Relatie tussen oppervlakte- en grondwater in de provincie Drenthe

NH 3 k 27, 134

Relatie tussen oppervlakte- en grondwater in de provincie Drenthe

K.E. Wit
H.Th.L. Massop
J.G. te Beest

Rapport 134

DLO-Staring Centrum, Wageningen, 1991

4 DEC. 1991

+ 8 bij.

REFERAAT

Wit, K.E., H. Th.L. Massop, J.G. te Beest, 1991. *Relatie tussen oppervlakte- en grondwater in de provincie Drenthe*. Wageningen, DLO-Staring Centrum. Rapport 134. 99 blz.; 42 fig.; 26 tab.; 2 aanh.; 7 bijl.

Voor het waterhuishoudingsplan van de provincie Drenthe zijn twee aspecten van de relatie tussen oppervlakte- en grondwater onderzocht:
- onderbouwing van de theoretische waarden voor de voedings- en/of drainageweerstand;
- modelonderzoek met het accent op de kwantitatieve en kwalitatieve analyse van de processen bij infiltratie vanuit en drainage naar waterlopen.

Bij de keuze van de 19 proefgebieden voor veldonderzoek zijn relevante gebiedskenmerken betrokken, zoals voedingstype, geomorfologie en waterhuishouding om representatieve gebieden voor de provincie Drenthe te verkrijgen. Voor 9 proefgebieden zijn de vorming en het gedrag van het infiltratielichaam onder slootbodem als gevolg van infiltratie en drainage gesimuleerd, terwijl voor alle proefgebieden voedings- en drainageweerstanden zijn bepaald met de formules van Ernst en Bruggeman. Voor het grootste deel van de provincie, met uitzondering van de Veenkoloniën, zijn de voedingsweerstanden dermate hoog dat slechts een geringe infiltratie plaatsvindt.

Trefwoorden: voedingstype, voedingsweerstand, drainageweerstand, gebiedskenmerken, Bruggeman, Ernst, infiltratielichaam, Drenthe

ISSN 0924-3070

©1991 DLO-Staring Centrum Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC-DLO)
Postbus 125, 6700 AC Wageningen
Tel.: 08370-74200; telefax: 08370-24812; telex: 75230 VISI-NL

Het DLO-Staring Centrum is een voortzetting van: het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), het Instituut voor Onderzoek van Bestrijdingsmiddelen, afd. Milieu (IOB), de Afd. Landschapsbouw van het Rijksinstituut voor Onderzoek in de Bos- en Landschapsbouw "De Dorschkamp" (LB), en de Stichting voor Bodemkartering (STIBOKA).

Het 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.

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

Project 100.37 [118IS/09.91]

INHOUD

		blz.
WOORD VOORAF		9
SAMENVATTING		11
1	INLEIDING	15
2	VASTSTELLING AANTAL EN LIGGING PROEFGEBIEDEN	17
2.1	Gebiedskenmerken	17
2.2	Keuze proefgebieden	17
3	VOEDINGS- EN/OF DRAINAGEWEERSTANDEN	21
4	HYDROLOGISCHE PROCESSEN NABIJ WATERLOPEN	27
5	OPZET VELDONDERZOEK	29
6	BASISGEGEVENS UIT VELDONDERZOEK	31
6.1	Waterhuishoudkundige begrenzing	31
6.2	Debieten en peilen open water	31
6.2.1	Stuwen	31
6.2.2	Duikers	36
6.2.3	Controlebewerking debieten	39
6.3	Grondwaterstanden en stijghoogten	44
6.4	Eigenschappen waterlopen	46
6.5	Bodemweerstanden	47
6.5.1	Infiltratieproeven	48
6.5.2	Grondwaterstanden en afvoeren	49
6.6	Hydrologische bodemconstanten	51
6.6.1	Boringen	51
6.6.2	Pompproeven	52
6.6.3	Doorlatendheidsmetingen aan ongeroerde monsters	55
6.6.4	Stijghoogtegegevens	55
6.7	Kwalitatieve parameters grond- en oppervlaktewater	56
7	EFFECTEN VAN WATERAANVOER OP DE WATERKWALITEIT	63
7.1	Methode	63
7.2	Berekening van stroomlijnen en verblijftijden	72
7.3	Kwaliteitsaspecten	78
7.4	Conclusies	80
8	BEREKENING VAN VOEDINGS- EN/OF DRAINAGEWEERSTANDEN	83
8.1	Methode	83
8.2	Uitgevoerde berekeningen	85
8.2.1	Bepaling q(h)-relaties	85
8.2.2	Specifieke grondwaterafvoer en drukverschil	88

blz.

8.2.3 Bepaling van de voedingsweerstand 89
8.3 Conclusies 93

LITERATUUR 95

AANHANGSELS
1 Oppervlakte van de proefgebieden, gegevens over het waterlopen-patroon en het drainagesysteem 97
2 Basisgegevens voor STRELIN-berekeningen 99

FIGUREN
1 Onderscheiden voedingstypen (Technische Werkgroep Grondwaterplan 1985) 16
2 Hydrologische grootheden voor de berekening van de voedings- en drainageweerstand 21
3 Schematisering voor voedingstype C1 26
4 Vorming van een infiltratielichaam onder de waterloop 27
5 Indeling van de dwarsdoorsnede in compartimenten 28
6 Schematische voorstelling voor het meten van h_s en α 32
7 Overzicht van de gemeten afvoercoëfficiënten aan klepstuwen 35
8 Het verband tussen inlaatdebiet en drukverschil bij verschillende schuifopeningen voor proefgebied 't Haantje 37
9 Het verband tussen inlaatdebiet en peil bovenstrooms bij een constante schuifopening voor Uffelte 38
10 Vergelijking van de gemeten afvoer voor Noordsche Schut met de berekende afvoer op grond van een correlatie met de gemeten afvoer voor Geesbrug 39
11 Gemeten afvoeren voor de proefgebieden Beilen en Dalerveen 41
12 Gemeten afvoeren voor de proefgebieden Gieten en Gieterveen 42
13 De netto-afvoer voor de proefgebieden Beilen en Dalerveen 43
14 Gemeten stijghoogten (boring naast waterloop) en slootpeil voor het proefgebied Zwiggelte 45
15 Het verloop van de grondwaterstand en stijghoogte in een raai loodrecht op de waterloop voor Noordsche Schut 45
16 Het verloop van de grondwaterstand en stijghoogte in een raai loodrecht op de waterloop in twee tijdvakken voor proefgebied Eelde 46
17 Het verband tussen de grondwaterstandsdiepte en de factor γ 47
18 Schematische voorstelling van de infiltratieproef 48
19 Het gemiddeld verloop van de grondwaterstand in een raai loodrecht op een waterloop (proefgebied Noord-Sleen) 50
20 Schematische voorstelling van de opzet van pompproef Noordsche Schut 53
21 Afpompingskromme van de pompproef Geesbrug 53
22 EC-IR-diagram van Noordsche Schut 58
23 EC-IR-diagram van Dalerveen 58
24 Verandering in de EC-waarden (Geesbrug) 59
25 Verandering in de EC-waarden (Zwiggelte) 60
26 Verloop van de EC-waarde van het oppervlaktewater te Beilen (zomer 1989) 61
27 Verloop van de EC-waarde van het oppervlaktewater voor 't Haantje (zomer 1989) 61

blz.

28 Schematisering van de dwarsdoorsnede van het gebied Noordsche Schut 64
29 Hydrologische bodemconstanten per compartiment voor Noordsche Schut 65
30 Relaties tussen de stroming door de waterbodem en het drukverschil tussen slootpeil en de stijghoogte in het filter op 3 m - mv. in de boring (Noordsche Schut) 68
31 Relaties tussen de stroming door de waterbodem en het drukverschil tussen slootpeil en de stijghoogte in het filter op 3 m - mv. in de boring ('t Haantje) 69
32 Relaties tussen de stroming door de waterbodem en het drukverschil tussen slootpeil en de stijghoogte in het filter op 3 m - mv. in de boring (Dalerveen) 69
33 Het verband tussen het neerslagoverschot (cumulatief) en de netto-afvoer (cumulatief) voor het proefgebied Noordsche Schut 70
34 Gemeten en berekende stijghoogten en slootpeil in een dwarsdoorsnede voor proefgebied Zwiggelte 71
35 Verplaatsing van waterdeeltjes in het eerste tijdvak (Noordsche Schut) 72
36 Verplaatsing van waterdeeltjes in het tweede tijdvak (Noordsche Schut) 73
37 Het stromingsbeeld in een dwarsdoorsnede voor Noordsche Schut in het eerste tijdvak 73
38a Verschillende fasen van het infiltratielichaam onder de waterlopen voor Beilen en Noordsche Schut 76
38b Verschillende fasen van het infiltratielichaam onder de waterlopen voor Geesbrug en Uffelte 77
38c Verschillende fasen van het infiltratielichaam onder de waterlopen voor 't Haantje en Zwiggelte 77
39 Schematisatie van de q(h)-relatie door één of twee rechten 83
40 q(h)-relatie voor Anderen (oorspronkelijke meetreeks) 85
41 q(h)-relatie voor Anderen (aangevulde meetreeks) 86
42 Het verband tussen voedingsweerstanden uit het verrichte onderzoek en de waarden hiervoor uit het Grondwaterplan 93

TABELLEN

1 Gebiedskenmerken van de proefgebieden 18
2 Berekende grondwaterstanden, afvoeren en weerstanden 26
3 Overzicht ijkprogramma stuwen (april 1989) 33
4 Overzicht ijkprogramma stuwen (juni 1989) 34
5 Gemiddelde maandafvoeren van de proefgebieden 1 t/m 9 40
6 Gemiddelde maandafvoeren van de proefgebieden 10 t/m 19 40
7 Gemiddelde maandaanvoeren van de proefgebieden 1 t/m 9 42
8 Gemiddelde netto maandafvoeren van de proefgebieden 1 t/m 9 43
9 Gemiddelde netto maandafvoeren van de proefgebieden 10 t/m 19 44
10 Klasse-indeling waterlopen 46
11 Resultaten van metingen met cylinder 49
12 Bodemweerstanden en drukverschillen, afgeleid uit grondwaterstanden en afvoeren 50
13 Doorlaatvermogen van de aangeboorde lagen bij boring Geesbrug 52
14 Doorlaatvermogen en horizontale doorlatendheid uit pompproeven 54
15 Doorlaatfactoren van ongestoorde monsters 55

blz.

16 Verticale weerstand van de laag van 1,5 tot 3,0 m - mv., afgeleid uit drukverschillen over deze laag op 10 resp. 30 m uit de sloot (Geesbrug) 56
17 De flux naar de waterlopen voor het proefgebied Noordsche Schut, berekend uit afvoer en inlaat, factor γ, neerslagoverschot en de bergingsverandering 66
18 Berekende flux q_b en q_r voor het gebied Noordsche Schut 66
19 Berekende waarden voor kwel en wegzijging 71
20 Correlatie-coëfficiënten voor gemeten grondwaterstanden 86
21 Berekende kwel en wegzijging 87
22 Berekende drainageweerstanden volgens formule 8 en 10 89
23 Voedingstypen van de waterlopen uit veldonderzoek en volgens het Grondwaterplan 90
24 Verticale weerstanden en doorlaatfactoren 90
25 Drainageweerstanden berekend met formules van Bruggeman 91
26 Voedingsweerstanden volgens Ernst, Bruggeman en Grondwaterplan 92

BIJLAGEN
1 Overzicht kanalen en waterlopen
2 Gebiedsindeling naar eigenschappen waterlopen
3 Gebiedsindeling naar fysisch-geografische eigenschappen
4 Gebiedsindeling naar de aanvoermogelijkheid van water
5 Gebiedsindeling naar voedingstypen
6 Vlekkenkaart met combinaties van gebiedskenmerken
7 Locatiekaart geselecteerde gebiedjes

WOORD VOORAF

Voor begeleiding van het onderzoek naar de relatie tussen oppervlakte- en grondwater in de provincie Drenthe is een projectgroep geformeerd, samengesteld uit vertegenwoordigers van de Dienst Water en Milieuhygiëne (WAMIL) en de Dienst Ruimte en Groen (R en G) van de provincie Drenthe, het Zuiveringsschap Drenthe en het DLO-Staring Centrum.

Deze projectgroep bestond uit:

ing. H.F.M.J. van den Eerenbeemt	Dienst WAMIL
W.H. Hut	Dienst WAMIL
drs. A.M.J. van de Vijver	Dienst R en G
ir. D.M. Komen	Zuiveringsschap
ing. K.E. Wit	DLO-Staring Centrum
ing. H.Th.L. Massop	DLO-Staring Centrum
J.G. te Beest	DLO-Staring Centrum

Het veldwerk is gedeeltelijk uitgevoerd door medewerkers van de Dienst WAMIL, de heren T. Ottens en G. Vos, en gedeeltelijk door medewerkers van het DLO-Staring Centrum, de heren H. Breunissen, L. Honkoop, J.W. Jansen en M. Wijnsma van mei 1988 tot oktober 1989.

De analyse van de watermonsters is uitgevoerd door de laboratoria van de provincie Drenthe en het Zuiveringsschap Drenthe.

SAMENVATTING

In het kader van de Wet op de Waterhuishouding dient elke provincie een provinciaal waterhuishoudingsplan vast te stellen. In dit plan worden de hoofdlijnen voor de waterhuishouding in de provincie aangegeven. Een belangrijk onderdeel vormt het integraal waterbeheer, waarin de relatie tussen oppervlakte- en grondwater een belangrijk element vormt. Om de gevolgen van ingrepen in de waterhuishouding in kwantitatieve en kwalitatieve zin te kunnen aangeven, is kennis van deze relatie nodig. Deze kennis spitst zich toe op de hydrologische processen bij infiltratie vanuit en drainage naar waterlopen, en de voedings- en drainageweerstanden. Daarom heeft de Dienst Water en Milieu (WAMIL) van de provincie Drenthe aan het toenmalige Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding een onderzoeksopdracht verstrekt.

Deze opdracht beschreef twee aspecten nl:
- uitvoering van slootproeven om de theoretische waarden voor de voedings- en/of drainageweerstand te onderbouwen;
- modelonderzoek met het accent op de kwantitatieve en kwalitatieve analyse van de processen bij infiltratie vanuit en drainage naar waterlopen.

Het aantal en de ligging van de onderzoekslocaties dienden voor deze onderzoeksaspecten een representatief beeld op te leveren voor de provincie Drenthe.

Hoofdstuk 2 vermeldt de vaststelling van het aantal en de ligging van de proefgebieden. Bij de keuze zijn enkele, voor de onderzoeksaspecten, relevante gebiedskenmerken betrokken. Deze kenmerken betreffen de geomorfologie, waterhuishoudkundige situatie en de geohydrologische opbouw van de ondergrond. Op basis van beschikbaar kaartmateriaal is een vlekkenkaart geproduceerd met per vlek een combinatie van gebiedskenmerken. Binnen deze vlekken zijn vervolgens (beheersbare) gebieden geselecteerd. Dit heeft geleid tot 19 proefgebieden, waarvan in 9 gebieden wateraanvoer mogelijk is.

Hoofdstuk 3 behandelt de theoretische afleiding van de drainage- en voedingsweerstanden. In Drenthe wordt overwegend een situatie aangetroffen, waarbij het watervoerend pakket wordt afgedekt door fijnzandige sedimenten. Het waterlopenstelsel ligt in het afdekkend pakket. Binnen dit afdekkend pakket kan een weerstandbiedende laag voorkomen op verschillende diepte ten opzichte van de slootbodem. Voor de bepaling van deze weerstanden zijn zowel de oplossingen volgens Ernst als Bruggeman gegeven. Voor waterlopen die geheel of gedeeltelijk in de weerstandbiedende laag liggen, is de oplossing volgens Rolf gegeven.

In hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de hydrologische processen nabij waterlopen. In gebieden met mogelijke wateraanvoer kan zich in het zomerhalfjaar een infiltratielichaam vormen dat in het daaropvolgende winterhalfjaar door drainage geheel of gedeeltelijk verdwijnt. De mate waarin dit proces zich afspeelt, is afhankelijk van factoren als:
- verdampingsoverschot;
- bodemweerstand waterlopen;

- geohydrologische eigenschappen ondiepe ondergrond;
- kwel/wegzijging.

Voor de simulatie van de grondwaterstroming in de omgeving van de waterlopen is het model STRELIN gebruikt. Hiermee worden in een tweedimensionaal vlak loodrecht op de waterloop de vorming en het gedrag van het infiltratielichaam gesimuleerd. Hierbij is een profieldoorsnede beschouwd van 30 m aan weerszijden van de waterloop en een diepte van 18 m - mv.

Hoofdstuk 5 behandelt de opzet van het veldonderzoek. Hiermee is begonnen in mei 1988 voor de gebieden met de mogelijkheid voor wateraanvoer. Aanvankelijk zouden de metingen uitgevoerd worden in de zomer van 1988 en in de winter van 1988/1989. Als gevolg van de relatief natte zomer van 1988 zijn de metingen in de gebieden met wateraanvoer voortgezet tot eind oktober 1989. De uitgevoerde metingen hebben betrekking op debieten (aan- en afvoer), peilen open water, grondwaterstanden, stijghoogten en kwaliteitsparameters van het oppervlakte- en grondwater. Voor de overige gebieden zijn voor de bepaling van de drainage- en voedingsweerstand de debieten (afvoer), peilen open water en grondwaterstanden bepaald. Deze gegevens zijn verzameld in de periode december 1988 tot mei 1989. Daarnaast zijn incidentele metingen verricht naar de bodemweerstanden van waterlopen, en horizontale en verticale doorlatendheden tot circa 7 m - mv.

In hoofdstuk 6 wordt de verzameling van de basisgegevens uit het veldonderzoek behandeld. Hierbij is relatief veel aandacht besteed aan het meten van de afvoer van en de eventuele aanvoer naar de proefgebieden, met name de waterhuishoudkundige begrenzingen, de gebruikte meetmethoden en de uitgevoerde controlebewerkingen. Voor het meten van stijghoogten en grondwaterstanden zijn filters gesteld tot een diepte van 18 m - mv. en zijn landbouwbuizen geplaatst. In de winter van 1988/89 zijn de waterlopen geïnventariseerd, waarbij de breedte, bodemdiepte en waterdiepte is opgenomen. De bodemweerstand is in een beperkt aantal proefgebieden bepaald door infiltratieproeven uit te voeren. Verder zijn gegevens over de bodemweerstand verkregen uit het grondwaterstandsverloop nabij waterlopen en de daarbij behorende afvoer. Voor het vaststellen van de hydrologische bodemconstanten van de ondergrond tot een diepte van 18 m - mv. zijn meerdere methoden gebruikt. Hieruit is informatie verkregen over de geometrie en de horizontale en verticale doorlatendheden. Aan zowel het oppervlaktewater als aan het grondwater van de verschillende filters binnen de afvoergebieden zijn analyses verricht voor het vaststellen van de verschillende chemische parameters.

Hoofdstuk 7 gaat in op de effecten van de wateraanvoer op de grondwaterkwaliteit voor de 9 gebieden met mogelijkheid voor wateraanvoer. Voor de modelberekeningen in een profieldoorsnede zijn gegevens afgeleid uit het veldonderzoek. Dit betreft tijdsonafhankelijke en tijdsafhankelijke gegevens. De tijdsonafhankelijke gegevens hebben betrekking op de geometrie, de horizontale en verticale doorlatendheden, en de porositeit. De tijdsafhankelijke gegevens hebben betrekking op de randvoorwaarden. Voor de zijranden en onderrand zijn gemiddelde stijghoogten bepaald. Voor de bovenrand zijn fluxen afgeleid, waarbij onderscheid is gemaakt voor de slootbodem en het grondwatervlak. Het gebruikte grondwatermodel is een stationair model.

Daarom is de totale meetperiode opgesplitst in 8 of 9 tijdvakken, waarin de stroming bij benadering als stationair kan worden beschouwd. Voor deze tijdvakken zijn vervolgens gemiddelde fluxen en stijghoogten vastgesteld. Het model is vervolgens gecalibreerd op een tijdvak, waarbij de stijghoogte binnen de profieldoorsnede en de kwaliteit zijn betrokken. Vervolgens is per tijdvak, beginnend bij tijdvak 1, de maximale omvang van het infiltratielichaam onder de slootbodem vastgesteld, waarbij het eindpunt van het ene tijdvak als startpunt voor het daaropvolgende tijdvak is gebruikt. De intensiteit van de infiltratie blijkt laag te zijn. Uit de modelberekeningen blijkt dat de hydrologische situatie de vorming van een infiltratielichaam beïnvloedt. In gebieden met een hoge potentiële wegzijging, veelal overeenkomend met een ondiep aanwezige weerstandbiedende laag, vindt overwegend een permanente infiltratie plaats. Deze infiltratie bestaat uit afwisselend gebiedseigen (winter) en gebiedsvreemd (zomer) water. In gebieden zonder weerstandbiedende laag of waarbij een laag op grotere diepte voorkomt, zal het infiltratielichaam qua omvang nauw samenhangen met de weersgesteldheid. Dit betekent dat in een relatief natte zomerperiode een infiltratielichaam wordt gevormd van geringe omvang dat in de daarop volgende winterperiode als gevolg van drainage geheel verdwijnt. In een relatief droge zomer wordt een infiltratielichaam gevormd van grote omvang dat in de daaropvolgende winterperiode slechts gedeeltelijk wordt afgevoerd. Voor kwelgebieden is de omvang van het infiltratielichaam sterk gerelateerd aan de grootte van de kwel; bij grote kwelwaarden is geen infiltratie door de slootbodem waargenomen en bij geringe kwel vormt zich een infiltratielichaam dat in de daaropvolgende winterperiode weer wordt afgevoerd.

Hoofdstuk 8 behandelt de bepaling van de voedings- en drainageweerstanden. Voor de bepaling van de voedings- en drainageweerstanden zijn de formules van Ernst en Bruggeman gebruikt. De bepaling van de drainageweerstand volgens Ernst is volgens twee methoden uitgevoerd nl.:

- uit specifieke afvoer en gemiddelde grondwaterstand (q(h)-relatie);
- uit specifieke afvoer en gemiddeld verschil in hoogte tussen grondwaterstand en peil in de waterlopen.

Op basis van de q(h)-relatie is een drainageweerstand voor de winter en voor de zomerperiode afgeleid en op basis van het drukverschil en specifieke afvoer een drainageweerstand voor de winter. De gevonden waarden voor de winter geven een grote overeenkomst te zien. Voor de zomerperiode worden voor de aanvoergebieden hoge drainageweerstanden gevonden; dit komt overeen met de gevonden geringe infiltratie-intensiteiten. De bepaling van de drainageweerstand volgens Bruggeman was alleen mogelijk voor de aanvoergebieden. De aldus bepaalde drainageweerstanden zijn vervolgens omgerekend naar voedingsweerstanden door hieraan een weerstand toe te voegen van eventuele weerstandbiedende lagen onder de slootbodem. Vergelijking van de voedingsweerstanden volgens het Grondwaterplan en de gevonden drainageweerstanden voor de zomersituatie geven een spreiding te zien. Deze spreiding kan gedeeltelijk worden verklaard door de verschillende schalen van onderzoek. Tijdens dit onderzoek bleek dat in praktisch alle proefgebieden incidenteel hoge afvoeren voorkomen, die niet verklaard kunnen worden uit de q(h)-relatie. Deze extremen kunnen wellicht worden toegeschreven aan snelle afvoercomponenten (surface-runoff en interflow). In het grootste deel van de provincie, en met name in het centrum, zijn in de zomer de drainage- en infiltratieweerstanden dermate hoog,

dat slechts een geringe infiltratie plaats kan vinden. In een deel van de Veenkoloniën zijn gunstige omstandigheden aanwezig voor infiltratie vanwege het voorkomen van overwegend voedingstype A1 en daarnaast een relatief dicht waterlopenstelsel.

1 INLEIDING

In het kader van de Wet op de Waterhuishouding dient elke provincie een waterhuishoudingsplan vast te stellen, waarin in hoofdlijnen het te voeren beleid voor de waterhuishouding in de provincie is aangegeven.

Een belangrijk onderdeel hierbij vormt het integraal waterbeheer waarin met name de relatie tussen oppervlakte- en grondwater als een onderbouwend element wordt gezien. Om kwantitatieve en kwalitatieve effecten van deze relatie vast te stellen, als gevolg van ingrepen in de waterhuishouding, is kennis nodig over de voedings- en drainageweerstanden, en over de processen bij infiltratie vanuit en drainage naar waterlopen. Daarom heeft de Dienst Water en Milieu (WAMIL) van de provincie Drenthe aan het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW) een onderzoeksopdracht verstrekt, waarin in het bijzonder twee aspecten zijn omschreven:

- uitvoering van slootproeven om de theoretische waarden voor de voedings- en/of drainageweerstand te onderbouwen. In het Grondwaterplan is hiervoor een waarde per km^2 berekend uit gegevens over de bodemgesteldheid en het waterlopenstelsel. De opzet van het onderzoek zal een toetsing inhouden van de beschikbare waarden en is bedoeld om te komen tot een nadere detaillering van deze weerstanden in afhankelijkheid van de grondwaterstand.
- modelonderzoek met het accent op de kwantitatieve en kwalitatieve analyse van de processen bij infiltratie vanuit en drainage naar waterlopen. Bijzondere aandacht zal worden besteed aan de vorming van een "infiltratielichaam" onder infiltrerende waterlopen en de beïnvloeding hiervan door drainage in het winterhalfjaar. Zodoende zal een indruk ontstaan over de belasting van het grondwater afhankelijk van de kwaliteit van het aangevoerde water. Hierop aansluitend zal een indicatie worden gegeven over het concentratieverloop en het spreidingsbeeld van het geïnfiltreerde water.

