7b	7b	7b	8a	5b	5b	5b	7b	7b	8a	7b	11b	11b	8a	8a	7b	7b	6a
18	10	80	6a	7b	7b	7b	5b	11b	7b	8a	7b	11b	5b	5b	5b	7b	7b	8a	7b	11b	9a	8a	8a	7b	7b	6a
19	10	90	6a	7b	11b	7b	11b	11b	7b	8a	11b	11b	5b	5b	5b	7b	7b	8a	9a	11b	9a	8a	8a	7b	7b	6a
20	10	100	7b	7b	11b	7b	11b	11b	8a	9a	11b	11b	5b	5b	5b	8a	7b	9a	9a	11b	9a	8a	8a	11b	11b	6a
21	10	110	7b	7b	11b	7b	9a	11b	8a	9a	9a	11b	5b	5b	5b	8a	11b	9a	9a	9a	9a	8a	8a	11b	11b	6a
22	10	120	8a	8a	11b	9a	9a	11b	8a	9a	9a	11b	5b	5b	5b	8a	11b	9a	9a	9a	9a	8a	8a	11b	11b	6a
23	10	130	8a	8a	11b	9a	9a	9a	8a	9a	9a	11b	5b	5b	5b	8a	11b	9a	9a	9a	9a	8a	8a	11b	11b	11b
24	10	140	8a	8a	11b	9a	9a	9a	8a	9a	9a	11b	5b	5b	5b	8a	11b	9a	9a	9a	9a	8a	8a	11b	11b	11b
25	10	150	8a	8a	11b	9a	9a	9a	9a	9a	9a	11b	5b	5b	5b	8a	9a	9a	9a	9a	9a	8a	8a	11b	11b	11b
26	10	160	8a	8a	11b	9a	9a	9a	9a	9a	9a	11b	5b	5b	5b	8a	9a	9a	9a	9a	9a	8a	8a	11b	11b	11b
27	10	170	8a	8a	11b	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	5b	5b	5b	8a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a
28	10	180	8a	8a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	5b	5b	5b	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a
29	10	190	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a
30	10	200	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a
31	10	210	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a
32	10	220	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a
33	10	230	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a
34	10	240	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a
35	10	250	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a	9a

nr.	dz	z	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5
1	1	1	18	18	18	35	18	9	9	9	9	9	18	18	18	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
2	1	2	18	18	18	35	18	9	9	9	9	9	18	18	18	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
3	1	3	18	18	18	35	18	9	9	9	9	9	18	18	18	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
4	1	4	18	18	18	35	18	9	9	9	9	9	18	18	18	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
5	1	5	18	18	18	35	18	9	9	9	9	9	18	18	18	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
6	2.5	7.5	18	18	18	35	18	9	9	9	9	9	18	18	18	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
7	2.5	10	18	18	18	35	18	9	9	9	9	9	18	18	18	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
8	5	15	35	35	35	35	18	35	35	35	35	35	18	18	70	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
9	5	20	35	35	35	35	18	35	35	35	35	35	18	18	70	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
10	5	25	35	35	35	35	70	35	35	35	35	35	18	70	70	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
11	5	30	35	35	35	35	70	35	35	35	35	35	18	70	70	35	35	35	35	35	35	80	35	35	35	35
12	5	35	35	80	35	80	70	35	35	35	35	35	18	70	70	35	35	35	35	35	35	80	80	35	35	35
13	5	40	35	80	80	80	70	35	35	35	35	35	70	70	70	35	35	35	35	35	35	80	80	35	35	35
14	5	45	35	80	80	80	70	80	80	80	35	35	70	70	70	35	80	35	80	35	80	80	80	80	35	35
15	5	50	35	80	80	80	70	80	80	80	80	35	70	70	70	35	80	80	80	35	80	200	80	80	35	35
16	10	60	35	80	80	80	70	80	80	80	80	200	70	70	70	35	80	80	80	80	80	200	80	80	35	35
17	10	70	35	80	80	80	70	80	80	80	80	200	70	70	70	80	80	200	80	300	300	200	200	80	80	35
18	10	80	35	80	80	80	70	300	80	200	80	300	70	70	70	80	80	200	80	300	5	200	200	80	80	35
19	10	90	35	80	300	80	300	300	80	200	300	300	70	70	70	80	80	200	5	300	5	200	200	80	80	35
20	10	100	80	80	300	80	300	300	200	5	300	300	70	70	70	200	80	5	5	300	5	200	200	300	300	35
21	10	110	80	80	300	80	5	300	200	5	5	300	70	70	70	200	300	5	5	5	5	200	200	300	300	35
22	10	120	200	200	300	5	5	300	200	5	5	300	70	70	70	200	300	5	5	5	5	200	200	300	300	35
23	10	130	200	200	300	5	5	5	200	5	5	300	70	70	70	200	300	5	5	5	5	200	200	300	300	300
24	10	140	200	200	300	5	5	5	200	5	5	300	70	70	70	200	300	5	5	5	5	200	200	300	300	300
25	10	150	200	200	300	5	5	5	5	5	5	300	70	70	70	200	5	5	5	5	5	200	200	300	300	300
26	10	160	200	200	300	5	5	5	5	5	5	300	70	70	70	200	5	5	5	5	5	200	200	300	300	300
27	10	170	200	200	300	5	5	5	5	5	5	5	70	70	70	200	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
28	10	180	200	200	5	5	5	5	5	5	5	5	70	70	70	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
29	10	190	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
30	10	200	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
31	10	210	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
32	10	220	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
33	10	230	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
34	10	240	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
35	10	250	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

nr.	dz	z	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5
1	1	1	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.36	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
2	1	2	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.36	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
3	1	3	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.36	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
4	1	4	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.36	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
5	1	5	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.36	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
6	2.5	7.5	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.36	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
7	2.5	10	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.36	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
8	5	15	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.36	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
9	5	20	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.29	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
10	5	25	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.29	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
11	5	30	.32	.32	.32	.32	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.29	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.29	.32	.32	.32	.32
12	5	35	.32	.29	.32	.29	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.29	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.29	.29	.32	.32	.32
13	5	40	.32	.29	.29	.29	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.29	.36	.36	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.29	.29	.32	.32	.32
14	5	45	.32	.29	.29	.29	.36	.29	.29	.29	.32	.32	.36	.36	.36	.32	.29	.32	.29	.32	.29	.29	.29	.29	.32	.32
15	5	50	.32	.29	.29	.29	.36	.29	.29	.29	.29	.32	.36	.36	.36	.32	.29	.29	.29	.32	.29	.23	.29	.29	.32	.32
16	10	60	.32	.29	.29	.29	.36	.29	.29	.29	.29	.26	.36	.36	.36	.32	.29	.29	.29	.29	.29	.23	.29	.29	.32	.32
17	10	70	.32	.29	.29	.29	.36	.29	.29	.29	.29	.26	.36	.36	.36	.29	.29	.23	.29	.26	.26	.23	.23	.29	.29	.32
18	10	80	.32	.29	.29	.29	.36	.26	.29	.23	.29	.26	.36	.36	.36	.29	.29	.23	.29	.26	.33	.23	.23	.29	.29	.32
19	10	90	.32	.29	.26	.29	.26	.26	.29	.23	.26	.26	.36	.36	.36	.29	.29	.23	.33	.26	.33	.23	.23	.29	.29	.32
20	10	100	.29	.29	.26	.29	.26	.26	.23	.33	.26	.26	.36	.36	.36	.23	.29	.33	.33	.26	.33	.23	.23	.26	.26	.32
21	10	110	.29	.29	.26	.29	.33	.26	.23	.33	.33	.26	.36	.36	.36	.23	.26	.33	.33	.33	.33	.23	.23	.26	.26	.32
22	10	120	.23	.23	.26	.33	.33	.26	.23	.33	.33	.26	.36	.36	.36	.23	.26	.33	.33	.33	.33	.23	.23	.26	.26	.32
23	10	130	.23	.23	.26	.33	.33	.33	.23	.33	.33	.26	.36	.36	.36	.23	.26	.33	.33	.33	.33	.23	.23	.26	.26	.26
24	10	140	.23	.23	.26	.33	.33	.33	.23	.33	.33	.26	.36	.36	.36	.23	.26	.33	.33	.33	.33	.23	.23	.26	.26	.26
25	10	150	.23	.23	.26	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.26	.36	.36	.36	.23	.33	.33	.33	.33	.33	.23	.23	.26	.26	.26
26	10	160	.23	.23	.26	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.26	.36	.36	.36	.23	.33	.33	.33	.33	.33	.23	.23	.26	.26	.26
27	10	170	.23	.23	.26	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.26	.36	.36	.36	.23	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33
28	10	180	.23	.23	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.36	.36	.36	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33
29	10	190	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33
30	10	200	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33
31	10	210	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33
32	10	220	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33
33	10	230	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33
34	10	240	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33
35	10	250	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33

Aanhangsel 14 Enkele locatiegebonden invoergegevens betreffende de bovenrandvoorwaarden

Dit aanhangsel bevat voor enkele locatiegebonden invoergegevens betreffende de bovenrandvoorwaarden per locatie de waarden die zijn gebruikt in de modellering. Het betreft de bewortelbare diepte, de dikte van de wortelzone en de maximale berging aan het maaiveld.

Raai-locatie	Bewortelbare diepte (m)	Dikte wortelzone (m)	Maximale berging (m)
1-1	0,50	0,25	0,001
1-2	0,40	0,30	0,001
1-3	0.40	0,35	0,001
1-4	0,30	0,30	0,001
1-5	0,20	0,20	0,010
2-1	0,45	0,36	0,001
2-2	0,40	0,32	0,001
2-3	0,40	0,32	0,001
2-4	0,45	0,36	0,001
2-5	0,40	0,32	0,001
2-6	0,40	0,40	0,050
2-7	0,40	0,40	0,010
2-8	0,40	0,40	0,010
3-1	0,50	0,35	0,001
3-2	0,50	0,40	0,001
3-3	0,40	0,32	0,001
3-4	0,40	0,32	0,001
3-5	0,40	0,32	0,001
3-6	0,40	0,32	0,001
4-1	0,30	0,25	0,001
4-2	0,30	0,30	0,001
4-3	0,25	0,20	0,002
4-4	0,20	0,20	0,003
4-5	0,10	0,10	0,005

Aanhangsel 15 Statistische criteria gebruikt bij de calibratie

De statistische criteria die zijn gebruikt voor het beoordelen van de calibratie-resultaten zijn:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(b_i - m_i)^2}{n}} \tag{15.1}$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^{n} (m_i - gm)^2}{\sum_{i=1}^{n} (b_i - gm)^2} \tag{15.2}$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i - \sum_{i=1}^{n} b_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i} \tag{15.3}$$

met:
b_i = berekende grondwaterstand (m - mv.);
m_i = gemeten grondwaterstand (m - mv.);
gm = gemiddelde van de gemeten grondwaterstanden (m - mv.);
n = aantal waargenomen grondwaterstanden (-).

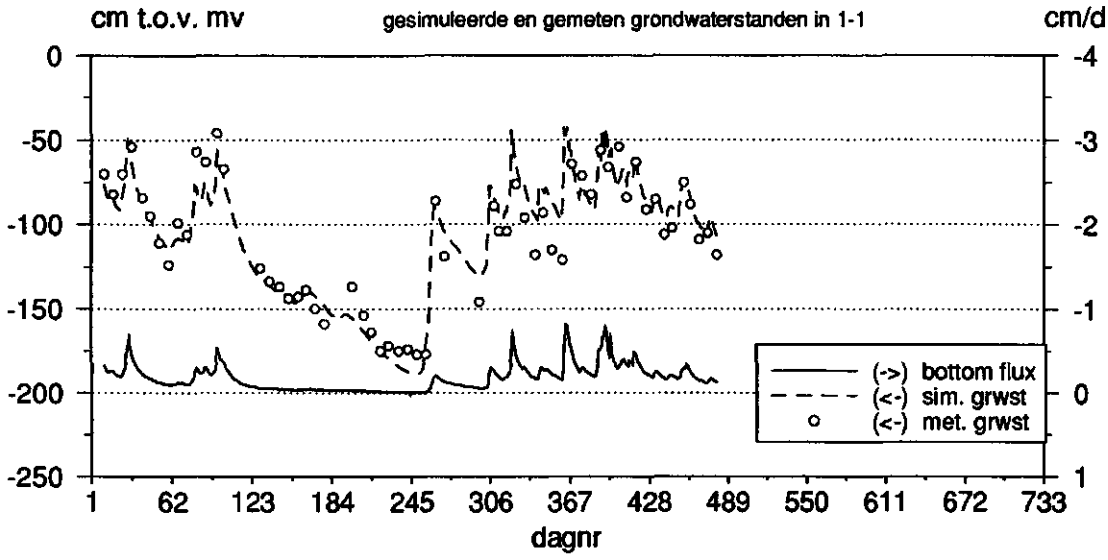
Betekenis van de drie criteria:
- RMSE: de root mean square error; de optimale waarde is 0;
- CD: de coefficient of determination; de optimale waarde is 1. Bij een kleinere waarde dan 1 is de spreiding in de berekeningen groter dan de spreiding in de metingen, bij een grotere waarde dan 1 is het omgekeerde het geval;
- CRM: de coefficient of residual mass; de optimale waarde is 0. Een negatieve waarde betekent dat gemiddeld gezien de berekende grondwaterstanden lager zijn dan de gemeten; bij een waarde groter dan 0 geldt het omgekeerde.

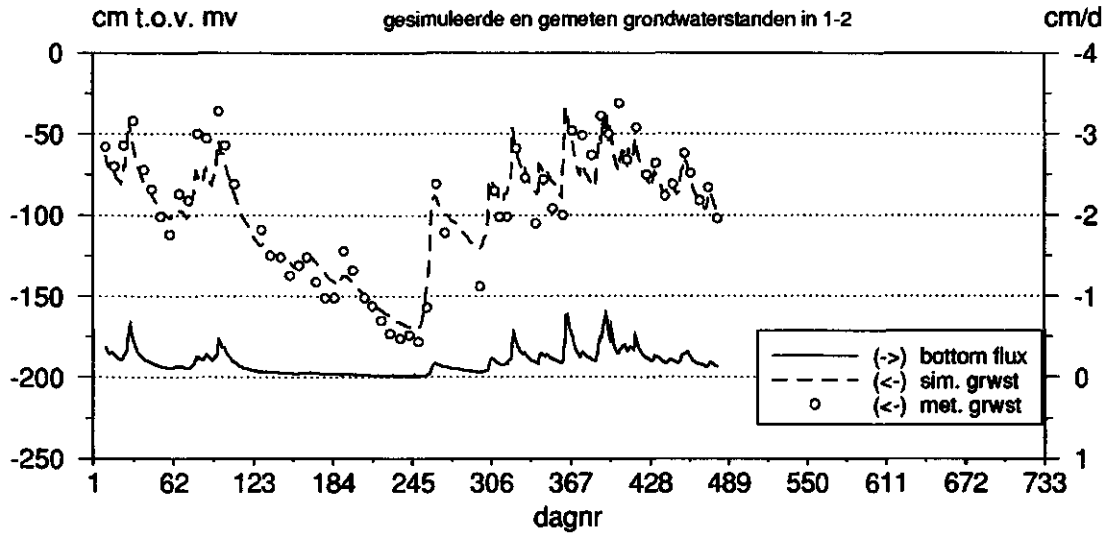
Aanhangsel 16 Resultaten van de calibratie in de vorm van de gecalibreerde waarden van de constanten van de onderrandvoorwaarde en de waarden van de statistische criteria

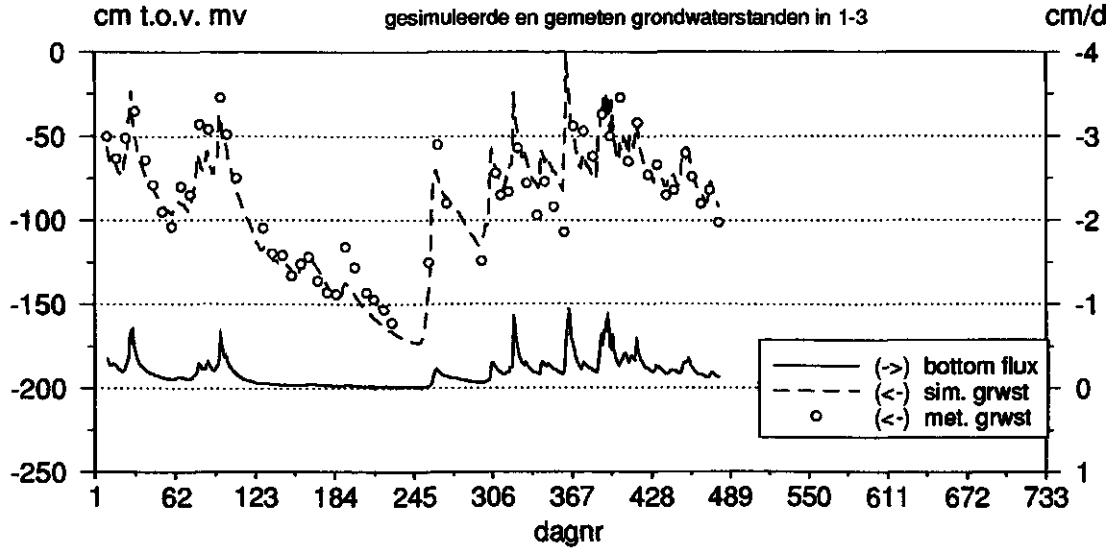
Raai, locatie	Orvw-relatie	Const. α_1 of α_2 ($m.d^{-1}$)	Const. β_1 (m^{-1})	Const. β_2 (d^{-1})	Aantal	RMSE (cm)	CD (-)	CRM (-)
1-1	exp.	-0,0300	-0,030	-	60	10,86	0,87	0,01
1-2	exp.	-0,0240	-0,030	-	63	11,77	1,43	-0,01
1-3	exp.	-0,0180	-0,030	-	60	12,31	1,01	-0,02
1-4	lin.	-0,0080	-	0,008	63	16,06	0,88	-0,13
1-5	lin.	-0,0060	-	0,010	63	20,90	0,43	-0,46
2-1	exp.	-0,0292	-0,032	-	63	28,02	1,40	-0,23
2-2	exp.	-0,0231	-0,038	-	50	15,93	1,51	0,08
2-3	exp.	-0,0358	-0,056	-	62	16,97	1,26	0,02
2-4	exp.	-0,0358	-0,054	-	63	15,75	1,04	0,08
2-5	exp.	-0,0276	-0,035	-	58	12,73	1,28	-0,01
2-6	lin.	-0,0101	-	0,013	63	18,82	0,41	-0,17
2-7	lin.	-0,0134	-	0,020	63	9,36	1,05	-0,08
2-8	lin.	-0,0146	-	0,025	63	9,71	0,66	-0,12
3-1	exp.	-0,0200	-0,040	-	35	15,93	2,34	0,01
3-2	exp.	-0,0200	-0,040	-	60	27,57	2,57	-0,04
3-3	exp.	-0,0190	-0,040	-	50	18,93	1,62	-0,02
3-4	exp.	-0,0222	-0,047	-	56	21,65	1,00	-0,33
3-5	lin.	-0,0081	-	0,010	60	19,54	1,76	-0,11
3-6	lin.	-0,0111	-	0,010	62	13,01	0,64	-0,03
4-1	exp.	-0,0100	-0,020	-	40	19,53	0,96	-0,12
4-2	exp.	-0,0060	-0,018	-	40	22,80	1,93	-0,16
4-3	lin.	-0,0064	-	0,008	39	32,45	0,35	-1,29
4-4	lin.	-0,0063	-	0,009	37	24,94	0,48	-0,82
4-5	lin.	-0,0071	-	0,014	32	23,39	0,20	-1,30

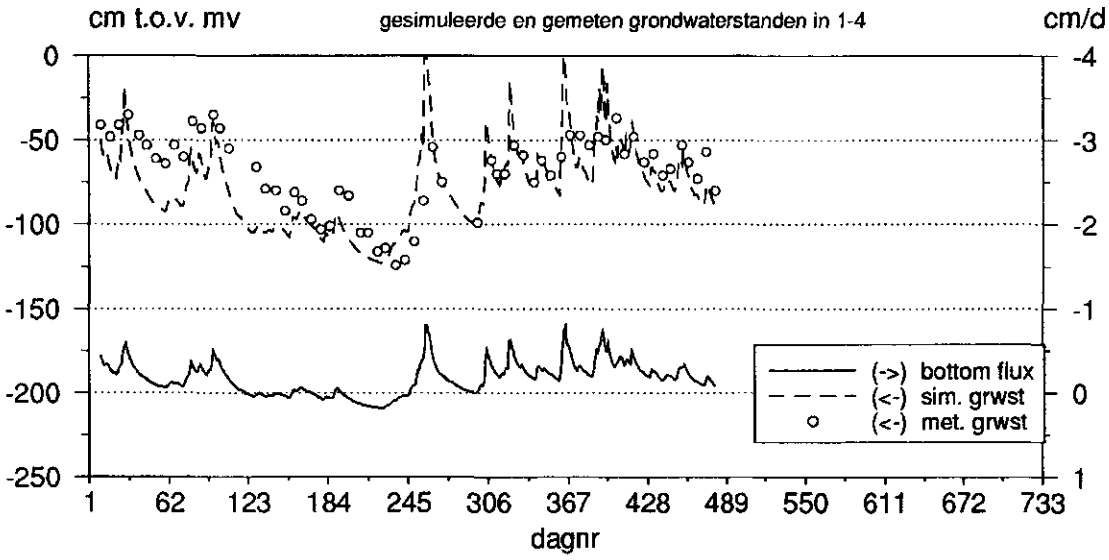
Orvw-relatie = onderrandvoorwaarde-relatie;
exp. = exponentieel;
lin. = lineair;
Const. = constante van de onderrandvoorwaarde-relatie;
Aantal = aantal grondwaterstandsmetingen waarop is gecalibreerd;
RMSE, CD, CRM = statistische criteria (zie aanhangsel 15).