Het aantal en de ligging van de locaties voor het veldonderzoek dienden voor genoemde aspecten een representatief beeld te leveren voor de gehele provincie. Op grond van mogelijke combinaties van gebiedskenmerken is uitgegaan van ongeveer 25 proefgebieden.

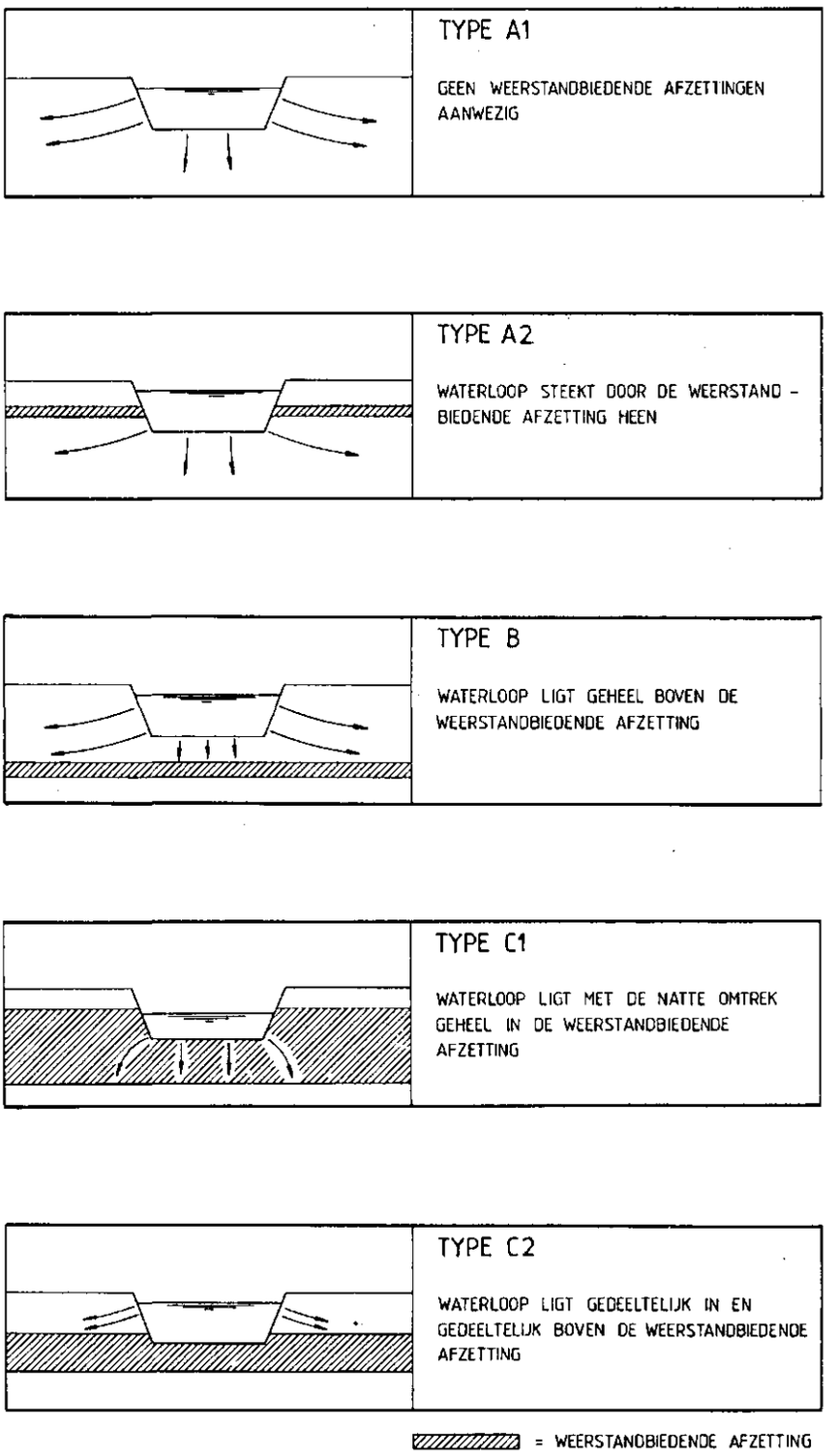


Fig. 1 Onderscheiden voedingstypen (Technische Werkgroep Grondwaterplan 1985)

2 VASTSTELLING AANTAL EN LIGGING PROEFGEBIEDEN

2.1 Gebiedskenmerken

Bij zowel het onderzoek naar drainage- en/of infiltratieweerstanden als naar de kwaliteitseffecten bij infiltratie van gebiedsvreemd water zijn de volgende gebiedskenmerken betrokken:

- onderscheiding in vlakke en hellende gebieden;
- waterhuishoudkundige situatie (opdeling in waterlopen die alleen infiltreren of draineren en waterlopen die zowel infiltreren als draineren);
- geohydrologische opbouw; onderscheiding van een aantal voedingstypen (fig. 1);
  -
  geen weerstandbiedende lagen aanwezig (de waterlopen reiken tot in het eerste watervoerend pakket of staan hiermee in nauw contact);
  -
  weerstandbiedende lagen aanwezig, waarbij de dikte en de diepteligging van belang zijn; de waterlopen liggen boven en/of reiken tot in de weerstandbiedende laag, of doorsnijden deze laag.

2.2 Keuze proefgebieden

Een selectie van de proefgebieden, waarbij rekening is gehouden met alle voorkomende combinaties van de onderscheiden gebiedskenmerken heeft in een aantal stappen plaatsgevonden. In chronologische volgorde zullen deze worden behandeld.

Als uitgangspunt is de door de provincie Drenthe vervaardigde kaart gebruikt, die een overzicht geeft van de aanwezige kanalen en waterlopen (bijlage 1; Technische Werkgroep Grondwaterplan 1985). Op deze kaart is tevens aangegeven of de waterlopen permanent gevoed worden, moeilijk (kwel en neerslagoverschot) of gemakkelijk droogvallen (neerslagoverschot). Op basis van deze kaart zijn gebieden geselecteerd waar een zekere dichtheid voorkomt met permanent voedende en moeilijk droogvallende waterlopen (bijlage 2). De indeling van het oppervlaktewaterstelsel is uitgevoerd in verband met de opzet van het uit te voeren veldonderzoek.

Daar de indeling, naast topografische verschillen aan het maaiveld, voor een belangrijk deel kan worden toegeschreven aan het ondiep voorkomen van stagnerende lagen is hierbij in zekere zin een classificatie van drainageweerstanden betrokken. Bij het vaststellen van de proefgebieden uitgaande van bijlage 2 dient ook rekening te worden gehouden met de mogelijkheid van extrapolatie van de onderzoeksresultaten naar het resterende deel van de provincie.

De indeling van de gebieden in bijlage 3 in vlakke gebieden en gebieden met microreliëf is een volgende stap. Hiervoor is de fysisch-geografische kaart van Drenthe (schaal 1 : 50 000, Nijland e.a. 1982) gebruikt. Hierbij wordt een vlak gebied gede-

finieerd als een terreinvorm die voor het oog horizontaal ligt en waarin hoogteverschillen voorkomen van minder dan 0,5 m. Onder gebieden met microreliëf worden gebie- den verstaan waarbinnen hoogteverschillen voorkomen tussen 0,5 en 1,5 m.

Uit bijlage 3 blijkt dat op basis van de juist genoemde criteria overwegend gebieden met microreliëf voorkomen. Op grond van terreinverkenning is de definitieve terreinvorm vastgesteld. De aangegeven terreinvorm in tabel 1 is niet altijd identiek aan die in bijlage 3.

Tabel 1 Gebiedskenmerken van de proefgebieden

Nr.	Proefgebied	Terrein vorm	Voedings- type	Inlaat (I) Afvoer (A)	Waterlopen	Drainage (%)
1	Beilen	Microreliëf	C1	I+A	p.v.	0
2	Dalerveen	„	B	I+A	p.v.	100
3	Eelde	„	C1	I+A	p.v.	5
4	Geesbrug	„	B	I+A	p.v.	0
5	't Haantje	„	A1	I+A	p.v.	0
6	Noordsche Schut	Vlak	B	I+A	p.v.	0
7	Nyeveen	„	A1	I+A	p.v.	0
8	Uffelte	„	A1	I+A	p.v.	0
9	Zwiggelte	Microreliëf	C1	I+A	p.v.	15
10	Anderen	„	B	A	g.dr.	10
11	Borger	„	A1	A	m.dr.	0
12	Brunsting	Vlak	C1	A	p.v.	50
13	Gieten	Microreliëf	B	A	p.v.	100
14	Gieterveen	Vlak	A1	A	p.v.	0
15	Noord-Sleen	Microreliëf	C1	A	m.dr.	25
16	Smilde	Vlak	B	A	p.v.	40
17	Tynaarlo	Microreliëf	A1	A	m.dr.	5
18	Veenhuizen	„	C1	A	p.v.	0
19	Wijster	„	C1	A	m.dr.	0

p.v. = permanent voedend
g.dr. = gemakkelijk droogvallend
m.dr. = moeilijk droogvallend

Voor de waterhuishouding (paragraaf 2.1) werden gebieden onderscheiden waar alleen aanvoer (infiltratie) of afvoer (drainage) plaatsvindt en gebieden met zowel aan- als afvoer (infiltratie, drainage). Uit een inventarisatie blijkt dat waterlopen met alleen aanvoer niet of nauwelijks voorkomen, zodat dit selectiecriterium niet is meegenomen. Er is dus alleen onderscheid gemaakt tussen gebieden met en zonder wateraanvoer.

De informatie over de gebieden die nu reeds van water kunnen worden voorzien, is ontleend aan een kaart uit het rapport van de Werkgroep Tus-10-Plan (bijlage 4; 1988). Bij het drainage- c.q. infiltratieproces is de geohydrologische opbouw in de naaste omgeving van de waterlopen van grote invloed. Voor het Grondwaterplan zijn hiermee samenhangend vijf voedingstypen onderscheiden (fig. 1). Per vak van 1 km^2 zijn over de verbreiding van deze voedingstypen gegevens beschikbaar (bijlage 5). Op bijlage 5 zijn tevens de contouren van bijlage 2 en 3 opgenomen.

Op basis van de onderscheiden kenmerken in bijlage 4 en 5 is een vlekkenkaart samengesteld (bijlage 6). Hierbij is er naar gestreefd om zoveel mogelijk combinaties van gebiedskenmerken te onderscheiden. Voor de voedingstypen was dit slechts mogelijk voor de typen A1, B, en C1 (fig. 1), daar de overige typen slechts sporadisch voorkomen. Om te voldoen aan het gestelde aantal van ongeveer 25 proefplekken zijn identieke combinaties meegenomen. Het veenkoloniale gebied is buiten beschouwing gelaten, daar in dit gebied reeds studies zijn verricht naar de effecten van wateraanvoer (Van Keulen 1982; Van Bakel 1985). De resultaten hiervan zullen worden meegenomen in dit onderzoek.

Als laatste stap zijn proefgebieden gelokaliseerd uitgaande van de vlekkenkaart en de waterlopenkaart. Met de desbetreffende waterschappen is overlegd om te komen tot gebieden met mogelijkheden voor een continue debietregistratie. Na een aansluitende terreinverkenning heeft de definitieve vaststelling plaatsgevonden. In bijlage 7 is de locatie van de proefgebieden aangegeven en in tabel 1 is aanvullende informatie verstrekt over de relevante gebiedskenmerken. Voor met name de terreinvorm en de mogelijkheid van wateraanvoer heeft op grond van een veldverkenning voor een aantal gebieden een aanpassing plaatsgevonden, en ten aanzien van het onderscheiden voedingstype zal naderhand een toetsing plaatsvinden.

3 VOEDINGS- EN/OF DRAINAGEWEERSTANDEN

De voedingsweerstand heeft betrekking op de totale weerstand tussen de waterlopen en het watervoerend pakket en is met name gedefinieerd om grondwaterstandsverlagingen te berekenen bij een onttrekking aan het watervoerend pakket. De drainageweerstand omvat de totale weerstand die de afvoer van het neerslagoverschot ondervindt vanaf het freatisch vlak naar de waterlopen. Deze weerstand kan eveneens worden gebruikt bij de eerder genoemde berekeningen; voor het voedingstype A1 uit fig. 1 kan dit zondermeer, daar in dit geval de voedingsweerstand gelijk gesteld kan worden aan de drainageweerstand. Voor de overige voedingstypen is zowel de diepte van de slecht doorlatende lagen ten opzichte van de bodem van de waterlopen als de verticale weerstand hiervan van invloed op de samenhang tussen voedings- en drainageweerstand.

Met twee geohydrologische schema's zal worden aangegeven op welke wijze de weerstanden zijn berekend. De ene heeft betrekking op de voedingstypen A1, A2 en B, waarbij het afdekkend pakket is samengesteld uit fijn, vaak slibhoudend zand en waarbij weerstandbiedende lagen kunnen voorkomen op een wisselende diepte ten opzichte van de bodem van de waterlopen (fig. 2). De andere heeft betrekking op het voedingstype C1, met altijd een weerstandbiedende laag en wel zo dat de natte omtrek van de waterloop geheel in de weerstandbiedende laag ligt (fig. 3). Het voedingstype C2 kan ten dele worden gerekend tot beide geohydrologische schematiseringen.

In fig. 2 zijn hydrologische grootheden weergegeven, waaruit de drainageweerstand direct kan worden afgeleid, of die van belang zijn voor de berekening hiervan.

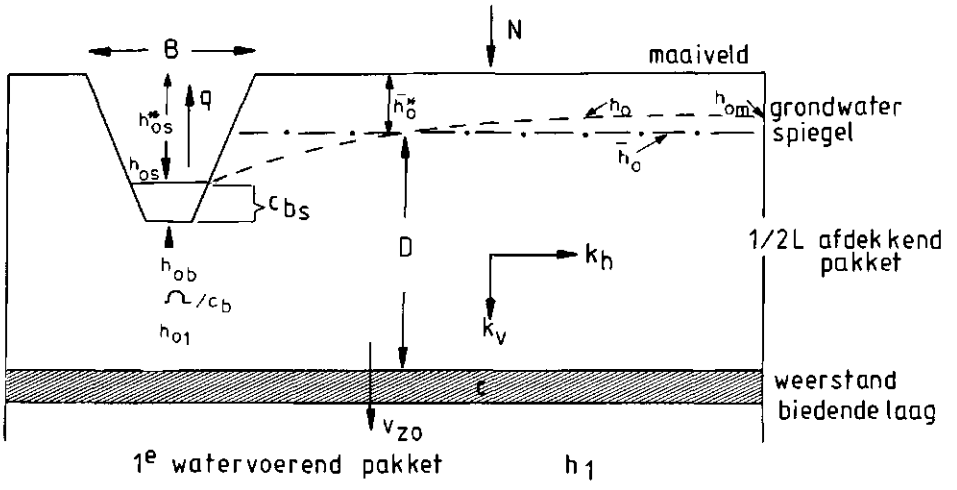


Fig. 2 Hydrologische grootheden voor de berekening van de voedings- en drainageweerstand

In fig. 2 leidt een voeding door een neerslagoverschot N van het freatisch vlak tot een opbolling van de grondwaterspiegel tussen de waterlopen, wat een grondwaterstroming

activeert naar de waterlopen. De drainageweerstand kan hierbij worden gedefinieerd als het quotiënt van de opbolling (h_{om}-h_{os}) en de specifieke grondwaterafvoer q (Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO 1986). Ernst e.a. (1970) heeft bij een grondwateronttrekking aan een watervoerend pakket, dat wordt afgedekt door fijnzandige sedimenten, de voedingsweerstand gelijk gesteld aan de differentie-benadering van de drainageweerstand. Hiermee wordt bedoeld het quotiënt van het verschil tussen de gemiddelde hoogte van de grondwaterspiegel en het peil in de waterlopen en de specifieke grondwaterafvoer. Indien op de overgang van het afdekkend pakket naar het watervoerend pakket weerstandbiedende lagen voorkomen, is de totale voedingsweerstand gelijk aan de gedefinieerde voedingsweerstand, vermeerderd met de verticale weerstand van de weerstandbiedende laag. Het laatste komt overeen met de weergegeven situatie in fig. 2.

Bruggeman (1978) heeft oplossingen gegeven voor de voeding vanuit waterlopen in een afdekkend pakket naar het onderliggende watervoerend pakket. Hierbij kan direct een waarde voor de voedingsweerstand worden verkregen. In het Grondwaterplan is overwegend gerekend met de formule van Bruggeman. Aangezien de oplossing van Ernst en die van Bruggeman specifieke mogelijkheden bieden om hydrologische grootheden uit het verrichte veldonderzoek af te leiden, leek het zinvol om beide oplossingen naast elkaar te gebruiken.

Hierna zal worden ingegaan op deze oplossingen.

Formules van Ernst

$$(h_{om} - h_{os}) = (h_{om} - h_{o1}) + (h_{o1} - h_{ob}) + (h_{ob} - (h_{os}) = \\ = \frac{q\,L^2}{8\,k_h D} + q\,L\Omega + qL\,\frac{c_{bs}}{B} \qquad (1)$$

$$\Omega = \frac{1}{\pi k_r} \ln \frac{\alpha D}{B} \qquad (2)$$

$$k_r = \sqrt{k_h \cdot k_v} \qquad (3)$$

$$\gamma = \frac{L^2}{8\,k_h D} + L(\Omega + \frac{c_{bs}}{B}) \qquad (4)$$

$$(h_{om} - h_{os}) = q\,\gamma \qquad (5)$$

$$(\bar{h}_o - h_{os}) = \beta(h_{om} - h_{os}) = q\,\gamma^* \tag{6}$$

$$(\bar{h}_o - h_{os}) \approx (\bar{h}^*_o - h^*_{os}) \tag{7}$$

$$(\bar{h}^*_o - h^*_{os}) \approx q\,\gamma^* \tag{8}$$

$$q \approx f\,(\bar{h}^*_o);\ q(h) \text{ - relatie} \tag{9}$$

$$\frac{dq}{d\bar{h}^*_o} = \gamma^* \tag{10}$$

$$\bar{h}_o = v_{zo}\,c \tag{11}$$

$$v_{zo} = N - q \tag{12}$$

$$c_v = \gamma^* + c \tag{13}$$

Formules van Bruggeman

$$q = \frac{[(c + \frac{D}{k_v})(1 - \frac{B}{L}) - BS]\,N - h_{os}}{(\frac{L\,c_b}{B}) + (c + \frac{D}{k_v}) + S\,L} \tag{14}$$

$$S = \frac{AL^2}{\pi^3 B^2 k_v} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin^2(\frac{n\pi B}{L})\,F(n,o) \tag{15}$$

$$F(n,o) = \frac{(n\alpha_1 + 1)e^{n\alpha_2} + (n\alpha_1 - 1)e^{-n\alpha_2}}{(n\alpha_1 + 1)e^{n\alpha_2} - (n\alpha_1 - 1)e^{-n\alpha_2}} \quad (16)$$

$$\alpha_1 = \frac{2\pi\ k_v\ c}{A\ L} \quad (17)$$

$$\alpha_2 = \frac{2\ \pi\ D}{A\ L} \quad (18)$$

$$A = \sqrt{k_v/k_h} \quad (19)$$

$$v_{zo} = (1 - \frac{B}{L})N - q \quad (20)$$

$$\bar{h}_o = (c + \frac{D}{k_v})v_{zo} \quad (21)$$

$$(h_{ob} - h_{os}) = \frac{q\ L\ c_b}{B} \quad (22)$$

$$\gamma 1 = \frac{(\bar{h}_o - h_{os})}{q} \quad (23)$$

$$c_v^1 = \gamma^1 + c \quad (24)$$

waarin:

B	=	slootbreedte (natte omtrek)	(m)
c	=	weerstand slecht doorlatende laag	(d)
c_y	=	voedingsweerstand volgens Ernst	(d)
c_v^1	=	voedingsweerstand volgens Bruggeman	(d)
c_b	=	bodemweerstand	(d)
c_{bs}	=	intrede weerstand	(d)
D	=	dikte van de doorstromende laag	(m)
h_{om}	=	stijghoogte midden tussen de ontwateringsmiddelen in het afdekkend pakket t.o.v. referentieniveau	(m)
h_{os}	=	slootpeil t.o.v. referentieniveau	(m)

h_{ol}	=	stijghoogte in een open sleuf onder de waterloop tot aan de weerstandbiedende laag t.o.v. referentieniveau	(m)
h_{ob}	=	stijghoogte midden onder de slootbodem t.o.v. referentieniveau	(m)
$\bar{h}_o$	=	gemiddelde stijghoogte t.o.v. referentieniveau	(m)
h^*_o	=	gemiddelde grondwaterdiepte beneden maaiveld	(m)
h^*_{os}	=	slootpeil beneden maaiveld	(m)
h_1	=	stijghoogte in het 1e watervoerend pakket (referetieniveau)	(m)
k_h	=	horizontale doorlatendheid	($m.d^{-1}$)
k_v	=	verticale doorlatendheid	($m.d^{-1}$)
k_r	=	radiale doorlatendheid	($m.d^{-1}$)
L	=	slootafstand	(m)
N	=	voeding freatisch vlak	($m.d^{-1}$)
q	=	specifieke grondwaterafvoer	($m.d^{-1}$)
v_{zo}	=	wegzijging c.q. kwel door weerstandbiedende laag	($m.d^{-1}$)
z	=	niveau onder de slootbodem waarvoor F(n,o) van toepassing	(m)
α	=	geometrie factor (is op 1 gesteld)	
β	=	factor voor de kromming van de grondwaterspiegel (is op 0,8 gesteld)	
γ	=	drainageweerstand volgens Ernst	(d)
γ^*	=	differentiebenadering voor de drainageweerstand	(d)
γ^1	=	drainageweerstand volgens Bruggeman	(d)

Uit de gegeven formules blijkt dat Ernst en Bruggeman de stromingsweerstand in de omgeving van waterlopen verschillend hebben gedefinieerd. Ernst geeft deze aan als een radiale weerstand, eventueel vermeerderd met een intredeweerstand in combinatie met de slootbreedte. Bruggeman definieert de stromingsweerstand als de som van een bodemweerstand en een intredeweerstand in combinatie met de slootbreedte.

In tabel 2 zijn de resultaten van berekeningen met de hiervoor genoemde formules weergegeven voor het voedingstype B met als keileemcode 3.3 (Technische Werkgroep Grondwaterplan 1985). De relevante gegevens zijn:

L = 100 m; D = 1,5 m; $k_h = k_v$ = 3 m/d; B = 2 m; c_b = 2 d en c = 280 d

Uit tabel 2 blijkt dat beide formules in orde van grootte dezelfde uitkomst geven. Bij een afnemende waarde van c geeft bij c < 10 d de formule van Ernst enigszins te hoge drainageweerstanden. In deze situatie dient in toenemende mate een gedeelte van het onderliggende pakket bij de berekeningen te worden betrokken. In de praktijk betekent dit dat een hogere kD-waarde dient te worden beschouwd, terwijl tevens een aanpassing voor de geometriefactor voor de berekening van Ω wenselijk is. Met de genoemde beperkingen is bij het onderzoek rekening gehouden.

Tabel 2 Berekende grondwaterstanden, afvoeren en weerstanden

N	h_{os}	Formule Ernst					Formule Bruggeman				
($mm.d^{-1}$)	(m)	q ($mm.d^{-1}$)	v_{zo} ($mm.d^{-1}$)	$\bar{h}_o$ (m)	γ^* (d)	c_v (d)	q ($mm.d^{-1}$)	v_{zo} ($mm.d^{-1}$)	$\bar{h}_o$ (m)	γ^1 (d)	c_v^1 (d)
0	0,25	-0,43	0,43	0,12	300	580	-0,50	0,50	0,13	264	544
1	0,25	0,05	0,95	0,27	300	580	0	0,90	0,26	346	626
2	0,25	0,54	1,46	0,41	300	580	0,50	1,40	0,40	276	556
2	0	0,97	1,03	0,29	300	580	1,00	1,00	0,27	270	550
-1	0,25	-0,91	-0,09	-0,02	300	580	-1,00	0	-0,01	267	547
-1	0	-0,48	-0,52	-0,15	300	580	-0,50	-0,50	-0,13	270	550

Voor het voedingstype C1 en C2, waar de waterlopen gedeeltelijk en geheel in de weerstandbiedende laag liggen, is de volgende formule gebruikt (Rolf 1981; fig. 3):

$$c_w = (c_b + c^1) \frac{L}{B + 1{,}5\ D^1} \qquad (25)$$

waarin:

c_w = voedingsweerstand waterloop (d)
c^1 = weerstand van de doorstroomde keileem of beekleem (d)
D^1 = dikte van de doorstroomde keileem of beekleem (d)

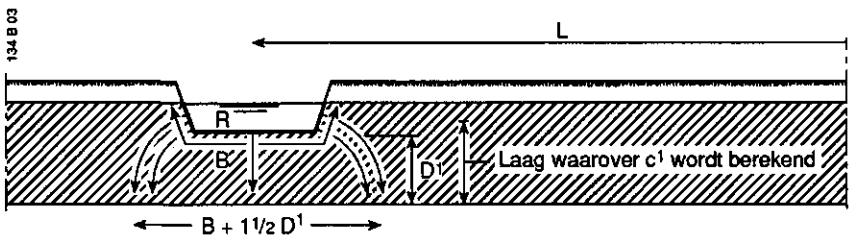


Fig. 3 Schematisering voor voedingstype C1 (uit: Rolf, 1981)

Voor het voedingstype C1 is $c_w = c_v$, terwijl tevens voor het voedingstype C2 gebruik is gemaakt van de eerder behandelde formules. In dit geval is de totale voedingsweerstand berekend met:

$$\frac{1}{c_v} = \frac{1}{\gamma^* + c} + \frac{1}{c_w} \qquad (26)$$

4 HYDROLOGISCHE PROCESSEN NABIJ WATERLOPEN

In de proefgebieden met mogelijkheden voor wateraanvoer kan in droge perioden vanuit de waterlopen infiltratie plaatsvinden. Het ingelaten water is gedeeltelijk afkomstig van lozingen door de afvalwaterzuiveringsinstallaties, daarnaast wordt een bijdrage geleverd vanuit de IJssel en het Ketelmeer.