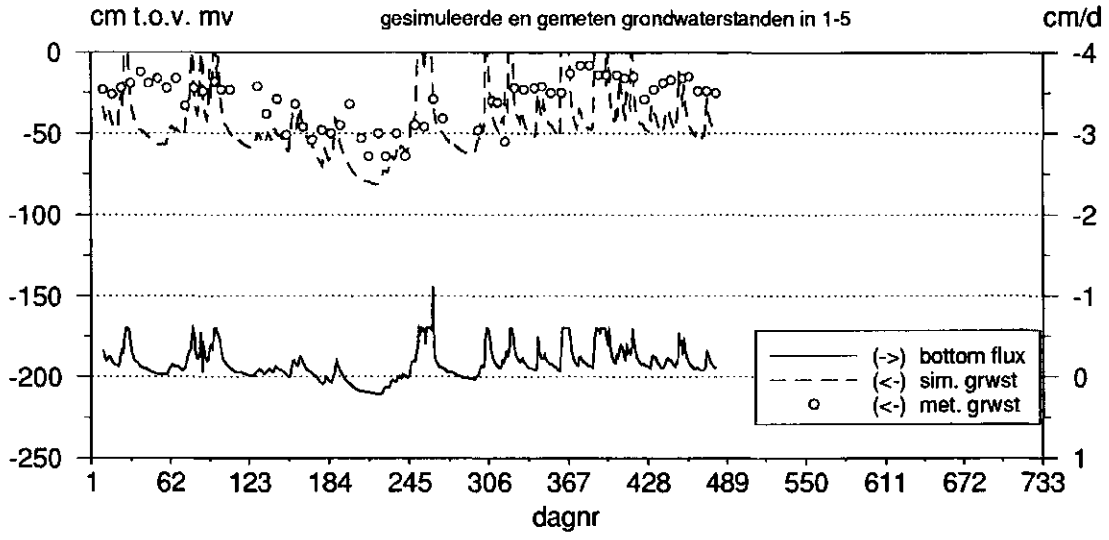
Aanhangsel 17 Grafische weergave van het berekende grondwaterstandsverloop, de gemeten grondwaterstanden en het verloop van de berekende onderrandflux in de calibratieperiode

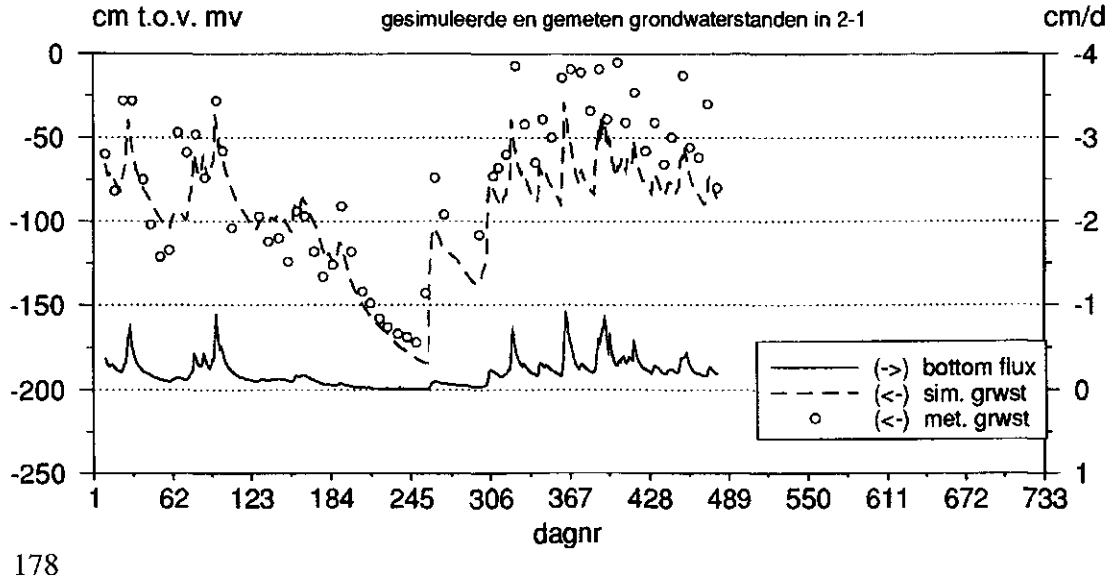


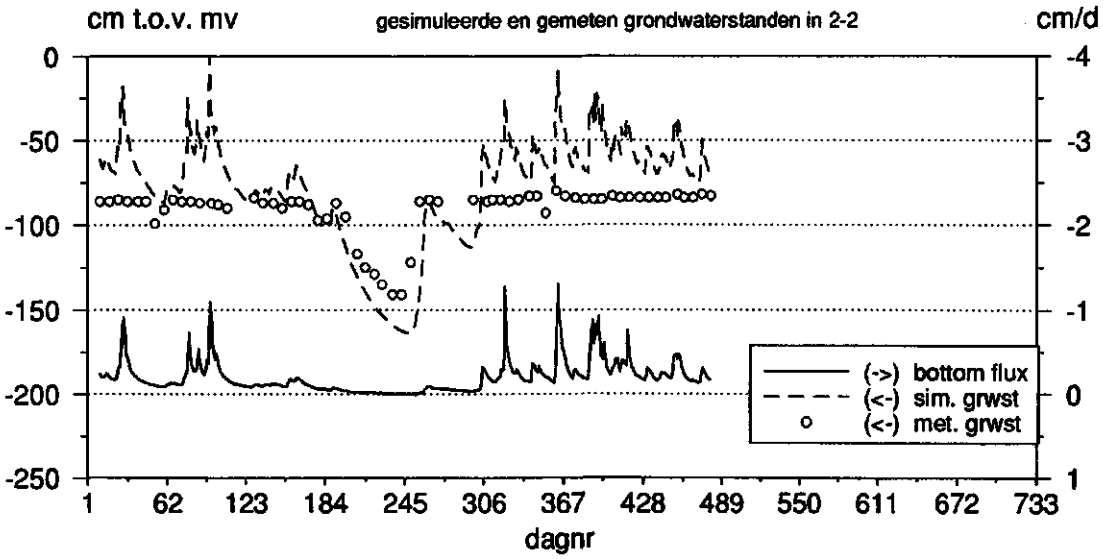


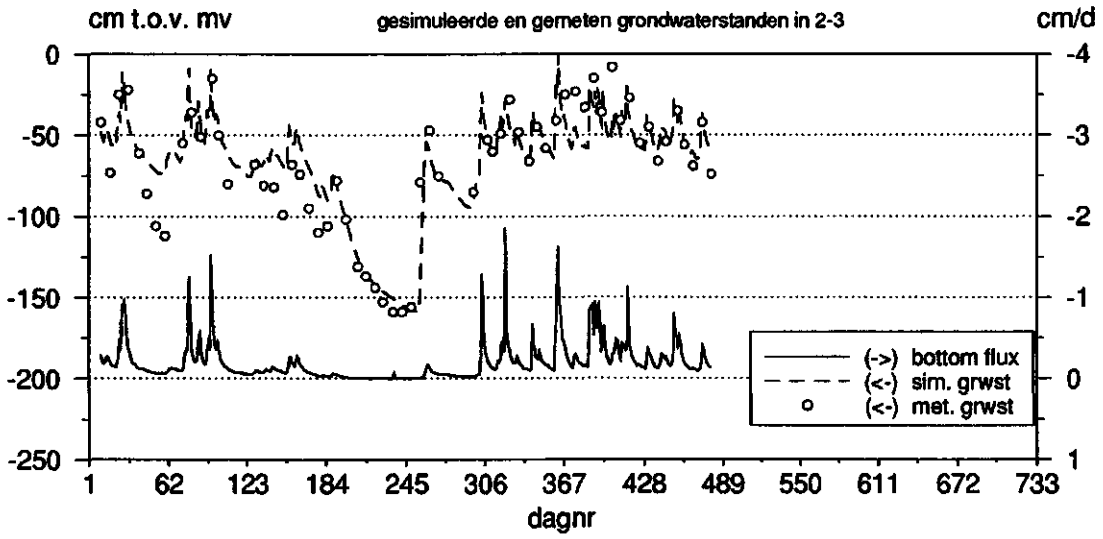


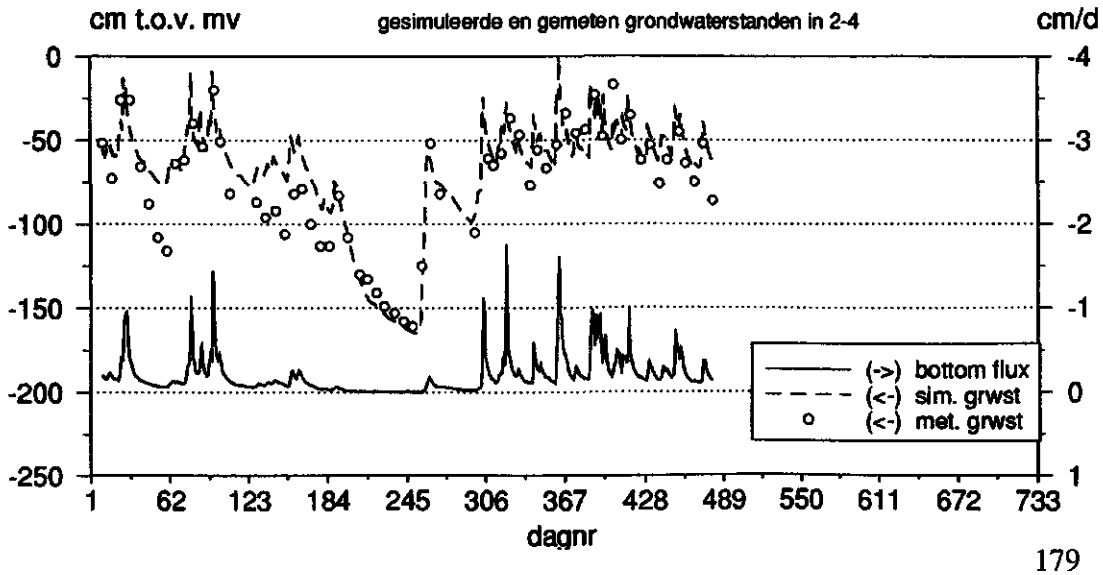

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 1-4
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

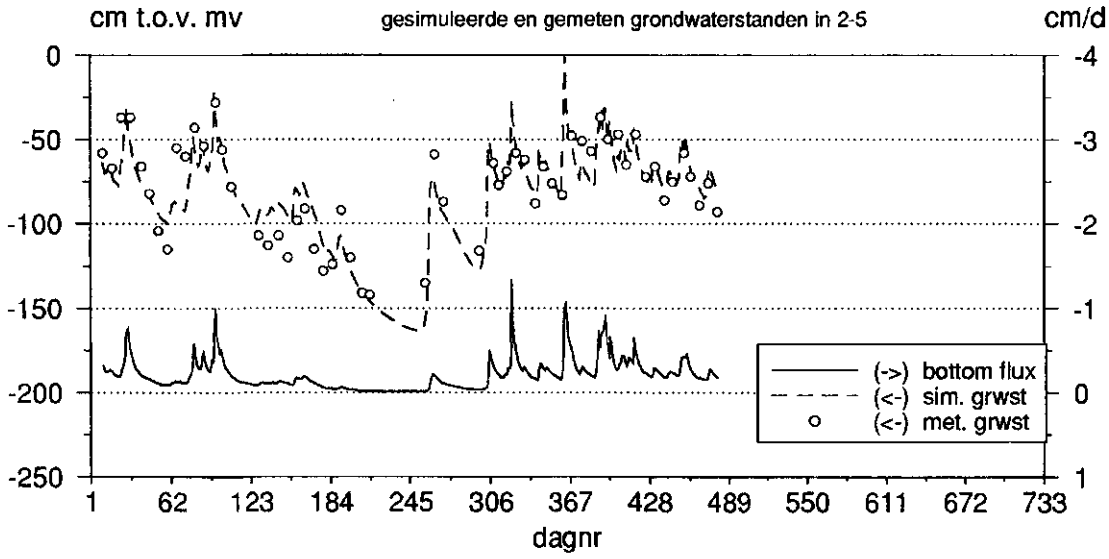

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 1-5
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

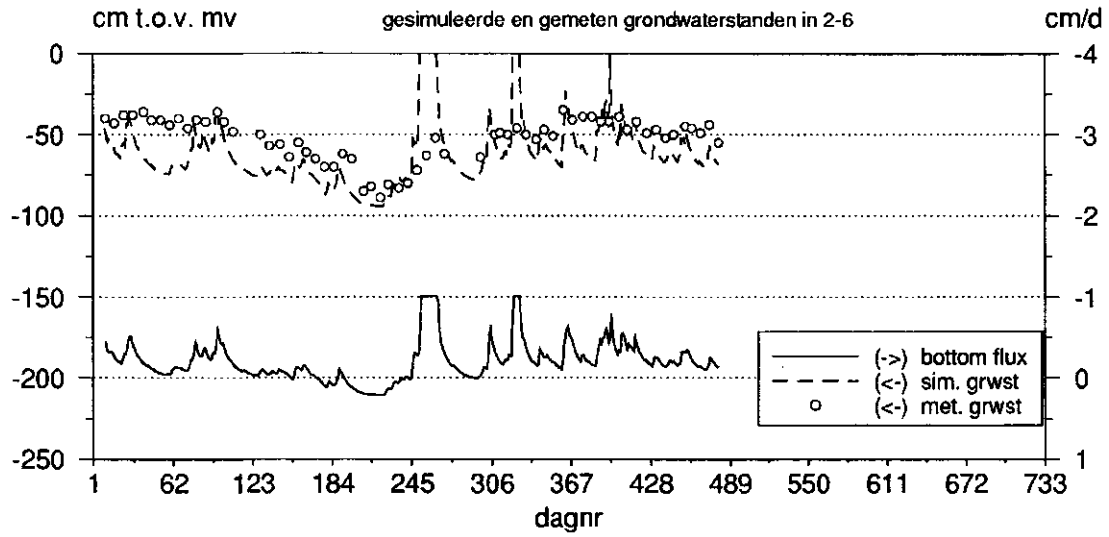

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 2-1
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

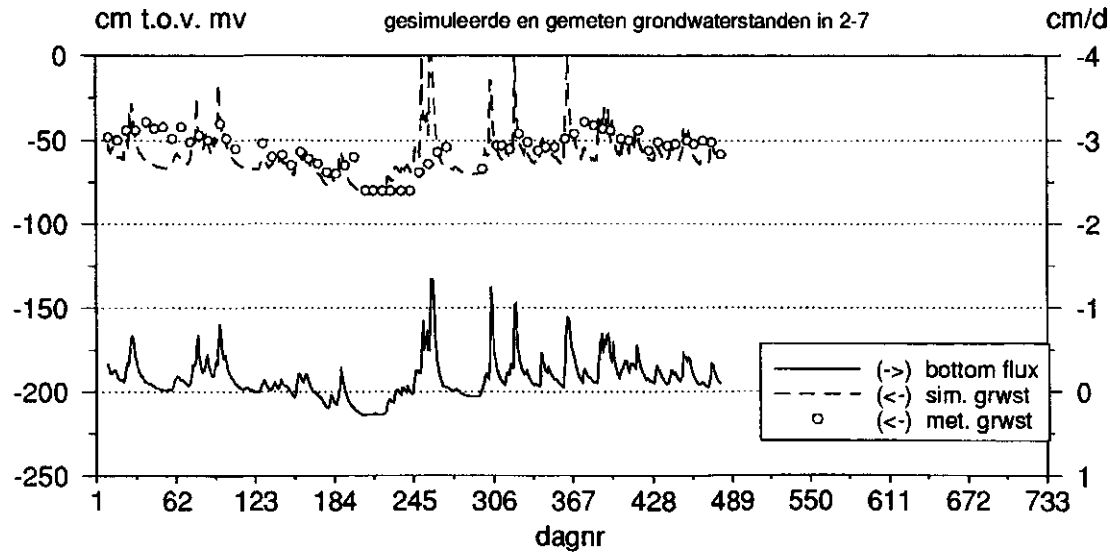

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 2-2
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

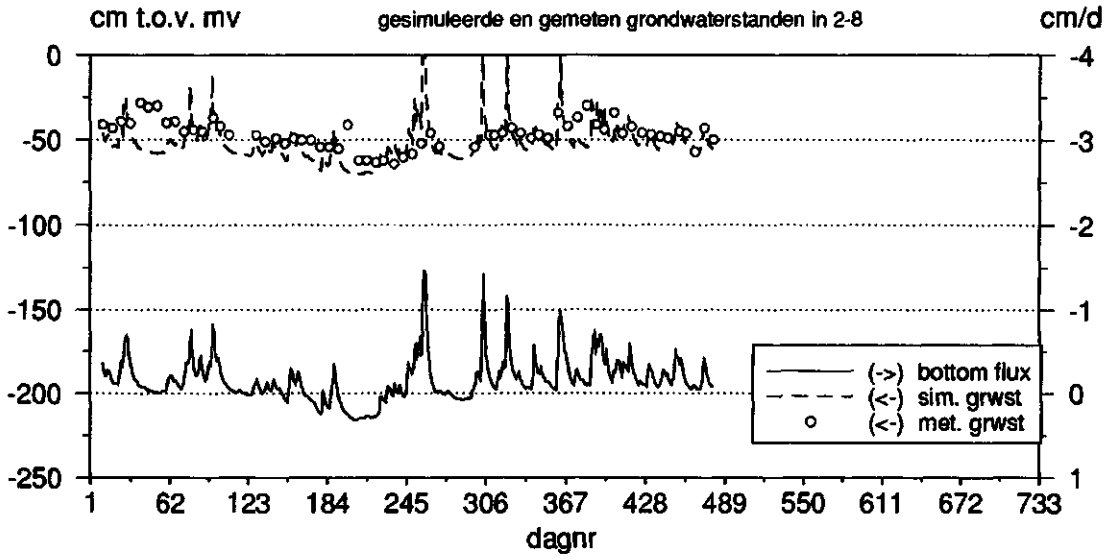

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 2-3
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

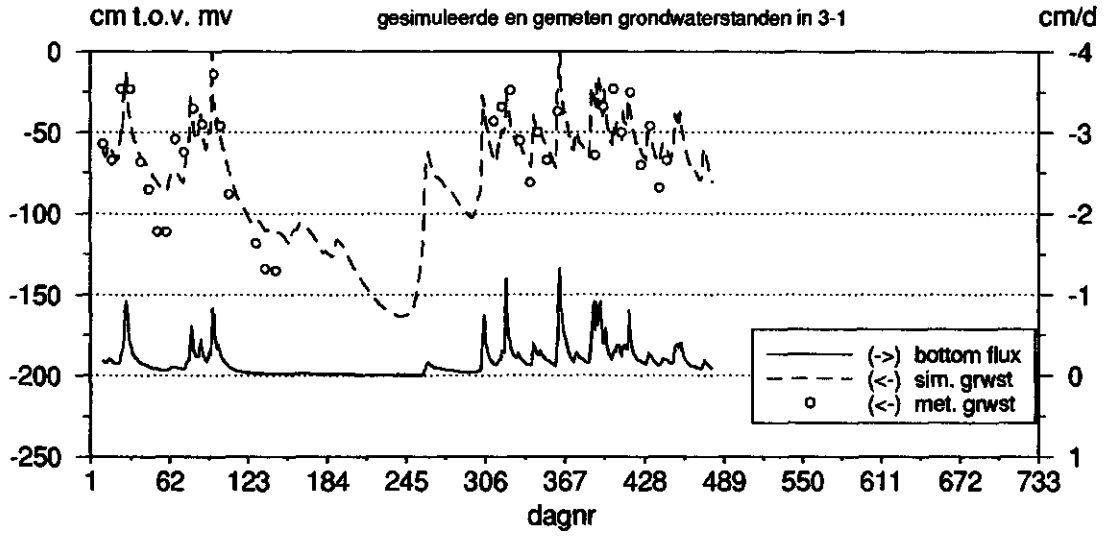

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 2-4
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

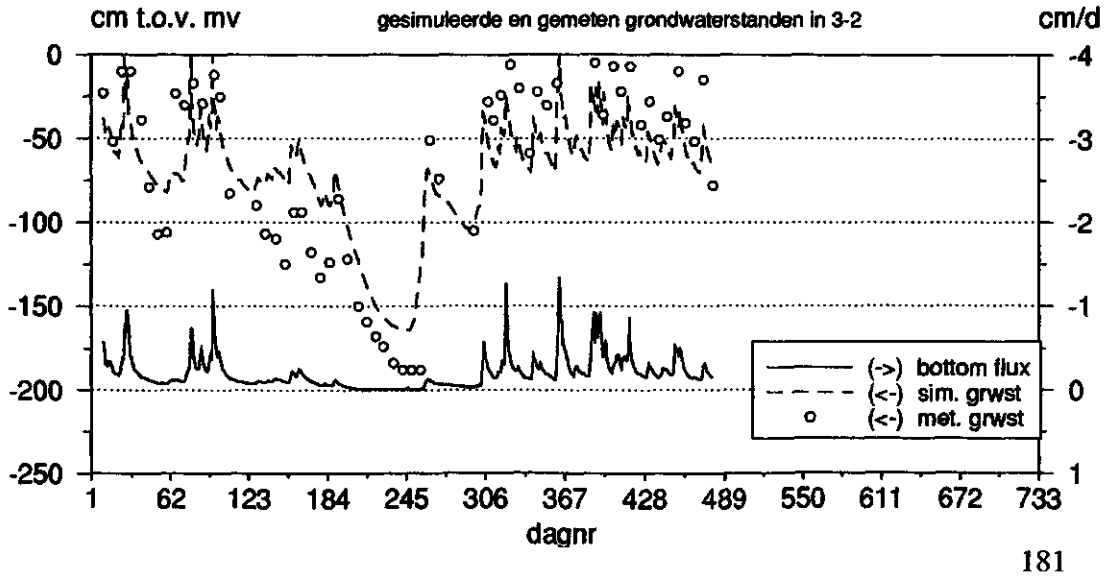

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 2-5
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

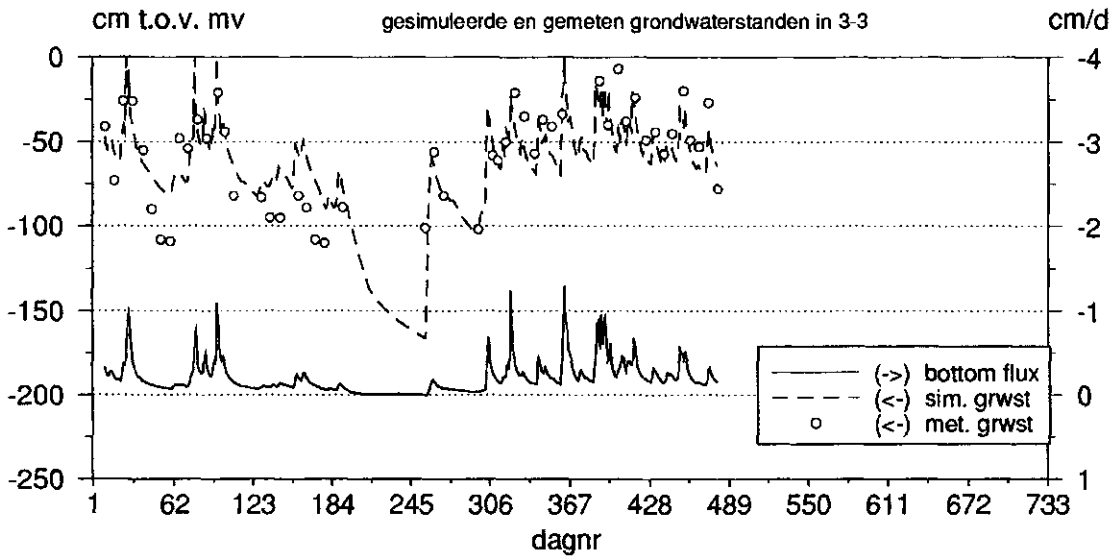

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 2-6
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

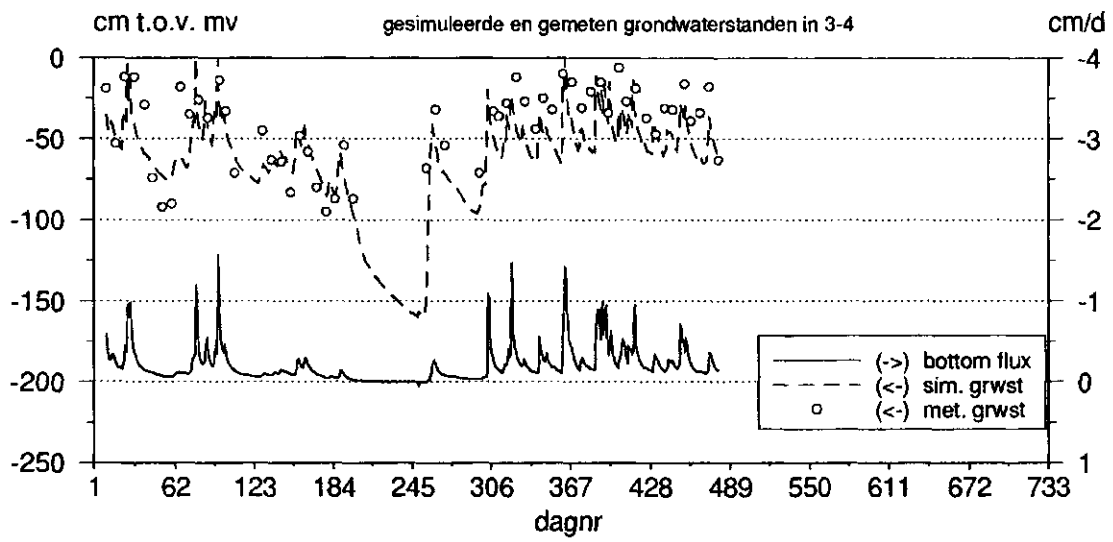

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 2-7
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