Het ingelaten water is overwegend van mindere kwaliteit dan het gebiedseigen oppervlaktewater of grondwater ter plaatse. De vraag is welke consequenties het inlaten van dergelijk gebiedsvreemd water heeft op de kwaliteit van het grondwater. Aangezien overwegend in het zomerhalfjaar water wordt ingelaten en in het winterhalfjaar gebiedseigen water wordt afgevoerd is er sprake van een periodiek proces met het begin in het voorjaar, wanneer het ingelaten water in eerste instantie voor een belangrijk deel de kwaliteit van het oppervlaktewater bepaalt. Vanuit de waterlopen ontstaat als gevolg van infiltratie een "infiltratielichaam" die aan het einde van de zomer de grootste omvang heeft (fig. 4).

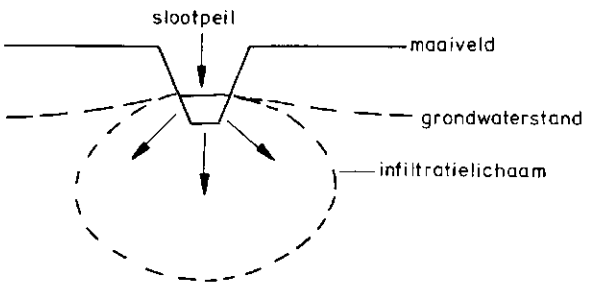


Fig. 4 Vorming van een infiltratielichaam onder de waterloop

De mate waarin dit hydrologisch proces plaatsvindt, is afhankelijk van:
- het verdampingsoverschot;
- de bodemweerstand van de waterlopen;
- de geohydrologische eigenschappen van de ondiepe ondergrond, gekarakteriseerd door het voedingstype;
- de kwel/wegzijgingssituatie.

In het winterhalfjaar zal door drainage van het neerslagoverschot een toestroming naar de waterlopen overheersen. Deze situatie is van invloed op het infiltratielichaam dat in de voorafgaande zomer onder de waterlopen is ontstaan. Het geïnfiltreerde water kan grotendeels worden teruggedrongen naar de waterloop, maar kan ook voor een deel een component gaan vormen van een regionale grondwaterstroming.

Om de grondwaterstroming in de naaste omgeving van de waterloop te simuleren, is het model STRELIN (Groenendijk 1988) gebruikt. Met dit model kunnen in een dwarsdoorsnede stroomfunctiewaarden, potentialen en verblijftijden worden berekend. In fig. 5 is een dergelijke dwarsdoorsnede loodrecht op een waterloop weergegeven.

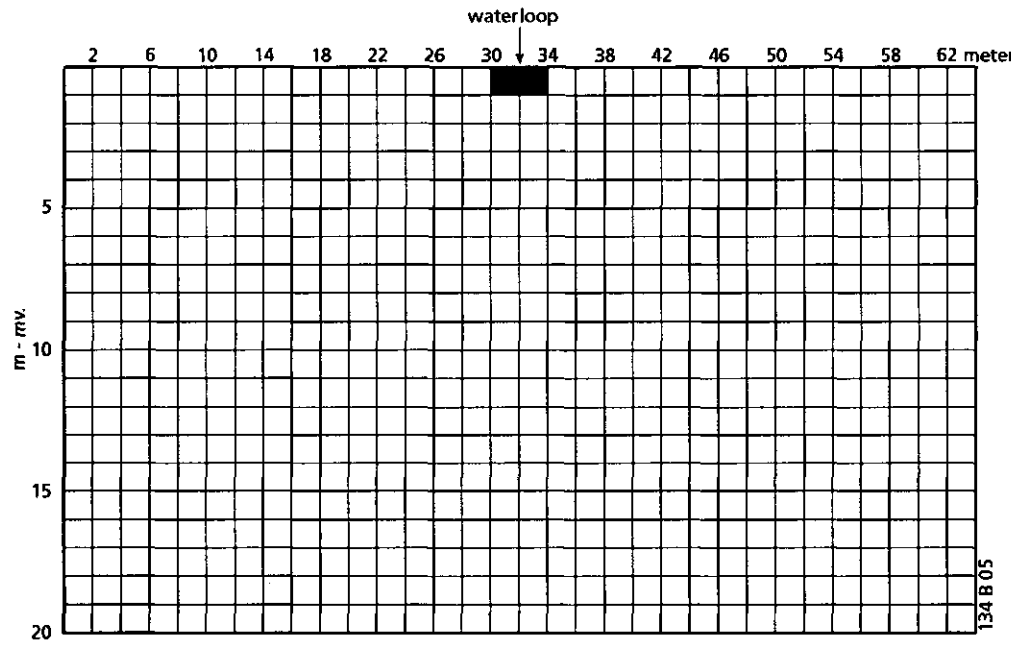


Fig. 5 Indeling van de dwarsdoorsnede in compartimenten

De dwarsdoorsnede heeft een lengte van 64 meter met in het midden de waterloop. In het voorbeeld bedraagt de diepte 20 meter, voor de beschouwde proefgebieden is een diepte beschouwd van 15 tot 18 meter, afhankelijk van het diepste filter in een boring naast de waterloop. De indeling in compartimenten vormt vierkanten, in de praktijk heeft in verticale richting veelal een meer gedifferentieerde laagindeling plaatsgevonden op grond van de geohydrologische opbouw. De benodigde gegevens per compartiment betreffen:

- de horizontale doorlatendheid;
- de verticale doorlatendheid;
- de porositeit.

Als randvoorwaarden zijn beschouwd:

- bovenrand: - waterloop: gemeten fluxen;
  - overige compartimenten: berekende fluxen;
- zijrand: fluxen en/of potentialen;
- onderrand: potentialen.

Het model rekent stationair; voor een simulatie van de werkelijke situatie is de onderzoeksperiode opgedeeld in tijdvakken, waarvoor bij benadering een stationaire situatie geldt. Voor het analyseren van de hydrologische processen onder de waterloop zijn in het eerste tijdvak punten onder de waterbodem opgegeven als startpunt voor de stroomlijnen. Het resultaat van het eerste tijdvak is vervolgens gebruikt als startpunt voor het tweede tijdvak. Behalve stroomlijnen worden voor de compartimenten potentialen berekend. Indien gegevens over grondwaterstanden, stijghoogten en slootpeilen gemeten zijn, bieden deze een mogelijkheid voor een toetsing van de uitgevoerde berekeningen. Hierbij kunnen tevens gegevens over de chemische samenstelling van het oppervlakte- en grondwater worden genoemd.

5 OPZET VELDONDERZOEK

De veldmetingen dienen de benodigde informatie aan te leveren voor het onderzoek naar de voedings- en/of drainageweerstanden en de hydrologische processen nabij waterlopen met wateraanvoer.

Gezien zowel het karakter als het aanvangstijdstip van het gehele onderzoek is de aandacht geconcentreerd op de proefgebieden met een mogelijkheid van wateraanvoer. In mei 1988 is begonnen met de registratie van de afvoer in de eerste negen proefgebieden van tabel 1 en het verzamelen van gegevens over de ingelaten hoeveelheden water.

In de maanden mei t/m juli 1988 zijn in het centrum van de betreffende proefgebieden langs de hoofdwaterloop boringen uitgevoerd tot een diepte van 15 tot 18 meter. In deze boringen zijn om de drie meter filters gesteld om de stijghoogte te meten en een bemonstering van het grondwater te kunnen uitvoeren op verschillende diepten onder de bodem van de betreffende waterloop.

Uit de boorbeschrijving en een lithologische beschrijving van de boormonsters is informatie verkregen over de profielopbouw ter plaatse. In de waterloop bij de boring is een waarnemingsfilter geplaatst op ongeveer 40 cm onder de slootbodem. De uitgevoerde metingen hadden betrekking op:
- debieten (aan- en afvoer);
- peilen van het open water;
- stijghoogten;
- kwalitatieve parameters van het grondwater.

In de tweede helft van 1988 zijn in de naaste omgeving van de boring in een raai loodrecht op en aan weerszijden van de waterloop grondwaterstandsbuizen geplaatst. Hierbij is een afstand aangehouden van 3, 10 en 30 m tot de waterloop. Er zijn steeds twee buizen geplaatst met het midden van het filter van een halve meter op een diepte van circa 1,25 en 2,75 m beneden maaiveld. De buizen zijn opgenomen in het meetprogramma voor een kwantitatieve en kwalitatieve analyse van de processen bij infiltratie vanuit en drainage naar waterlopen.

Vanwege de weersomstandigheden in de zomer van 1988, relatief veel neerslag en derhalve een geringe kwantitatieve en kwalitatieve beïnvloeding van het grondwater door infiltratie van ingelaten water vanuit de waterlopen, is het meetprogramma voortgezet tot en met oktober 1989.

De aktiviteiten voor het onderzoek naar de voedings- en/of drainageweerstanden zijn in de winter 1988/89 begonnen. Deze betreffen allereerst de registratie van de afvoer in de resterende proefgebieden 10 t/m 19 in tabel 1. Aansluitend zijn zowel in deze proefgebieden als in de proefgebieden met een mogelijkheid van wateraanvoer in een representatieve raai grondwaterstandsbuizen geplaatst. De uitgevoerde metingen betreffen:

- debieten (afvoer);
- peilen van het open water;
- grondwaterstanden.

Bij het plaatsen van de grondwaterstandsbuizen is de profielopbouw tot een diepte van drie meter vastgelegd. In het voorjaar van 1989 is het waterlopenpatroon qua afmetingen en dichtheid geïnventariseerd.

Het meetprogramma voor het onderzoek naar de drainageweerstand is uitgevoerd van december 1988 tot mei 1989. In de zomer van 1989 zijn incidentele metingen uitgevoerd naar:
- bodemweerstanden van waterlopen;
- horizontale en verticale doorlatendheden tot een diepte van globaal zeven meter.

De opname van grondwaterstanden en peilen, en de bemonstering zijn grotendeels uitgevoerd door de Dienst Water en Milieu van de provincie Drenthe.

6 BASISGEGEVENS UIT VELDONDERZOEK

Bij de verzameling van de relevante gegevens in het veld zijn niet alleen de hiervoor gebruikte methoden van belang, maar ook de dichtheid van de meetpunten, de frequentie van de metingen en de wijze waarop de gegevens zijn vastgelegd. Voor éénmalig uitgevoerde metingen zijn kaarten en/of tabellen gebruikt, voor meer frequente metingen (grondwaterstanden, peilen en debieten) zijn de meetgegevens ingevoerd in een gegevensbestand (Oostindie 1984). Voor een aantal gegevens zijn controlebewerkingen uitgevoerd.

6.1 De waterhuishoudkundige begrenzing

Veelal in overleg met het waterschap en door terreinverkenning is de waterhuishoudkundige begrenzing van de geselecteerde proefgebieden vastgesteld. Vervolgens is de oppervlakte bepaald die naderhand is gebruikt voor de specifieke grondwaterafvoer en de afstand tussen de waterlopen. In aanhangsel 1 zijn de verkregen oppervlakten weergegeven.

6.2 Debieten en peilen open water

Bij de selectie van de proefgebieden is een belangrijk criterium geweest of de afvoer kon worden geregistreerd. Dit uitgangspunt is eveneens gehanteerd voor de proefgebieden met wateraanvoer, maar de mogelijkheden voor de aanvoerpunten waren echter beperkt. Voor het registreren van de afvoer van alle proefgebieden en de aanvoer naar drie proefgebieden zijn stuwmetingen gebruikt. De aanvoer naar de overige proefgebieden is afgeleid uit incidentele metingen, gegevens over de schuifstanden in bepaalde perioden en uit relaties tussen klep- en schuifstanden, en peilverschillen.

6.2.1 Stuwen

Naar stuwconstructies zijn aangetroffen:
- klepstuw;
- stuw met schuif;
- vaste stuw.

Overwegend komen klepstuwen voor; bij Noordsche Schut en Uffelte (beide afvoer) en Borger (aanvoer) komt een stuw met schuif voor en bij Anderen (afvoer) een vaste stuw. Voor het opstellen van Q(h)-relaties voor klepstuwen wordt doorgaans de afvoerformule voor horizontale lange overlaten gebruikt (Boiten 1987).

$$Q = C\, B_s\, h_s^x \qquad (27)$$

waarin:	Q	= debiet	(m^3/s)
	C	= afvoercoëfficiënt	($m^{2/x}/s$)
	B_s	= stuwbreedte	(m)
	h_s	= overstorthoogte (waterstand boven stuwkruin)	(m)
	x	= exponent	(-)

De afvoercoefficiënt is afhankelijk van de kruinvorm, de klephoek α, de overstorthoogte h_s en de aanstroomsituatie (fig. 6). In de praktijk worden voor C en x veelal waarden aangehouden van 1,8 à 1,9 en 1,5 (Bon 1965; Humbert 1970; Bon en Humbert 1975). Bij het onderzoek is x op 1,5 gesteld. Om een waarde voor de stuwconstante C en de effectieve stuwbreedte B_s te bepalen is in april en juni 1989 een ijkprogramma uitgevoerd. Hierbij is een directe meting van het stuwdebiet uitgevoerd en zijn verder de overstorthoogte en de klephoek α bepaald, de laatst genoemde factor is alleen van belang bij klepstuwen (fig. 6).

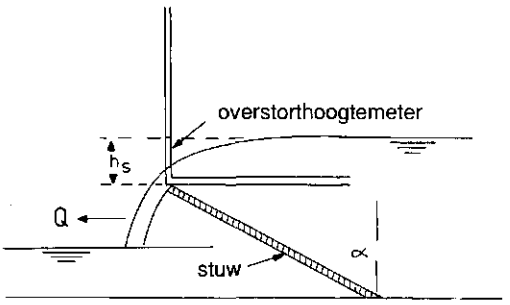


Fig. 6 Schematische voorstelling voor het meten van h_s en α

Bij stuwen met een laag debiet, overstorthoogte 1 à 2 cm, is het totale debiet Q gemeten. Hiervoor is de stuw opgedeeld in segmenten; het debiet is van de afzonderlijke segmenten bepaald, waarna door sommatie het totale stuwdebiet is verkregen. De meetprocedure omvat de volgende stappen:

- onder de overstortende straal van de onderscheiden segmenten is een plastic container geplaatst;
- het in de plastic container (diameter 0,60 m) stromende water is naar een meetcontainer met een bekende inhoud gepompt;
- uit de gemeten tijd voor het vullen van de meetcontainer volgt direct het debiet van het betreffende segment;
- de sommatie van het debiet van de onderscheiden segmenten levert het totale stuwdebiet.

Ingeval het stuwdebiet relatief hoog was, of geen plastic container onder de overstortende straal van de stuw kon worden geplaatst, is een stuwsegmentmeter gebruikt. Deze werkt volgens hetzelfde principe als indertijd door Bon (1965) is ontwikkeld, maar heeft als voordeel dat bij hoge stuwdebieten nog nauwkeurige metingen kunnen worden uitgevoerd. De segmentmeter heeft een breedte van 10 cm en kan op de stuw worden

geplaatst zonder de overstortende straal te beïnvloeden. Het in de segmentmeter stromende water kan met een pomp worden afgevoerd naar een meetcontainer. Op deze wijze kan eveneens het totale stuwdebiet worden verkregen. Veelal is echter volstaan met een debietmeting op drie plaatsen, representatief verdeeld over de stuw.

De overstorthoogte h_s is bij het uitgevoerde meetprogramma aan weerszijden en in het midden van de stuw gemeten met een overstorthoogtemeter. Deze is afgeleid van een door Homma (1981) voor deze meting ontwikkeld meetapparaat. Het kenmerkende verschil is, dat de gebruikte overstorthoogtemeter geheel uit perspex is vervaardigd, zodat controle mogelijk is op luchtbellen in het meetsysteem. Verder kan de overstorthoogte met een hoekspiegel en een meetlint in de verticale stijgbuis worden afgelezen, terwijl het meetinstrument op de stuw is geplaatst.

Bij de klepstuwen is de klephoek gemeten, en is aandacht besteed aan de wijze van ophanging en de kruinbreedte. Uit de laatstgenoemde kenmerken is een waarde voor de effectieve stuwbreedte afgeleid. Door de relevante gegevens in (27) te substitueren zijn bij een waarde van 1,5 voor x voor de afvoercoefficiënt C van de betreffende klepstuwen waarden verkregen. Voor de stuw met schuif en de vaste stuw is eveneens gebruik gemaakt van (27). In tabel 3 zijn de resultaten van het eerste ijkprogramma samengevat, waarbij de stuwen overwegend op winterpeil waren ingesteld.

Tabel 3 Overzicht ijkprogramma stuwen (april 1989)

Nr.	Proefgebied	Type stuw	Overstort-hoogte (cm)	Effectieve breedte (m)	Klep-hoek (°)	Afvoer-coëfficiënt ($m^{2/x}/s$)
2	Dalerveen	klep	4,0	1,40	68	1,9
3	Eelde	"	6,4	0,90	72	1,9
4	Geesbrug	"	1,5	1,35	72	2,1
5	't Haantje	"	2,4	1,95	65	1,9
7	Nijeveen	"	7,0	0,85	88	1,6
9	Zwiggelte	"	2,6	1,40	70	1,9
10	Anderen	vast	2,2	0,90	--	1,5
11	Borger	klep	4,8	1,55	88	1,5
11	Borger	schuif	2,2	0,82	--	1,5
12	Brunsting	klep	3,5	0,85	72	1,6
13	Gieten	"	8,2	1,40	70	2,0
14	Gieterveen	"	1,9	1,45	81	1,6
15	Noord-Sleen	"	3,6	1,35	68	2,1
16	Smilde	"	6,5	0,80	79	2,0
17	Tynaarlo	"	3,9	1,30	76	2,0
18	Veenhuizen	"	3,2	0,90	66	2,0
19	Wijster	"	5,4	0,85	72	1,9

Met uitzondering van de stuw met schuif (Borger) hebben de gegevens in tabel 3 betrekking op afvoerstuwen. Uit tabel 3 blijkt dat alle meetstuwen van de proefgebieden nr 10 t/m 19, voor het registreren van de afvoer gedurende de winterperiode 1988/89, in het ijkprogramma zijn opgenomen. Van de proefgebieden met een mogelijkheid van wateraanvoer ontbreken meetstuwen; de betreffende stuwen waren kort daarvoor reeds op zomerpeil ingesteld, zodat nog geen overstorthoogte aanwezig was.

Om gegevens over deze stuwen te verkrijgen en om een indruk te krijgen over de stuwstanden in de winter- en zomerperiode is in juni 1989 nogmaals een ijkprogramma uitgevoerd voor de proefgebieden nr 1 t/m 9. De resultaten van het tweede ijkprogramma zijn weergegeven in tabel 4.

Tabel 4 Overzicht ijkprogramma stuwen (juni 1989)

Nr.	Proefgebied	Type stuw	Overstort-hoogte (cm)	Effectieve breedte (m)	Klep-hoek (°)	Afvoer coëff. ($m^{2/x}.s^{-1}$)
1	Beilen	klep	3,7	0,89	45	1,9
2	Dalerveen	"	2,9	1,40	53	1,8
3	Eelde	"	3,5	0,90	63	2,0
3	Eelde (aanvoer)	"	2,4	1,40	45	1,9
5	't Haantje	"	1,4	1,95	67	1,6 *
6	Noordsche Schut	schuif		0,80		
8	Uffelte	"	7,5	0,59		1,9
9	Zwiggelte	klep	2,3	0,88	37	2,0

* augustus 1989

In tabel 4 hebben Eelde (aanvoer) en Zwiggelte betrekking op aanvoerstuwen. Bij een aantal afvoerstuwen was wederom geen of te weinig afvoer om een ijkmeting uit te voeren. Voor drie proefgebieden zijn de afvoerstuwen in beide ijkprogramma's opgenomen. Voor de proefgebieden Dalerveen en Eelde varieerde de afvoercoëfficiënt bij verschillende stuwstanden (klephoeken) tussen 1,8 en 2,0. Voor het proefgebied 't Haantje zijn bij praktisch dezelfde klephoek voor de afvoercoëfficiënt waarden van 1,9 en 1,6 verkregen, de laatste waarde is bepaald bij een relatief lage overstorthoogte. In fig. 7 is een overzicht gegeven van de verrichte metingen aan klepstuwen. Uit de figuur blijkt dat voor de afvoercoëfficiënt overwegend een waarde van 1,9 tot 2,0 voorkomt. Deze waarde komt redelijk overeen met de in deze paragraaf genoemde waarde op grond van literatuurgegevens.

Volgens Bon en Humbert (1975) wordt bij kleine overstorthoogten veelal een grote spreiding in de afvoercoëfficiënt gevonden met een tendens naar lagere waarden. Daar bij dergelijke overstorthoogten het debiet relatief gering is, is hier verder geen rekening mee gehouden. Het betreft hier met name de waarde van 1,6, die in augustus voor proefgebied 't Haantje is bepaald. De verkregen afvoercoëfficiënt van 1,6 voor het proefgebied Brunsting valt uit de toon. Een mogelijke verklaring hiervoor is een exorbitante aangroeiing van algen op de kleprand, waardoor de overstorthoogte enigszins wordt overschat en leidt tot een lagere afvoercoëfficiënt. Dit verschijnsel is alleen bij het proefgebied Brunsting aangetroffen.

Voor een klephoek groter dan 80°, die overigens weinig voorkomt, zijn eveneens lage afvoercoëfficiënten verkregen. Op grond van literatuurgegevens kan in deze situatie de exponent x in (27) groter dan 1,5 zijn, waardoor in de gevolgde procedure de afvoercoëfficiënt afneemt (Bon en Humbert 1975). Het voorgaande heeft betrekking op de proefgebieden Nijeveen, Borger en Gieterveen.

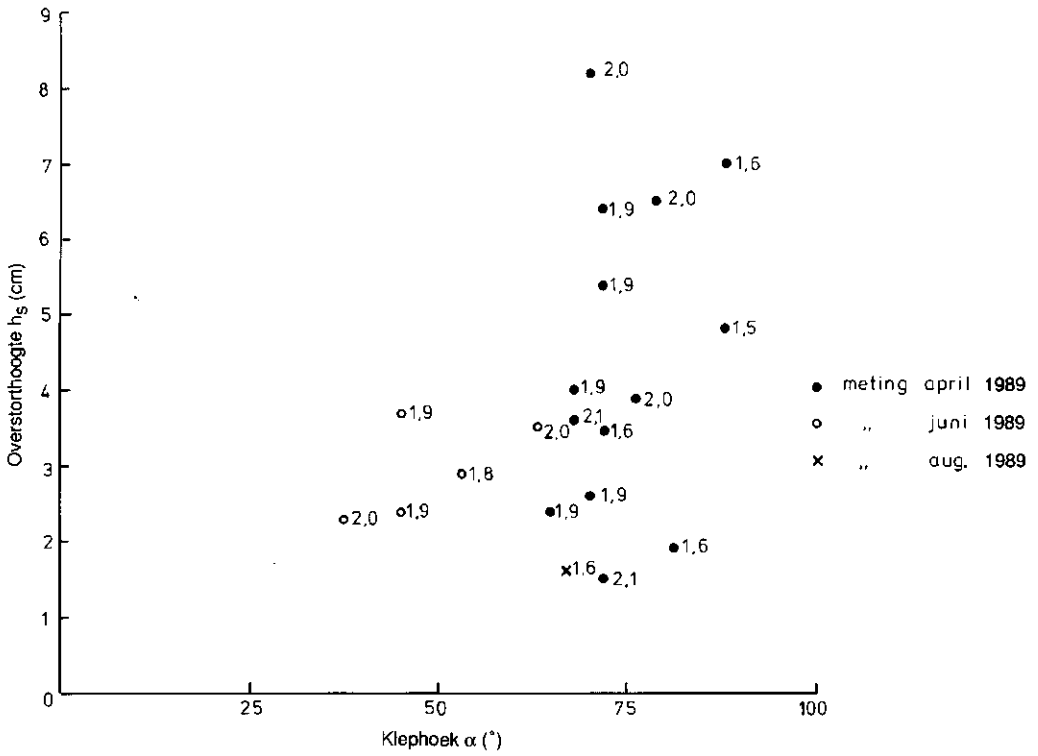


Fig. 7 Overzicht van de gemeten afvoercoëfficiënten aan klepstuwen

Bij de uitgevoerde afvoermetingen zijn de afvoercoëfficiënten in tabel 4 gebruikt met de volgende kanttekeningen:
- voor Dalerveen en Eelde is voor de afvoerstuw voor de afvoercoëfficiënt een waarde van 1,9 aangehouden;
- voor Noordsche Schut is de afvoercoëfficiënt gesteld op 1,9 op grond van de verkregen waarde voor Uffelte en een identieke constructie voor beide stuwen;
- voor Nijeveen is voor de afvoercoëfficiënt 1,9 aangehouden op grond van het overzicht in fig. 7 en het gegeven dat de klephoek veelal kleiner is dan 80°.