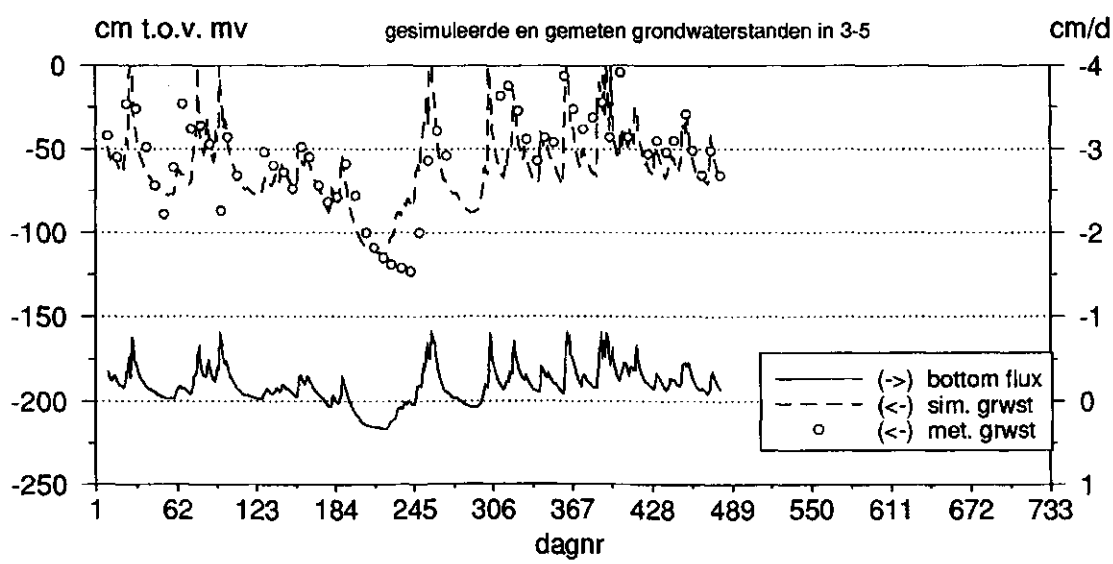

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 2-8
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

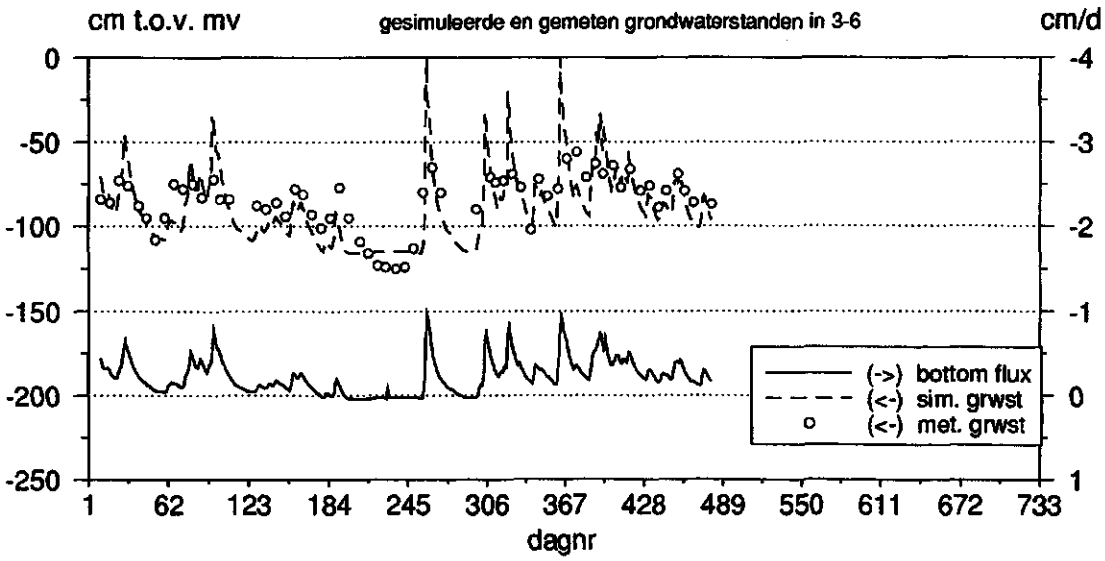

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 3-1
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

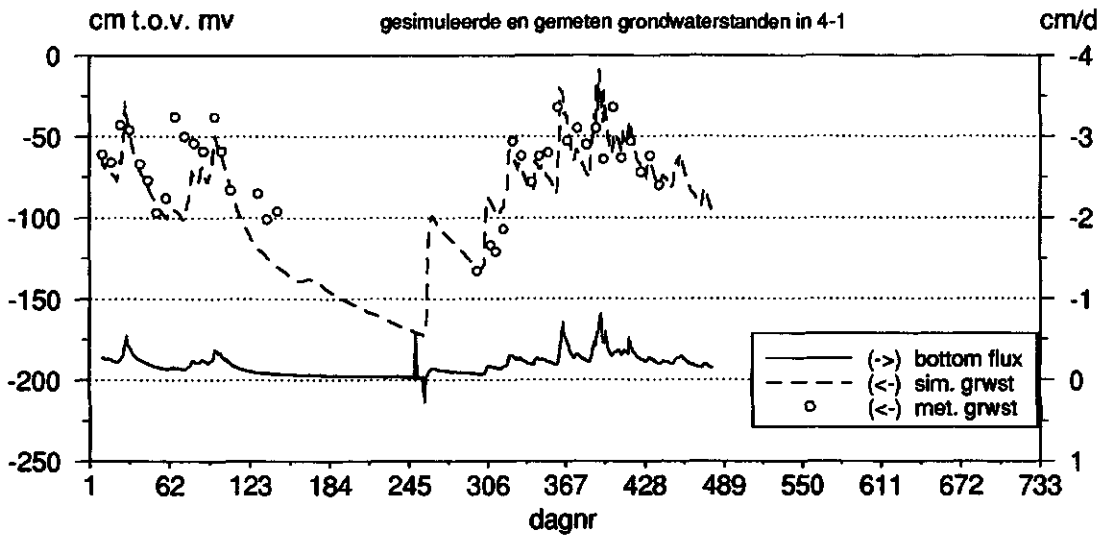

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 3-2
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

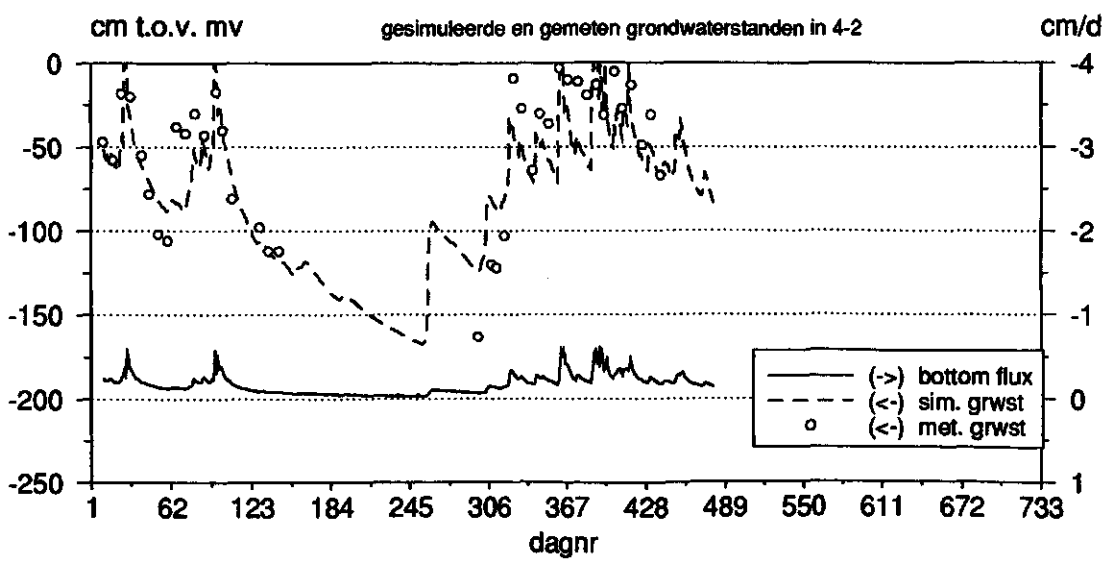

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 3-3
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

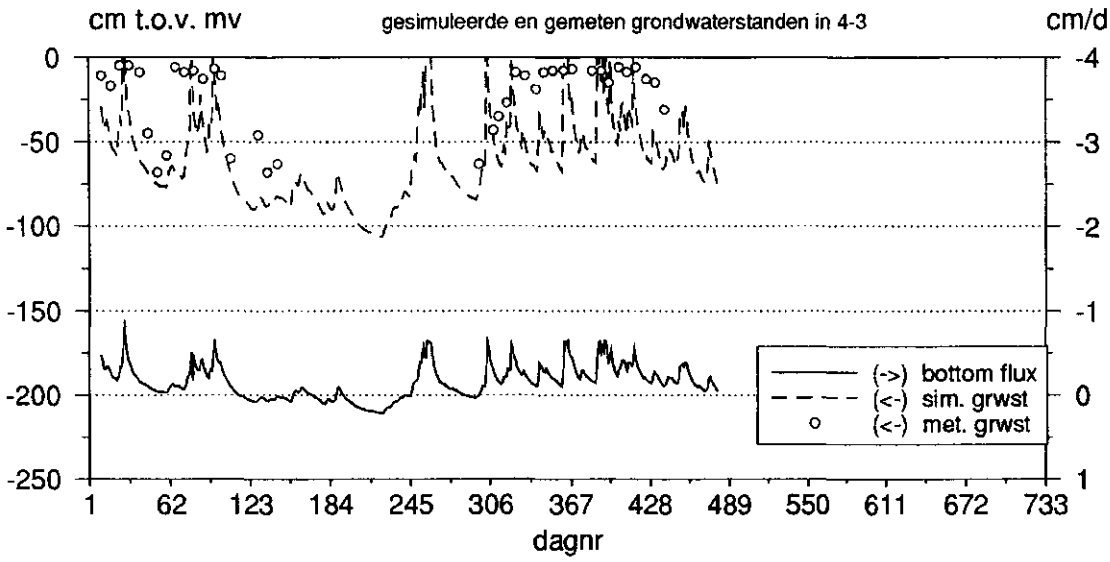

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 3-4
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

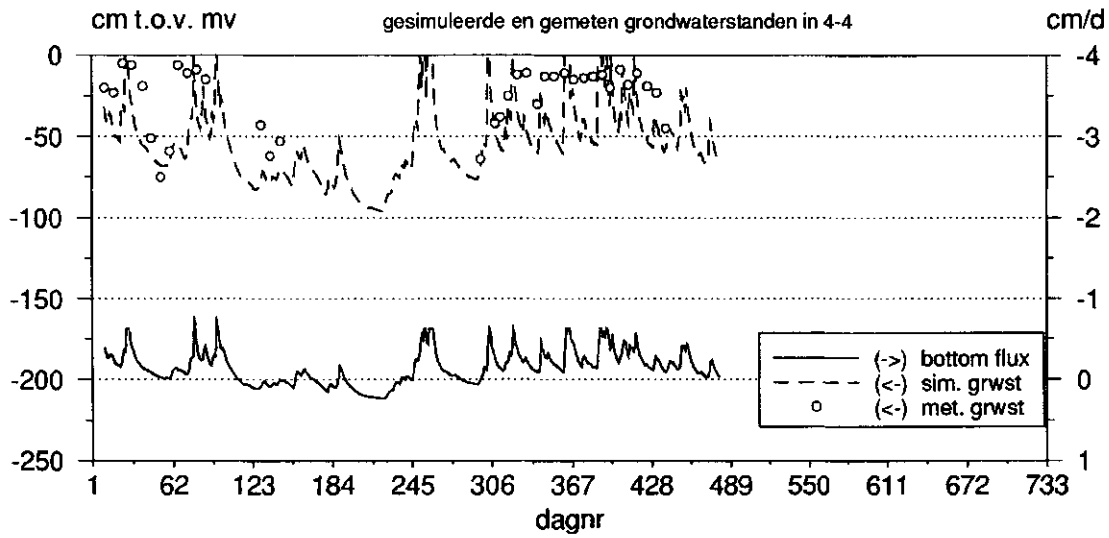

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 3-5
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

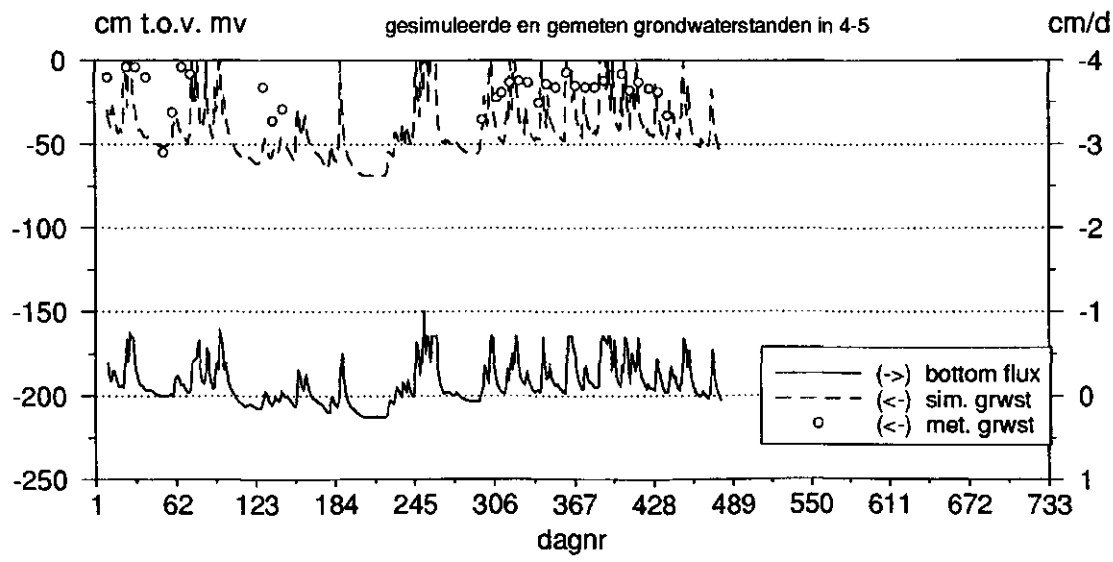

cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 3-6
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst


cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 4-1
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst


cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 4-2
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst


cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 4-3
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst


cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 4-4
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst


cm t.o.v. mv
gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden in 4-5
cm/d
0
-50
-100
-150
-200
-250
-4
-3
-2
-1
0
1
1
62
123
184
245
306
367
428
489
550
611
672
733
dagnr
(->) bottom flux
(<-) sim. grwst
(<-) met. grwst

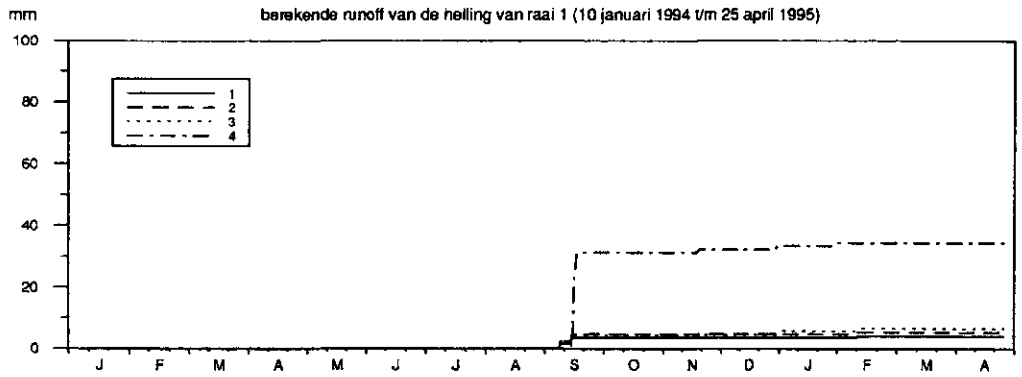
Aanhangsel 18 Berekende oppervlakkige afstroming

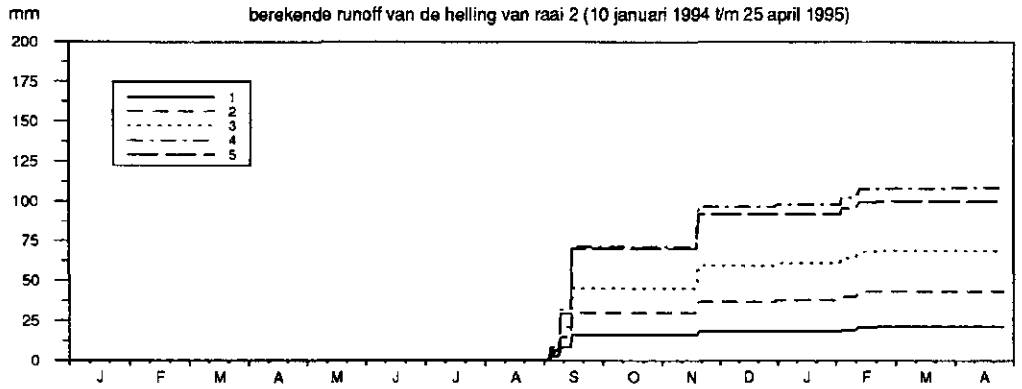
Dit aanhangsel bestaat uit de volgende onderdelen:

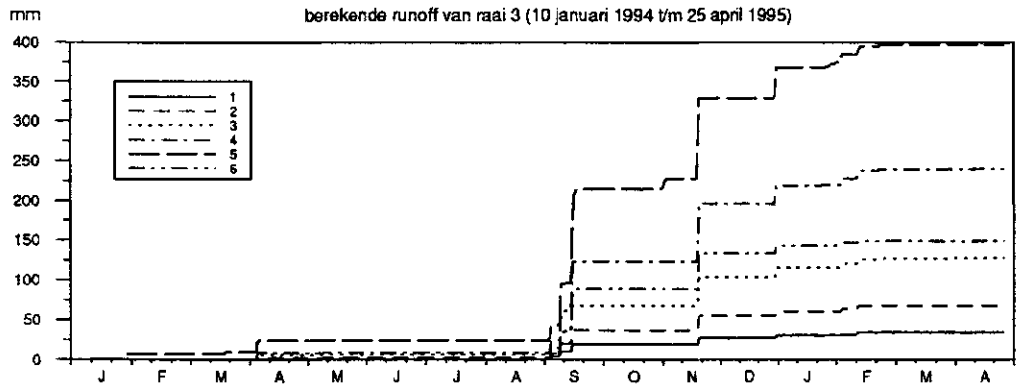
a Grafische weergave van de berekende afstroming voor de vier raaien;

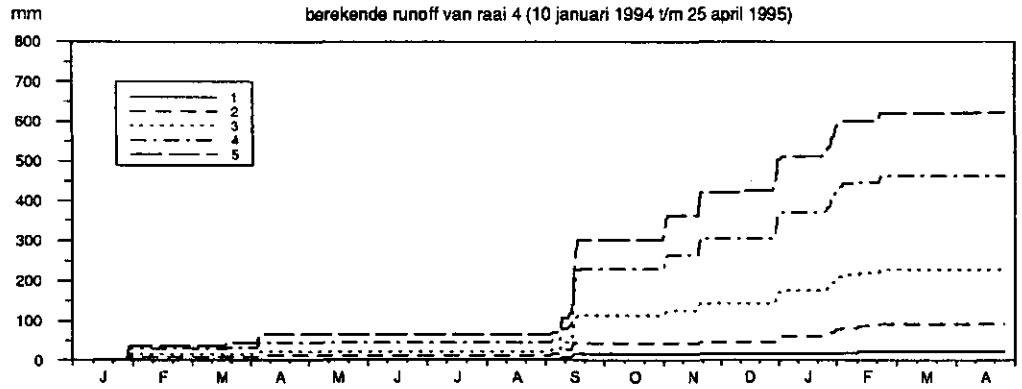
b Grafische vergelijking van de berekende afstroming van de kolommen 3-6 en 2-5 met het verloop van de vatwaterstand.

Aanhangsel 18a Grafische weergave van de berekende afstroming voor de vier raaien