In het voorgaande is aangegeven op welke wijze de constanten in (27) zijn vastgesteld. Voor het berekenen van de afvoer van de beschouwde proefgebieden in de onderzoeksperiode dient de variabele overstorthoogte h_s nog te worden bepaald. Het hiervoor uitgevoerde meetprogramma omvatte een continue registratie van het peil bovenstrooms en een wekelijkse directe meting van:
- de overstorthoogte;
- de kruinhoogte van de stuw;
- het peil benedenstrooms.

De wekelijks verzamelde gegevens zijn in een databestand ingevoerd, waarna met een programma DEBIET de afvoer is berekend (Oostindie 1984). Bij de eerste berekening wordt naast de gemeten overstorthoogte eveneens een berekende overstorthoogte gepresenteerd op grond van kruinhoogte en het peil bovenstrooms. Deze toetsing dient als controle en verder als uitgangspunt om uit de continue registratie van het peil

bovenstrooms een waarde voor de overstorthoogte op dagbasis af te leiden. Deze waarden zijn eveneens in een databestand opgenomen, waarna met het eerder genoemde programma de debieten op dagbasis zijn berekend. Het peil benedenstrooms heeft bij de uitgevoerde berekeningen een bewakingsfunctie in verband met een mogelijke verdrinking van de stuw. In de berekende debieten op dagbasis kunnen nog onvolkomenheden voorkomen als gevolg van ondermeer een tijdelijke opeenhoping van vuil voor de stuw en stagnatie bij de peilregistratie. In een later stadium zullen de gemeten debieten getoetst worden en zal nader worden ingegaan op de verkregen resultaten.

6.2.2 Duikers

De aanvoer naar de meeste proefgebieden vindt plaats door afsluitbare duikers vanuit overwegend provinciale kanalen. De mate van opening van de inlaatduiker, in eerste instantie aangegeven door een aantal slagen of het gat van ophanging en naderhand vertaald in cm, en het bovenpeil of het drukverschil, is bepalend voor de wateraanvoer.

In twee proefgebieden, Eelde en Zwiggelte, is de aanvoer geregistreerd vanwege de aanwezigheid van een stuw bij de inlaatduiker. Voor deze proefgebieden kunnen de gronden tussen de duiker en de stuw in het winterhalfjaar door drainage een bijdrage leveren aan het gemeten debiet bij de aanvoerstuw. Uit incidentele metingen is gebleken dat in de zomerperiode dit effect is te verwaarlozen.

Voor het proefgebied Geesbrug kan de aanvoer worden geregeld met een RomijnVlugter inlaat. Hierbij kunnen een bepaald debiet en tijd worden ingesteld. De gegevens hierover zijn verstrekt door het betreffende waterschap.

Bij het waterschap is voor 't Haantje een tabel beschikbaar over de ingelaten hoeveelheden water in relatie tot de mate van opening in cm en het drukverschil. Om een compleet beeld te krijgen van de door duikers ingelaten hoeveelheden bij vaak voorkomende standen van opening is in juli 1988 een ijkprogramma uitgevoerd. Het inlaatdebiet is hierbij gemeten volgens de verdunningsmethode (Warmerdam 1974; Meijer 1980). Het principe van de verdunningsmethode berust op het gecontroleerd toevoegen van een bekende stof aan een onbekende hoeveelheid vloeistof om daarna aan de hand van de concentratie van de stof in het mengsel het totaalvolume te berekenen. De uitvoering van de meetmethode is: Aan de inlaatzijde van de duiker wordt met een Mariotte-systeem een constante stroom pekelwater gedoseerd. Het systeem is geplaatst op een snelweger; uit de gewichtsafname per tijdseenheid volgt hoeveel gram pekel per seconde wordt toegediend, bijvoorbeeld y g/s. Bij een gemeten soortelijk gewicht van het pekelwater van 1,1 komt dit neer op 0,91 y ml/s. Met een EC-meter wordt zowel het geleidingsvermogen van het ingelaten water afzonderlijk als tijdens het injecteren van de zoutoplossing bepaald. Door de meetcel aan de uitlaatzijde van de duiker over het gehele doorstroomde oppervlak te verplaatsen kan worden vastgesteld of een goede menging is verkregen tussen het ingelaten water en de geïnjecteerde vloeistof. Is aan de laatste voorwaarde voldaan, dan zal vanaf de aanvang van toediening van de zoutoplossing na een bepaalde periode het geleidingsvermogen toenemen tot een

constante waarde is bereikt. Deze waarde dient als uitgangspunt bij het vaststellen van de hoeveelheid zoutoplossing, bijvoorbeeld b ml, die aan a ml inlaatwater moet worden toegevoegd om eenzelfde geleidingsvermogen te verkrijgen als tijdens het injecteren. Het inlaatdebiet kan nu worden berekend met de formule:

$$Q = 0{,}91y \frac{a}{1000\ b} \qquad (28)$$

waarin: Q = inlaatdebiet (l/s)

De gegevens uit het ijkprogramma zijn verwerkt in tabellen, waarin het verband is aangegeven tussen het inlaatdebiet en de stand van de opening. Bij de bewerking van de aan- en afvoergegevens over de zomer van 1988 bleek dat niet alleen de stand van de opening van de inlaatduiker van invloed is op het inlaatdebiet, maar tevens het bovenpeil of het drukverschil. Om deze reden zijn vanaf het voorjaar van 1989 gedurende het zomerhalfjaar bij alle inlaatduikers wekelijks metingen uitgevoerd. Uit deze metingen bleek dat de beschikbare tabel voor het proefgebied 't Haantje voor met name de grootste standen van opening een aanmerkelijk hoger debiet aangeeft dan is gemeten (fig. 8). De getrokken lijnen zijn afgeleid uit de tabel van het waterschap.

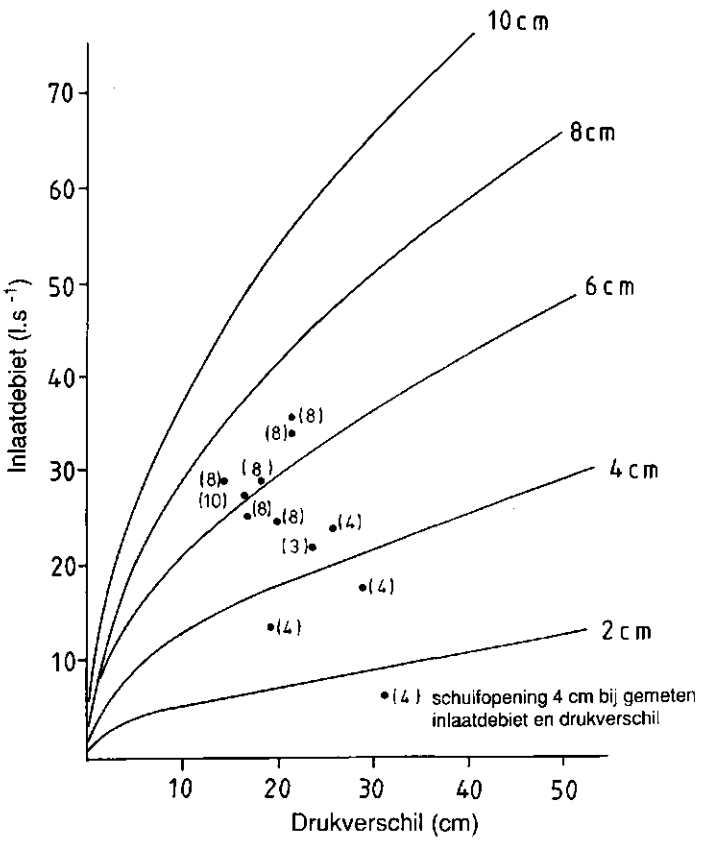


Fig. 8 Het verband tussen inlaatdebiet en drukverschil bij verschillende schuifopeningen voor proefgebied 't Haantje

De afwijkingen kunnen oplopen tot globaal 20 l/s. Dit heeft aanleiding gegeven om de injectiemethode te toetsen. Voor het proefgebied is het inlaatdebiet achtereenvolgens bepaald met de injectiemethode en uit een stroomsnelheidsmeting in combinatie met een opname van de natte doorsnede van de duiker. Om een gemiddelde waarde voor de stroomsnelheid in de duiker te verkrijgen is het doorstroomde oppervlak opgedeeld in segmenten, waarin met een Ott-molen de stroomsnelheid is gemeten. Uit de injectiemethode en de meer traditionele meting van het debiet werden voor de aanvoer waarden verkregen van 24,6 en 27,1 l/s. Als conclusie volgt hieruit dat de injectiemethode bruikbaar is om de ingelaten hoeveelheden te meten.

Door de frequent uitgevoerde metingen in de zomer van 1989 aan de inlaatduikers kon tevens de invloed van het bovenpeil of het drukverschil in de eerder genoemde tabellen worden verwerkt. In fig. 9 is voor het proefgebied Uffelte het verband tussen inlaatdebiet en bovenpeil bij een bepaalde schuifstand weergegeven. De constructie van het inlaatwerk is bepalend of het drukverschil of het bovenpeil van invloed is op het inlaatdebiet. Voor de proefgebieden Beilen en Uffelte is dit overwegend het bovenpeil en voor 't Haantje en Noordsche Schut het drukverschil.

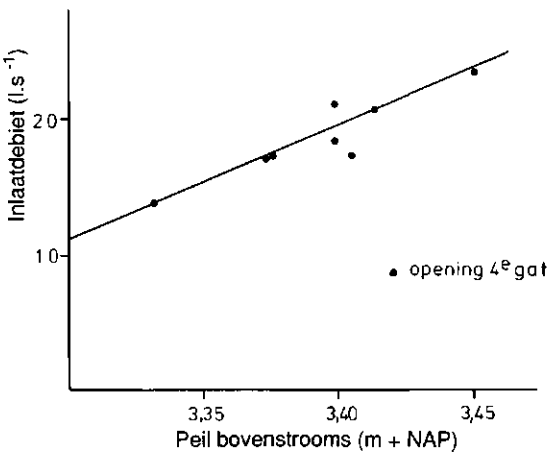


Fig. 9 Het verband tussen inlaatdebiet en peil bovenstrooms bij een constante schuifopening voor Uffelte

Voor de overige proefgebieden zijn eveneens dergelijke relaties verkregen, maar voor het proefgebied Nijeveen was deze minder duidelijk. De metingen hebben verder aangetoond dat sommige meetpunten gevoelig zijn voor verstopping; in dit verband is een regelmatige controle gewenst. Daarnaast zijn met name bij grote openingen van de schuif in een aantal proefgebieden de openingen minder groot dan wordt verondersteld. Daar voor het bovenpeil in sommige proefgebieden dagelijks gegevens beschikbaar waren, was het mogelijk om met de verkregen relaties de ingelaten debieten op dagbasis vast te stellen voor de gehele onderzoeksperiode. Voor de overige proefgebieden is hiervoor een lineaire interpolatie toegepast tussen de verkregen waarden uit het meetprogramma. In paragraaf 6.2.3 zal nader worden ingegaan op de wateraanvoer in relatie met de afvoer en andere relevante factoren.

6.2.3 Controlebewerking debieten

Bij de verzameling van de veldgegevens is reeds een beperkte controle ingebouwd, toch kunnen factoren (paragraaf 6.2.1 en 6.2.2) en de eerste bewerkingen leiden tot onjuiste waarden in het gegevensbestand. Voor een signalering hiervan zijn controlebewerkingen uitgevoerd en wel allereerst voor de afvoergegevens. De invloed van de eventuele aanvoer op deze gegevens is beperkt, omdat in de periode dat water wordt ingelaten geen of weinig afvoer plaatsvindt. In verband met de opzet van het onderzoek zijn de proefgebieden ingedeeld in twee groepen (tabel 1):
- de proefgebieden 1 t/m 9;
- de proefgebieden 10 t/m 19.

De controlebewerkingen voor de twee groepen van proefgebieden omvatten:
- een visuele controle;
- een statistische bewerking.

Bij de visuele controle zijn grafische plots van de meetreeksen op dagbasis vervaardigd. Deze zijn zowel onderling met elkaar vergeleken als met meetreeksen van de neerslag en/of het neerslagoverschot. Bij deze controle worden alleen extreem afwijkende waarden gesignaleerd.

Bij de statistische bewerking zijn proefgebieden geselecteerd, waarvoor tussen de afvoeren een hoge correlatie aanwezig is. Voor deze proefgebieden is vervolgens de gemeten afvoer vergeleken met een berekende afvoer op grond van vastgestelde correlatie (fig. 10).

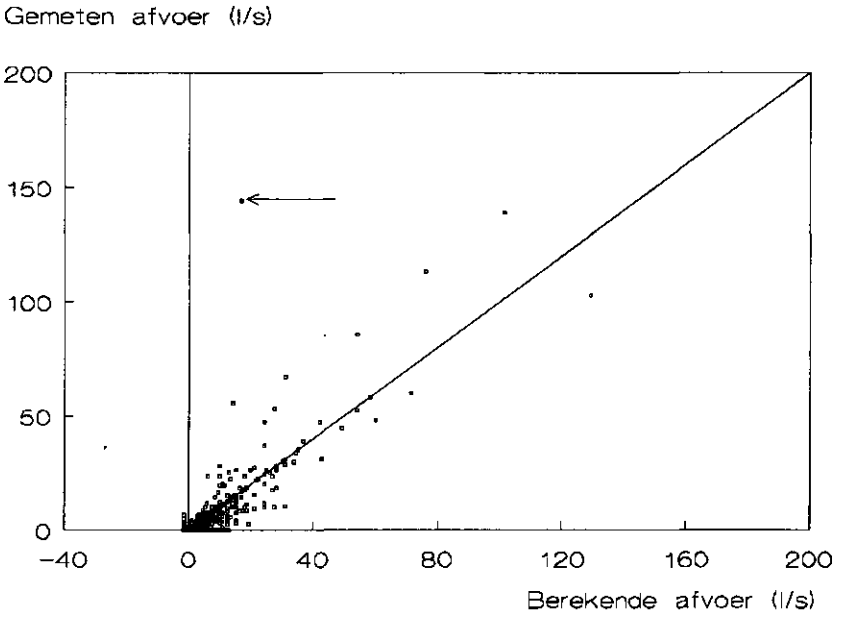


Fig. 10 Vergelijking van de gemeten afvoer voor Noordsche Schut met de berekende afvoer op grond van een correlatie met de gemeten afvoer voor Geesbrug

Voor afwijkende waarden buiten een bepaald spreidingsgebied zijn alle betreffende veldgegevens nogmaals kritisch beschouwd en zijn de waarden eventueel aangepast volgens de verkregen regressievergelijking. De gemarkeerde waarde in fig. 10 is het gevolg van een kortstondig verstopte duiker voor de afvoerstuw in het proefgebied Geesbrug.

De gecontroleerde afvoergegevens op dagbasis zijn voor de twee groepen van proefgebieden verwerkt tot maandgemiddelden en samengevat in de tabellen 5 en 6.

Tabel 5 Gemiddelde maandafvoeren (l/s) van de proefgebieden 1 t/m 9

Maand	Beilen (1)	Daler-veen (2)	Eelde (3)	Gees-brug (4)	't Haantje (5)	Noords. Schut (6)	Nije-veen (7)	Uffel-te (8)	Zwig-gelte (9)
juni '88	11,0	11,6	17,0	0,2	6,1	0,9	2,6	18,3	11,1
juli	24,4	40,8	40,2	15,2	6,4	8,5	55,2	25,8	18,7
aug.	19,6	23,1	31,2	13,3	4,0	2,4	28,6	15,5	20,8
sep.	10,7	32,0	35,5	13,7	9,5	4,3	28,8	4,0	14,7
okt.	22,4	34,5	51,7	23,9	30,3	20,4	50,8	10,6	37,0
nov.	3,4	33,6	35,5	13,7	33,0	4,0	16,7	3,1	13,9
dec.	13,0	58,8	61,6	39,2	82,1	24,4	55,1	12,9	36,2
jan. '89	3,5	30,1	35,1	16,1	30,8	8,5	29,4	3,3	18,0
feb.	3,9	35,4	39,7	23,3	28,8	11,4	27,4	1,9	17,1
maart	11,3	48,9	64,6	42,2	49,5	24,9	44,3	9,2	35,1
april	2,9	25,9	35,7	13,2	19,5	4,0	26,2	3,3	14,9
mei	6,9	14,3	18,4	2,3	10,2	0,4	7,3	9,5	9,5
juni	10,4	11,4	12,4	4,3	6,2	0,2	11,4	16,6	11,2
juli	10,5	10,1	10,4	0,0	14,3	0,1	4,9	17,1	11,5
aug.	7,4	5,4	7,3	0,8	11,0	0,0	6,7	21,7	19,1
sep.	5,5	10,0	5,8	4,5	9,2	0,0	9,7	19,3	11,0
okt.	3,0	10,4	7,9	1,2	0,0	0,0	19,0	17,2	7,4

Tabel 6 Gemiddelde maandafvoeren (l/s) van de proefgebieden 10 t/m 19

Maand	Ande-ren	Bor-ger	Bruns-ting	Gie-ten	Gieter-veen	Noord-Sleen	Smil-de	Tynaar-lo	Veen-huizen	Wijs-ter
dec. '88	13,7	31,5	14,7	89,9	19,7	36,9	51,7	38,9	28,5	52,2
jan. '89	4,7	20,8	10,1	59,9	7,2	27,7	33,4	22,7	9,6	34,1
feb.	5,4	20,1	8,6	67,3	7,0	22,4	33,8	23,7	12,3	33,6
mrt.	15,9	32,9	16,9	113,5	21,8	46,2	55,9	41,0	32,4	67,0
apr.	6,3	25,6	8,3	60,4	8,8	29,7	31,1	29,9	11,6	25,6
1-15 mei	2,7	12,8	2,8	44,5	2,9	16,6	15,5	9,5	4,2	11,6

Voor representatieve proefgebieden per groep zijn de afvoeren op dagbasis tevens in grafische plots weergegeven (fig. 11 en 12).

De afvoeren in fig. 11 en 12 zijn uitgedrukt in mm/d, waardoor een onderlinge vergelijking in de hydrologische situatie wordt bevorderd. De hogere afvoeren voor de proefgebieden Dalerveen en Gieten worden toegeschreven aan het voorkomen van kwel van betekenis (par. 7.1 en 8.2.1). Hoge piekafvoeren in de orde van 10 mm/d kunnen

voorkomen (hoofdstuk 8). In het proefgebied Gieten kan aanvoer plaatsvinden vanuit een bovenliggend stroomgebied; dit leidt tot een extreem hoge waarde in maart 1989.

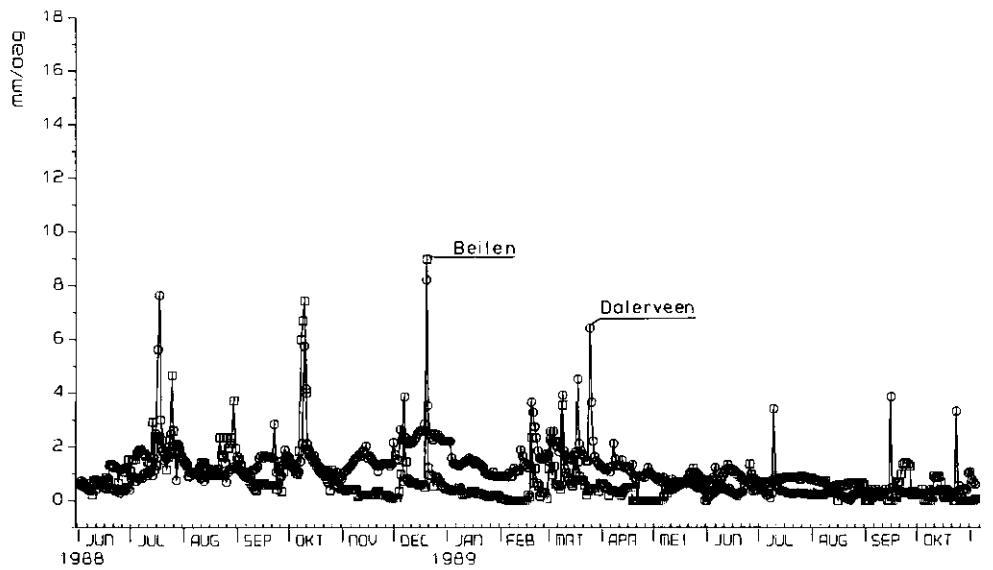


Fig. 11 Gemeten afvoeren voor de proefgebieden Beilen en Dalerveen

De aanvoergegevens zijn alleen gecontroleerd voor de proefgebieden 1 t/m 9. Allereerst heeft een visuele controle plaatsgevonden met grafische plots van de meetreeksen. De periode met wateraanvoer is vervolgens op grond van peilfluctuaties en de grondwatersituatie opgedeeld in tijdvakken. Voor elk tijdvak en per proefgebied is voor de wateroppervlakte van de sloot een waterbalans opgesteld met als restterm de interactie tussen het oppervlaktewater en het grondwater. De intensiteit van de interactie is vervolgens per tijdvak getoetst aan het verschil tussen het peil in de waterloop, en de grondwaterstand en stijghoogte in de omgeving van de waterloop. Hierbij bleek dat het interactieproces in enkele proefgebieden een gecompliceerd karakter heeft. In hetzelfde tijdvak kan namelijk tegelijkertijd drainage naar en infiltratie vanuit de waterlopen voorkomen. Deze situatie doet zich met name voor in wegzijgingsgebieden met een slecht doorlatende laag ter hoogte van de slootbodem (voedingstype A2). Bij neerslag stijgt de grondwaterstand boven slootpeil en dit leidt vooral bij gedraineerde percelen tot afvoer; in de filters van de boring bij de waterloop is op dat moment een stijghoogte aanwezig die beneden het slootpeil ligt en dit leidt tot infiltratie. Bovengenoemd verschijnsel zal bij de processen onder de waterloop, (paragraaf 7.1) worden behandeld. Bij de toetsing van de aanvoergegevens in deze fase heeft alleen een visuele controle plaatsgevonden met grafische plots. In tabel 7 zijn de aanvoeren weergegeven.

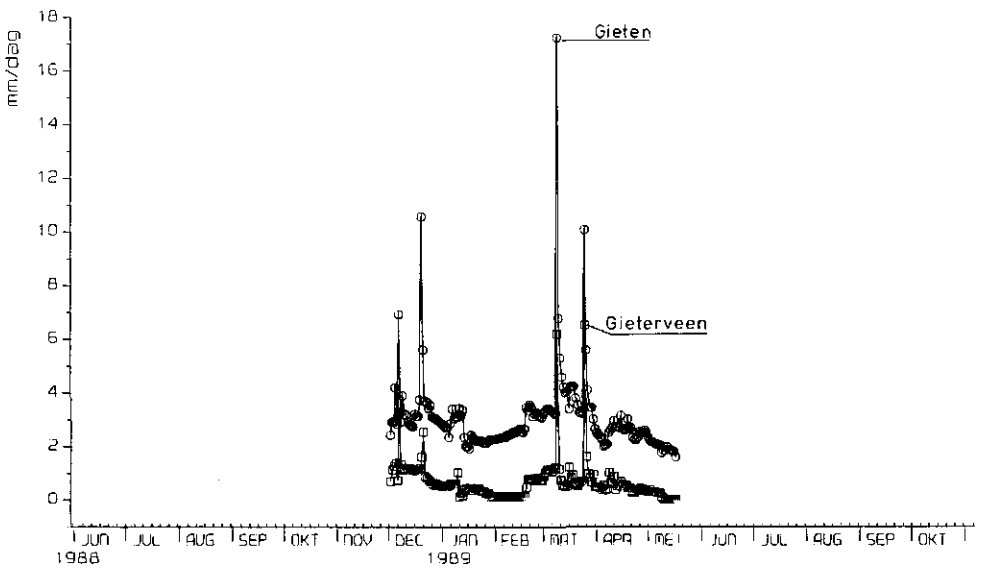


Fig. 12 Gemeten afvoeren voor de proefgebieden Gieten en Gieterveen

Tabel 7 Gemiddelde maandaanvoeren (l/s) van de proefgebieden 1 t/m 9

Maand	Beilen (1)	Daler-veen (2)	Eelde (3)	Gees-brug (4)	't Haantje (5)	Noords. Schut (6)	Nije-veen (7)	Uffel-te (8)	Zwig-gelte (9)
juni '88	15,6	0,0	8,6	1,9	16,9	2,6	7,1	22,1	7,9
juli	23,8	0,0	22,2	0,2	3,7	0,3	1,2	29,7	7,8
aug.	13,5	0,0	23,1	0,0	0,0	1,1	0,0	10,7	6,8
sep.	11,9	0,0	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3
okt.	0,0	0,0	12,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1
nov.	0,0	0,0	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
dec.	0,0	0,0	14,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,1
jan. '89	0,0	0,0	12,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8
feb.	0,0	0,0	15,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
maart	0,0	0,0	16,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,2
april	0,0	0,0	16,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
mei	4,5	0,2	12,5	3,6	7,0	3,4	2,3	10,5	1,4
juni	14,0	4,1	6,9	4,1	18,0	2,8	6,1	15,5	4,3
juli	16,2	0,0	7,6	7,0	24,6	5,2	7,2	17,0	9,0
aug.	9,5	0,0	3,5	5,2	29,7	4,3	4,9	18,6	18,0
sep.	9,1	0,0	1,9	1,8	21,3	2,2	0,0	21,0	13,5
okt.	8,9	0,0	4,3	0,0	3,8	3,3	0,0	10,1	5,9

In fig. 13 zijn voor twee proefgebieden met mogelijkheden voor wateraanvoer gemiddelde weekwaarden voor de netto-afvoer afgebeeld. Hiermee wordt aangegeven de eventuele afvoer uit een proefgebied verminderd met de eventuele aanvoer naar dat proefgebied. Voor Dalerveen (kwelgebied) wordt in de gehele onderzoeksperiode een netto-afvoer aangetroffen. Voor Beilen (wegzijgingsgebied) ligt de netto-afvoer in het algemeen op een lager niveau en wordt in de zomer zelfs negatief, met name in de zomer van 1989.