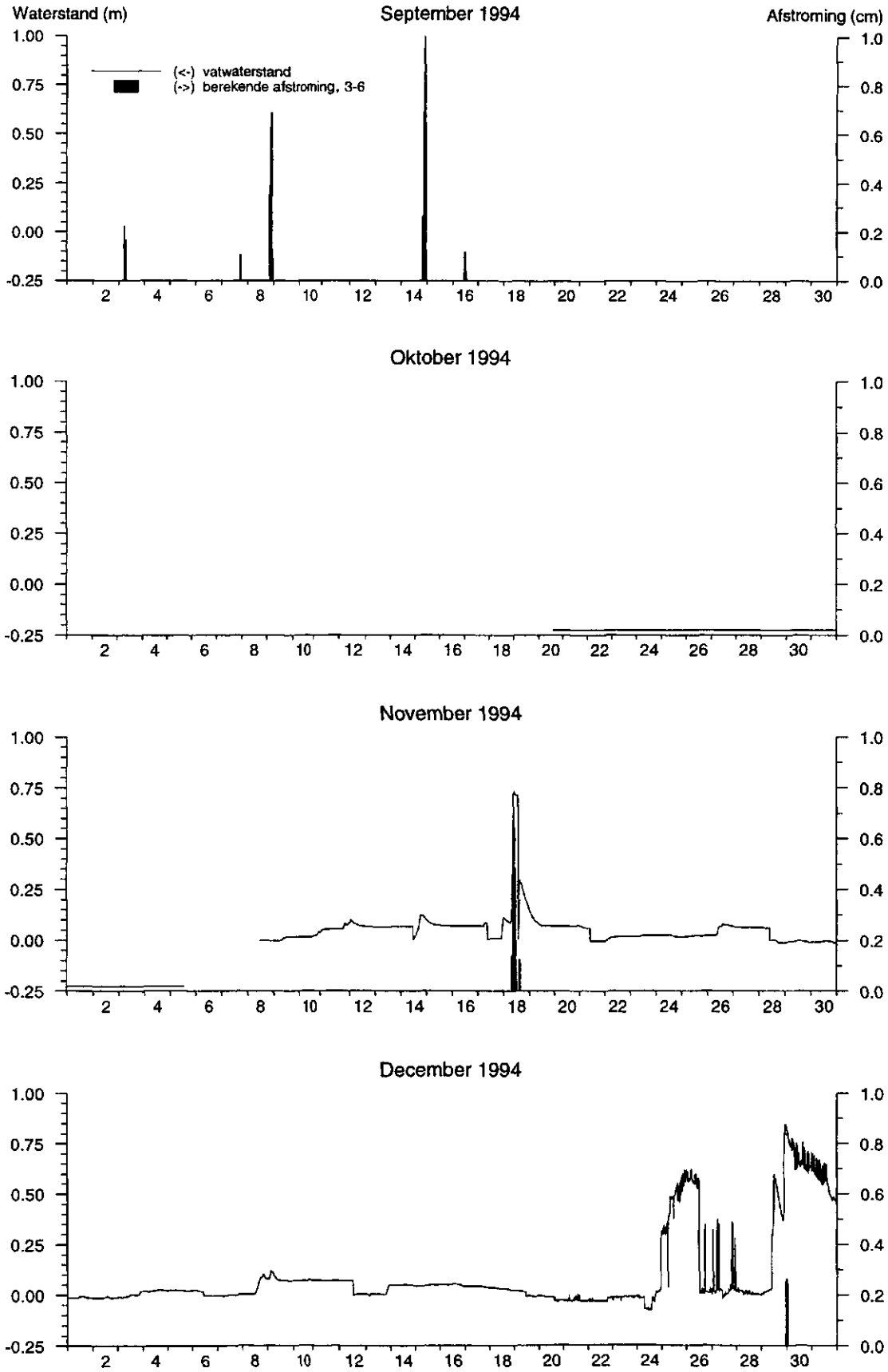


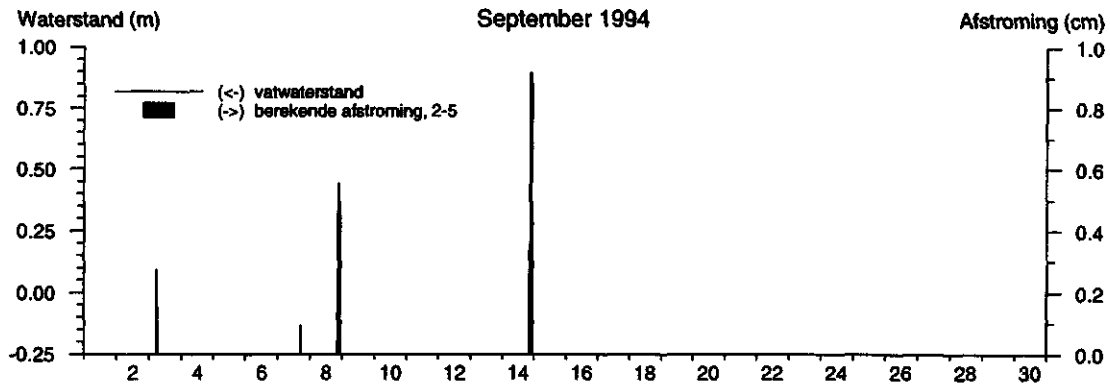


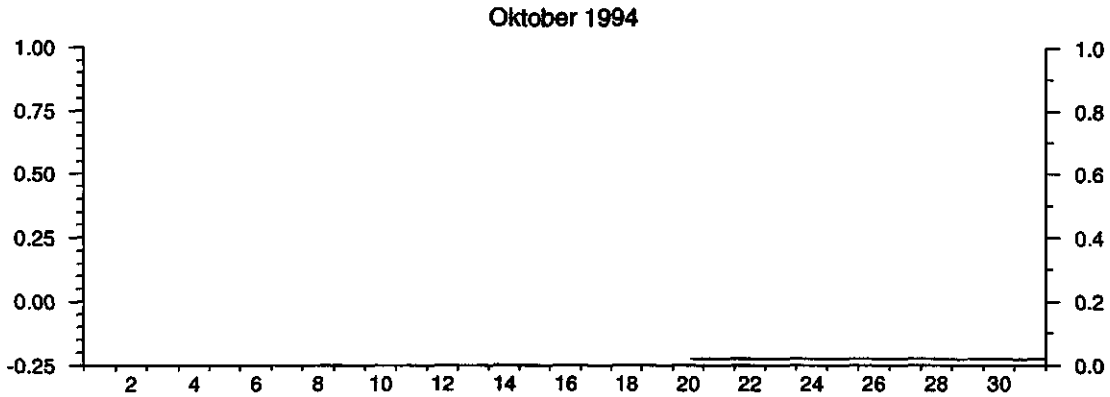


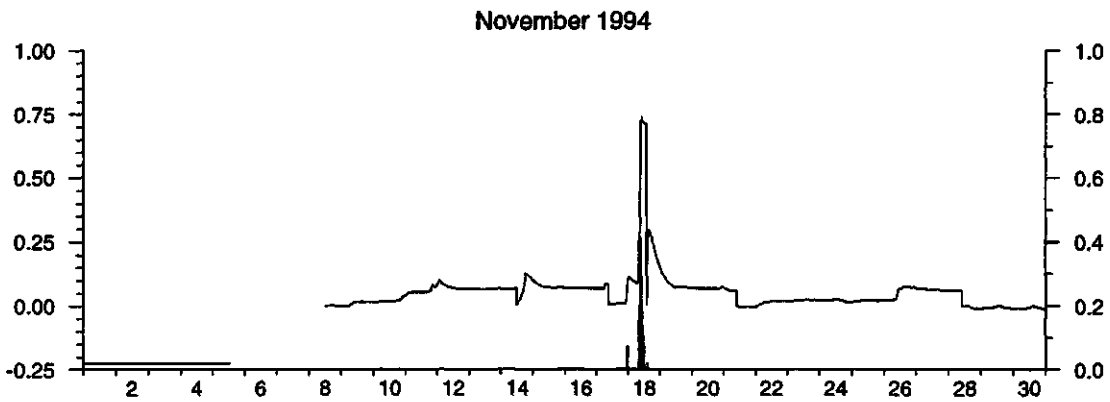


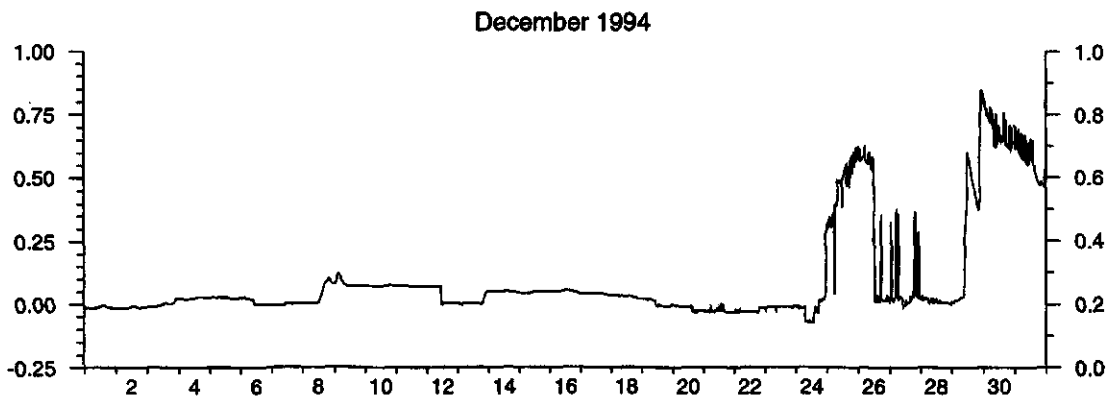
Aanhangsel 18b Grafische vergelijking van de berekende afstroming van de kolommen 3-6 en 2-5 met het verloop van de vatwaterstand

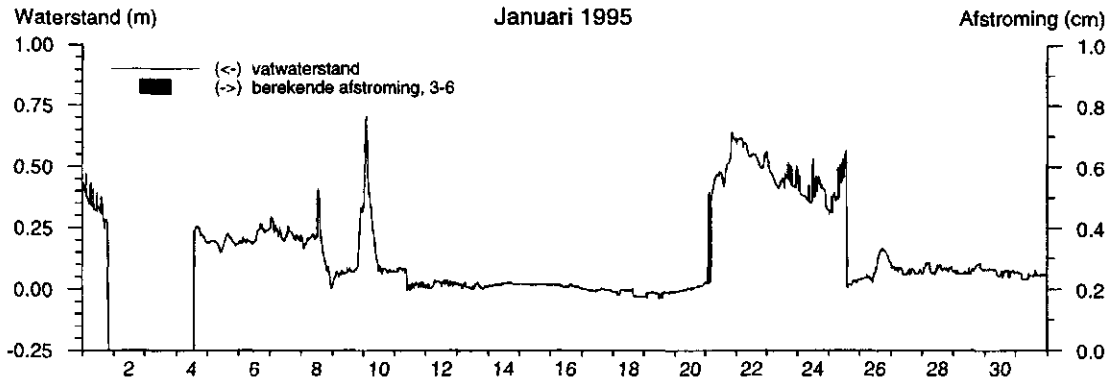

Waterstand (m)
September 1994
Afstroming (cm)
(<-) vatwaterstand
(->) berekende afstroming, 3-6
Oktober 1994
November 1994
December 1994

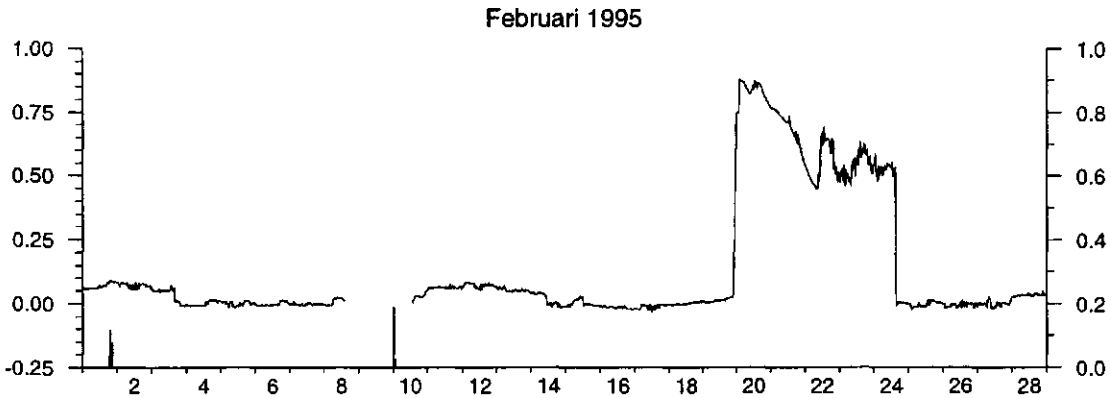

Waterstand (m)
September 1994
Afstroming (cm)
(<-) vatwaterstand
(->) berekende afstroming, 2-5
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

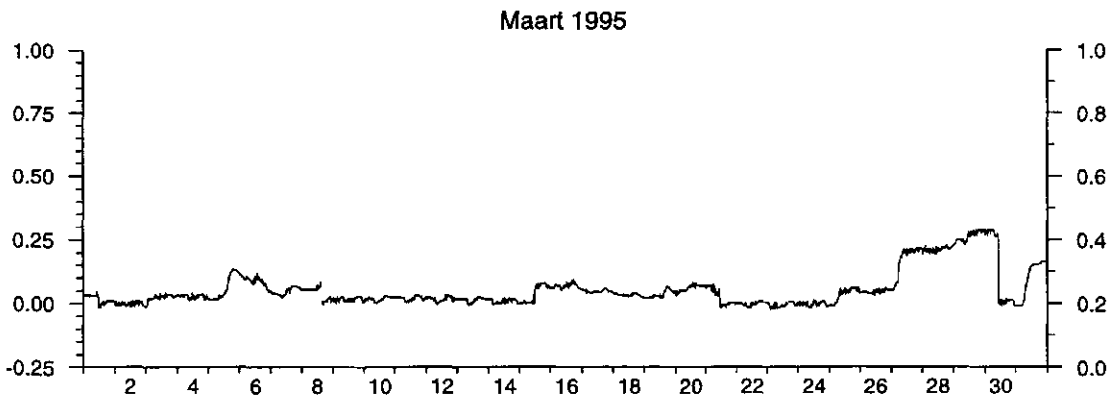

Oktober 1994
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

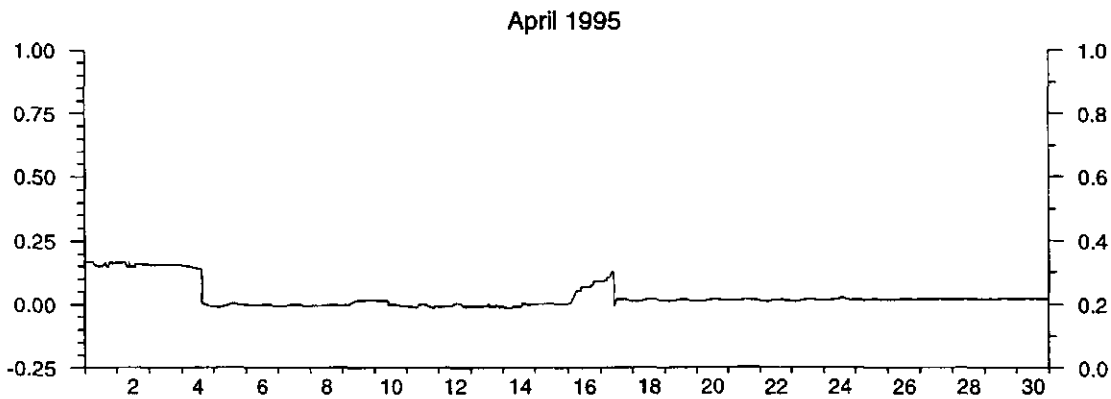

November 1994
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

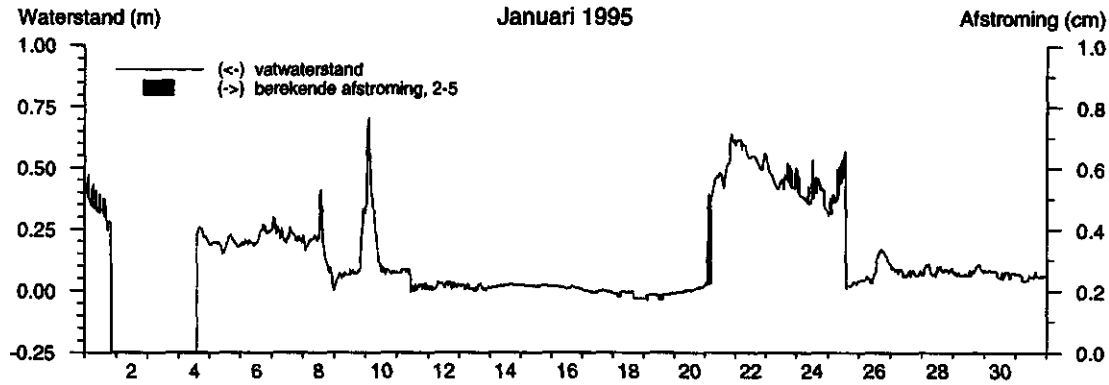

December 1994
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

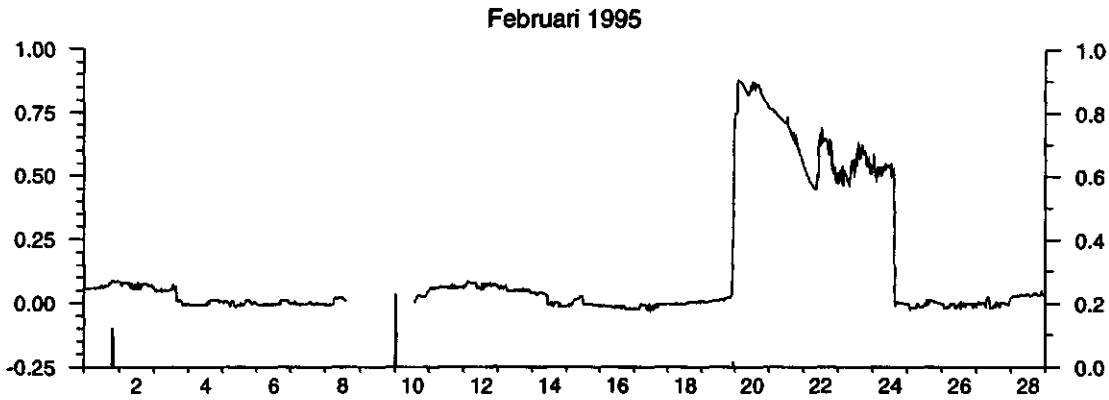

Waterstand (m)
Januari 1995
Afstroming (cm)
(<-) vatwaterstand
(->) berekende afstroming, 3-6
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

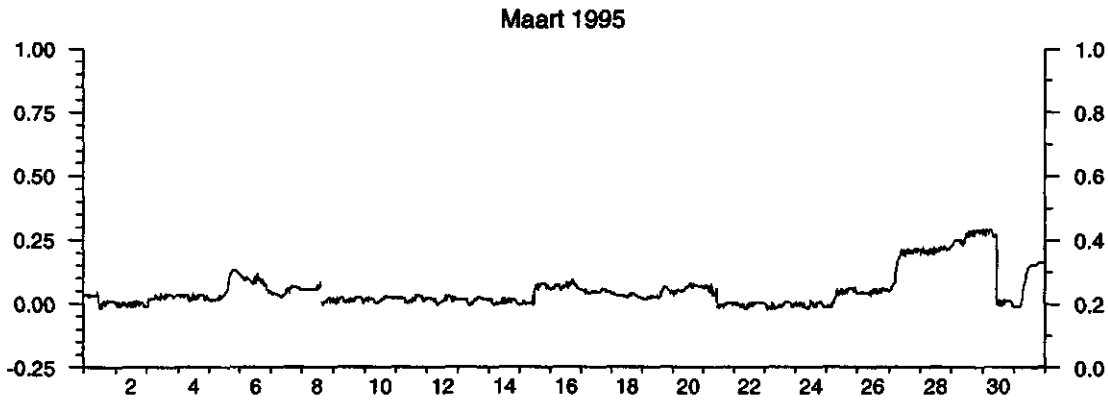

Februari 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28

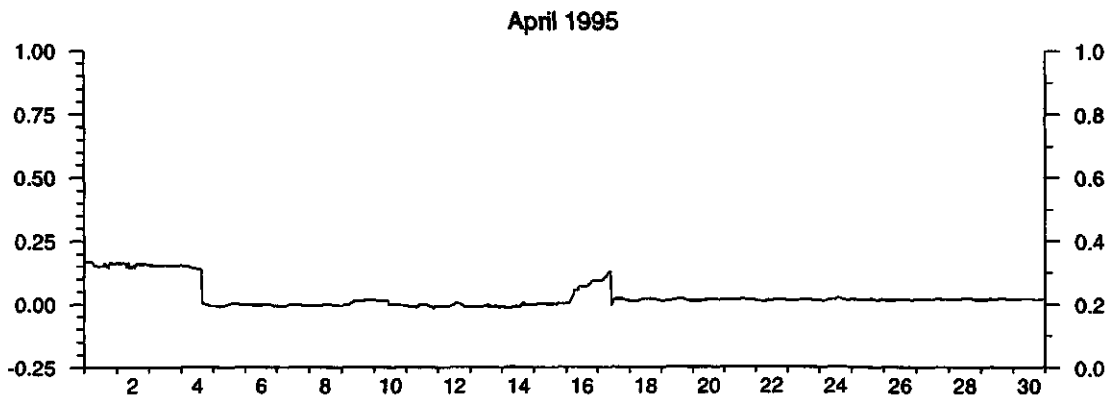

Maart 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30


April 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30


Waterstand (m)
Januari 1995
Afstroming (cm)
(<-) vatwaterstand
(->) berekende afstroming, 2-5
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30


Februari 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28


Maart 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30


April 1995
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
-0.25
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30

Aanhangsel 19 Berekende waterbalansen voor de bestaande situatie en de hydrologische scenario's

Dit aanhangsel bevat de met de SWAP-modellen berekende waterbalansen van de kolommen van de vier raaien voor de bestaande situatie en de hydrologische scenario's. Voor de bestaande situatie zijn twee jaren doorgerekend: het jaar 1994 en het 'gemiddelde' jaar. De hydrologische scenario's zijn doorgerekend voor het 'gemiddelde' jaar. In de waterbalansen worden de volgende termen onderscheiden (alle termen in mm):

Inkomende termen

neersl = neerslag;
$afst_{in}$ = inkomende afstroming;
$orfl_{in}$ = inkomende onderrandflux.

Uitgaande termen

intc. = interceptie;
$afst_{uit}$ = uitgaande afstroming;
trans. = actuele transpiratie;
evap. = actuele evaporatie;
$orfl_{uit}$ = uitgaande onderrandflux;
getal tussen haakjes is de netto uitgaande onderrandflux = $orfl_{uit}$ - $orfl_{in}$

Overige termen

Bergingsverschil: positief = er wordt water geborgen;
negatief = er komt water vrij uit de berging.

Overige symbolen

Kolom:
1-2 ge = raai 1, kolom 2, met gras (extensief);
gi = met gras (intensief);
m = met maïs;
b = met bos;
Factor = omrekeningsfactor voor berekenen inkomende afstroming uit uitgaande afstroming van vorige kolom (zie 4.2 onder stap 4);
Gem. grwst = gemiddelde grondwaterstand (m - mv.).

Waterbalans bestaande situatie voor het jaar 1994

Kolom	Factor	Inkomende termen			Uitgaande termen					Bergings-	Balans-	Gem.
		neersl	$afst_{in}$	$orfl_{in}$	intc.	$afst_{uit}$	trans.	evap.	$orfl_{uit}$	verschil	afwijk.	grwst
1-1 ge	-	1012	0	0	59	3	335	69	525 (525)	20	1	1,19
1-2 ge	0,86	1012	3	0	59	5	335	69	534 (534)	13	0	1,07
1-3 ge	0,84	1012	4	0	59	6	339	69	530 (530)	12	1	1,01
1-4 ge	1,47	1012	8	76	59	33	346	69	577 (501)	10	2	0,83
1-5 b	2,14	1012	71	67	205	123	214	33	568 (501)	10	-3	0,46
2-1 m	-	1012	0	0	20	18	254	97	609 (609)	14	0	1,02
2-2 m	0,89	1012	16	0	20	39	259	97	598 (598)	16	-1	0,84
2-3 m	1,13	1012	44	0	20	62	257	97	614 (614)	7	-1	0,72
2-4 m	1,33	1012	82	1	20	106	257	97	603 (602)	13	-1	0,75
2-5 m	0,89	1012	94	0	20	94	245	97	636 (636)	15	-1	0,93
2-6 b	2,70	1012	254	92	205	129	269	35	716 (624)	4	0	0,64
2-7 b	1,11	1012	144	112	205	139	277	36	611 (499)	9	-9	0,60
2-8 b	0,98	1012	136	112	205	174	255	35	585 (473)	6	0	0,48
3-1 gi	-	1012	0	0	59	30	346	69	490 (490)	18	0	0,89
3-2 m	1,08	1012	32	0	20	61	259	97	609 (609)	-1	-1	0,79
3-3 m	1,47	1012	89	0	20	119	258	97	601 (601)	8	-2	0,78
3-4 m	1,74	1012	208	1	20	221	257	97	627 (626)	-2	1	0,73
3-5 m	1,27	1012	281	110	20	371	247	96	657 (547)	11	1	0,65
3-6 m	0,52	1012	193	25	20	145	244	97	703 (678)	22	-1	0,93
4-1 gi	-	1012	0	0	59	17	314	69	531 (531)	22	0	1,09
4-2 gi	1,09	1012	18	0	59	53	327	69	508 (508)	13	1	0,97
4-3 gi	1,22	1012	65	93	59	162	340	68	538 (445)	1	2	0,66
4-4 gi	1,45	1012	235	111	60	349	339	66	536 (425)	3	5	0,57
4-5 gi	1,00	1012	349	142	59	489	326	64	562 (420)	3	0	0,42

Waterbalans bestaande situatie voor het 'gemiddelde' jaar

Kolom	Factor	Inkomende termen			Uitgaande termen					Bergings-	Balans-	Gem.
		neersl	$afst_{in}$	$orfl_{in}$	intc.	$afst_{uit}$	trans.	evap.	$orfl_{uit}$	verschil	afwijk.	grwst
1-1 ge	-	803	0	0	55	0	326	69	342 (342)	12	-1	1,32
1-2 ge	0,86	803	0	0	55	0	321	69	358 (358)	0	0	1,20
1-3 ge	0,84	803	0	0	55	0	327	69	347 (347)	5	0	1,16
1-4 ge	1,47	803	0	111	55	3	348	69	438 (327)	1	0	0,89
1-5 b	2,14	803	5	115	163	55	281	35	388 (273)	1	0	0,52
2-1 m	-	803	0	0	19	5	246	95	431 (431)	7	0	1,13
2-2 m	0,89	803	5	0	19	10	258	95	412 (412)	14	0	0,94
2-3 m	1,13	803	12	1	19	15	258	95	423 (422)	6	0	0,81
2-4 m	1,33	803	20	1	19	23	259	95	417 (416)	12	-1	0,84
2-5 m	0,89	803	21	0	19	22	235	95	442 (442)	11	0	1,03
2-6 b	2,70	803	60	110	163	0	276	35	502 (392)	-3	0	0,70
2-7 b	1,11	803	0	131	163	0	282	36	448 (317)	6	-1	0,61
2-8 b	0,98	803	0	139	163	0	282	36	458 (319)	4	-1	0,53
3-1 gi	-	803	0	0	55	7	345	69	312 (312)	17	-2	1,02
3-2 m	1,08	803	7	0	19	13	259	95	428 (428)	-2	-2	0,89
3-3 m	1,47	803	19	0	19	21	253	95	428 (428)	7	-1	0,87
3-4 m	1,74	803	37	0	19	39	257	95	434 (434)	-3	-1	0,82
3-5 m	1,27	803	49	129	19	75	252	95	532 (403)	10	-2	0,69
3-6 m	0,52	803	39	33	19	25	241	95	470 (437)	25	0	0,99
4-1 gi	-	803	0	13	55	6	288	69	399 (386)	-1	0	1,23
4-2 gi	1,09	803	7	12	55	12	313	69	367 (355)	5	1	1,12
4-3 gi	1,22	803	15	128	55	48	345	68	434 (306)	0	-4	0,70
4-4 gi	1,45	803	69	141	55	114	340	67	437 (296)	2	-2	0,61
4-5 gi	1,00	803	114	165	55	181	335	65	452 (287)	0	-6	0,44

Waterbalans hydrologische scenario's ('gemiddelde' jaar)

Ko- lom	Sub- kolom	Factor	Scenario	Inkomende termen neersl	$afst_{in}$	$orfl_{in}$	Uitgaande termen intc.	$afst_{uit}$	trans.	evap.	$orfl_{uit}$	Bergings- verschil	Balans- afwijk.	Gem. grwst
3-6	-	0,52	oorspr.	803	39	33	19	25	241	95	470 (437)	25	0	0,99
	1	1,00	geen buf.	803	75	30	19	50	240	95	497 (467)	7	0	0,99
	2	1,83	geen buf.	803	91	29	19	87	240	97	474 (445)	6	0	1,00
	3	2,00	geen buf.	803	175	29	19	168	240	97	477 (448)	6	0	1,00
	4	3,00	1-gras	803	505	73	71	415	402	32	456 (384)	6	-2	1,01
	2	1,83	10-gras	803	91	76	71	51	406	32	407 (330)	6	-2	1,02
	3	2,00	10-gras	803	102	76	71	70	407	32	395 (318)	6	0	1,03
	4	3,00	10-gras	803	210	76	71	170	407	32	403 (328)	6	0	1,02
	4	3,00	1-bos	803	505	39	163	411	277	36	463 (425)	-2	-2	1,00
	2	1,83	10-bos	803	91	34	163	50	279	36	405 (371)	-2	-3	1,02
	3	2,00	10-bos	803	101	34	163	69	279	36	394 (359)	-2	0	1,02
	4	3,00	10-bos	803	208	34	163	167	279	36	402 (368)	-2	0	1,02
4-5	-	1,00	oorspr.	803	114	165	55	181	335	65	452 (287)	0	-6	0,44
	1	1,48	geen buf.	803	169	166	55	224	338	66	452 (287)	0	2	0,45
	2	3,50	geen buf.	803	784	165	55	842	337	66	453 (287)	0	-2	0,45
	3	2,00	geen buf.	803	1684	166	55	1733	337	66	457 (291)	1	3	0,45
	4	3,00	1-gras	803	5200	271	71	5121	487	29	538 (267)	26	3	0,45
	2	3,50	10-gras	803	784	273	71	808	496	31	448 (174)	6	1	0,47
	3	2,00	10-gras	803	1616	272	71	1600	490	30	481 (209)	16	2	0,46
	4	3,00	10-gras	803	4800	271	71	4745	486	30	515 (244)	26	2	0,46
	4	3,00	1-bos	803	5200	136	163	5091	269	33	556 (420)	24	3	0,42
	2	3,50	10-bos	803	784	137	163	782	274	34	465 (328)	4	2	0,44
	3	2,00	10-bos	803	1565	137	163	1519	271	34	501 (364)	14	2	0,43
	4	3,00	10-bos	803	4557	136	163	4470	269	34	534 (399)	24	2	0,43

Symbolen bij waterbalans van de scenario's

Subkolom = kolommen behorende bij de vier subsecties waarin de betreffende sectie is verdeeld (zie tabel 9 hoofdtekst);

Scenario = doorgerekende hydrologische scenario's:

- oorspr.: oorspronkelijke balans voor bestaande situatie;
- geen buf.: geen bufferstrook;
- 1-gras: bufferstrook 1 m breed met gras;
- 10-gras: bufferstrook 10 m breed met gras;
- 1-bos: bufferstrook 1 m breed met bos;
- 10-bos: bufferstrook 10 m breed met bos.