In tabel 8 zijn maandgemiddelden voor de netto-afvoer voor de eerste negen proefgebieden weergegeven. De negatieve waarden duiden op infiltratie, de positieve op drainage. Voor Beilen, Geesbrug, 't Haantje en Noordsche Schut vindt in de zomer van 1989 over een lange periode infiltratie plaats. In de proefgebieden Dalerveen en Eelde komt alleen drainage voor. In de resterende proefgebieden is dit eveneens in overwegende mate het geval.

Tabel 8 Gemiddelde netto maandafvoeren (mm/d) van de proefgebieden 1 t/m 9

Maand	Beilen (1)	Daler-veen (2)	Eelde (3)	Gees-brug (4)	't Haan-tje (5)	Noords. Schut (6)	Nije-veen (7)	Uffel-te (8)	Zwig-gelte (9)
juni '88	-0,35	0,51	0,40	-0,06	-0,24	-0,11	-0,31	-0,58	0,22
juli	0,05	1,80	0,85	0,54	0,06	0,52	3,72	-0,59	0,72
aug.	0,47	1,02	0,38	0,48	0,09	0,08	1,97	0,73	0,93
sep.	-0,09	1,41	1,09	0,49	0,21	0,27	1,98	0,61	0,69
okt.	1,71	1,52	1,86	0,86	0,68	1,29	3,49	1,60	2,25
nov.	0,26	1,48	1,24	0,49	0,74	0,25	1,15	0,47	0,92
dec.	0,99	2,60	2,23	1,40	1,84	1,54	3,79	1,95	2,00
jan. '89	0,27	1,33	1,07	0,58	0,69	0,54	2,02	0,50	1,14
feb.	0,30	1,56	1,14	0,83	0,65	0,70	1,89	0,29	1,14
maart	0,86	2,16	2,28	1,51	1,11	1,57	3,05	1,39	1,99
april	0,22	1,14	0,93	0,47	0,44	0,25	1,80	0,50	0,92
mei	0,18	0,62	0,28	-0,05	0,07	-0,19	0,34	-0,05	0,54
juni	-0,28	0,32	0,26	0,01	-0,26	-0,16	0,36	0,17	0,49
juli	-0,44	0,47	0,13	-0,25	-0,23	-0,32	-0,16	0,02	0,17
aug.	-0,16	0,23	0,18	-0,16	-0,42	-0,27	0,12	0,47	0,07
sep.	-0,28	0,44	0,18	-0,10	-0,27	-0,14	0,67	-0,26	-0,17
okt.	-0,45	0,46	0,17	0,04	-0,09	-0,21	1,31	1,07	0,10

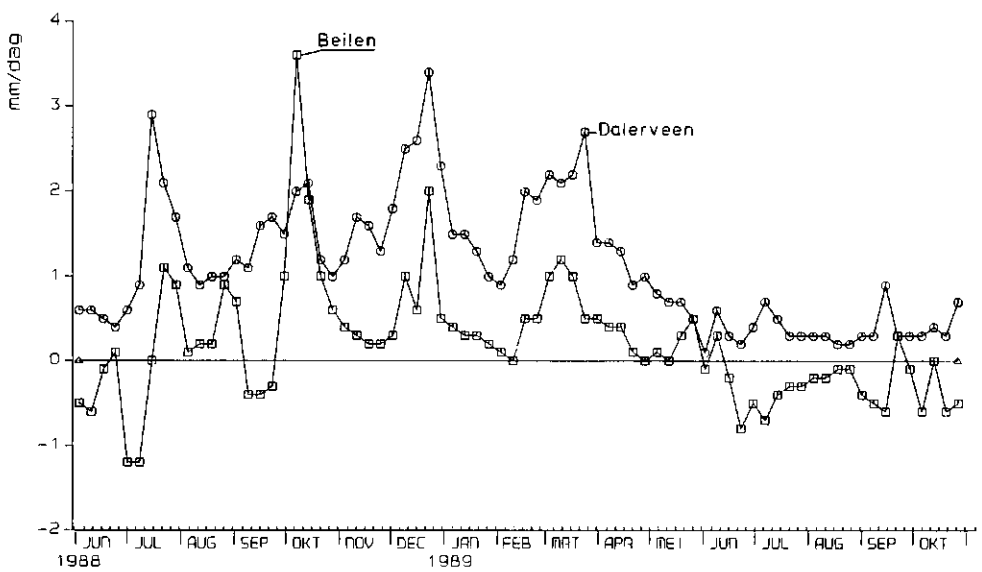


Fig. 13 De netto-afvoer voor de proefgebieden Beilen en Dalerveen

In tabel 9 zijn maandgemiddelden voor de netto-afvoer weergegeven van de proefgebieden waar het onderzoek alleen is geconcentreerd op de bepaling van voedings- en drainageweerstanden.

Tabel 9 Gemiddelde netto maandafvoeren (mm/d) van de proefgebieden 10 t/m 19

Maand	Anderen (10)	Borger (11)	Brunsting (12)	Gieten (13)	Gieterveen (14)	Noord-Sleen (15)	Smilde (16)	Tynaarlo (17)	Veenhuizen (18)	Wijster (19)
dec. '88	0,81	2,97	1,68	3,23	1,10	1,96	2,06	1,44	1,63	1,54
jan. '89	0,28	1,96	1,16	2,15	0,40	1,47	1,33	0,84	0,55	1,01
feb.	0,32	1,90	0,98	2,42	0,39	1,19	1,35	0,88	0,70	0,99
mrt.	0,94	3,11	1,93	4,08	1,22	2,47	2,23	1,52	1,85	1,98
apr.	0,37	2,42	0,99	2,17	0,49	1,58	1,24	1,11	0,66	0,76
1-15 mei	0,16	1,21	0,32	1,60	0,16	0,88	0,62	0,35	0,24	0,34

6.3 Grondwaterstanden en stijghoogten

Om inzicht in de hydrologische processen nabij waterlopen te verkrijgen dient informatie te worden verzameld over stijghoogten en grondwaterstanden. In samenhang met het open waterpeil vindt een directe indicatie over het voorkomen van kwel of wegzijging plaats en over drainage of infiltratie. In alle proefgebieden met wateraanvoer is daartoe een boring uitgevoerd op een afstand van globaal 3 m van de hoofdwaterloop en in het centrum van het proefgebied. Voor Beilen is geboord tot een diepte van 15 m - mv. en voor de overige proefgebieden tot 18 m - mv.

In de boringen zijn filters gesteld met een lengte van 0,50 m en een diameter van 1,6 cm. De onderkant van de filters bevindt zich op 3, 6, 9, 12, 15 en 18 m - mv. De boringen zijn uitgevoerd in de periode mei t/m juli 1988. De filters zijn vervolgens gepeild met veelal een wekelijkse frequentie.

In fig. 14 is voor Zwiggelte het verloop van de stijghoogte in de filters (B1 t/m B6) en het peil in de waterloop (SL) weergegeven. Het filter B1 heeft betrekking op de stijghoogte in het diepste filter (18 m - mv.) en het filter B6 op het ondiepste filter (3 m - mv.). Vanaf het begin van de onderzoeksperiode tot juli 1989 is de stijghoogte in de filters boven het slootpeil gelegen, wat op een kwelsituatie duidt. Vanaf juli 1989 ligt de stijghoogte beneden slootpeil, waardoor een overgang naar een wegzijgingssituatie is ontstaan. Deze verandering geldt ter plaatse van de boring; volgens tabel 8 vindt voor het gehele proefgebied nog afvoer plaats.

In hoofdstuk 5 is reeds aangegeven dat in de proefgebieden met wateraanvoer ter plaatse van de boring in een raai loodrecht op de waterloop grondwaterstandsbuizen zijn geplaatst. Daarnaast zijn in alle proefgebieden circa 10 grondwaterstandsbuizen geplaatst om informatie over de grondwatersituatie voor het gehele proefgebied te verkrijgen.

In fig. 15 zijn voor Noordsche Schut het verloop van de grondwaterstand (filters 1,0 tot 1,5 m - mv.) en de stijghoogte (filters 2,5 tot 3,0 m - mv.) voor de raai loodrecht op de waterloop in tijdvak 5 (zie aanhangsel 2) weergegeven.

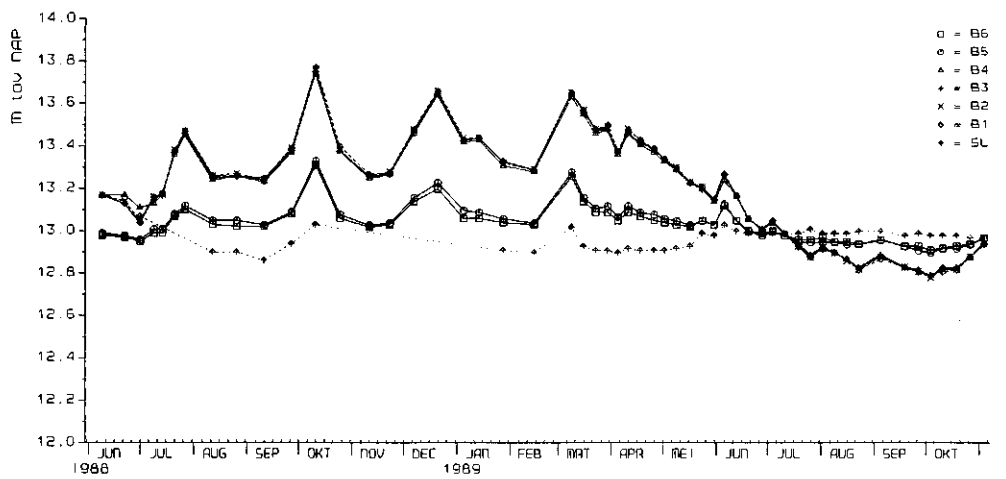


Fig. 14 Gemeten stijghoogten (boring naast waterloop) en slootpeil voor het proefgebied Zwiggelte

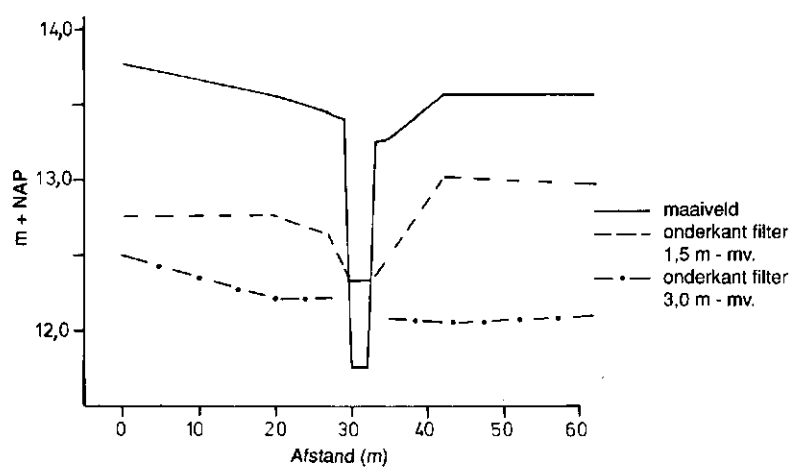


Fig. 15 Het verloop van de grondwaterstand en stijghoogte in een raai loodrecht op de waterloop voor Noordsche Schut

In de figuur is tevens het peil in de waterloop aangegeven. De grondwaterstand ligt boven het slootpeil wat duidt op drainage naar de waterloop. De stijghoogte in de filters op 3 m - mv. ligt lager dan het slootpeil wat aangeeft dat tegelijkertijd vanuit de waterloop infiltratie optreedt naar de ondergrond. Het relatief grote verschil tussen grondwaterstand en stijghoogte wijst op een weerstandbiedende laag met een relatief hoge c-waarde. Dit wordt bevestigd door een uitgevoerde pompproef (paragraaf 6.6.2).

In fig. 16 zijn voor Eelde het verloop van de grondwaterstand en de stijghoogte voor tijdvak 4 en 9 weergegeven (zie aanhangsel 2). In tijdvak 4 liggen zowel de grondwater-

stand als stijghoogte boven het peil in de waterloop wat aangeeft dat drainage naar de waterloop plaatsvindt. De stijghoogte in de filters op 3 m - mv. ligt in tijdvak 4 boven de grondwaterstand met extreme waarden in de naaste omgeving van de waterloop. Dit kan duiden op een relatief hoge waarde voor de radiale (bodem)weerstand. Vanaf tijdvak 4 tot 9 vindt een uitzakkingsproces van de grondwaterstand plaats, zodat in tijdvak 9 de verschillen tussen grondwaterstand en stijghoogte minimaal zijn en deze praktisch gelijk zijn aan het slootpeil. Uit aanhangsel 2 volgt dat dan de stroming door de slootbodem gelijk nul is.

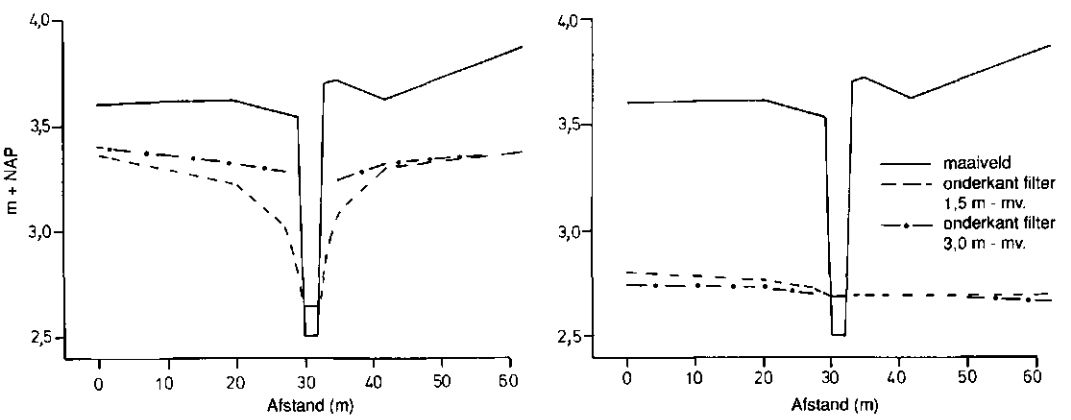


Fig. 16 Het verloop van de grondwaterstand en stijghoogte in een raai loodrecht op de waterloop in twee tijdvakken voor proefgebied Eelde

6.4 Eigenschappen waterlopen

In de winter van 1988/89 zijn in de proefgebieden de watervoerende waterlopen geïnventariseerd. Naast de waterlopen, bij het waterschap in beheer, zijn hierbij tevens kavelsloten en greppels betrokken voor zover deze water bevatten. De dimensies van de waterlopen zijn opgemeten, waarna deze vervolgens qua diepte en breedte zijn ingedeeld in klassen. Hierbij is dezelfde klasse-indeling gehanteerd als in het Grondwaterplan, alleen zijn voor de kleinere waterlopen twee klassen toegevoegd (tabel 10).

Tabel 10 Klasse-indeling waterlopen

Klasse	Natte omtrek (B) (m)	B gemiddeld (m)	Waterdiepte gemiddeld (m)	Bodemligging gemiddeld (m - mv.)
0	0 - 0,5	(0,4)	(0,03)	(1,1)
01	0,5 - 1	(0,7)	(0,08)	(1,2)
1	1 - 3	2 (1,7)	0,5 (0,21)	1,3 (1,3)
2	3 - 5	4 (3,7)	1,0 (0,48)	1,7 (1,5)
3	5 - 8	6,5 (5,7)	1,5 (0,60)	2,1 (1,4)
4	8 -12	10	2,0	2,5

(0,4) waarde uit veldopname

Voor elke klasse is per proefgebied de lengte van de betreffende waterloop bepaald. Uit het oppervlak van de proefgebieden volgt vervolgens de dichtheid; de reciproke waarde hiervan levert de effectieve afstand L_e van de waterlopen. Daarnaast is per klasse een waarde opgemeten voor de natte omtrek, de gemiddelde waterdiepte en de bodemligging beneden maaiveld. In proefgebieden met drainage is het percentage oppervlak hiervan aangegeven alsmede de drainafstand en draindiepte. In aanhangsel 1 zijn de verzamelde gegevens samengevat. In een aantal gebieden kunnen de kavelsloten en met name de greppels in de loop van het voorjaar droogvallen. Dit leidt tot een toename van de waarde voor L_e; uit aanhangsel 1 volgt hierover indirecte informatie, indien wordt verondersteld dat een klasse afvalt, wanneer de grondwaterstand ongeveer 5 tot 10 cm boven de bodem van de waterloop in de betreffende klasse ligt.

Voor de naderhand uit te voeren berekeningen is het verband vastgesteld tussen de grondwaterdiepte en een factor γ. Deze factor geeft de verhouding weer tussen het oppervlak van het proefgebied en het slootoppervlak binnen het proefgebied. In fig. 17 is het verband weergegeven voor drie proefgebieden.

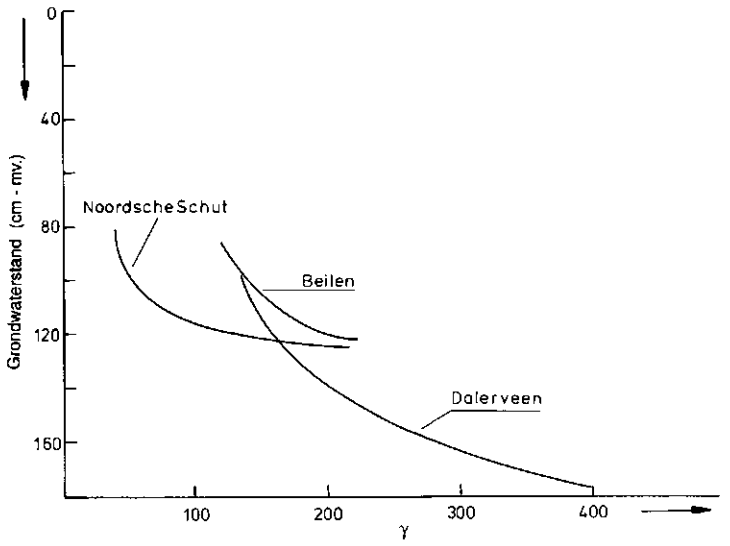


Fig. 17 Het verband tussen de grondwaterstandsdiepte en de factor γ

6.5 Bodemweerstanden

In de omgeving van waterlopen ondervindt de grondwaterstroming een bepaalde weerstand, die kan worden toegeschreven aan een radiale component, de hydrologische parameters van de lagen onder de waterlopen en eventueel de in- of uittredeweerstand van een gesedimenteerde laag op de bodem van de waterlopen. Bij met name infiltratie kan de weerstand van laatstgenoemde laag van betekenis zijn; voor het proefgebied 't Haantje wordt volgens mededeling van het Waterschap Loo- en Drostendiep in beperkte mate gebaggerd, omdat hierna de infiltratie naar de ondergrond merkbaar toeneemt.

In de formules van Ernst wordt de radiale weerstand en de in- of uittredeweerstand apart beschouwd. In de formules van Bruggeman zijn beide weerstanden opgenomen in de bodemweerstand. Informatie over deze weerstanden zijn op de volgende wijze bepaald of afgeleid:
- infiltratieproeven;
- grondwaterstanden en afvoeren.

6.5.1 Infiltratieproeven

In vijf proefgebieden zijn in de hoofdwaterloop infiltratieproeven uitgevoerd; waarbij een metalen cylinder met een oppervlak van 0,785 m^2 is in de slootbodem gedrukt. De gemiddelde diepte varieerde van 0,30 tot 0,44 m (fig. 18).

Aan de buitenkant van de cylinder bevinden zich om de 10 cm peilfilters om de potentiaal van de grondlagen binnen de cylinder over de diepte te meten, beginnend op het niveau van de onderkant van de cylinder. Naast de cylinder is een apart filter geplaatst ter hoogte van de onderkant. Verder bevond zich in de cylinder een vlotter om het peil te registreren. Bij aanvang van de proef wordt de waterstand binnen de cylinder op hetzelfde niveau gebracht als daarbuiten met een hevel. De daling van de waterspiegel binnen de cylinder wordt vervolgens gemeten over een gering traject, zodat de omstandigheden binnen en buiten de cylinder weinig verschillen. Tegelijkertijd

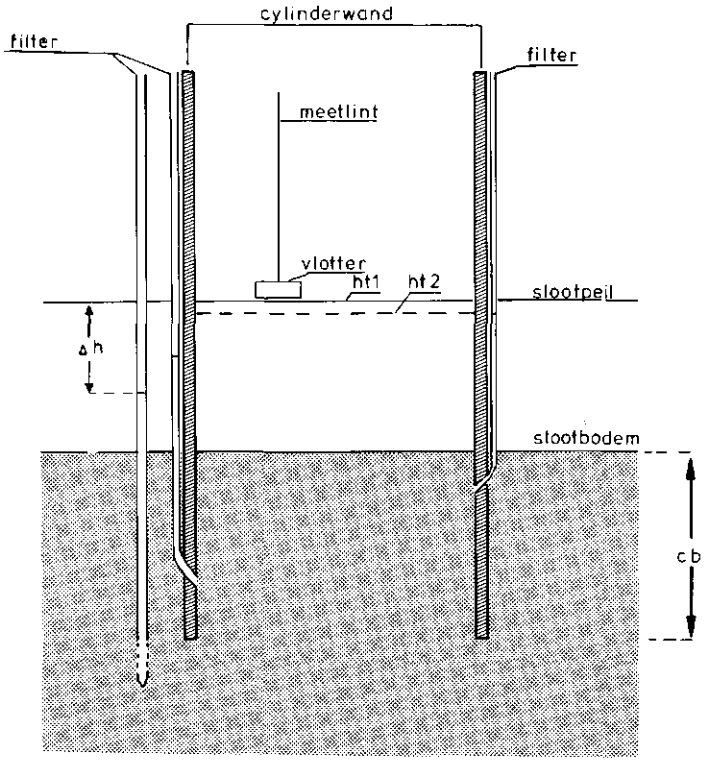


Fig. 18 Schematische voorstelling van de infiltratieproef

is de stijghoogte in de peilfilters regelmatig opgenomen. Uit de daling van de waterspiegel (h_{t1}-h_{t2}) in de cylinder in de tijd (t_2-t_1) en de gemeten stijghoogten kan de doorlatendheid van de lagen tussen de peilfilters worden berekend. De resultaten van de metingen staan weergegeven in tabel 11.

Tabel 11 Resultaten van metingen met cylinder

Nr.	Proefgebied	Infiltratie (mm/d)	Lengte (cm)	Drukverschil (cm)	Bodemweerstand (cb) (d)	Verticale doorlatendheid (k_v) (cm/d)
1	Beilen	6	42	4,4	7,4	5,7
4	Geesbrug	70	38	16,1	2,3	16,5
5	't Haantje	25	36	12,7	5,1	7,1
6	Noordsche Schut	26	30	14,7	5,7	5,3
8	Uffelte	1	44	0,75	7,5	5,9

De locatie van de infiltratieproeven te Beilen, 't Haantje en Uffelte is buiten de raai met peilbuizen gelegen. Bij alle proeven is infiltratie gemeten wat overeenkomt met aanhangsel 2. Voor Noordsche Schut wordt naderhand in tabel 18 het resultaat van de infiltratieproef vergeleken met de waarde voor de infiltratie uit debietmetingen.

6.5.2 Grondwaterstanden en afvoeren

Uit het verloop van de grondwaterstand loodrecht op een sloot is op grafische wijze het drukverschil tengevolge van de (sloot)bodemweerstand of de radiale weerstand af te leiden. Voor de winter 1988/89 zijn voor de raaien in de proefgebieden gemiddelde waarden bepaald van het grondwaterstandsverloop nabij de waterlopen en het gemiddeld peil daarin. Het verloop van de grondwaterspiegel naar een volkomen waterloop is parabolisch. Dit is echter zelden het geval, hierdoor ontstaat dan in de omgeving van de waterloop een afwijking van het parabolisch verloop als gevolg van een radiale stroming en een eventuele uittredeweerstand. De werkwijze voor de bepaling van het drukverschil tengevolge van de slootbodemweerstand is als volgt: op basis van het grondwaterstandsverloop tussen 3 en 30 m tot de sloot wordt het parabolisch verloop van de grondwaterstand tot het midden van de sloot geconstrueerd (fig. 19). Uit het geconstrueerde verloop en het slootwaterpeil wordt het drukverschil (h_{rad}) bepaald.

Om de flux q_b te bepalen door de slootbodem is de totale gebiedsafvoer q vermenigvuldigd met een factor γ die de verhouding aangeeft tussen de oppervlakte van het proefgebied en de totale natte oppervlakte van alle sloten binnen het proefgebied. De verhouding tussen drukverschil (h_{rad}) en de waarde voor de flux (q_b) geeft vervolgens een waarde voor de bodemweerstand (c_b). De bepaalde waarden voor c_b staan vermeld in tabel 12.

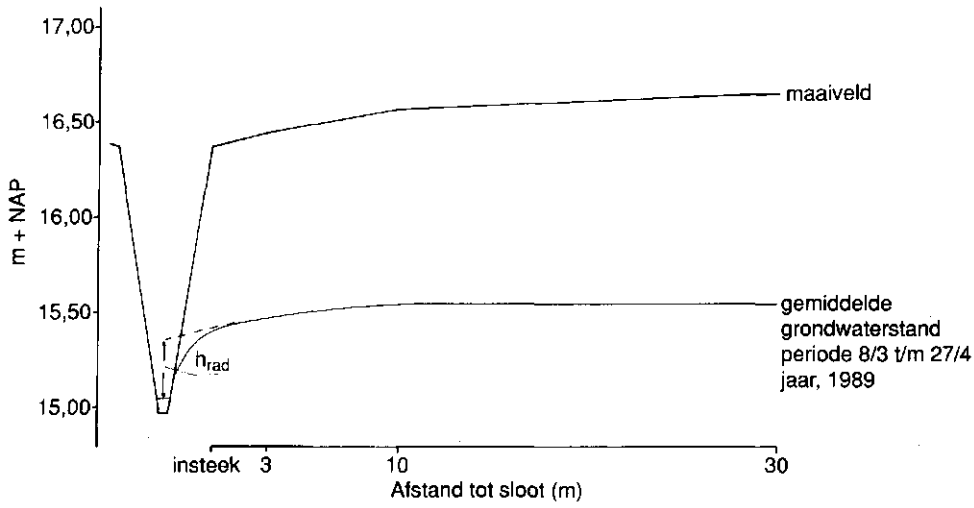


Fig. 19 Het gemiddeld verloop van de grondwaterstand in een raai loodrecht op een waterloop (proefgebied Noord-Sleen)

Tabel 12 Bodemweerstanden en drukverschillen, afgeleid uit grondwaterstanden en afvoeren

Nr.	Proefgebied	Flux	Factor	Flux	Hoofdsloot		Zijsloot	
					druk-verschil	bodem-weerstand	druk-verschil	bodem-weerstand
		q (mm/d)	γ	q_b (mm/d)	h_{rad} (m)	c_b (d)	h_{rad} (m)	c_b (d)
1	Beilen	0,333	134	44,5	0,08	1,8	-	-
2	Dalerveen	1,194	133	158,4	0,45	2,8	-	-
3	Eelde	0,883	159	140,4	0,37	2,6	-	-
4	Geesbrug	0,477	114	54,4	0,16	2,9	-	-
5	't Haantje	0,427	309	131,8	0,07	0,5	-	-
6	Noordsche Schut	0,313	39	12,1	1,00	82,6	-	-
7	Nijeveen	1,170	31	36,8	0,03	0,8	0,07	1,9
8	Uffelte	1,257	187	234,5	- -	-	-	
9	Zwiggelte	1,011	166	167,9	0,10	0,6	-	-
10	Anderen	0,433	602	260,8	0,25	1,0	-	-
11	Borger	2,550	113	289,1	0,11	0,4	0,09	0,3
12	Brunsting	1,355	109	148,1	0,08	0,3	0,01	0,1
13	Gieten	2,613	149	388,3	0,72	1,9	0,84	2,2
14	Gieterveen	0,624	267	166,8	0,11	0,7	-	-
15	Noord-Sleen	1,780	270	481,1	0,26	0,5	-	-
16	Smilde	1,631	75	122,2	0,57	4,7	0,32	2,6
17	Tynaarlo	0,932	278	258,9	0,21	0,8	0,05	0,2
18	Veenhuizen	0,595	159	94,4	0,27	2,9	0,29	3,1
19	Wijster	1,128	189	213,6	0,27	1,3	0,51	2,4

Bij de berekening van de bodemweerstand in tabel 12 is geen rekening gehouden met de invloed van eventuele drainage. Deze invloed manifesteert zich in een lagere waarde voor q_b en dientengevolge in een hogere waarde voor c_b. Dit aspect doet zich met name voor in de proefgebieden Dalerveen, Geesbrug, Zwiggelte en Gieten, waar 20 tot 45%

van de oppervlakte is gedraineerd (aanhangsel 1). Een benadering voor de bodemweerstand in deze gebieden kan worden verkregen door de waarde voor c_b in tabel 12 te verhogen met het percentage gedraineerde oppervlakte.

Voor de proefgebieden met voedingstypen A2 (Geesbrug, Noordsche Schut, Uffelte en Veenhuizen) kan de methode te hoge waarden voor c_b opleveren, indien de slecht doorlatende laag boven slootbodem een relatief hoge weerstand heeft. Dit is het geval voor het proefgebied Noordsche Schut. In de vier genoemde proefgebieden zal c_b kleiner dan of gelijk zijn aan de vermelde waarde in tabel 12. Daar in het proefgebied Geesbrug 35% is gedraineerd, dient hier rekening te worden gehouden met twee tegengestelde effecten.

Op grond van de profielopbouw onder slootbodem in fig. 1 zijn de voedingstypen A1, A2 en B samengevoegd en evenzo C1 en C2. Voor een toekenning van een voedingstype aan de hoofdwaterlopen wordt verwezen naar tabel 23. Indien rekening wordt gehouden met de eerdergenoemde invloed van drainage blijkt uit tabel 12 dat de bodemweerstand voor de voedingstypen A1 en B varieert van 0,3 tot 4,7 d en voor C2 van 1,3 tot 4,1 d. De gemiddelde waarde is respectievelijk 0,7 en 2,1 d.

In het Grondwaterplan, deel III (1985) is voor de voedingstypen A1, A2, B en C2 een bodemweerstand aangehouden van 2 d. Een vergelijking met de bodemweerstanden uit de infiltratieproeven in tabel 11 geeft aan dat die waarden in het algemeen hoger zijn. Hierbij moet wel worden bedacht dat puntwaarnemingen worden vergeleken met gebiedsgemiddelden.

6.6 Hydrologische bodemconstanten

Voor de vaststelling van de voedings- en drainageweerstanden en voor de berekening van de omvang en de vorm van het infiltratielichaam is inzicht noodzakelijk in de hydrologische bodemconstanten. Gegevens hierover zijn direct dan wel indirect verkregen uit:
- boringen;
- pompproeven;
- doorlatendheidsmetingen aan ongeroerde monsters;
- stijghoogtegegevens.

6.6.1 Boringen

In de negen proefgebieden waar water kan worden aangevoerd is een boring uitgevoerd tot 18 m - mv., met uitzondering van Beilen (15 m - mv.). De boringen zijn uitgevoerd volgens de pulsboormethode, waarbij de aangeboorde bodemlagen zijn beschreven en bemonsterd. Aan de verkregen grondmonsters zijn zeefanalyses verricht voor een bepaling van de volgende parameters:

- U-cijfer: het specifiek oppervlak van de zandkorrels, die betrekking hebben op de diameter van de korrels;
- a: de sorteringsgraad of spreiding;
- b: het slibgehalte;
- c: het grindgehalte.

De doorlaatfactor is te berekenen met de relatie:

$$k = \frac{C}{U^2}.a.b.c \qquad (29)$$

In deze relatie stelt C een constante voor, afhankelijk van het poriënvolume, de vorm en de oriëntatie van de korrels. Veelal wordt een waarde van 54 000 aangehouden voor C. Voor de toepassing van de correctiefactoren a, b en c zijn tabellen gebruikt, empirisch vastgesteld door Ernst aan de hand van metingen aan monsters (De Ridder en Wit 1965). Met een computerprogramma wordt bij invoer van de correctiefactoren en de laagdikte D direct de kD-waarde verkregen (tabel 13).

Tabel 13 Doorlaatvermogen (kD) van de aangeboorde lagen bij boring Geesbrug

Laag (m -mv.)	Grond-soort	U-cijfer	Sortering	Slib gehalte (%)	k-factor (m/d)	Laag-dikte (m)	kD (m^2/d)	kD-totaal (m^2/d)
0,00- 0,60	veen							
0,60- 2,50	zand	84	71	1,3	6	1,90	11	
2,50- 4,00	zand	65	71	0,2	13	1,50	19	
4,00- 6,00	zand	77	79	0,2	11	2,00	22	
6,00- 8,00	zand	66	82	0,1	16	2,00	32	
8,00-11,00	zand	91	90	0,3	10	3,00	29	
11,00-13,50	zand	75	78	0,2	11	2,50	28	
13,50-15,50	zand	62	84	0,3	18	2,00	36	
15,50-18,00	zand	63	87	0,2	19	2,50	49	226

Kaartblad: 17G
Boring: D 41
Coördinaten: 241.090 526.030

Naast de pulsboring zijn ondiepe boringen uitgevoerd in een raai loodrecht op de sloot en verspreid over het gebied. Deze boringen, die een diepte bereiken van maximaal 3 m - mv., geven aanvullende informatie over de ondiepe ondergrond, zoals de verbreiding en dikte van bepaalde bodemlagen.

6.6.2 Pompproeven

In vier proefgebieden zijn in de periode oktober-november 1989 pompproeven uitgevoerd in het afdekkend pakket. Het pompfilter met een lengte van 3 m is afwisselend gesteld op een diepte tussen 2,5 en 7,0 m - mv. Voor het meten van de potentiaalverlaging tengevolge van de onttrekking zijn op een afstand van 1, 3 en 10 m tot de pompput twee

filters geplaatst, één ter hoogte van het midden van het pompfilter en één als landbouwbuis. Verder is vlak naast het pompfilter, en eronder een filter geplaatst.

De locatie van de pompproef is over het algemeen in de directe omgeving van de diepe boring. Gedurende een periode van drie dagen is water aan het pompfilter onttrokken. Tijdens de pompproef is het debiet gemeten en zijn de filters frequent waargenomen. Voor de filters op het niveau van het pompfilter was over het algemeen na drie dagen een stationaire situatie bereikt. In fig. 20 zijn de inrichting van de pompproef te Noordsche Schut en de eindverlagingen weergegeven.

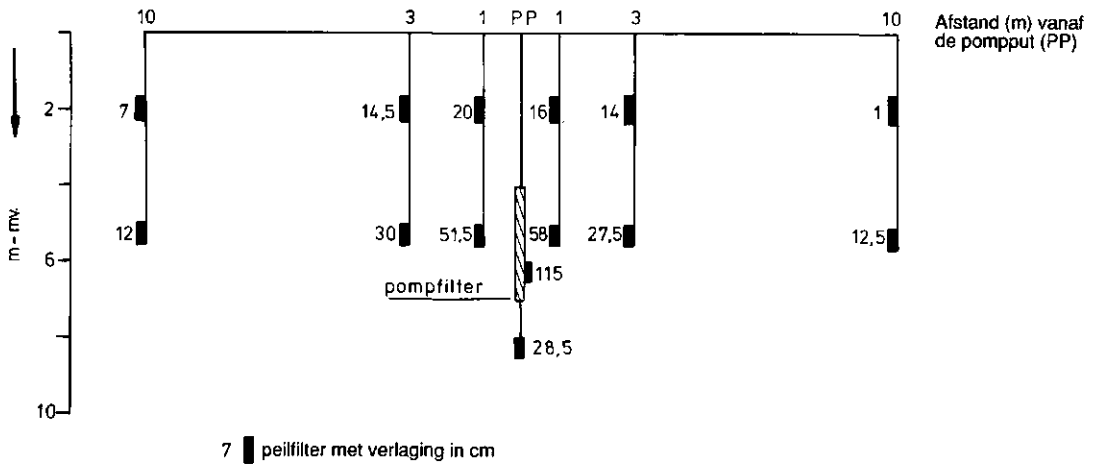


Fig. 20 Schematische voorstelling van de opzet van pompproef Noordsche Schut

In fig. 21 is de gemeten verlaging aan het eind van de pompproef in de filters ter hoogte van het midden van het pompfilter op verschillende afstanden voor het proefgebied Geesbrug met een afpompingskromme weergegeven.

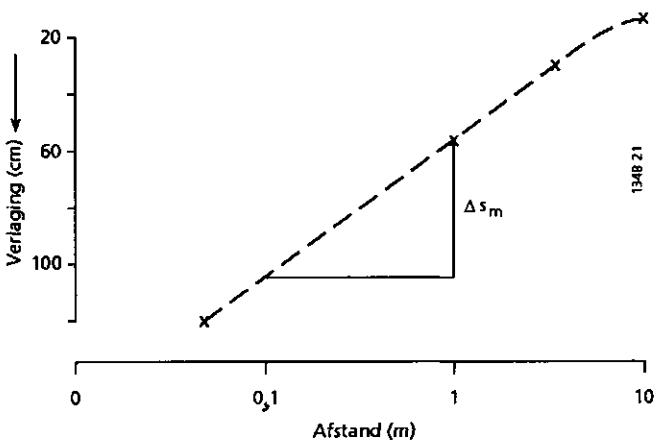


Fig. 21 Afpompingskromme van de pompproef Geesbrug

Voor de bepaling van de kD-waarde is gerekend met de formule van Thiem (Kruseman en de Ridder 1970):

$$kD = \frac{2{,}3\ Q}{2\pi\ \Delta s_m} \qquad (30)$$

waarin: k = horizontale doorlatendheid (m/d)
D = dikte watervoerende laag (m)
Q = pompdebiet (m^3/d)
Δs_m = verlaging per logschaal (m)

Vanwege de wijze van opzet van de pompproef is de toepassing van (30) alleen geoorloofd in de naaste omgeving van de pompproef. De berekende kD-waarde heeft betrekking op dezelfde laagdikte als waarin het pompfilter is gesteld. Daar D gelijk is aan de lengte van het pompfilter, wordt dus tevens een waarde voor de horizontale doorlatendheid k_h verkregen voor de laag waarin het pompfilter is gesteld.

Vervolgens zijn waterbalansen opgesteld voor de laag waarin het pompfilter is gesteld. Hierbij is het pompdebiet gebruikt, de verkregen waarde voor k_h en het verlagingspatroon in alle filters. Uit deze waterbalans is aanvullende informatie verkregen over de verticale weerstand van aangrenzende slecht doorlatende lagen en/of de horizontale doorlatendheid van zandige afzettingen. In tabel 14 zijn de verkregen waarden uit de pompproeven weergegeven.

Tabel 14 Doorlaatvermogen (kD) en horizontale doorlatendheid (k_h) uit pompproeven

Nr.	Gebied	Pompfilter (m - mv.)	kD-waarde (m^2/d)	k_h (m/d)
1	Beilen	2,5-5,5	40	13,3
4	Geesbrug	4,0-7,0	24	8
5	't Haantje	2,5-5,5	50	16,7
6	Noordsche Schut	2,5-5,5	0,14	0,05

Voor het proefgebied Geesbrug is voor de betreffende laag de doorlatendheid aanmerkelijk lager dan in tabel 13. Voor de overige boringen is eveneens de indruk verkregen dat de textuurgegevens te hoge doorlatendheden opleveren. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat een deel van de fijne fractie met het pulswater is weggespoeld.

Voor Noordsche Schut wordt een zeer lage waarde voor de doorlatendheid verkregen. Dit leidt tot een zeer hoge drainageweerstand bij een bepaalde grondwaterstand zoals in paragraaf 8.2.2 zal blijken.

6.6.3 Doorlatendheidsmetingen aan ongeroerde monsters

Ter plaatse van de locatie van de pompproeven zijn ongestoorde bodemmonsters genomen. Hiervoor is slagvaste pvc-buis gebruikt met een diameter van 45 mm (Wit e.a. 1987). De lengte van de monsters varieerde van 25 tot 55 cm, aan deze monsters is de verticale doorlatendheid bepaald en in een enkel geval tevens de horizontale doorlatendheid. De resultaten van de metingen staan weergegeven in tabel 15.

Tabel 15 Doorlaatfactoren (k_v en k_h) van ongestoorde monsters

Beilen		Geesbrug		't Haantje		Noordsche Schut		
monster m - mv.	k_v (m/d)	monster m - mv.	k_v (m/d)	monster m - mv.	k_v (m/d)	monster m - mv.	kv (m/d)	k_h (m/d)
0,50-0,80	0,35	1,00-1,39	0,0004	1,00-1,40	2,0	1,35-1,65	0,0002	0,006
1,50-2,05	1,4	1,50-1,89	0,0045	2,00-2,30	0,5	4,00-4,50	0,0004	0,04
2,05-2,40	0,85	2,00-2,36	0,057			4,50-5,00	0,0003	0,05
3,00-3,25	7,0	2,50-2,78	5,0					
3,50-3,75	1,9	3,00-3,38	0,55					
		3,50-3,80	1,8					

Uit tabel 15 blijkt dat er een grote spreiding in de doorlatendheid wordt aangetroffen. Voor het proefgebied Noordsche Schut zijn de waarden praktisch gelijk aan die in tabel 14.

6.6.4 Stijghoogtegegevens

Uit het verticaal stijghoogteverloop in de filters van de boring naast de waterloop en in de raai volgt direct een indicatie over minder goed doorlatende lagen. Indien een verschil in stijghoogte tussen twee filters voorkomt, kan de weerstand van de tussengelegen lagen worden berekend uit de flux door deze laag en het bijbehorend drukverschil met:

$$c = \frac{h_1 - h_2}{q} \qquad (31)$$

waarin: h_1, h_2 = stijghoogte boven en onder de weerstandbiedende laag (m)
c = hydraulische weerstand (d)
q = flux door weerstandbiedende laag (m/d)

De hydraulische weerstand c is gelijk aan de verhouding van de dikte en de verticale doorlatendheid van de weerstandbiedende laag. Als flux is voor weerstanden boven slootniveau de berekende q_l gebruikt (aanhangsel 2). Voor weerstanden beneden de slootbodem is q_l gebruikt, vermeerderd met q_b, waarbij de totale q is verdeeld over een breedte van 64 m.

Als voorbeeld volgt een berekening van de k_v-waarde voor de laag tussen 13-14 m - mv. voor Noordsche Schut voor het tijdvak 1/9-31/10.

Infiltratie sloot (breedte 4 m) :	4 x 0,0195 = 0,076 m^2/d
Infiltratie vanuit landoppervlak (breedte 60 m) :	60 x 0,0006 = 0,036 m^2/d
	64 x 0,0018 = 0,112 m^2/d

Gemiddeld is de flux 0,0018 m/d of 1,8 mm/d over 64 m. Het drukverschil over deze laag bedraagt in het tijdvak 0,04 m, hieruit volgt met (31) een weerstand c = 22,2 d.

De verticale doorlatendheid wordt nu via

$$k_v = \frac{D}{c} = 0{,}04 \text{ m/d}$$

Voor Geesbrug is het drukverschil vastgesteld tussen de landbouwbuizen en de filters op 3 m - mv. op een afstand van 10 en 30 m vanaf de waterloop voor een viertal tijdvakken. Uit deze waarden en de waarde voor q_l is de verticale weerstand van de tussenliggende laag te berekenen (tabel 16).

De gemiddelde weerstand bedraagt 750 d, bij een laagdikte van 1,50 m betekent dit een k_v van 0,002 m/d.

Tabel 16 Verticale weerstand (c) van de laag van 1,5 tot 3,0 m - mv., afgeleid uit drukverschillen over deze laag op 10 resp. 30 m uit de sloot (Geesbrug)

Tijdvak	Drukverschil (10 m)	Drukverschil (30 m)	Flux q_l	c (10 m)	c (30 m)
	(m)	(m)	(mm/d)	(d)	(d)
4/1-18/4	0,09	0,45	0,50	180	900
18/4-18/5	0,17	0,37	0,50	340	740
18/5-27/6	0,59	0,34	0,50	1180	680
27/6-1/8	0,61		0,50	1220	

6.7 Kwalitatieve parameters grond- en oppervlaktewater

In de aanvoergebieden is het mogelijk om in de zomerperiode water het gebied binnen te laten om het peil te handhaven. Bij waterinlaat zal er zogenaamd "gebiedsvreemd" water het gebied binnen komen. De kwaliteit van het ingelaten water is afwijkend van het oppervlaktewater ter plaatse als gevolg van ondermeer lozingen van rioolwaterzuiveringsinstallaties. Gedurende een langdurig droge periode met een groot watertekort zal het aandeel water uit het Meppelerdiep in het Drenthse kanalenstelsel steeds verder toenemen; dit uit zich in de kwaliteit van het ingelaten water. Als gevolg

van een verschil in kwaliteit tussen het gebiedseigen en het gebiedsvreemd water geven een aantal kwaliteitsparameters informatie over de vorming en verandering van een infiltratielichaam onder een waterloop.

Gedurende de onderzoeksperiode zijn alle filters in de boringen naast de waterloop zes maal bemonsterd en geanalyseerd op de volgende parameters:
pH, EC, temperatuur, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{3-}, HCO_3^-, Ca^{2+}.

Daarnaast zijn bij de latere analyses tevens nog bepaald:
het totaal- en ortho-PO_4^{3-}-P, Kjeldahl-N, NH_4^+, NO_2^-.

Tevens zijn, met uitzondering van de filters te Dalerveen en Nijeveen, tweemaal analyses uitgevoerd aan watermonsters uit de filters in de raai loodrecht op de waterlopen, voorzover deze watervoerend waren. De analyses zijn uitgevoerd omstreeks de volgende data: 6-7-1988; 31-8-1988; 31-10-1988; 8-2-1989; 25-5-1989; 31-8-1989. De analyses van de filters in de raaien zijn uitgevoerd omstreeks 8-2-1989 en 31-8-1989. De monsters zijn afwisselend geanalyseerd door het Laboratorium van het Zuiveringsschap Drenthe en het Laboratorium van de Dienst WAMIL van de provincie Drenthe.

De kwaliteitsparameters Cl^- en SO_4^{3-} geven een indicatie over de mogelijke antropogene invloed, terwijl de parameters HCO_3^{3-}, Ca^{2+} en pH indicatoren zijn voor het grondwatertype. De invloed van de ecosysteemcompartimenten die gedurende de kringloop van het water worden doorlopen, weerspiegelen zich in de kwaliteit van het water(type). Zo heeft grondwater de invloed van de lithosfeer ondergaan, regenwater dat van de atmosfeer en zeewater dat van de oceaan.

Een mogelijkheid om de analyseresultaten weer te geven is het zogenaamde EC-IR-diagram (Van Wirdum 1989). EC staat voor Electric Conductivity en IR voor Ionen Ratio ((Ca/20)/(Ca/20+Cl/35,5)). In het EC-IR-diagram zijn standaardmonsters weergegeven die als representatief kunnen worden beschouwd voor bepaalde watertypen:
- LI voor lithotroof;
- AT voor atmotroof;
- TH voor thalassotroof.

Daarnaast is de gemiddelde Rijnwatersamenstelling te Lobith in 1975 weergegeven (RH). Deze kwaliteit kan worden beschouwd als referentie voor antropogeen beïnvloed water.

In fig. 22 is een EC-IR-diagram voor Noordsche Schut weergegeven. Door de analyses voor de verschillende filters onderling te verbinden zijn kwaliteitsveranderingen gedurende de onderzoeksperiode te volgen. Het verloop van de kwaliteit van het oppervlaktewater is op deze manier weergegeven. De eerste en laatste analyse voor het oppervlaktewater vertonen grote overeenkomst met het Rijnwatermonster, terwijl de tussenliggende monsters meer een karakter hebben van een mengmonster van lithotroof met atmotroof water. De veranderingen in de kwaliteit van het grondwater in de zes filters onder de slootbodem zijn minder groot dan bij het oppervlaktewater, daarom is het gebied waarbinnen de monsters van de verschillende filters liggen weergegeven. De monsters van de filters op 3, 6, 9 en 12 m - mv. hebben een duidelijke overeenkomst met het Rijnwatermonster, terwijl de monsters op 15 en 18 m - mv. een sterke

overeenkomst vertonen met het oppervlaktewater in de winterperiode. Deze monsters vertonen overeenkomst met het gebiedseigen water. De sprong in kwaliteit kan worden verklaard door de geringe infiltratie-intensiteit in combinatie met de geohydrologische opbouw onder de slootbodem, waardoor op grotere diepte de invloed van het gebiedsvreemde water sterk afneemt.