Aanhangsel 20 Tracerexperimenten

Ter ondersteuning van het hydrologische deel van het perceelsonderzoek zijn twee tracerexperimenten uitgevoerd. Het doel van deze experimenten was drieledig:
1 het traceren van de transportweg van water en stoffen door de bodem richting Mosbeek;
2 het verkrijgen van een indruk van de stroomsnelheid van het water richting Mosbeek;
3 het nagaan of water met daarin opgeloste stoffen ter hoogte van raai 2 door de bufferstrook stroomt.

Het eerste experiment is uitgevoerd op twee locaties in raai 3 in de periode november 1994 tot en met januari 1995. Dit experiment had vooral betrekking op de eerste twee doelen. Het tweede experiment is ter hoogte van raai 2 in de bufferstrook uitgevoerd in maart-april 1995. Dit experiment diende vooral het derde doel.

In de experimenten is een hoeveelheid geconcentreerde bromideoplossing in de bodem geïnfiltreerd. Benedenstrooms de injectiepunten zijn op een aantal tijdstippen en op verschillende afstanden tot de injectiepunten grondwatermonsters genomen. In deze monsters is de bromideconcentratie bepaald.

In dit aanhangsel worden de twee tracerexperimenten uitgebreid besproken. Eerst wordt het experiment in raai 3 beschreven (20.1) en vervolgens het experiment in de bufferstrook (20.2).

20.1 Tracerexperiment in raai 3

Het doel van het eerste tracerexperiment was tweeledig:
1 het traceren van de transportweg van water en stoffen door de bodem richting de Mosbeek. De verwachting was dat de transportweg min of meer loodrecht op de beek staat, dus parallel aan de geplaatste raaien met grondwaterstandsbuizen. Het eerste doel van de tracer experimenten was deze aanname te controleren;
2 het verkrijgen van een indruk van de stroomsnelheid van het water richting beek. Hierdoor kan een indruk worden verkregen van de verblijftijd van water en stoffen in de verzadigde bodem voordat deze uitspoelen in de beek, en daarmee van de horizontale doorlatendheid (k-waarde).

Eerst wordt de opzet van het experiment behandeld (20.1.1). Vervolgens worden de resultaten gegeven en besproken (20.1.2). Tot slot worden conclusies getrokken (20.1.3).

20.1.2 Opzet van het experiment

Eerst zijn voor het maken van een opzet van het experiment beschikbare gegevens geanalyseerd. Op basis van deze informatie is besloten tot een opzet. Vervolgens is een meetnet van peilbuizen geïnstalleerd volgens deze opzet en zijn de metingen uitgevoerd.

Schatting van de reistijd

Om de opzet van het experiment te kunnen plannen, is op basis van de beschikbare gegevens een schatting gemaakt van de tijd die een conservatieve stof nodig heeft om de afstand tussen peilbuis 3.1 en de Mosbeek te overbruggen (zie fig. 2 van de hoofdtekst). Uit een globale waterbalans is een gemiddelde verzadigde doorlatendheid afgeleid van 5 $m.d^{-1}$. Deze waarde wijkt af van de schattingen uit de bodemkundige beschrijving van 0,35 à 0,50 $m.d^{-1}$ (zie aanhangsel 3). Wel wordt in de meeste profielen een laag aangegeven met een doorlatendheid van 2 à 3 $m.d^{-1}$ (dikte 0,15 tot 0,40 m). Voor het schatten van de reistijd is de waarde van 5 $m.d^{-1}$ gebruikt.

De porositeit is geschat op 30%. De gradiënt van het grondwatervlak fluctueert relatief weinig en wordt sterk bepaald door de topografie. Het watervoerend zandpakket heeft, vooral vanaf buis 3.3, een geringe maximale dikte van circa 1 m. De werkelijk doorstroomde dikte is als gevolg van de geringe pakketdikte en de fluctuerende grondwaterstand aan sterke fluctuaties onderhevig en plaatselijk bepaald door het reliëf van de bovenkant van het nagenoeg ondoorlatende tertiaire pakket. Om een inschatting van de reistijd te maken, is gerekend met de gemiddelde gradiënt. Het stijghoogteverschil tussen buis 3.1 en 3.2 is gering. Buis 3.1 stond niet in het verlengde van raai 3, maar week af in westelijke richting. In figuur 20.1 is de stijghoogte in de tijd voor de buizen van raai 3 weergegeven. In tabel 20.1 is een schatting gegeven van de reistijd. Hierbij is, vanwege de positie van 3.1 buiten de raai, voor het traject 3.1-3.2 een zelfde gradiënt aangehouden als voor het traject 3.2-3.3.

Op basis van deze schattingen is de reistijd tussen 3.1 en 3.6 geschat op 189 dagen. Het experiment was gepland voor de periode november-december (ca. 60 dagen). Om toch zoveel mogelijk informatie te verzamelen, is besloten om op twee plaatsen de traceroplossing te injecteren, namelijk ter plaatse van buis 3.1 en ter plaatse van

Tabel 20.1 Inschatting van de reistijd voor de trajecten in raai 3

Traject	Afstand[1] (m)	Gradiënt ($m.m^{-1}$)	Stroomsnelheid[2] ($m.d^{-1}$)	Reistijd (d)
3.1-3.2	39	0,0327[2]	0,55	71
3.2-3.3	33	0,0327	0,55	60
3.3-3.4	16	0,0259	0,43	37
3.4-3.5	12	0,0413	0,69	17
3.5-3.6	10	0,1434	2,39	4

[1] eerste inschatting in het veld, deze stemt niet overeen met de resultaten van de uitgevoerde detailmeting waarop fig.2 (hoofdtekst) en fig. 20.2 t/m 20.4, en tabel 20.2 t/m 20.4 zijn gebaseerd

[2] filtersnelheid

[3] 3.1-3.2 is gelijk genomen aan 3.2-3.3 vanwege positie van 3.1 buiten de raai

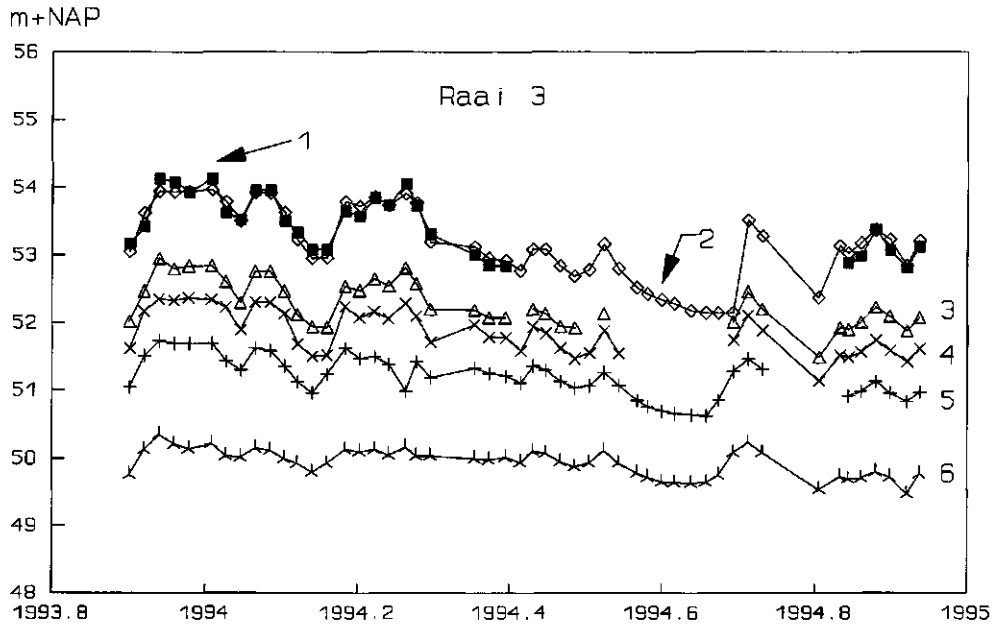


Fig. 20.1 Stijghoogte in de tijd voor de buizen van raai 3 (de cijfers verwijzen naar de buisnummers; zie fig. 2 van de hoofdtekst voor de positie van de buizen)

buis 3.3. In een periode van 60 dagen wordt in het eerste geval de afstand tussen buis 3.1 en buis 3.2 overbrugd en in het tweede geval de afstand tussen buis 3.3 en de Mosbeek.

Inrichting van het meetnet

Voor de uitvoering van het tracerexperiment is raai 3 onderverdeeld in twee delen: raaideel 1 en raaideel 2. Raaideel 1 liep van injectiepunt 1, dat in het verlengde van de gehele raai lag ter hoogte van buis 3.1, tot buis 3.2; raaideel 2 liep van injectiepunt 2 bij buis 3.3 tot buis 3.6 (zie fig. 20.4).

Voor de injectie van de traceroplossing zijn per injectiepunt vijf injectiebuizen gebruikt. De injectiebuizen bevonden zich in een 4 m lange injectieraai loodrecht op raai 3 op een onderlinge afstand van 1 m (zie fig. 20.4). Zo is een initieel tracerfront van ruim 4 m breedte verkregen. De middelste buis van de injectieraai van raaideel 1 lag in het verlengde van raai 3. Alle injectiebuizen in raaideel 1 waren nieuw geplaatste buizen. In raaideel 2 was de middelste buis van de injectieraai de bestaande buis 3.3. De overige injectiebuizen in dit raaideel waren nieuw geplaatste buizen.

Voor het bepalen van de positie van injectiepunt 1 is uitgegaan van een stroomsnelheid van 0,55 $m.d^{-1}$ in raaideel 1 (zie tabel 20.1). Op basis van deze snelheid kan in 60 dagen (beschikbare tijd voor het experiment) 33 m worden afgelegd. Om die reden en omdat buis 3.1 niet in het verlengde van raai 3 stond, is injectiepunt 1 op 30 m bovenstrooms van buis 3.2 gelocaliseerd in het verlengde van raai 3.

Tabel 20.2 Codering en plaats van de nieuwe buizen en de bestaande buis (3.2) voor injectie en bemonstering in raaideel 1 van raai 3 (zie ook fig. 20.4). De afstand tussen de O- en W-buizen is gelijk aan de geschatte breedte van het bromidefront.

Afstand tot injectie (m)	Geschatte breedte bromidefront (m)	Codering en plaats buizen t.o.v. elkaar		
0	4	5 injectiebuizen in injectiepunt 1 (nabij 3.1)		
8	5	1.8 W	1.8 M	1.8 O
15	6	1.15W	1.15 M	1.15 O
30	8	1.30 W	3.2	1.30 O

Codering nieuwe buizen:
- M = midden; W = west; O = oost;
- 1.8 W = raaideel 1, op 8 m van het injectiepunt, ten Westen van raai 3

Voor monitoring van de tracerconcentraties in het grondwater is gebruik gemaakt van bestaande buizen van raai 3. Daarnaast zijn in beide raaidelen extra bemonsteringsbuizen geplaatst (tabel 20.2 en 20.3, en fig. 20.4). Op verschillende afstanden van de beide injectiepunten zijn extra buizen geplaatst in de lengterichting van raai 3 (buizen met codering M van Midden). Aan weerszijden van elk van deze M-buizen is een buis gezet (buizen met codering O van Oosten en W van Westen). Op deze wijze ontstonden verschillende bemonsteringsraaien van drie bemonsteringsbuizen dwars op raai 3. De codering van de buizen is als volgt: het eerste deel (een 1 of 2) slaat op het raaideel, het tweede op de afstand tot het injectiepunt (bv. 22 is 22 m) en het derde op de ligging ten opzichte van raai 3 (M, O of W).

Voor het bepalen van de positie van de extra bemonsteringsbuizen is aangenomen dat de breedte van het tracerfront zich heeft verdubbeld in 60 dagen. De eerste bemonsteringsraaien zijn op relatief korte afstand van het injectiepunt geplaatst.

Tabel 20.3 Codering en plaats van de nieuwe en de bestaande buizen voor injectie en bemonstering in raaideel 2 van raai 3 (zie ook fig. 20.4). De afstand tussen de O- en W-buizen is gelijk aan de geschatte breedte van het bromidefront.

Afstand tot injectie (m)	Geschatte breedte bromidefront (m)	Codering en plaats buizen t.o.v. elkaar		
0	4	2 injectiebuizen	3.3	2 injectiebuizen
8	5	2.8 W	2.8 M	2.8 O
16	-		3.4	
22	6,5	2.22 W	2.22 M	2.22 O
28 (herplaatst)	-		3.5	
33	7,5	2.33 W	2.33 M	2.33 O
38	-		3.6	

Codering nieuwe buizen:
- M = midden; W = west; O = oost;
- 2.8 W = raaideel 2, op 8 m van het injectiepunt, ten Westen van raai 3

Hiervoor is uitgegaan van de volgende twee overwegingen:
1 als de stromingsrichting sterk afwijkt van de verwachte stromingsrichting worden de eerste buizen mogelijk toch aangesneden door het tracerfront;
2 door dispersie en diffusie zal de concentratie van de traceroplossing afnemen bij toenemende afstand tot het injectiepunt, waardoor de concentratie mogelijk te laag wordt om te detecteren.

In raaideel 1 zijn extra bemonsteringsbuizen geplaatst in bemonsteringsraaien op 8, 15 en 30 m (bij buis 3.2) van het injectiepunt. Uitgaande van een stroomsnelheid (filtersnelheid) van 0,55 $m.d^{-1}$ worden deze bemonsteringsraaien na respectievelijk 15, 27 en 55 dagen door het bromidefront bereikt. De afstand tussen de buitenste buizen van elke bemonsteringsraai is bepaald op grond van de geschatte breedte van het bromidefront na de reistijd van het injectiepunt tot die raai (zie tabel 20.2).

In raaideel 2 zijn extra bemonsteringsbuizen geplaatst in bemonsteringsraaien op 8 m (midden tussen 3.3 en 3.4), 22 m (midden tussen 3.4 en 3.5) en 33 m (midden tussen 3.5 en 3.6) van het injectiepunt bij buis 3.3. Uitgaande van de geschatte stroomsnelheid voor de verschillende trajecten (zie tabel 20.1) worden deze raaien na respectievelijk 19, 44 en 55 dagen door het bromidefront bereikt. Ook hier is de afstand tussen de buitenste buizen van elke bemonsteringsraai bepaald uit de geschatte breedte van het bromidefront bij het bereiken van die raai (zie tabel 20.3).

Tabel 20.4 Diepte van de onderkant van het filter van de nieuw geplaatste bemonsteringsbuizen in raai 3 (voor codering en positie van de buizen in de tabel, zie tabel 20.2 en 20.3)

Raaideel 1

Afstand tot injectiepunt 1 (m)	Onderkant filter (m - mv.)				
0	0,80	0,60	0,60	1,40	1,20
8	0,95		1,00		0,65
15	0,85		1,14		1,17
30	0,95		-		0,95

Raaideel 2

Afstand tot injectiepunt 2 (m)	Onderkant filter (m - mv.)				
0	1,15	1,15	-	1,05	0,85
8	1,00		1,00		0,90
14			-		
22	0,95		0,65		0,80
28 (herplaatst)			0,75		
33	1,07		1,05		1,25
45			-		

Voor de injectiebuizen en de bemonsteringsbuizen zijn buizen gebruikt met een filterlengte van 0,5 m en een diameter van 0,025 m. Bij de plaatsing van de extra buizen zijn in raaideel 2 alle filters tot op de tertiaire laag gezet. In raaideel 1 werd de diepte van het filter meestal bepaald door de aanwezigheid van een 'keienvloertje'. Tabel 20.4 geeft voor de nieuw geplaatste buizen de diepte van de onderkant van het filter.

Na afloop van het experiment is op 27 januari 1995 in een detailmeting de positie ingemeten van de nieuw geplaatste buizen en van de bestaande buizen van raai 3, en tevens van enkele buizen van raai 2 en raai 4. Daarnaast zijn de hoogten en de grondwaterstanden in deze buizen gemeten, en is op een aantal punten de maaiveldhoogte gemeten (zie fig. 20.2). De afstanden tussen de bestaande buizen zoals ingeschat in het veld bleken niet (helemaal) te kloppen met de resultaten van de detailmeting (zie ook tabel 20.1). Op basis van de ingemeten topografie bestaat de indruk dat de stroming ter plaatse van buis 3.1 niet loodrecht op de Mosbeek is, maar meer dwars op raai 3 in de stroomrichting van de beek. Dit is mogelijk tevens een verklaring voor de geringe gradiënt in het freatisch vlak tussen buis 3.1 en buis 3.2.

Injectie en monstername

Het eigenlijke experiment is uitgevoerd in de periode van 4 november 1994 tot en met 4 januari 1995 (lengte van deze periode: 61 dagen). De injectie van de geconcentreerde traceroplossing in het grondwater is uitgevoerd op 4 november 1994. Als tracer is bromide gebruikt. De beschikbare hoeveelheid KBr bedroeg 20 kg. Er is geïnjecteerd over een breedte van 4 m. Om rond de vijf injectiebuizen (onderlinge afstand 1 m) cirkels te vormen die elkaar raken, was per injectiepunt een hoeveelheid KBr-oplossing nodig van:
5 buizen * 0,5 m (filterlengte) * π * 0,5 m * 0,5 m (straal) * 0,3 (poros.) = 590 liter.
Met de hiervoor beschikbare hoeveelheid KBr van 10 kg, zou dit een concentratie geven van 11,3 $g.l^{-1}$ Br. Deze hoeveelheid is te groot om aan te maken en om te injecteren. Bovendien is de Br-concentratie te laag. Toch was het van belang om de breedte van 4 m te handhaven, omdat anders het gevaar bestond dat het bromidefront te smal was en zodoende niet was te detecteren in de bemonsteringsbuizen.

Er is getracht om een concentratie van circa 1 $mol.l^{-1}$ (80 $g.l^{-1}$ Br) te creëeren in het veld. Voor het eerste injectiepunt is circa 10 kg KBr opgelost in 70 l leidingwater. Tijdens de injectie bleek dat het water maar moeizaam in de buizen wegzakte, zodat de injectie een langdurige geschiedenis werd. Voor het tweede injectiepunt is daarom een kleinere hoeveelheid KBr-oplossing aangemaakt. Hiervoor is de beschikbare hoeveelheid KBr van circa 10 kg opgelost in 50 l water uit de Mosbeek. Van beide aangemaakte KBr-oplossingen is ter controle een monster genomen. Bij injectiepunt 1 is per buis 14 l KBr-oplossing toegediend; bij injectiepunt 2 was dat 10 l per buis. Bij een filterlengte van 0,5 m levert dit 5 bromide-kernen op met een straal van 0,17 respectievelijk 0,15 m, althans als er geen directe menging met het bodemwater cq. dispersie optreedt. Tijdens het injecteren is de indruk ontstaan dat de oplossing bij injectiepunt 2 gemakkelijker infiltreerde dan bij injectiepunt 1.

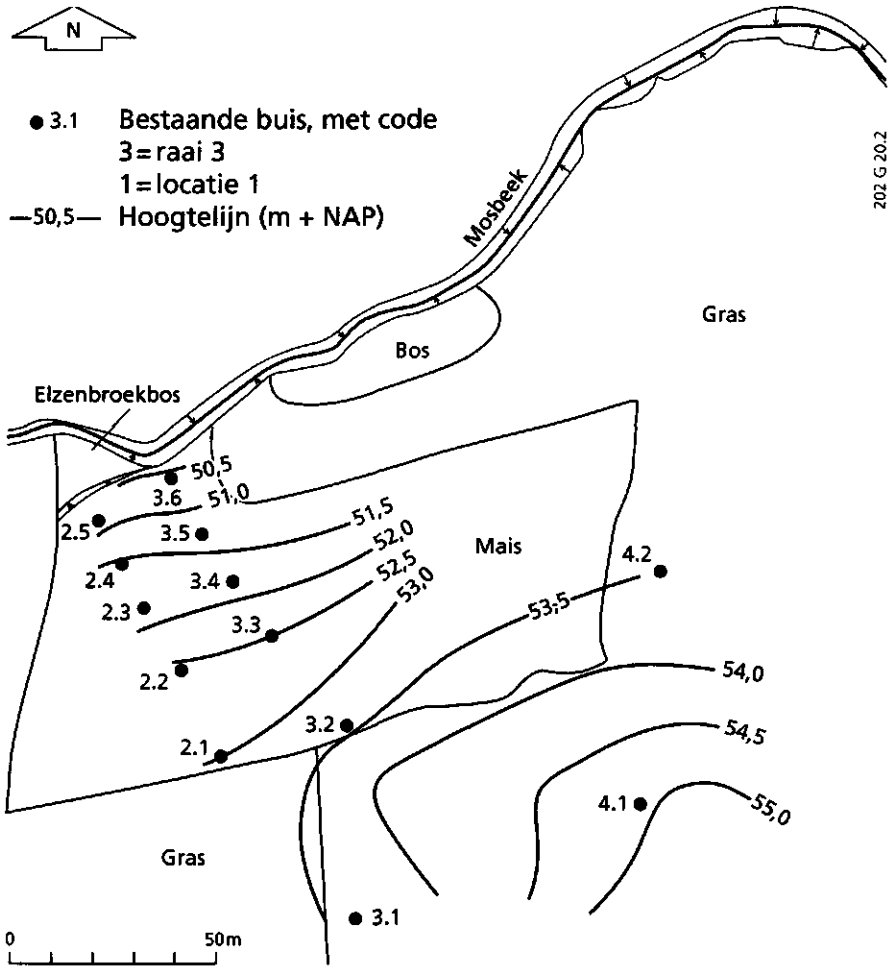


Fig. 20.2 Locatie van de bestaande buizen van raai 3 en van een gedeelte van raai 2 en 4, en globale hoogtelijnenkaart van de omgeving van raai 3

De bemonstering is uitgevoerd in de periode van 14 november 1994 tot en met 4 januari 1995. Er zijn zes bemonsteringsronden geweest. De tijd tussen de monsternamen bedroeg aanvankelijk 10 dagen en nam vervolgens toe tot maximaal 16 dagen tussen twee opeenvolgende bemonsteringsronden. De zes bemonsteringen hebben op de volgende data plaatsgevonden:

Bemonstering	Datum			Aantal dagen na injectie
1e	14	november	1994	10
2e	24	november	1994	20
3e	6	december	1994	32
4e	19	december	1994	45
5e	4	januari	1995	61
6e (alleen 1.8 O, 3.4 en 2.22 O)	27	januari	1995	84

Bij de monstername is steeds de volgende procedure toegepast. De monstername is begonnen benedenstrooms in de buizen nabij de Mosbeek. Vervolgens is

stroomopwaarts gewerkt in de richting van het injectiepunt. Na elke monstername is de slang van het monstername-apparaat doorgespoeld met leidingwater. Hiervoor is steeds water uit dezelfde emmer gebruikt, dat in een 0,5 l fles is gegoten van waaruit de slang is doorgespoeld. Hierdoor kon de emmer niet als bron van besmetting dienen. Verder is de uitvoerders van het veldwerk gevraagd om bij het peilen van de waterstand van de buizen van raai 3, telkens het peilklokje schoon te spoelen om onderlinge 'besmetting' tussen de buizen te voorkomen.

20.1.2 Resultaten en discussie

20.1.2.1 Grondwaterstand

In figuur 20.3 is het verloop van het grondwatervlak voor 27 januari 1995 weergegeven. De grondwaterstand was op die datum relatief hoog.

Raaideel 1
Tussen buis 3.1 en buis 3.2 wijkt het stromingsbeeld af van het algemene globale beeld van stroming in de richting van raai 3. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door de topografie van het gebied (zie fig. 20.2) en het reliëf van de bovenkant van het nagenoeg ondoorlatende tertiaire pakket. Als gevolg hiervan buigen de stroomlijnen vanuit injectiepunt 1 af in westelijke richting (zie fig. 20.4 voor de ligging van injectiepunt 1). Op basis van het isohypsenpatroon is de afbuiging niet zodanig dat de bemonsteringsbuizen op 8 m vanaf het injectiepunt en buis 1.15 W buiten de stroombanen vanuit het injectiepunt vallen. In deze buizen kan naar verwachting bromide dat in injectiepunt 1 is geïnjecteerd, worden getraceerd. Voor de buizen 1.15 M en 1.15 O en de buizen op 30 m afstand mag wel worden verwacht dat ze buiten de stroombanen vanuit injectiepunt 1 vallen. Hier kan mogelijk in injectiepunt 1 geïnjecteerde bromide niet worden getraceerd.

Raaideel 2
Het isohypsenbeeld geeft aan dat vanaf buis 3.2 de stroming globaal in de richting van raai 3 plaatsvindt. Op basis van het isohypsenpatroon staan de buizen 3.2 tot en met 3.4 precies in de stromingsrichting. Vanaf buis 3.4 neemt de gradiënt iets toe en wijkt het stromingsbeeld enigszins af: de stroombanen vanuit 3.4 liggen ten oosten van raai 3. Dit is mogelijk het gevolg van de topografie van het maaiveld (zie fig. 20.2) en van de topografie van de bovenkant van de zeer slecht doorlatende tertiaire afzettingen, die in grote lijnen hetzelfde patroon volgen. Op basis van het isohypsenpatroon kan naar verwachting bromide dat in injectiepunt 2 is geïnjecteerd, worden getraceerd in alle bemonsteringsbuizen behalve 2.22 W, 2.33 M en W, en 3.6 (zie fig. 20.4 voor de ligging van injectiepunt 2 en de bemonsteringsbuizen).

Volgens mondelinge mededeling van de eigenaar van de percelen komen in dit gebied van de Mosbeek kleibanken voor die stagnerend werken op de waterafvoer naar de beek in de richting van de helling, waardoor het water mogelijk een andere weg naar

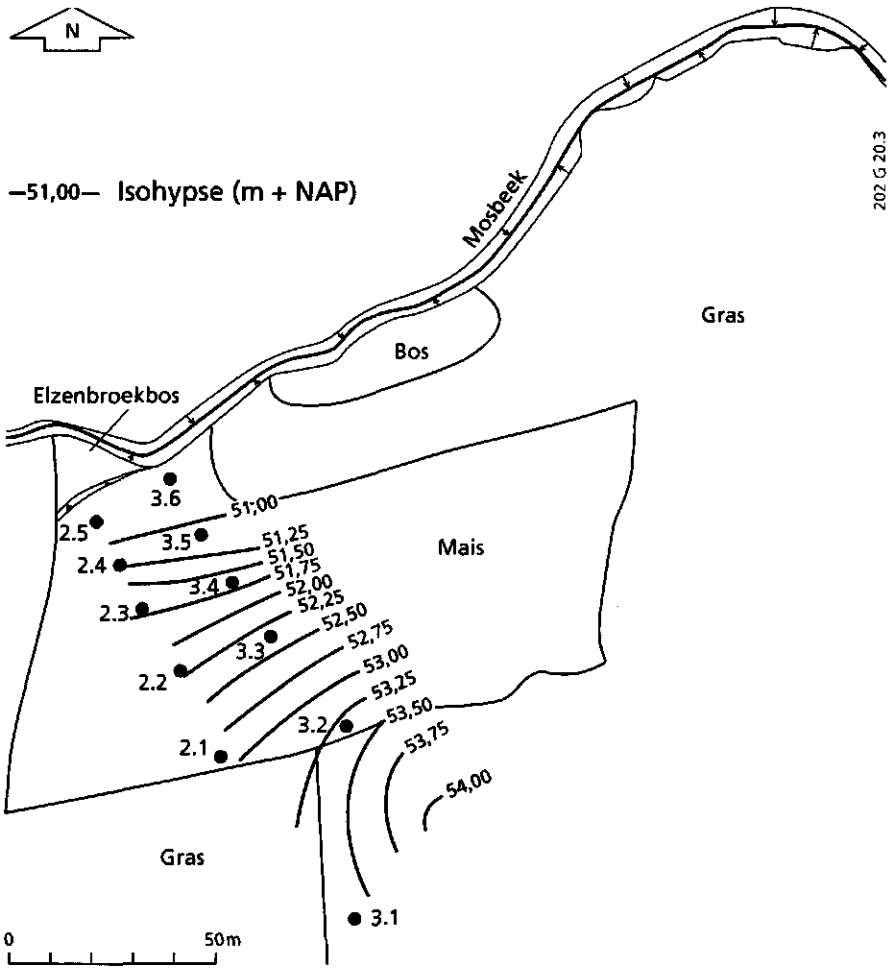


Fig. 20.3 Globaal isohypsenpatroon van het grondwatervlak in raai 3 op 27 januari 1995

de beek moet volgen. Op basis van het isohypsenbeeld zijn niet direct stagnatiezones af te leiden. Het is niet bekend waar deze kleibanken zich precies bevinden en of ze ook in het onderzochte maïsperceel voorkomen.

20.1.2.2 Bromideconcentraties

De gemeten bromideconcentraties zijn gegeven in tabel 20.5. Figuur 20.4 geeft een temporeel en ruimtelijk beeld van deze concentraties.

Raaideel 1

In raaideel 1 is slecht op één datum en in één buis een concentratie hoger dan 0 gemeten. Het betreft buis 1.8 O, de meest oostelijk gelegen buis op 8 m afstand van

Tabel 20.5 Bromideconcentraties (mg.l^{-1}) in de meetpunten van raaideel 1 en 2 van het tracer-experiment in raai 3

Raaideel 1 (Br-concentratie in injectiewater dd. 4-11-'94: 92,7 g.l^{-1})

Meetpunt	Datum					
	14-11-1994	24-11-1994	6-12-1994	19-12-1994	4-1-1995	27-1-1995
1.8 O	0,0	0,0	10,13	0,0	0,0	0,0
1.8 M	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
1.8 W	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
1.15 O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
1.15 M	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
1.15 W	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
1.30 O	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
3.2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
1.30 W	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB

Raaideel 2 (Br-concentratie in injectiewater dd. 4-11-'94: 119,3 g.l^{-1})

Meetpunt	Datum					
	14-11-1994	24-11-1994	6-12-1994	19-12-1994	4-1-1995	27-1-'95
3.3 (inj.)	NB	2,94	0,95	0,29	0,0	NB
2.8 O	0,12	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
2.8 M	0,09	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
2.8 W	0,53	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
3.4	0,0	1,27	11,58	9,39	6,90	13,80
2.22 O	4,19	10,31	22,15	47,50	30,43	0,99
2.22 M	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
2.22 W	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
3.5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
2.33 O	0,0	0,13	0,0	0,0	0,0	NB
2.33 M	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
2.33 W	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB
3.6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NB

NB = niet bepaald
Op 27 januari 1995 zijn van eveneens monsters genomen van het water uit drie van de vijf injectiebuizen ter plaatse van injectiepunt 1. De gevonden bromideconcentraties in de meest westelijke, de middelste en de meest oostelijke buis bedragen resp. 48,52; 807,60 en 51,63 mg.l^{-1}.

het injectiepunt, met een concentratie van 10,13 mg.l^{-1} op 6 december 1994 (32 dagen na injectie).

Dat in buis 1.8 O bromide wordt aangetroffen, is op basis van het isohypsenbeeld verklaarbaar (zie 20.1.2.1). Op basis van dit isohypsenbeeld zou echter ook bromide worden verwacht in de andere buizen op 8 m afstand (1.8 M en 1.8 W) en in de meest westelijke buis op 15 m afstand (1.15 W). Dit is echter niet gevonden.

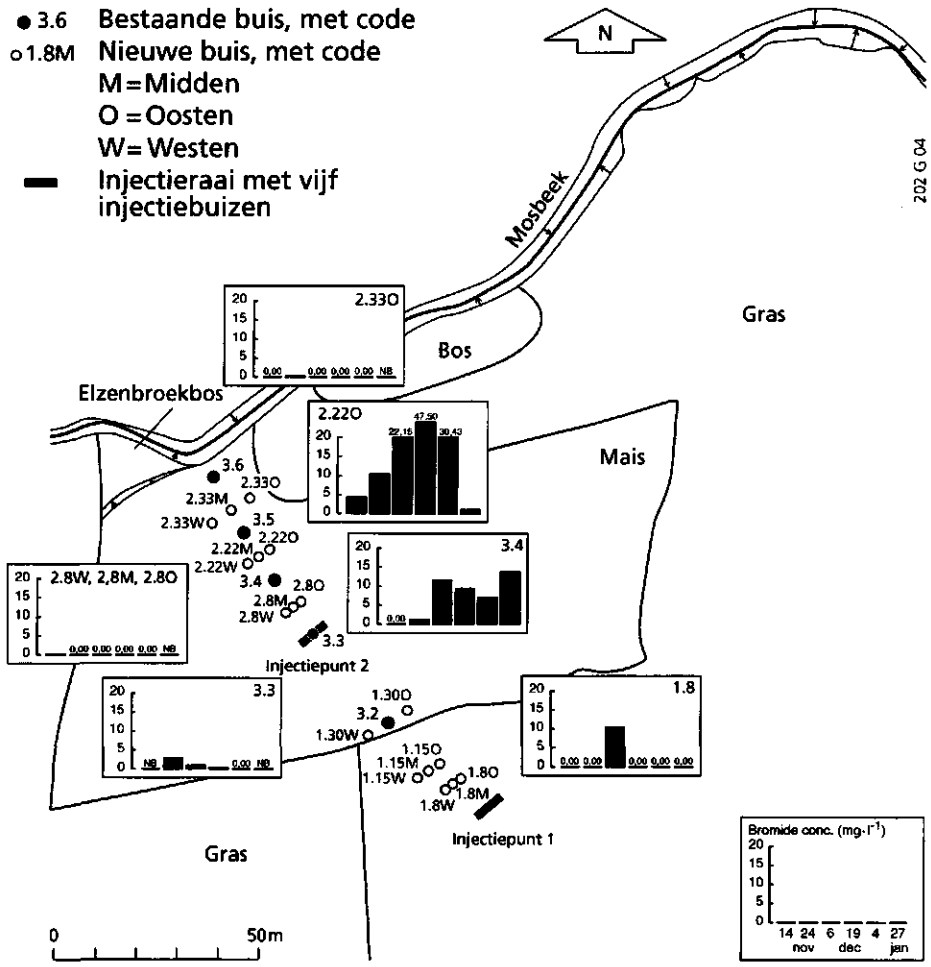


Fig. 20.4 Locatie van de nieuwe en de bestaande buizen voor injectie en bemonstering, en bromideconcentraties in de ruimte en de tijd van het tracerexperiment in raai 3
NB = niet bepaald

Waarschijnlijke oorzaak hiervan is dat preferente laterale stroming door goeddoorlatende lagen een rol speelt. Uit de boorbeschrijvingen van raai 3 blijkt dat in de meeste boringen een laag matig grof zand wordt aangetroffen met een geschatte doorlaatfactor van 2 à 3 $m.d^{-1}$ (zie aanhangsel 3). Deze laag ligt meestal direct op de tertiaire afzettingen die nagenoeg ondoorlatend zijn. Boven de laag liggen fijnere afzettingen met een veel lagere geschatte verzadigde doorlatendheid van 0,3-0,8 $m.d^{-1}$.

Ter plaatse van buis 3.1 komt deze laag met hoge doorlatendheid voor op een diepte van 0,65 tot 0,95 m - mv., ter plaatse van buis 3.2 op een diepte van 1,0-1,4 m - mv. Het was vaak niet mogelijk de filters van de nieuwe buizen in raaideel 1 dieper dan 0,6 à 0,9 m - mv. te plaatsen, vanwege de aanwezigheid van een grofzandige grindhoudende laag ('keienvloertje') (zie tabel 20.4). Voor een groot deel van de nieuw geplaatste buizen in raaideel 1 kan dit betekenen dat de filters mogelijk boven de goed doorlatende laag stonden, uitgaande van de bodemopbouw ter plaatse van buizen 3.1 en 3.2. Dit kan verklaren waarom in de buizen 1.8 W en 1.15 W geen bromide is getraceerd, terwijl dat op basis van het isohypsenpatroon wel werd verwacht.

Het filter van buis 1.8 M stond wel in de goed doorlatende laag. In deze buis is echter geen bromide gevonden. Het filter van buis 1.8 O stond mogelijk boven of maar net in de goeddoorlatende laag. In deze buis is wel bromide getraceerd. Dit betekent dat de aanwezigheid van de goeddoorlatende laag en de positie van de filters in of boven deze laag niet volledig de gemeten bromideconcentratie kunnen verklaren. Het tracertransport verloopt waarschijnlijk via een grillig patroon van preferente laterale stroombanen.

Een andere verklaring voor de gevonden bromideconcentraties, die samenhangt met de eerste, is dat als gevolg van de stroming via preferente stroombanen de bromide uit de vijf injectiebuizen geen gesloten front heeft gevormd en tussen de filters van de bemonsteringsbuizen is doorgestroomd.

Raaideel 2

In raaideel 2 is in slechts twee bemonsteringsbuizen, namelijk 3.4 en 2.22 O, en in de injectiebuis 3.3 bromide in relatief hoge concentraties aangetroffen. In figuur 20.5 is voor deze drie buizen het verloop in de tijd van de bromideconcentratie uitgezet. Verder zijn zeer geringe concentraties bromide aangetroffen in de buizen op 8 m afstand van het injectiepunt tijdens de eerste bemonsteringsronde, 10 dagen na injectie, en in buis 2.33 O tijdens de tweede bemonsteringsronde, 20 dagen na injectie. In de overige buizen is geen bromide gevonden.

Dat in de buizen 2.22 W, 2.33 M en W, en 3.6 geen bromide is aangetroffen, komt overeen met de verwachting op grond van het isohypsenpatroon (zie 20.1.2.1). Dit geldt niet voor het ontbreken van bromide in de buizen 2.22 M en 3.5 en voor het slechts eenmaal in zeer lage concentraties traceren van bromide in de buizen 2.8 en 2.33 O. De verklaring voor deze discrepantie moet waarschijnlijk worden gezocht in het optreden van preferente laterale stroming via lagen met hoge doorlatendheid. De laag matig grof zand met hoge doorlatendheid is bij de boringen ter plekke van de buizen 3.3, 3.5 en 3.6 aangetroffen tussen 0,6 en 0,9 m - mv. (zie aanhangsel 3). Bij buis 3.4 ontbreekt deze laag en beginnen de nagenoeg ondoorlatende tertiaire afzettingen op de geringe diepte van 0,6 m - mv.

Uit het combineren van de informatie over het voorkomen en de diepte van de laag met hoge doorlatendheid met de informatie over de filterstelling van de buizen in raaideel 2 (zie tabel 20.4), volgt dat het grootste deel van de buizen met hun filter tot in de laag met hoge doorlatendheid reikten. Voor buis 3.4 geldt dit duidelijk niet, hier ontbreekt de goeddoorlatende laag. Voor de buizen in de nabijheid van buis 3.4, de buizen 2.8 en 2.22 is dit onduidelijk. Dit kan de verklaring zijn voor het niet of nauwelijks traceren van bromide in een aantal van deze buizen.

Net als in raaideel 1 kan de positie van de filters in relatie tot de aanwezigheid van de goeddoorlatende laag de bromideconcentraties in raaideel 2 niet volledig verklaren. Duidelijk voorbeeld hiervan is buis 3.4, waarin wel duidelijke concentraties bromide zijn aangetroffen, maar waarvan het filter niet in de goeddoorlatende laag stond. Ook voor raaideel 2 moet worden geconcludeerd dat het tracertransport waarschijnlijk via een grillig patroon van preferente laterale stroombanen verloopt.

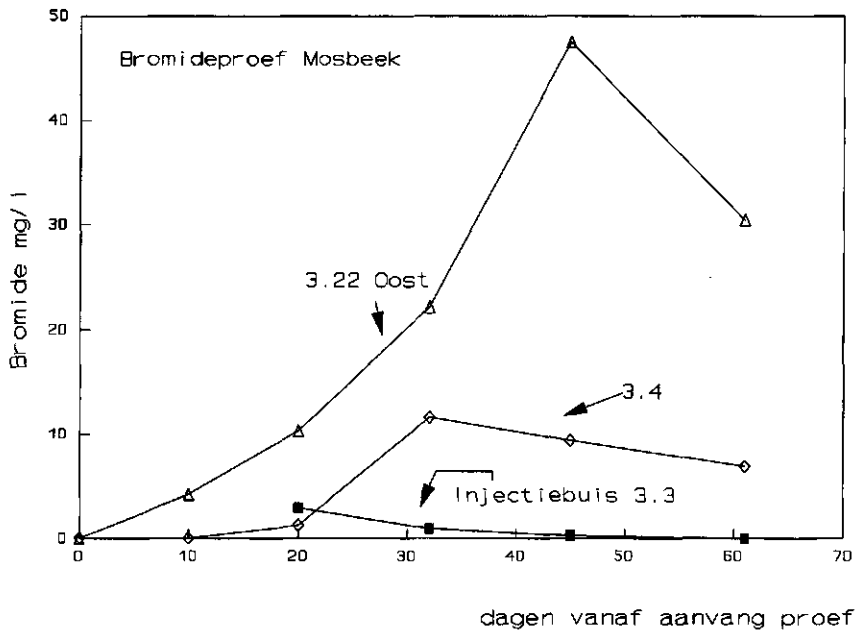


Fig. 20.5 Bromideconcentratie in de tijd voor 3 buizen in raaideel 2 van raai 3 (dag 0 = 4 november 1994; 3.22 Oost = 2.22 O)

Aanwijzing hiervoor is ook het gegeven dat in buis 3.4 consequent lagere Br-concentraties zijn gemeten dan in de verder stroomafwaarts gelegen buis 2.22 O (zie fig. 20.5). Blijkbaar is het water met de hoge Br-concentraties dat in buis 2.22 O is getraceerd niet via buis 3.4 gestroomd.

Een schatting van de stroomsnelheid (filtersnelheid) kan worden verkregen uit het concentratieverloop in de tijd van buis 2.22 O (fig. 20.5). De aankomsttijd van de piek in de concentratie is een redelijke maat voor de gemiddelde reistijd. De piek moet tussen 32 en 61 dagen, en waarschijnlijk rond 45 dagen na aanvang van het experiment zijn gearriveerd ter plekke van buis 2.22 O. Hieruit volgt dat de gemid-delde stroomsnelheid (v) voor het 22 m lange traject van injectiepunt 2 tot buis 2.22 O circa 0,5 $m.d^{-1}$ bedraagt met een minimum van 0,35 en een maximum van 0,7 $m.d^{-1}$. Uitgaande van een gemiddelde gradiënt (i) van 0,03 $m.m^{-1}$ (zie tabel 20.1) en een porositeit (n) van 30% geeft dit een doorlatendheid (k) van circa 5 $m.d^{-1}$ met een mi-nimum van 3,5 en een maximum van 7 $m.d^{-1}$ ($k = v * n / i$). Deze gemiddelde door-latendheid komt goed overeen met de globale schatting op basis van de waterbalans.

De gemiddelde stroomsnelheid van 0,5 $m.d^{-1}$ en de gemiddelde doorlatendheid van 5 $m.d^{-1}$ zijn hoog. Gezien de opbouw van het profiel en de geschatte, relatief lage doorlatendheden van de profiellagen duiden deze hoge waarden op snel preferent transport via stroombanen met een relatief zeer hoge doorlatendheid.

De vorm van de curves van figuur 20.5 geeft aan dat dispersie en diffusie een grote rol spelen bij het tracertransport door de bodem. Binnen 10 dagen bereikt de eerste bromide buis 2.22 O, terwijl de bulk van de geïnjecteerde bromide pas circa 35 dagen

later, rond dag 45 bij deze buis arriveert. Hierna duurt het nog circa 40 dagen voordat alle bromide buis 2.22 O is gepasseerd. De betekenis van deze brede basis van de bromidepiek is dat een spreiding in de verblijftijd van water en stoffen optreedt. De belangrijkste oorzaak hiervan is de dispersie die optreedt doordat verschillende lagen met verschillende doorlatendheid als transportbaan fungeren. Daarnaast zijn dispersie en diffusie binnen elke afzonderlijke transportbaan oorzaak van dit verschijnsel.

20.1.3 Conclusies

De stromingsrichting van het grondwater is in raai 3 tussen de buizen 2 en 6 globaal in de richting van de raai. Lokaal kunnen echter afwijkingen van de hoofdrichting bestaan. Vanaf buis 3.4 is de stroming iets ten oosten van raai 3 gericht.

Tussen de buizen 3.1 en 3.2 wijken de isohypsen af van het meer regionale beeld. De stroming is hier meer in westelijke richting.

Er vindt sneltransport plaats via lagen met een hoge doorlatendheid die als preferente stroombanen fungeren.

De gemiddelde stroomsnelheid van het water in het watervoerende profiel is geschat op circa 0,5 $m.d^{-1}$. De bijbehorende gemiddelde verzadigde doorlatendheid bedraagt ongeveer 5 $m.d^{-1}$

Doordat verschillende lagen met een verschillende doorlatendheid als transportbaan fungeren, treedt spreiding in de verblijftijd van water en stoffen op.

Dispersie en diffusie spelen een belangrijke rol bij het transport door de bodem.

Voor de berekeningen met het model ANIMO is op basis van het tracerexperiment te concluderen dat de stroming naar de beek complex verloopt. Er zijn sterke aanwijzingen dat voor een belangrijk deel preferent transport plaatsvindt via lagen met een hoge doorlatendheid. Bij de interpretatie van de modeluitkomsten moet hiermee rekening worden gehouden.

20.2 Tracerexperiment in de bufferstrook

Voor het hydrologisch onderzoek van het perceelsonderzoek Mosbeek is een tweede tracerexperiment uitgevoerd. Dit experiment had specifiek betrekking op de bestaande bufferstrook in de vorm van een laaggelegen, 14 m brede, natte strook met bomen (elzenbroekbos) langs de beek (zie fig. 2 in de hoofdtekst).

Het doel van dit tracerexperiment was na te gaan of water met daarin opgeloste stoffen bij uitspoeling naar de Mosbeek ter hoogte van raai 2 de bufferstrook doorstroomt of daar onderdoor of langs stroomt. Als het uitstromende water niet door

deze strook stroomt, fungeert deze niet als buffer voor uitspoelende nutriënten. Een nevendoel van het experiment was het verkrijgen van een indruk van de stroomsnelheid van het door of onder de bufferstrook stromende water.