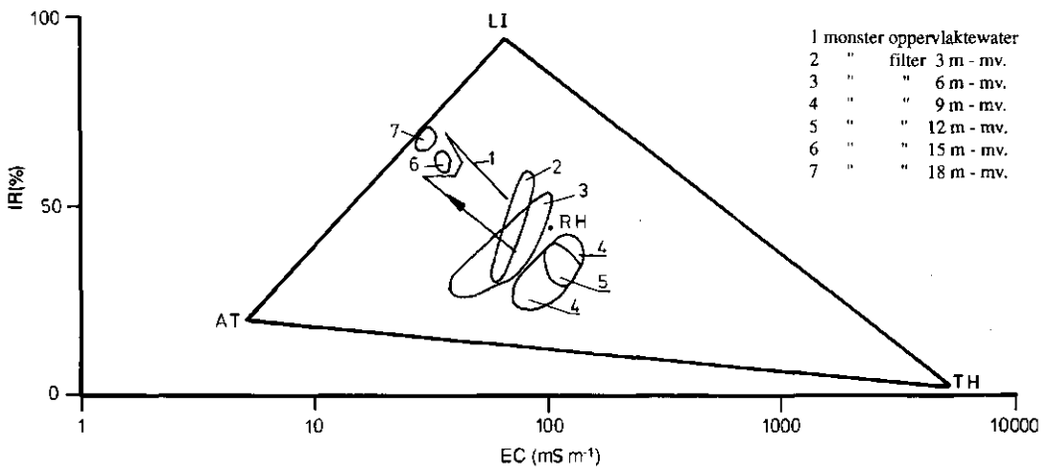


Fig. 22 EC-IR-diagram van Noordsche Schut

Voor Dalerveen blijkt uit fig. 23 dat alle monsters zich in een kleine cluster bevinden en nauwelijks veranderen gedurende de onderzoeksperiode.

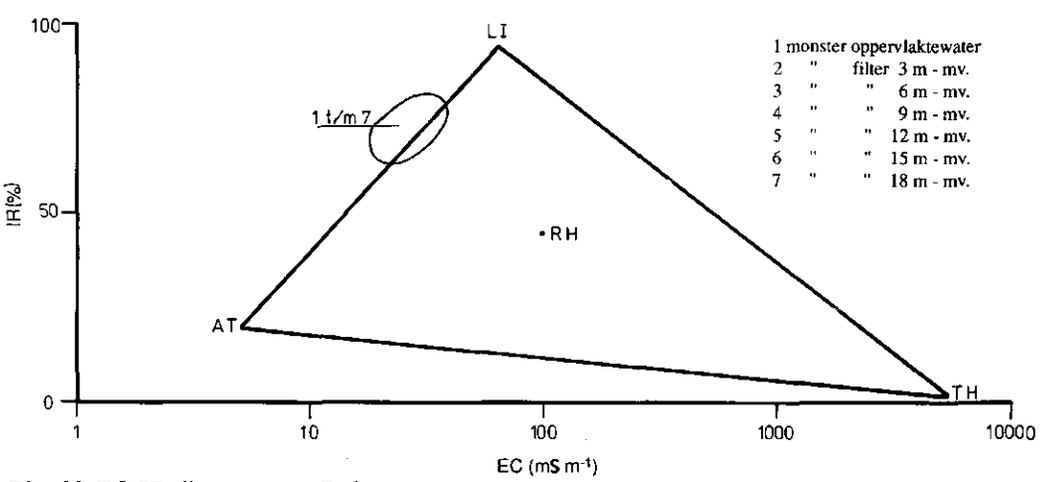


Fig. 23 EC-IR-diagram van Dalerveen

De EC-IR-diagrammen van Nijeveen, Eelde en Uffelte vertonen grote overeenkomst met die voor Dalerveen. Dit geldt ook voor Zwiggelte met uitzondering van het laatste monster van het oppervlaktewater en het filter op 3 m - mv., deze bewegen zich in de richting van het Rijnwatermonster. Voor Geesbrug geeft het filter op 3 m - mv. grote overeenkomst met het oppervlaktewater, terwijl de diepere monsters een cluster vormen met een duidelijke atmotrofe invloed, hetzelfde beeld geeft het EC-IR-diagram voor 't

Haantje. Het oppervlaktewater te Beilen heeft aanvankelijk een lithotroof karakter, maar vertoont bij volgende monsternames grote overeenkomst met het Rijnwatermonster. De filters op 3 en 6 m - mv. hebben aanvankelijk een atmotroof karakter en vertonen eveneens bij volgende monsternames grote overeenkomst met het Rijnwatermonster. De overige filters vertonen bij de eerste monstername een duidelijke thalassotrofe invloed, deze neemt bij volgende monsternames duidelijk af, waarbij de filters een meer atmotroof karakter krijgen. Een verklaring voor dit verschijnsel is met de beschikbare gegevens niet te geven.

Uit het voorgaande is reeds gebleken dat de EC-waarde een indicator is voor het aangeven van veranderingen in de kwaliteit van het oppervlakte- en grondwater. In fig. 24 en 25 wordt dit voor twee proefgebieden geïllustreerd.

In fig. 24 is voor Geesbrug het EC van het slootwater en de filters weergegeven voor de bemonsteringsdata. Uit de figuur blijkt dat de filters op 3, 6 en 9 m - mv. bij de laatste bemonstering een duidelijke stijging te zien geven met betrekking tot het EC. De filters op 12 en 15 m geven een daling, terwijl het diepste filter weer een stijging te zien geeft.

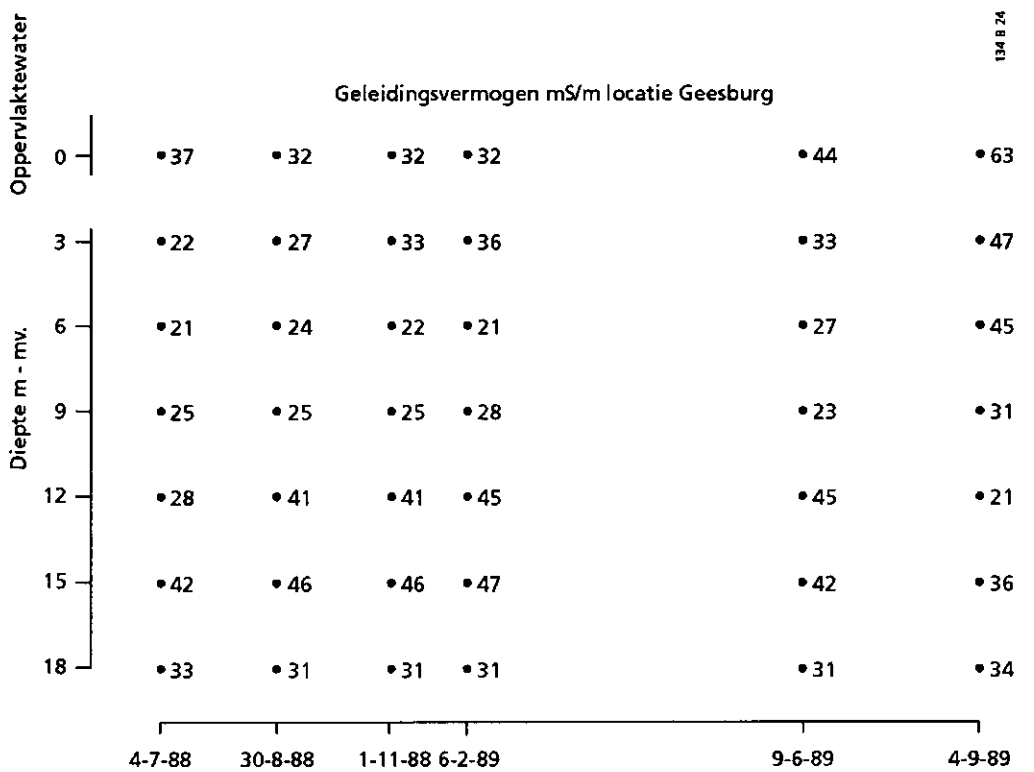


Fig. 24 Verandering in de EC-waarden (Geesbrug)

De EC-grafieken voor Dalerveen, Eelde, Nijeveen en Uffelte blijken weinig te veranderen, al is het opvallend dat de EC-waarden voor Uffelte duidelijk hoger liggen dan voor de overige gebieden. Ook voor Zwiggelte blijken de EC-waarden nauwelijks te

veranderen; alleen blijkt tijdens de laatste monstername een stijging van het EC te zijn opgetreden voor het filter op 3 m - mv. (fig. 25).

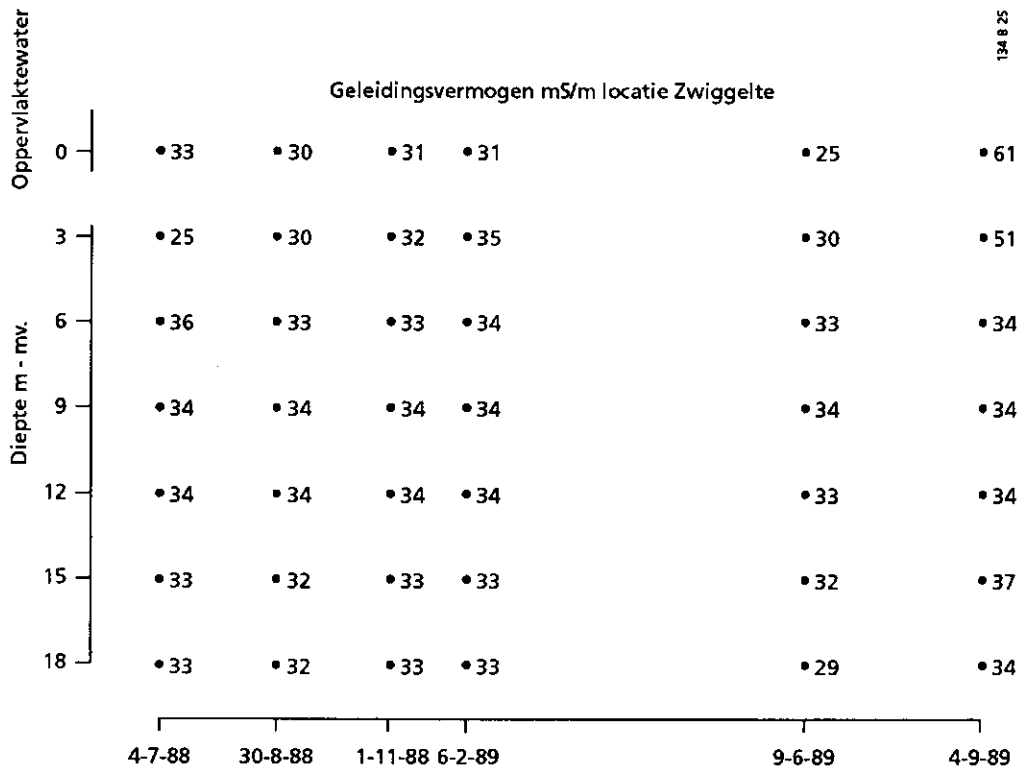


Fig. 25 Verandering in de EC-waarden (Zwiggelte)

Voor 't Haantje hebben de filters van 6 t/m 18 m - mv. een zeer lage EC-waarde in tegenstelling tot het filter op 3 m - mv.; de EC-waarde hiervoor lijkt bijzonder veel op die voor het oppervlaktewater.

Opvallend bij Noordsche Schut zijn de hoge EC-waarden in de filters op 9 en 12 m - mv. De filters op 15 en 18 m - mv. hebben een meer constant karakter, terwijl de filters op 3 en 6 m - mv. een fluctuatie te zien geven. Deze verhoogde EC-waarden treffen we ook aan te Beilen op dezelfde diepte en in mindere mate te Geesbrug op 12 en 15 m - mv. Het filter op 15 m - mv. te Beilen heeft aanvankelijk een hoge EC-waarde; deze neemt gedurende de meetperiode af tot een zeer lage waarde. De filters op 3 en 6 m - mv. te Beilen vertonen een zekere fluctuatie.

Tijdens de zomerperiode in 1989 zijn frequent metingen uitgevoerd aan het oppervlaktewater. In fig. 26 is het verloop van de EC-waarde van het oppervlaktewater voor Beilen weergegeven.

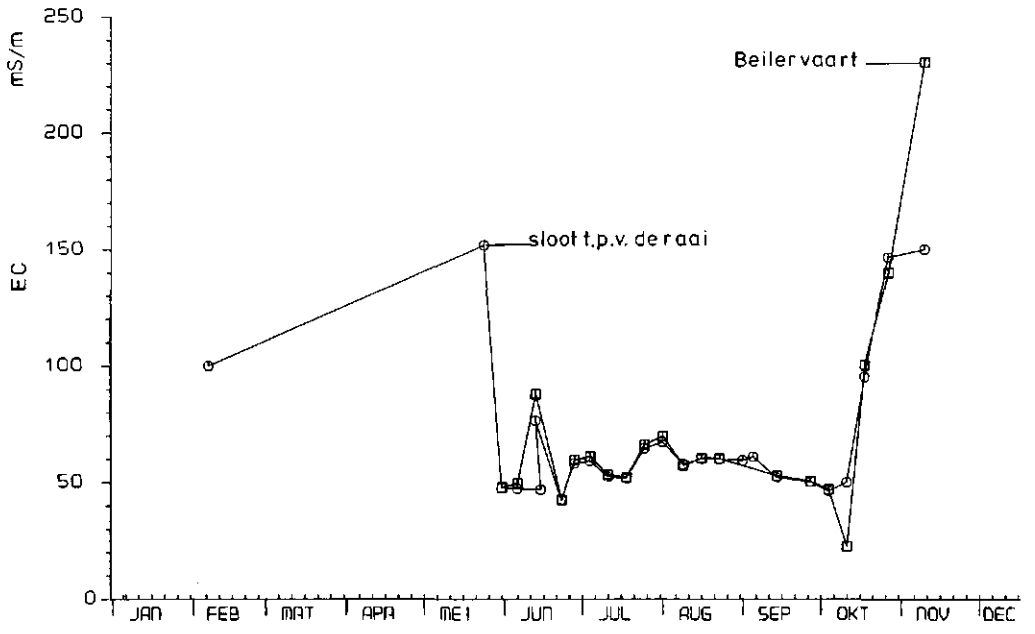


Fig. 26 Verloop van de EC-waarde van het oppervlaktewater te Beilen (zomer 1989)

Uit deze figuur blijkt dat het EC van het oppervlaktewater sterk kan variëren, dit is mede van invloed op de EC-waarde van het geïnfiltreerde water. De hoge waarde van het EC in de Beilervaart (november 1989) kan worden toegeschreven aan een lozing op de Beilervaart. Uit fig. 27 blijkt dat voor 't Haantje de EC-waarde in de loop van de zomer een regelmatige stijging vertoont onder invloed van het ingelaten water.

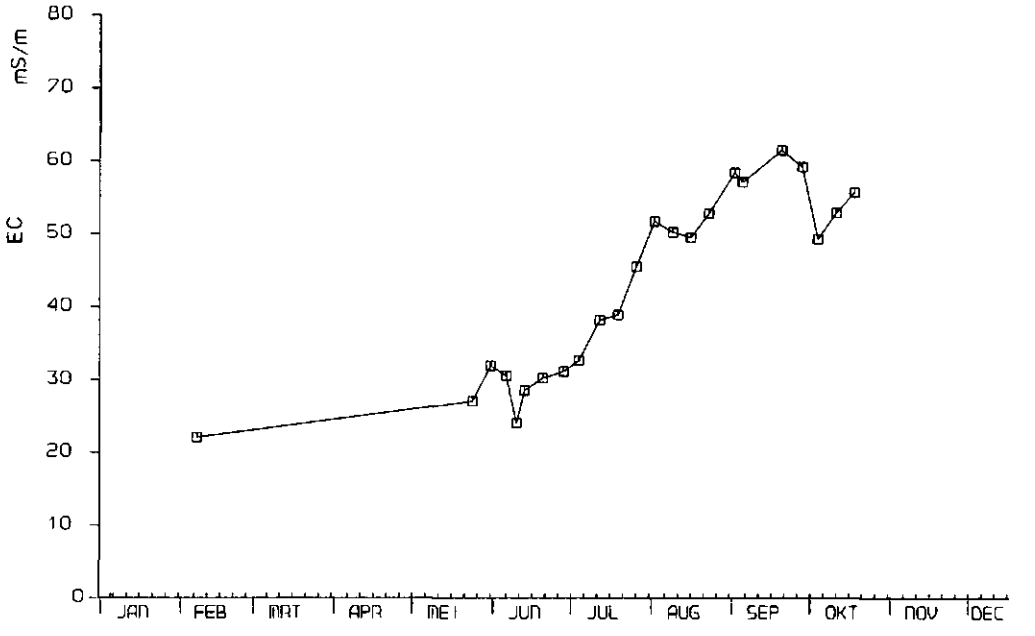


Fig. 27 Verloop van de EC-waarde van het oppervlaktewater voor 't Haantje (zomer 1989)

De hoge waarde voor het EC in oktober 1989 bij 't Haantje wordt veroorzaakt door de droge maand oktober. Er vindt nog geen afvoer naar de sloot plaats, zodat het oppervlaktewater het karakter behoudt van het laatst ingelaten water (9 oktober is inlaat gesloten).

7 EFFECTEN VAN WATERAANVOER OP DE WATERKWALITEIT

In hoofdstuk 4 is een eerste indruk gegeven over de voorkomende hydrologische processen in de omgeving van waterlopen bij afwisselend infiltratie en drainage. In paragraaf 6.7 is de chemische samenstelling van het grond- en oppervlaktewater voor een aantal indicatieve parameters behandeld. In een aantal proefgebieden verandert tijdens de onderzoeksperiode de samenstelling van het grondwater, wat kan worden toegeschreven aan de infiltratie vanuit de waterlopen van gebiedsvreemd water in het zomerhalfjaar en drainage in het winterhalfjaar. Voor de simulatie van de hydrologische processen in de omgeving van waterlopen en de daarmee samenhangende veranderingen in de kwaliteit van het grondwater wordt eerst een toelichting gegeven op de gevolgde methode en vervolgens op de verkregen resultaten.

7.1 Methode

Voor een simulatie van de hydrologische processen is het stationair twee-dimensionaal model STRELIN gebruikt (Groenendijk 1988). Allereerst dient de onderzoeksperiode te worden opgedeeld in tijdvakken, waarin bij benadering een stationaire situatie heerst. Als criteria zijn hiervoor achtereenvolgens beschouwd: fluctuatie van het peil in de waterlopen (zomer- en winterpeil), grondwaterstandsfluctuaties in de raaien loodrecht op de waterlopen en aanvoer en/of afvoer.

Voor de negen proefgebieden heeft dit geleid tot een indeling van de onderzoeksperiode in 8 of 9 tijdvakken. De stroomlijnen en verblijftijden worden berekend in een dwarsdoorsnede loodrecht op de waterloop. In de naaste omgeving van de waterloop zal de richting van de grondwaterstroming praktisch samenvallen met de dwarsdoorsnede. Op grotere afstand en diepte kan de richting van de grondwaterstroming onder invloed van lokale en regionale factoren een afwijking vertonen. Door de beperkingen qua diepte en lengte aan de dwarsdoorsnede zijn de genoemde afwijkingen te verwaarlozen. Eerst zullen de geometrie van de dwarsdoorsnede en de daarbij behorende hydrologische constanten worden behandeld. In fig. 28 is een schematisering van de dwarsdoorsnede van het proefgebied Noordsche Schut gegeven. In dit proefgebied was het niet mogelijk om ter plaatse van de boring in een doorlopende raai aan weerszijden van de waterloop grondwaterstandsbuizen te plaatsen. In dit geval is uitgegaan van een enkelzijdige raai ter plaatse van de boring en is een spiegeling toegepast ten opzichte van de waterloop.

Zowel de laagindeling als de daaraan toegekende horizontale (k_h) en verticale (k_v) doorlatendheden zijn het resultaat van een interpretatie van alle verkregen informatie. Bij deze interpretatie kunnen twee fasen worden onderscheiden:

1. een indeling van de dwarsdoorsnede in lagen en een toekenning van hydrologische constanten daaraan op grond van:
   - de textuur van boormonsters van een boring naast de waterloop;
   - stijghoogten en grondwaterstanden (filters in een boring naast de waterloop en grondwaterstandsbuizen in een raai loodrecht op de waterloop);

- doorlatendheidsmetingen aan ongestoorde monsters (waterbodem en incidenteel in reeds genoemde raai);
- pompproeven;
- infiltratiemetingen in de waterloop.

2. een nadere detaillering van bovengenoemde laagindeling en hydrologische parameters op grond van berekeningen met STRELIN; het eerste tijdvak van de onderzoeksperiode is gebruikt voor calibratie. Dit heeft geleid tot een differentiatie in de horizontale en verticale doorlatendheid van overwegend slecht doorlatende lagen. Vervolgens heeft voor de overige tijdvakken een verificatie plaatsgevonden op grond van gemeten en berekende grondwaterstanden, stijghoogten en veranderingen in de kwaliteit van het grondwater.

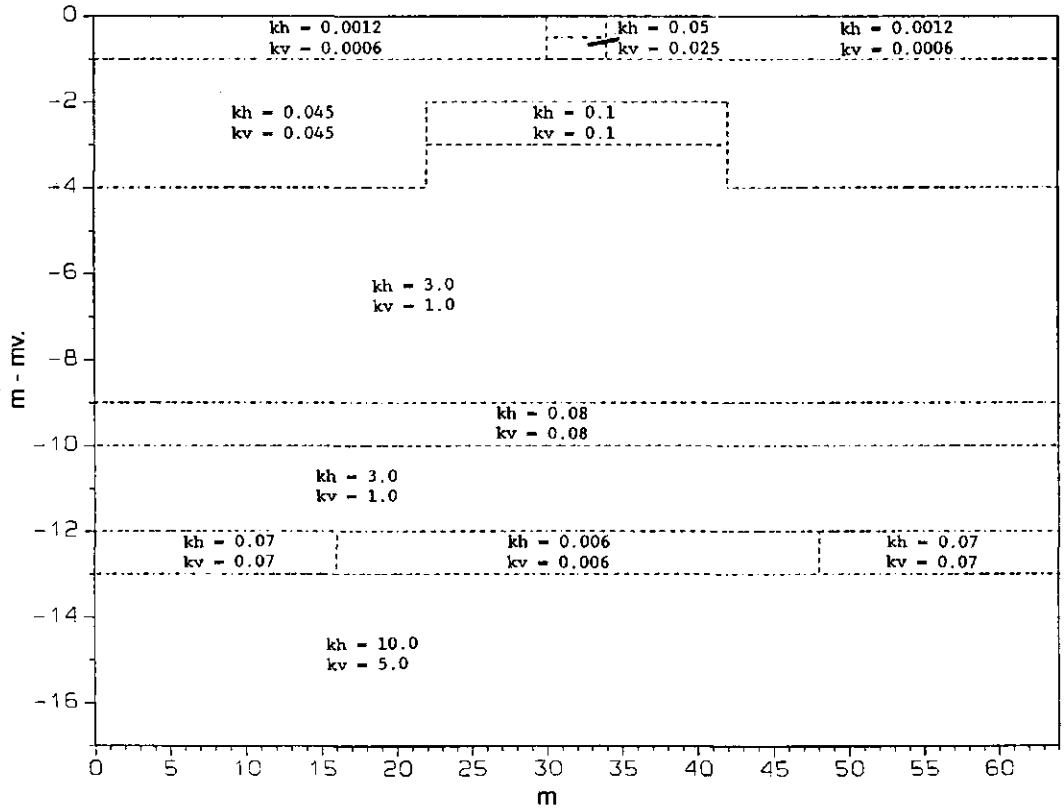
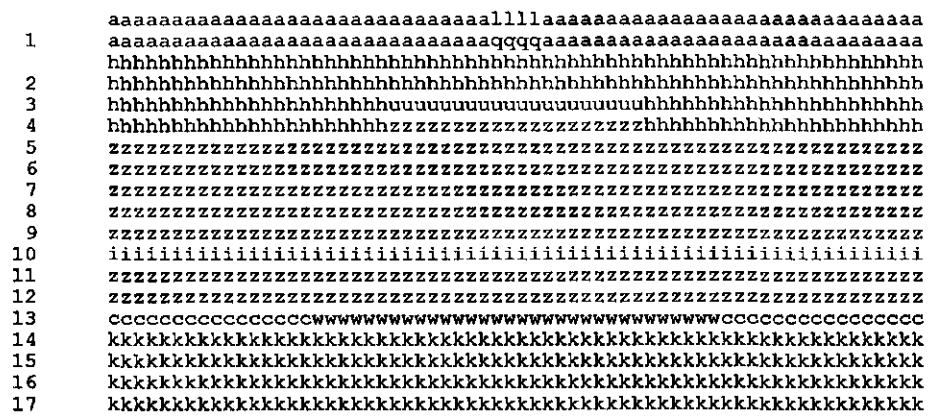


Fig. 28 Schematisering van de dwarsdoorsnede van het gebied Noordsche Schut

De horizontale en verticale doorlatendheden uit fig. 28 zijn in fig. 29 per compartiment door een symbool weergegeven. Dit is eveneens het geval voor de porositeit; voor de bodemlagen is hiervoor een waarde van 0,3 aangehouden en voor open water 1,0. Aan de bovenkant van de dwarsdoorsnede zijn vier lagen met een dikte van 0,50 m onderscheiden, verder bedraagt de laagdikte 1 m. Voor de lengte van de compartimenten is steeds 1 m aangehouden. De waterloop is aangegeven door de letter l voor vier compartimenten; voor de doorlatendheid van open water is een relatief hoge waarde aangenomen. In de waterloop staat 0,50 m water, de bovenrand van het model is gelegen ter hoogte van de waterspiegel in de waterloop hetgeen overeenkomt met ongeveer 1 m - mv.



	k_h m/d	k_v m/d	por %
w	0,006	0,006	0,3
u	0,1	0,1	0,3
q	0,05	0,025	0,3
l	100000	100000	1,0
a	0,0012	0,0006	0,3
h	0,045	0,045	0,3
z	3,0	1,0	0,3
i	0,08	0,08	0,3
c	0,07	0,07	0,3
k	10,0	5,0	0,3

Fig. 29 Hydrologische bodemconstanten per compartiment voor Noordsche Schut

Voor de tijdsonafhankelijke variabelen per tijdvak is als randvoorwaarde een keuzemogelijkheid tussen fluxen en potentialen. Uit de opzet van het veldonderzoek blijkt dat vanaf het begin van de onderzoeksperiode de reeks gegevens over de aan- en afvoer en de stijghoogten in de boringen naast de waterloop het meest compleet zijn. Voor het uitvoeren van simulaties voor de gehele periode heeft dit geleid tot de volgende randvoorwaarden:

- bovenrand:
  - flux q_b door de bodem van de waterloop;
  - flux q_l voor de overige compartimenten.
- zijranden:
  in het algemeen zijn stijghoogten ingevoerd op grond van de informatie over het verloop van gemeten stijghoogten in de filters in de boring naast de waterloop en van de stijghoogte op een diepte van 3 m uit filters in raaien loodrecht op de waterloop. Voor slecht doorlatende lagen is een flux gelijk nul ingevoerd.
- onderrand:
  hier zijn stijghoogten ingevoerd; in het midden van de dwarsdoorsnede onder de waterloop is de gemeten stijghoogte in het diepste filter van de boring naast de waterloop gebruikt. Naar de hoekpunten is een bepaald verhang vastgesteld op grond van de geohydrologische schematisatie en het totale beeld van gemeten stijghoogten en grondwaterstanden.