Eerst wordt de opzet van het experiment behandeld (20.2.1). Daarna worden de resultaten gegeven en besproken (20.2.2). Ten slotte worden enkele conclusies getrokken (20.2.3).

20.2.1 Opzet van het experiment

Aanvullende bodemkartering en inrichting van het meetnet
Voor de vraag of naar de Mosbeek uitstromend water de bufferstrook doorstroomt of er onderdoor stroomt, is het belangrijk te weten of de zeer slecht doorlatende tertiaire afzettingen op niet te grote diepte onder de bufferstrook voorkomen. Door de zeer lage doorlatendheid en de helling fungeert deze tertiaire laag als vlak waarover het water afstroomt richting beek. Als deze laag onder de bufferstrook ontbreekt of op grote diepte voorkomt, bestaat de kans dat uitstromend water richting beek onder de bufferstrook door stroomt.

Bij de eerder uitgevoerde bodemkartering zijn de tertiaire afzettingen in nagenoeg alle boorpunten in de vier uitgezette raaien aangetroffen op een diepte tussen 1 en 1,5 m. Deze afzettingen zijn echter niet aangeboord in de bufferstrook, onderaan het aangrenzende onderzoeksperceel en in de steilrand die beide scheidt (punten 5 t/m 8 van raai 2, zie fig. 2 hoofdtekst). Dit gaf geen uitsluitsel over het voorkomen van de tertiaire afzettingen, want meestal was hier niet dieper dan 1,8 m geboord.

Om zekerheid te verkrijgen over het voorkomen van de tertiaire afzettingen, is eerst een aanvullende kartering uitgevoerd. Doel hiervan was in de eerste plaats het traceren van het verloop van de bovenkant van de tertiaire laag in de bufferstrook en rond de steilrand. Daarnaast kon deze kartering aanvullende informatie geven over het voorkomen van grove lagen die mogelijk als preferente stroombanen fungeren.

De bodemkartering is uitgevoerd op 10 maart 1995 (boorpunten O6, O8 en W8 op 13 maart 1995). De boringen zijn gezet naast de bestaande buizen 5 tot en met 8 van raai 2, bovenaan en onderaan de steilrand, en op enkele punten aan weerszijde van de raai op circa 5 m afstand van de raai (fig. 20.6) Op deze wijze is een goede indruk verkregen van het verloop van de tertiaire afzettingen onder de bufferstrook rond raai 2. De codering van de boorpunten is gerelateerd aan de codering van de bestaande buizen. Hierbij staat M voor Midden in raai 2 direct naast de bestaande buis (behalve bij 5), en O voor ten Oosten en W voor ten Westen van raai 2 ter hoogte van de bestaande buis (behalve bij 5). In de boorgaten zijn buizen (diameter 0,025 m) met een filter van 0,5 m geplaatst om grondwater te bemonsteren en de grondwaterstand te meten. De filters staken circa 0,2 m in de aangeboorde tertiaire afzettingen. De positie van de buizen, en de hoogte van de bovenkant van de buizen en het maaiveld ter plekke zijn ingemeten.

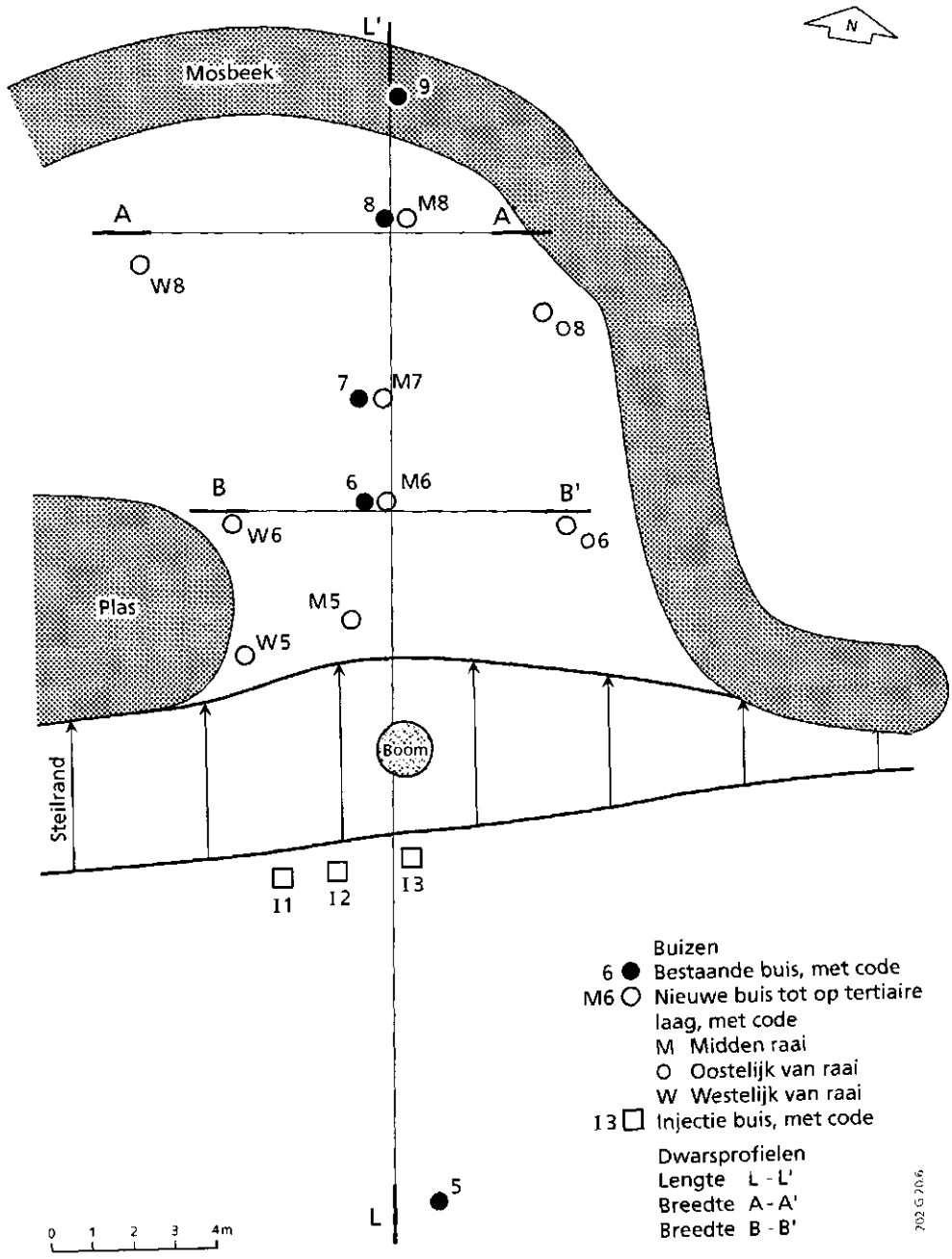


Fig. 20.6 Locatie van het tracerexperiment in de bufferstrook

Injectie en monstername

Voor het injecteren van de traceroplossing zijn vijf gaten geboord tot op de tertiaire laag. De injectiebuizen bevonden zich boven aan de steilrand in een 3 m lange raai loodrecht op raai 2; het midden van deze injectieraai lag in het verlengde van de buizen 6 tot en met 8 van raai 2 (zie fig. 20.6). Zo is een initieel tracerfront van ruim 3 m breedte verkregen. In de twee buitenste gaten en het middelste gat zijn peilbuizen geplaatst om grondwater te bemonsteren en de grondwaterstand te meten.

Als tracer is bromide gebruikt. Op 10 maart 1995 is in elk van de vijf injectiebuizen 12 l KBr-oplossing gegoten met een concentratie van 440 $g.l^{-1}$ Br. Omdat de oplossing slechts langzaam in de gaten wegzakte, werden de gaten steeds volledig gevuld. Hierdoor infiltreerde de Br-oplossing niet alleen in het grondwater, maar ook over de gehele diepte van de gaten in de onverzadigde zone.

Bij het plannen van de vijf begrote bemonsteringsronden is in eerste instantie uitgegaan van de bevinding uit het eerste tracerexperiment dat preferente stroming een belangrijke rol speelt op de onderzoekspercelen (zie 20.1). Daarom is besloten de eerste bemonsteringsronde enkele dagen na het tijdstip van injectie te laten plaatsvinden om zeer snelle stroming door de sterk hellende steilrand te kunnen traceren in buis M5. Het tijdsinterval tussen de tweede en derde bemonstering is steeds iets vergroot, omdat werd verwacht dat de stroming in de vlakke bufferstrook langzamer verloopt. De tijdstippen voor de vierde en vijfde bemonstering zijn bepaald op basis van de resultaten van de eerste drie bemonsteringen.

De vijf bemonsteringen hebben op de volgende data plaatsgevonden:

Bemonstering	Datum	Aantal dagen na injectie
1e	13 maart	3
2e	17 maart	7
3e	24 maart	14
4e	31 maart	21
5e	7 april	28

Op deze data zijn alle in figuur 20.6 aangegeven buizen (behalve 5) en het water van de plas aan de voet van de steilrand nabij buis W5 bemonsterd. Tevens is in alle buizen de grondwaterstand gemeten.

20.2.2 Resultaten en discussie

20.2.2.1 Tertiaire afzettingen

In alle boorpunten is de tertiaire afzetting aangeboord. De diepte bevindt zich tussen 1,4 en 3,15 m - mv. en wisselt per locatie (tabel 20.6). In het westen van het bemonsterde gebied is het tertiair niet als klei maar als sterk glauconiethoudend, zeer fijn zand aanwezig (punten I1, W5, W8). De doorlatendheid hiervan is even gering als die van de tertiaire klei, vanwege de sterk versmerende eigenschappen van het glauconiet (pers. med. Groot-Obbink).

In figuur 20.7 zijn dwarsdoorsneden langs een lengteraai en langs twee breedteraaien gegeven (zie fig. 20.6). De helling van de tertiaire laag onder de steilrand is geringer dan die van het maaiveld (dwarsdoorsnede L-L'). Gevolg hiervan is dat de dikte van het bovenliggende pakket dat kan worden doorstroomd door water, het geringst is aan de voet van de steilrand (bij buis M5). Vanaf buis M5 duikt de tertiaire laag relatief steil naar beneden. De grootste diepte is gevonden bij buis 7. Bij buis 8 is

Tabel 20.6 Hoogte maaiveld, diepte bovenkant tertiaire laag en grondwaterstanden van het tracer-experiment in de bufferstrook

Meetpunt	Maaiveld	Diepte Tertiaire laag		Grondwaterstand per datum (m + NAP)				
	(m + NAP)	(m + NAP)	(m - mv.)	13-3	17-3	24-3	31-3	7-4
5	51,28	49,68	1,60	50,49	50,57	50,44	50,82	50,49
I1	50,99	49,59*	1,40	-	-	-	-	-
I2	50,98	49,18	1,80	49,98	50,03	50,00	50,20	49,98
I3	50,96	49,56	1,40	-	-	-	-	-
M5	49,79	48,64	1,15	49,36	49,38	49,31	49,44	49,35
W5	49,40	48,50*	0,90	49,30	49,30	49,25	49,36	49,30
6	49,46	-	-	49,20	49,14	49,06	49,19	49,09
M6	49,46	46,96	2,50	49,15	49,06	48,98	49,11	49,01
O6	49,47	46,32	3,15	-	49,00	48,92	49,05	48,95
W6	49,45	47,25	2,20	49,34	49,35	49,28	49,40	49,33
7	49,51	-	-	49,14	49,02	48,97	49,06	48,99
M7	49,51	46,41	3,10	49,13	49,02	48,97	49,08	48,99
8	49,35	-	-	49,13	48,94	48,87	48,99	48,88
M8	49,35	47,50	1,85	49,13	48,93	48,87	48,99	48,88
O8	49,29	46,74	2,55	-	48,80	48,79	48,88	48,77
W8	49,82	46,87*	2,95	-	49,16	49,05	49,22	49,07
9	n.v.t.	-	-	-	-	48,87	48,99	48,87
Beekpeil	n.v.t.	-	-	-	-	48,76	48,87	48,76

- = geen waarneming
* tertiair aanwezig als sterk glauconiethoudend, zeer fijn zand

de diepte 1 m kleiner dan bij buis 7. De bovenkant van de tertiaire laag heeft hierdoor de vorm van een stroomgeul. Deze geul lijkt ter hoogte van buis 6 naar het oosten te hellen (dwarsdoorsnede B-B') en ter hoogte van buis 8 naar het westen (dwarsdoorsnede A-A'). Bij buis 8 lijkt een bult in de tertiaire laag aanwezig te zijn.

Door het verloop van de tertiaire laag in de lengterichting van raai 2 heeft de slecht doorlatende onderrand van het doorstroomde pakket in de bufferstrook een soort komvorm. Deze 'kom' is gevuld met afwisselende lagen fijner en grover zand, waarvan de meeste zeer humeus en sommige humusrijk, en dunne venige laagjes en zelfs laagjes met nauwelijks verteerde takjes en boombladeren. De bovenste 0,1 m van het profiel bestaat uit zandig veen tot veen. Het maaiveld van deze 'kom' vertoont een lichte helling in noord-noord-oostelijke richting en vertoont aan de westelijke kant wat onregelmatigheden in de vorm van een depressie aan de voet van de steilrand (plas) en een bult aan de oever van de beek (fig. 20.8). Door de vorm en geringe diepte van de ondoorlatende onderrand is water dat door de steilrand uitstroomt richting beek gedwongen door de bufferstrook te stromen. Door de helling in oostelijke richting aan de bovenstroomse kant van de 'kom' is het mogelijk dat de stroming van water preferent in noordoostelijke richting zal plaatsvinden. Omdat het bodemmateriaal in de bufferstrook plaatselijk vrij veel organische stof bevat, heeft het naar verwachting een (vrij) groot vermogen voor denitrificatie van nitraat.

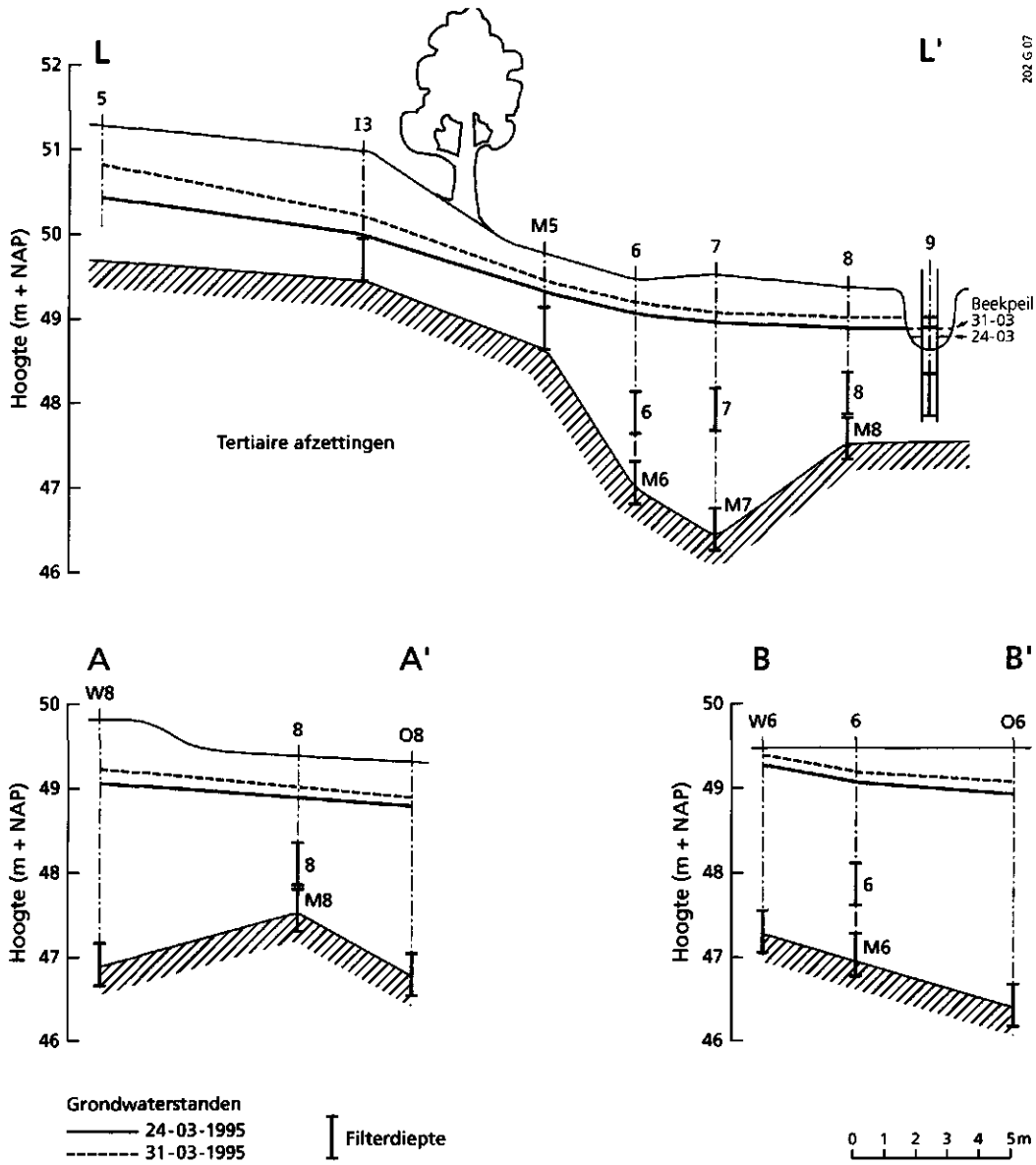


Fig. 20.7 Dwarsprofielen langs de raaien L-L', A-A' en B-B'

20.2.2.2 Grondwaterstand

De grondwaterstanden voor de vijf data zijn gegeven in tabel 20.6. De laagste grondwaterstanden zijn gemeten op 24 maart, de hoogste op 31 maart na een periode met circa 40 mm neerslag (zie ook fig. 20.12). Voor deze twee uitersten zijn globale isohypsenbeelden van het grondwatervlak gemaakt (fig. 20.9 en 20.10). Uit deze beelden en ook uit de dwarsdoorsneden van figuur 20.7 blijkt dat het water in de bufferstrook in noordoostelijke richting stroomt. Een verklaring hiervoor is in de eerste plaats de loop van de beek. De beekbedding bevindt zich ten oosten en ten

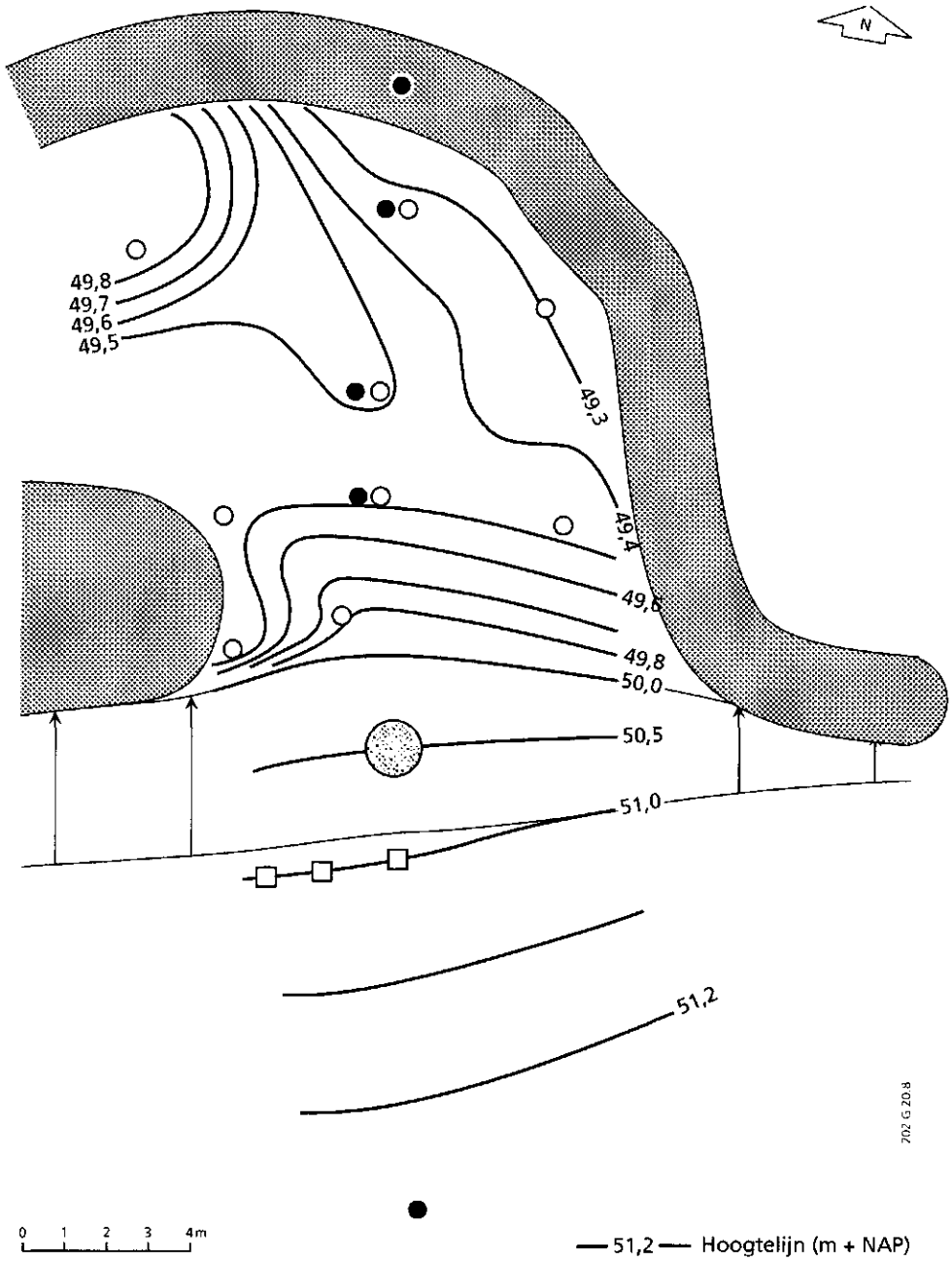


Fig. 20.8 Globale hoogtelijnenkaart van de bufferstrook

noorden van raai 2. Door de drainerende werking van de beek volgt het isohypsenpatroon de vorm van de beekloop. Een andere verklaring kan de onder 20.2.2.1 genoemde helling in oostelijke richting van de ondoorlatende onderrand zijn.

Stel dat het isohypsenpatroon van de bufferstrook mag worden geëxtrapoleerd naar het zuidwestelijke deel van de bufferstrook. De stijghoogte van het grondwater aan de voet van de steilrand ten westen van buis W5 is dan hoger dan het maaiveld: er

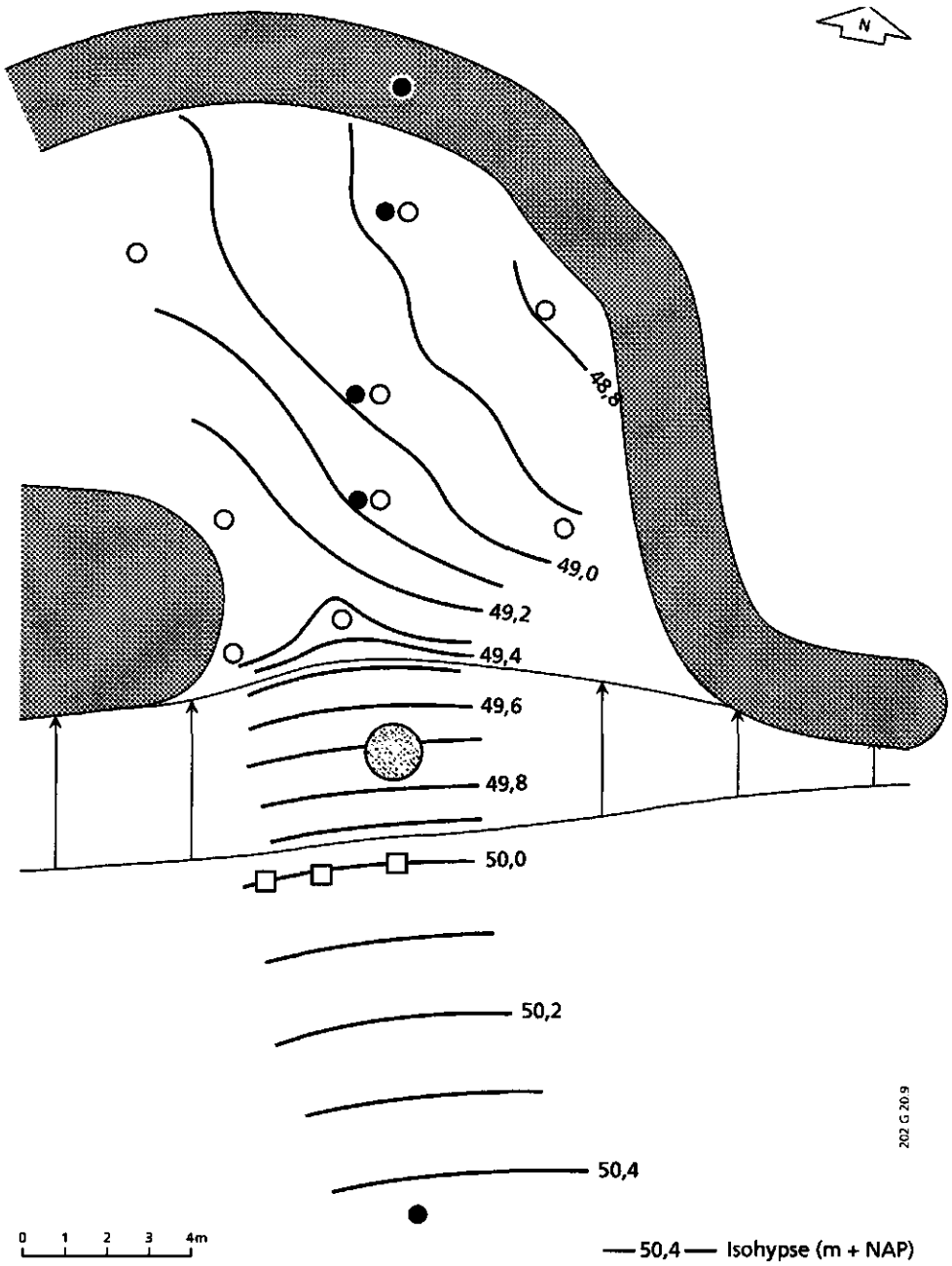


Fig. 20.9 Globaal isohypsenpatroon van het grondwatervlak in de bufferstrook, 'droge periode' 24-3-1995

treedt kwel op. Dit is waarschijnlijk een verklaring voor het bestaan van de plas op deze plek. Het water van deze plas is dus waarschijnlijk kwelwater.

De gradiënt in het grondwatervlak is het grootst in de steilrand en het geringst in de bufferstrook. Hierdoor en omdat de dikte van het doorstroomde pakket bij de steilrand 2 tot 4 keer zo klein is als bij de bufferstrook, is de stroomsnelheid door de steilrand veel groter dan door de bufferstrook. Uit het verschil tussen beekpeil

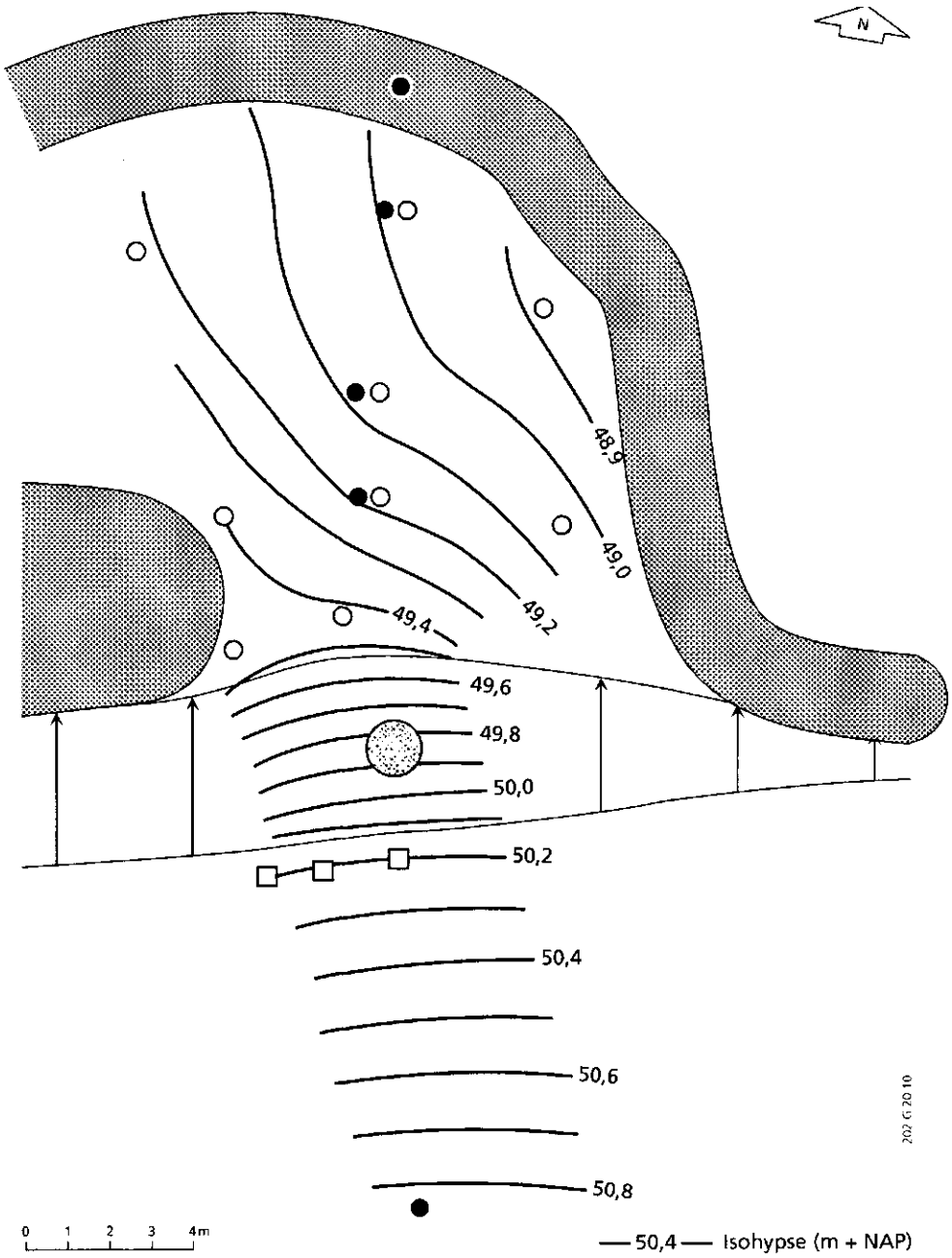


Fig. 20.10 Globaal isohypsenpatroon van het grondwatervlak in de bufferstrook, 'natte periode' 31-3-1995

en stijghoogte van het grondwater onder de beekbedding van ruim 0,1 m blijkt dat de beek een (sterk) drainerende werking heeft.

Conclusie uit de informatie over het grondwaterstandsverloop in de ruimte en de tijd is dat het grondwater uit het onderzoeksperceel ter hoogte van raai 2 via de steilrand door de bufferstrook naar de Mosbeek stroomt. Deze stroming is in de bufferstrook niet volledig in de richting van raai 2, maar buigt af in noordoostelijke richting.

20.2.2.3 Bromideconcentraties

De gemeten bromideconcentraties zijn gegeven in tabel 20.7. Een temporeel en ruimtelijk beeld van de concentraties vormt figuur 20.11.

In alle buizen is bromide gevonden, zij het soms in zeer geringe concentraties. Ook in buis 9 onder de beekbedding is op 24 maart een duidelijke hoeveelheid bromide aanwezig. Hiermee is aangetoond dat water dat bovenaan de steilrand tot uitstroming komt door de bufferstrook naar de beek stroomt. In de plas zijn op 13 en 31 maart sporen bromide gevonden die de voorzichtige conclusie ondersteunen dat het water in de plas kwelwater is. Door de relatief grote hoeveelheid water in de plas zijn deze concentraties sterk verdund.

In het oosten zijn vaker en hogere bromideconcentraties gemeten dan in het westen. Dit bevestigt het stromingsbeeld dat uit de isohypsen volgt (zie 20.2.2.2). Dat ondanks dit noordoostelijke stromingspatroon toch sporen bromide in de westelijke buizen zijn gevonden, moet worden verklaard uit het optreden van dispersie waardoor een uitwaaierend, pluimvormig bromidefront ontstaat. Hierbij kan preferente laterale stroming door het grillige patroon van lagen met een relatief grote doorlatendheid een rol hebben gespeeld (zie ook 20.1).

Tabel 20.7 Bromideconcentraties ($mg.l^{-1}$) in de meetpunten van het tracerexperiment in de bufferstrook

Meetpunt	Datum				
	13-3-1995	17-3-1995	24-3-1995	31-3-1995	7-4-1995
I1	41,19	95,99	204,35	37,84	17,20
I2	26,92	112,01	213,35	33,91	9,63
I3	d	96,45	d	162,90	d
M5	1,95	0,56	31,16	259,80	203,20
W5	0,75	2,15	1,00	0,17	0,00
6	0,03	0,00	7,02	0,00	0,00
M6	18,06	7,97	3,92	0,61	0,22
O6	GB	8,62	1,10	0,33	5,77
W6	1,45	0,95	0,31	0,00	0,00
7	0,00	0,00	7,78	0,00	0,00
M7	5,58	0,00	5,10	1,17	1,35
8	0,06	0,20	10,52	0,00	0,18
M8	0,08	0,00	2,44	0,09	0,00
O8	GB	11,98	3,35	0,00	0,28
W8	GB	3,60	0,00	0,20	0,15
9	0,00	0,01	14,52	0,20	0,00
Plas	0,20	0,00	0,01	0,11	0,00

d = droog; GB = nog geen buis aanwezig

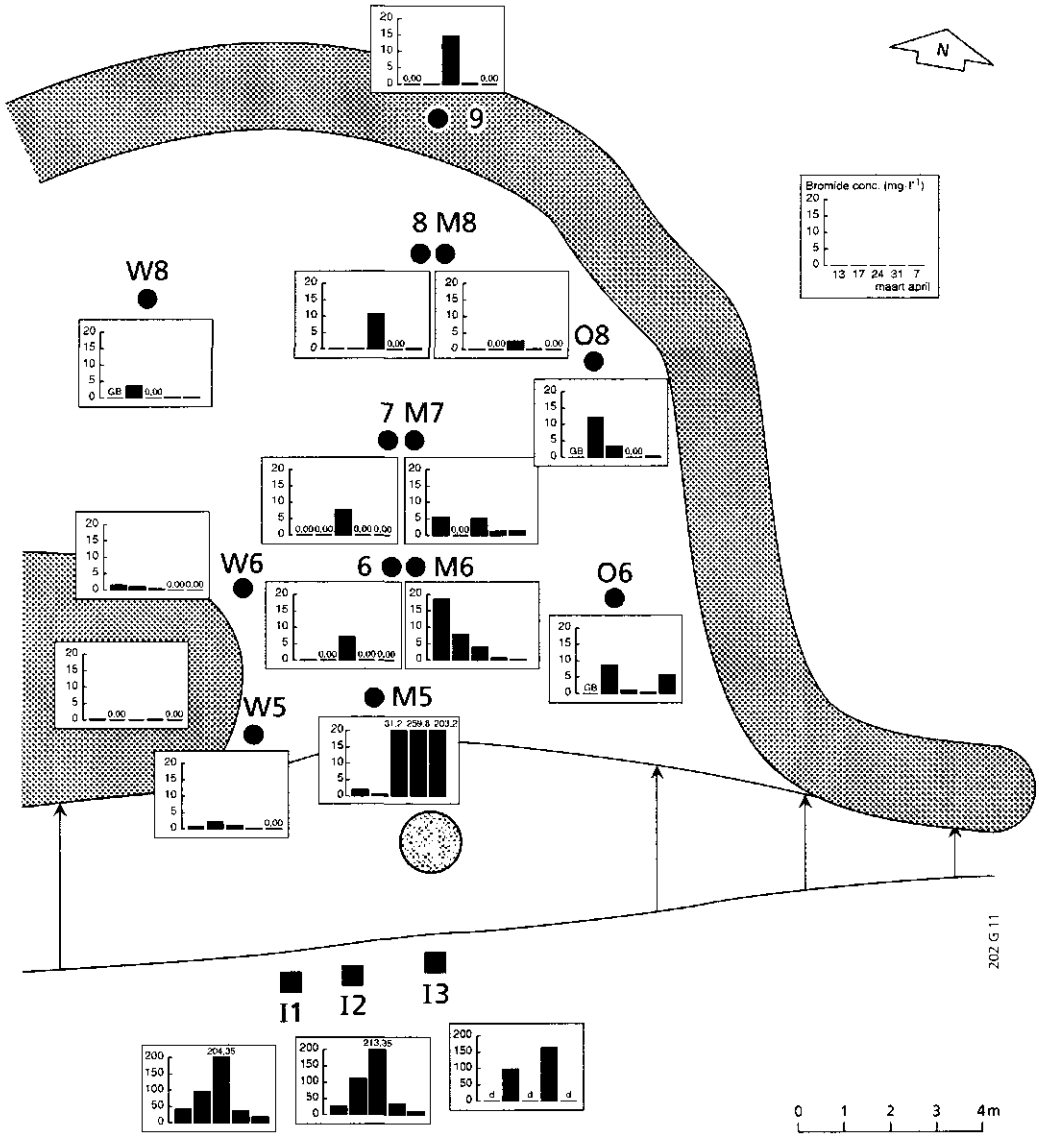


Fig. 20.11 Bromideconcentraties in de ruimte en in de tijd van het tracerexperiment in de bufferstrook
d = buis stond droog; GB = nog geen buis aanwezig

Voor het midden en het oosten geldt in het algemeen dat naarmate een bemonsteringspunt in de bufferstrook verder verwijderd is van het injectiepunt er minder vaak bromide wordt gevonden en dat de concentraties lager zijn. Een verklaring hiervoor is de verdunning die optreedt door dispersie en menging met de relatief grote hoeveelheid water in de 'kom' van de bufferstrook.

Uit het verloop in de tijd van de concentraties in de injectiebuizen en de buizen M5, M6 en M7 kan worden afgeleid dat de bromide in drie golven uitspoelt: een korte, hevige puls direct na toediening, een lange, geleidelijke tussen 13 en 24 maart en een minder lange, vrij hevige tussen 25 en 31 maart. De korte puls is het gevolg van het uitspoelen van bromide die tijdens injectie direct in het grondwater kwam. Het gaat hier waarschijnlijk om zeer hoge concentraties, aangezien het injectiewater 440.000 $mg.l^{-1}$ Br bevatte. Aanwijzing voor het optreden van deze puls is dat op 13 maart in de buizen M6 en M7 bromide in veel hogere concentraties is gevonden dan in buis M5. Blijkbaar is de puls op die datum buis M5 al gepasseerd. Mogelijk vindt deze stroming plaats via wat diepere beter doorlatende lagen, want de filters van M6 en M7 staan relatief diep.

De tweede en derde golf zijn het gevolg van het uitspoelen van de bromide die tijdens injectie in de onverzadigde zone is terechtgekomen (zie 20.2.2). Zij hangen samen met het optreden van neerslag. De tweede golf begint op 13 maart. Na drie dagen van droogte begint het die dag te regenen; tot 20 maart valt circa 26 mm neerslag (fig. 20.12). De concentraties in de injectiebuizen nemen daardoor geleidelijk toe (fig. 20.13). Op 24 maart resulteert dit in een concentratie van 31 $mg.l^{-1}$ in buis M5.

De derde golf begint op 25 maart als het na vijf dagen van droogte weer begint te regenen. In zeven dagen tijd valt 40 mm. De hoogste piek in de concentratie in de injectiebuizen is waarschijnlijk ergens tussen 25 maart en 31 maart opgetreden. Op 31 maart is de bromide in deze buizen nagenoeg volledig uitgespoeld gezien de relatief geringe concentraties op 31 maart en 7 april. Deze derde uitspoelingsgolf leidt tot relatief hoge concentraties in buis M5 op 31 maart en 7 april.

De concentraties op 24 maart die zijn gemeten in de buizen 6 tot en met 9 moeten hoogstwaarschijnlijk worden toegeschreven aan de eerste, hevige uitspoelingsgolf. Alleen tijdens die uitspoeling zijn concentraties uitgespoeld die voldoende hoog waren om ook in deze buizen getraceerd te kunnen worden. Het eerste spoor van bromide in de plas hangt waarschijnlijk ook met deze golf samen, het tweede waarschijnlijk met de derde golf.

Van de tweede en derde uitspoelingsgolf zijn stroomafwaarts van buis M5 alleen sporen gevonden in de diepere filters M6, O6, M7 en O8. Het piekje in O6 op 7 april duidt waarschijnlijk op de derde golf. Waarschijnlijk waren de concentraties van rond de 250 $mg.l^{-1}$ ter plekke van buis M5 te laag om duidelijk te kunnen worden getraceerd in de andere buizen. Oorzaak hiervan is de grote verdunning die optreedt bij transport langs raai 2 richting beek. Mogelijk speelt ook transport via diepere preferente lagen een rol.

De verkregen resultaten zijn niet allemaal volledig en in detail te verklaren. Oorzaak hiervan is dat slechts vijf momentane metingen in de tijd zijn uitgevoerd. Het is duidelijk dat pieken en belangrijke concentratie-verlopen zijn gemist. Voor een meer gedetailleerde analyse is het noodzakelijk op meerdere punten het bromideverloop continu of met zeer kleine tijdsintervallen te registreren. Dit was, en is meestal, praktisch en financieel niet haalbaar. Uitspraken over het stromingspatroon door de bufferstrook blijven daarom voornamelijk kwalitatief.

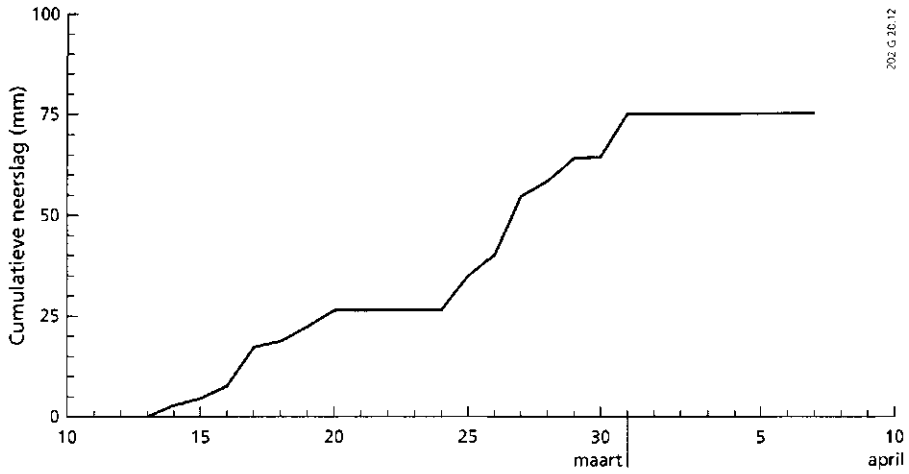


Fig. 20.12 Cumulatieve neerslag op de ondrzoekslocatie in de periode 13 maart tot en met 7 april 1995

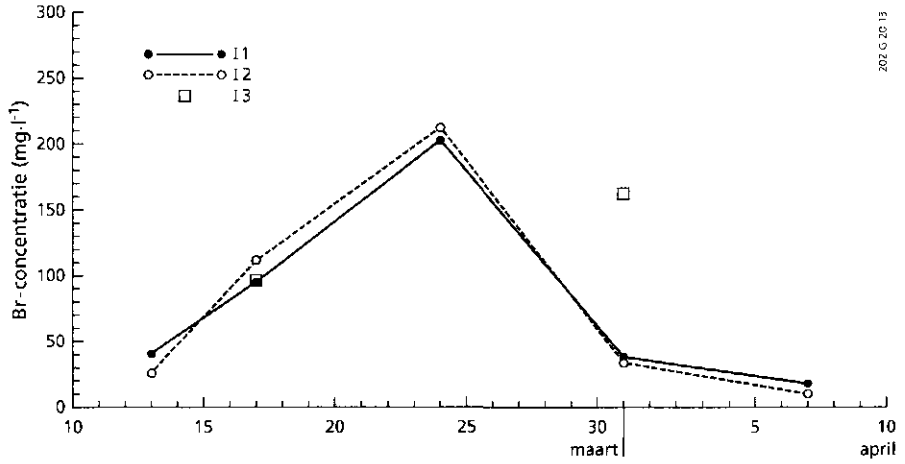


Fig. 20.13 Verloop in de tijd van de bromideconcentratie in de injectiebuizen boven de bufferstrook, in de periode 13 maart tot en met 7 april 1995

Toch valt een schatting te maken van de gemiddelde stroomsnelheid (filtersnelheid) van het water dat langs raai 2 naar de beek stroomt. De piek van de eerste uitspoelingsgolf moet buis M5 hebben bereikt ruim binnen drie dagen. Stel de minimale reistijd op 1 dag en de maximale op 2,5 dag dan is de gemiddelde stroomsnelheid door de steilrand maximaal 6 en minimaal 2,4 $m.d^{-1}$. De gemiddelde stroomsnelheid door de bufferstrook van M5 naar de beek (buis 9) is geschat uit de metingen op 24 maart in de buizen 6 tot en met 9. Op deze datum neemt de concentratie in deze buizen toe richting beek (fig. 20.14). Hieruit kan worden geconcludeerd dat de piek de buizen 6 tot en met 8 al heeft gepasseerd. De piek moet rond 24 maart buis 9 hebben bereikt, maar niet op 17 en 31 maart. Stel dat de piek op z'n vroegst op 20 maart en op z'n laatst op 28 maart is gearriveerd dan wordt, met inachtneming van de minimale en maximale reistijd door de steilrand, een gemid-

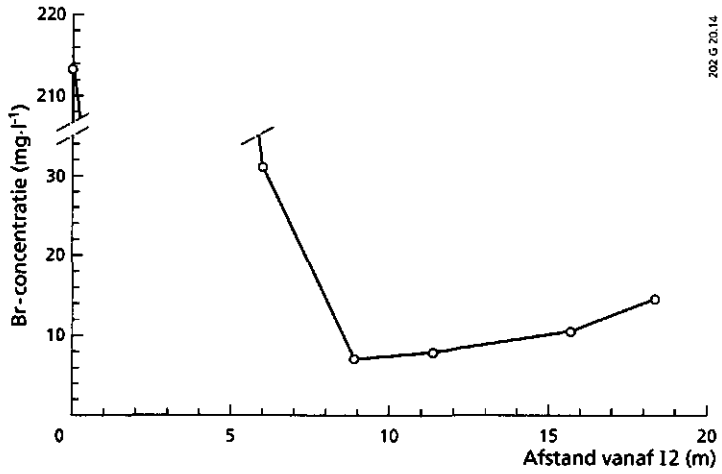


Fig. 20.14 Verloop van de bromideconcentratie langs het deel van raai 2 vanaf injectiebuis I2, op 24 maart 1995

delde stroomsnelheid over het traject tussen de buizen M5 en 9 verkregen van maximaal 1,9 en minimaal 0,8 $m.d^{-1}$.

20.2.4 Conclusies

Water met daarin opgeloste stoffen dat bovenaan de steilrand ter hoogte van raai 2 tot uitstroming komt, stroomt door de bufferstrook naar de Mosbeek. Dit is op drie wijzen aangetoond:

1 uit het overal onder de bufferstrook voorkomen van nagenoeg ondoorlatende tertiaire afzettingen op niet te grote diepte (gemiddeld 2 m - mv., maximaal 3 m - mv.);
2 uit isohypsenbeelden;
3 door het traceren van een conservatieve stof (bromide).

De stromingsrichting van het water door de bufferstrook is niet evenwijdig aan raai 2, maar noordoostelijk. Oorzaak hiervan is vooral de loop van de beek die ten noorden en oosten van de raai stroomt.

Preferente laterale stroming speelt waarschijnlijk een rol in de bufferstrook.

De gemiddelde stroomsnelheid van het water door de steilrand wordt geschat op 2,4 tot 6 $m.d^{-1}$, die door de bufferstrook in de langsrichting van raai 2 op 0,8 tot 1,9 $m.d^{-1}$.

Voor een meer gedetailleerde tracering van de stroming van water en stoffen door een gebied als het proefgebied is het nodig traceerconcentraties op verschillende punten continu te registreren.