De flux q_b door de bodem van de waterlopen per tijdvak kan worden afgeleid uit de netto-afvoer en het effectief slootoppervlak, het neerslagoverschot op en de bergingsverandering in de waterlopen. De netto-afvoer volgt uit de gemeten aan- en

afvoer. Het effectief slootoppervlak hangt samen met de eigenschappen van het waterlopenpatroon en het feit dat in de loop van de zomer de kleinere waterlopen droogvallen (paragraaf 6.4, fig. 17).

In de tabellen 17 en 18 is voor het proefgebied Noordsche Schut de berekening van de flux q_b uitgewerkt voor de onderscheiden tijdvakken. Voor de overige proefgebieden met wateraanvoer is eenzelfde bewerking uitgevoerd. Aangezien de afvoer van het neerslagoverschot naar de waterlopen op verschillende wijzen kan plaatsvinden: oppervlakkig (surface-runoff), door de bovengrond (interflow), door drains of via een grondwaterstroming, is eerst een flux q_a naar de waterlopen bepaald.

Tabel 17 De flux (q_a') naar de waterlopen voor het proefgebied Noordsche Schut, berekend uit afvoer en inlaat (A-I), factor γ, neerslagoverschot (N-Eo) en de bergingsverandering (Δh_{os})

Tijdvak	Aantal dagen	A-I (mm/d)	γ	q_a (mm/d)	N-Eo (mm/d)	Δh_{os} (mm/d)	q_a' (mm/d)
1/6- 15/7	45	-0,08	40	-3,2	0,18	1,80	-1,58
15/7-10/10	87	0,55	40	22,0	1,90	0,41	20,51
10/10-31/12	82	0,91	40	36,4	1,17	-5,02	30,21
31/12- 20/4	110	0,84	33	27,7	1,20	0,25	26,75
20/4- 20/5	30	-0,18	41	-7,4	-2,73	11,50	6,83
20/5- 30/6	41	-0,13	49	-6,4	-3,00	-1,56	-4,96
30/6- 31/7	31	-0,32	49	-15,5	-1,49	0,65	-13,36
31/7- 31/8	31	-0,27	68	-18,4	-0,14	1,00	-17,26
31/8-31/10	61	-0,17	68	-11,6	1,03	-2,07	-14,70

Tabel 18 Berekende flux q_b en q_r voor het gebied Noordsche Schut

Tijdvak	Flux q_a' (mm/d)	druk-verschil h_{os}-h_{ob} (m)	flux q_b (mm/d)	flux gemeten q_b (mm/d)	flux q_r (mm/d)
1/6- 15/7	-1,58	0,67	-10,63		9
15/7-10/10	20,51	0,38	-6,03		27
10/10-31/12	30,21	0,18	-2,85		33
31/12- 20/4	26,75	-0,17	2,70		24
20/4- 20/5	6,83	0,25	-3,97		11
20/5- 30/6	-4,96	0,66	-10,48		6
30/6- 31/7	-13,36	0,83	-12,53		
31/7- 31/8	-17,26	0,98	-15,56		
31/8-31/10	-14,70	1,00	-15,87	-26,0 *	

*** 2 t/m 5 oktober 1989, (h_{os}-h_{ob}) = 1,07**

Uit de afvoer en inlaat (A-I) per tijdvak, en waarden voor de factor γ volgt een eerste benadering (q_a); een exacte waarde voor q_a' wordt verkregen door per tijdvak tevens rekening te houden met het neerslagoverschot (N-Eo) op en de bergingsveranderingen Δh_{os} in de waterlopen. Het neerslagoverschot is bepaald uit de neerslag van het dichtsbijgelegen KNMI-station en de open waterverdamping van het station Eelde. De bergingsveranderingen volgden uit peilverschillen tussen het begin en eind van de tijdvakken.

Een negatieve waarde voor q_a' in tabel 18 duidt op infiltratie en een positieve op drainage. Om de invloeden van surface-runoff, interflow en drains te elimineren zijn de waarden voor q_a' getoetst aan het verschil tussen slootpeil en de stijghoogte in het filter op 3 m - mv. in de boring naast de waterloop. Uit tabel 18 blijkt dat alleen in het tijdvak 31/12-20/4 1989 een negatief drukverschil tussen slootpeil en stijghoogte aanwezig is (drainage door de bodem van de waterloop). Voor de overige tijdvakken zal op grond van het drukverschil infiltratie door de bodem van de waterloop plaatsvinden. Voor deze tijdvakken is het teken van q_a' niet altijd correct, wat toegeschreven kan worden aan de ondiepe afvoercomponenten. Voor de laatste drie tijdvakken zijn op grond van de weersgesteldheid deze ondiepe componenten te verwaarlozen. Voor deze tijdvakken is uit het drukverschil h_{os}-h_{ob} en q_a' een gemiddelde stromingsweerstand berekend. Met deze waarde en de waarden voor h_{os}-h_{ob} is vervolgens q_b voor alle tijdvakken berekend. Deze wijze van berekenen is eveneens toegepast voor de proefgebieden Geesbrug, Beilen en Uffelte. In perioden met wateraanvoer -veelal droge perioden- is in beperkte mate een toetsing van de wateraanvoer mogelijk uit de relatie tussen het drukverschil en de waarde voor q_b.

In het laatste tijdvak is gedurende enkele dagen de wegzijging q_b direct gemeten, omgerekend naar een drukverschil van 1,0 m voor het betreffende tijdvak, wordt de gemeten waarde -24,0 mm/d. De gemeten waarde is aanmerkelijk hoger dan de berekende waarde, hierbij moet worden opgemerkt dat de infiltratiecylinder midden in de waterloop is geplaatst en een waarde oplevert voor een relatief klein slootoppervlak. Uit tabel 17 blijkt dat in het 3e en 4e tijdvak geen aanvoer plaatsvindt; het in die tijdvakken door de waterbodem geïnfiltreerde water komt uit het gebied zelf. Dit water komt via de ondiepe afvoercomponenten in de waterlopen, in tabel 18 is dit weergegeven door de term q_r die volgt uit (q_a-q_b). Voor het proefgebied Noordsche Schut vindt in een groot gedeelte van het winterhalfjaar infiltratie plaats van gebiedseigen water, in het zomerhalfjaar vindt afhankelijk van de weersgesteldheid overwegend infiltratie van gebiedsvreemd water plaats.

Voor alle proefgebieden zijn relaties vastgesteld tussen q_a' en (h_{os}-h_{ob}); zoals op grond van tabel 18 valt te verwachten is de spreiding van de punten voor het proefgebied Noordsche Schut groot (fig. 30).

Voor de proefgebieden waar de ondiepe afvoercomponenten van weinig betekenis zijn is de spreiding gering (fig. 31 en 32).

Voor deze gebieden is de regressievergelijking gebruikt voor de berekening van q_b. Tot dusver is er van uitgegaan dat de waarde voor q_b, die als een gebiedsgemiddelde is te beschouwen, geldt ter plaatse van de dwarsdoorsneden. Bij de berekeningen met STRELIN zijn als voornaamste toetsing hiervoor het stijghoogteverloop in de boring naast de waterloop en enkele chemische parameters gebruikt.

Met uitzondering van proefgebieden 't Haantje en Zwiggelte bleken de berekende waarden acceptabel. Voor het proefgebied 't Haantje diende ter plaatse van de dwarsdoorsnede de waarde voor q_b lager te zijn dan het hiervoor berekende gebiedsgemiddelde. De relatie in fig. 31 ondersteunt deze aanpassing; de berekende waarden zijn verminderd met 48,1 mm, wat overeenkomt met de afstand tussen de oorsprong en het snijpunt van de regressielijn met de y-as.

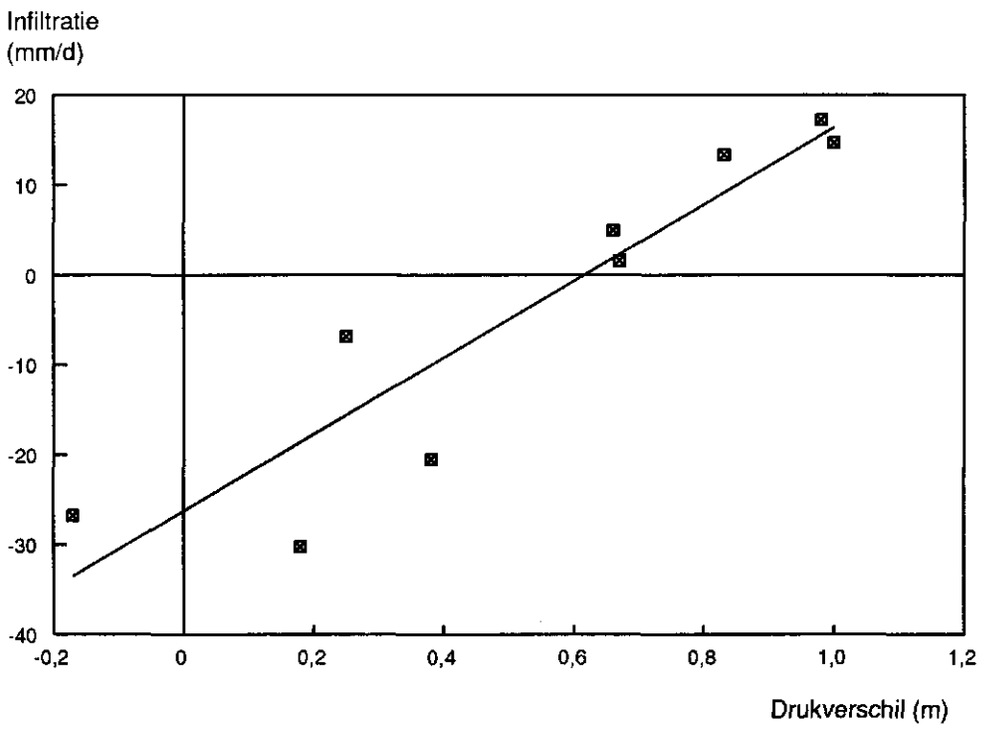


Fig. 30 Relaties tussen de stroming door de waterbodem en het drukverschil tussen slootpeil en de stijghoogte in het filter op 3 m - mv. in de boring (Noordsche Schut)

Van alle proefgebieden met mogelijkheden voor wateraanvoer zijn in aanhangsel 2 de onderscheiden tijdvakken en de daarvoor berekende q_b-waarden weergegeven. Deze waarden zijn aangepast aan de aangehouden slootbreedte in gehele meters bij de modelberekeningen.

De bovenrandvoorwaarde q_l voor de overige compartimenten hangt nauw samen met de wijze waarop de afvoer van het neerslagoverschot is gemodelleerd. In wegzijgingsgebieden is het deel van het neerslagoverschot bepaald dat naar de ondergrond infiltreert. Dit deel is als een flux voor de bovenranden opgenomen. Het overige deel van de neerslag via de ondiepe afvoer-componenten is niet gemodelleerd. Voor het vaststellen van de wegzijging naar of de kwel vanuit de ondergrond is de volgende balansvergelijking gebruikt:

$$N + I = A + Ep + v_{z0} + B \qquad (32)$$

waarin:

N	=	neerslag	(mm)
Ep	=	potentiële verdamping	(mm)
A	=	afvoer	(mm)
I	=	aanvoer	(mm)
v_{z0}	=	wegzijging (positief) of kwel (negatief)	(mm)
B	=	bergingsverandering	(mm)

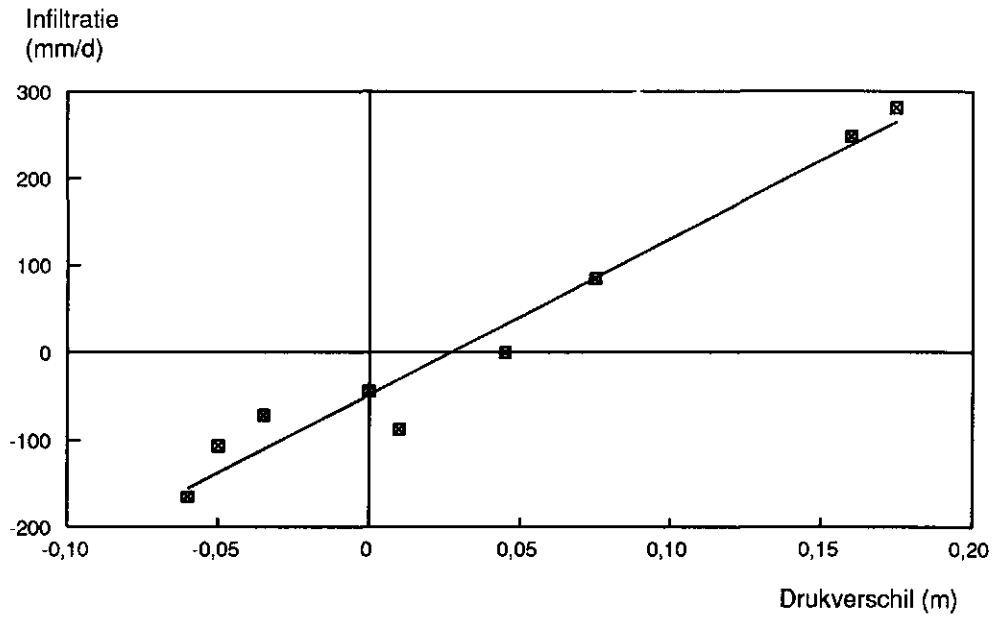


Fig. 31 Relaties tussen de stroming door de waterbodem en het drukverschil tussen slootpeil en de stijghoogte in het filter op 3 m - mv. in de boring ('t Haantje)

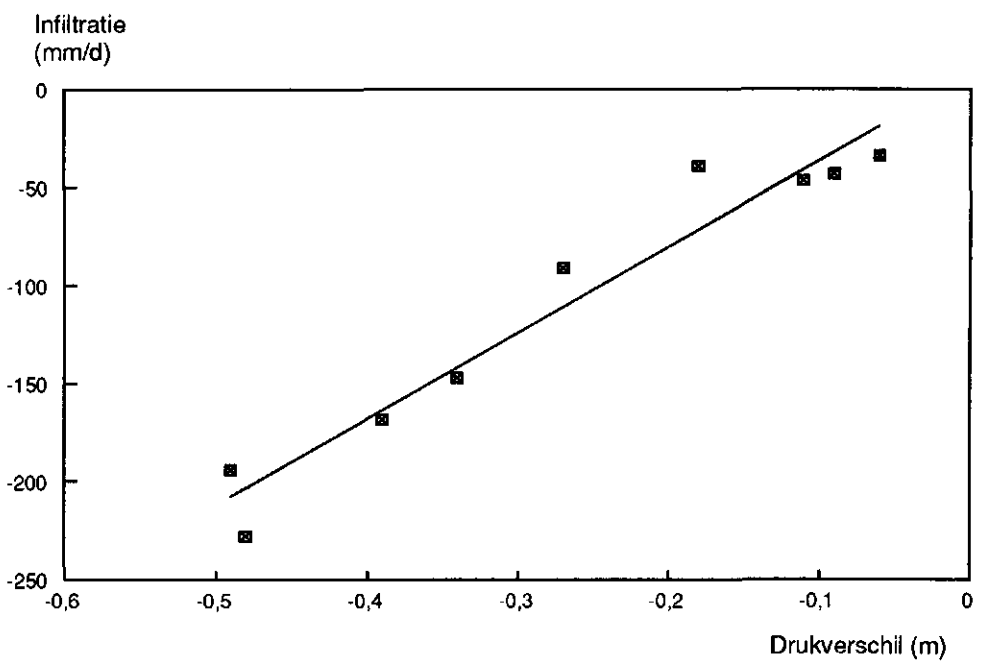


Fig. 32 Relaties tussen de stroming door de waterbodem en het drukverschil tussen slootpeil en de stijghoogte in het filter op 3 m - mv. in de boring (Dalerveen)

Als balansperiode is 1-6-1988 tot 20-5-1989 (50 weken) beschouwd, waarvoor op grond van grondwaterstandsfluctuaties B=0. Voor de gehele onderzoeksperiode zijn per proefgebied weekwaarden voor het neerslagoverschot (N-Ep) en de netto-afvoer (A-I) cumulatief in een grafiek weergegeven (fig. 33). Voor de neerslag is het dichtsbijgelegen KNMI-station gebruikt en voor de berekening van de potentiële verdamping het station Eelde.

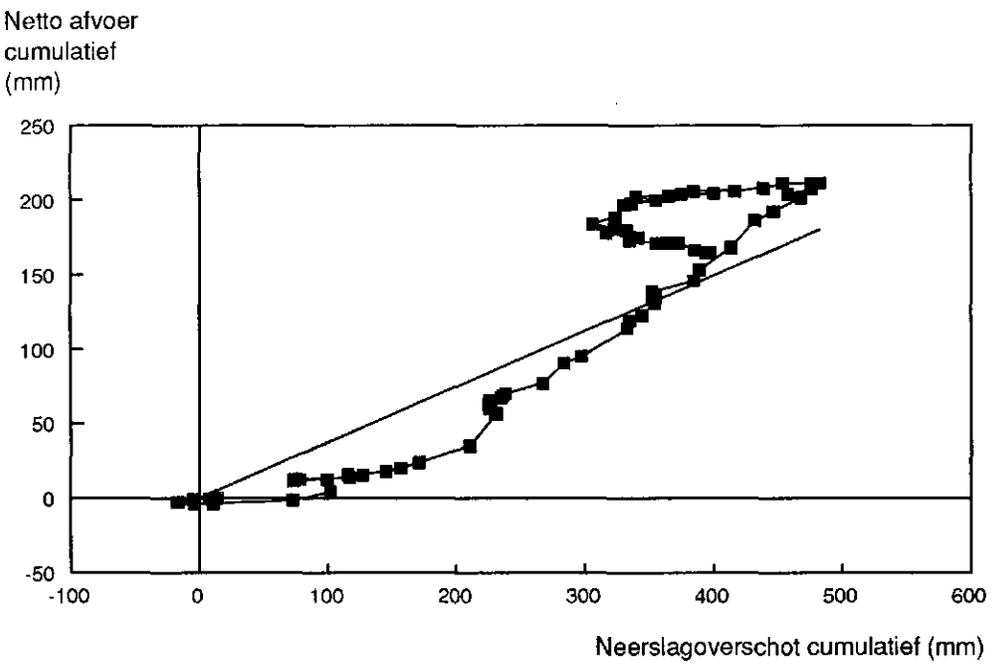


Fig. 33 Het verband tussen het neerslagoverschot (cumulatief) en de netto-afvoer (cumulatief) voor het proefgebied Noordsche Schut

In de winter liggen de punten in fig. 33 onder de berekende lijn en in de zomer erboven. De relatief natte zomer van 1988 heeft tot gevolg dat alle punten onder de lijn liggen; in de relatief droge zomer van 1989 liggen de punten boven de lijn. De onderzoeksperiode is te kort om uit de berekende regressievergelijking een waarde voor de kwel of wegzijging af te leiden.

Voor de bepaling van v_{z0} is uit fig. 33 voor week 50 een waarde af te lezen voor (N-Ep) en (A-I). Uit de twee waarden volgt direct of er sprake is van wegzijging of kwel. Het verschil tussen de twee waarden, gedeeld door 350 dagen, geeft de kwel of wegzijging in mm/d (tabel 19).

Om q_l te berekenen is de vergelijking gebruikt:

$$v_{zo} = \gamma^{-1} q_b + (1 - \gamma^{-1}) q_l \qquad (33)$$

waarin γ en q_b de gewogen gemiddelde waarden zijn uit tabel 17 en aanhangsel 2 voor de eerste vier of vijf tijdvakken. Voor γ en q_b worden waarden verkregen van 38 en -3,0 mm/d. Substitutie van deze waarden in (33) geeft na uitwerking voor q_l:-0,60 mm/d.

Het was niet mogelijk een differentiatie aan te brengen voor q_l voor de verschillende tijdvakken. Aangezien bij ondiep voorkomende slecht doorlatende lagen gedurende de gehele onderzoeksperiode een relatief groot stijghoogteverschil over die laag aanwezig is, heeft deze aanname weinig invloed op de resultaten gehad. Een uitzondering is gemaakt voor de proefgebieden, waar de ondiepe slecht doorlatende lagen ontbreken;

hier is de waarde van q_l veel meer afhankelijk van het neerslagoverschot. Dit zijn de proefgebieden met een waarde voor q_l van ongeveer -1 mm/d. In die situaties is opnieuw gebruik gemaakt van (33) waarbij is verondersteld dat de kwel of wegzijging weinig is veranderd. Aangezien $|q_l| << |q_b|$ is de gevoeligheid van q_l in de uit te voeren berekeningen gering.

Tabel 19 Berekende waarden voor kwel (mm/d) en wegzijging (mm/d)

Nr.	Gebied	Kwel	Wegzijging
1	Beilen		0,88
2	Dalerveen	0,67	
3	Eelde	0,04	
4	Geesbrug		0,59
5	Haantje		0,53
6	Noordsche Schut		0,66
7	Nijeveen	1,16	
8	Uffelte		0,48
9	Zwiggelte	0,08	

Voor de zijranden met uitzondering van slecht doorlatende lagen en de onderrand zijn per tijdvak gemiddelde stijghoogten ingevoerd. Voor de slecht doorlatende lagen is de flux op nul gesteld. Uit het gegevensbestand zijn per tijdvak gemiddelde waarden verkregen voor de stijghoogten van de in een boring naast de waterloop en in een raai loodrecht op de waterloop geplaatste filters.

In fig. 34 zijn voor een bepaald tijdvak in een dwarsdoorsnede de gemeten en berekende waarden voor de grondwaterstand en stijghoogte en het slootpeil weergegeven.

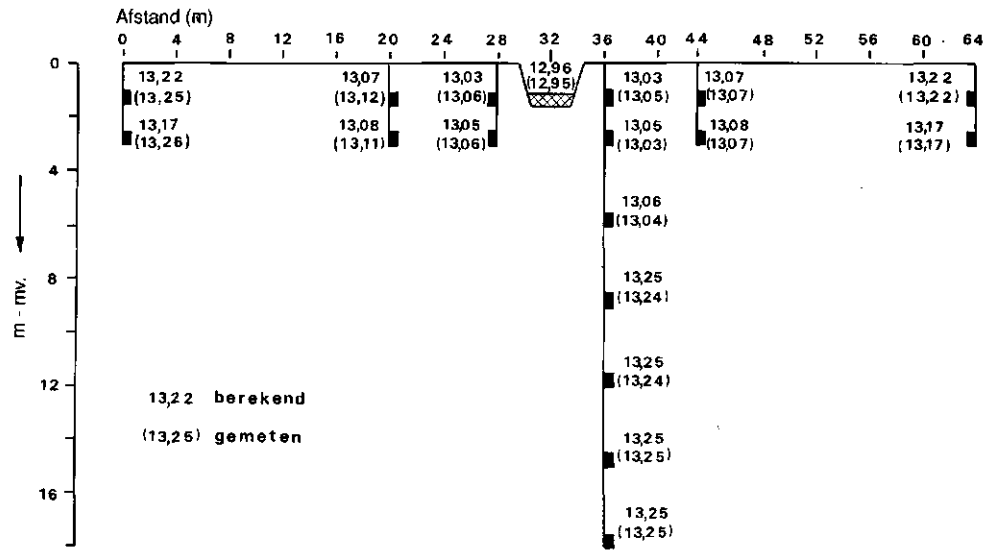


Fig. 34 Gemeten en berekende stijghoogten en slootpeil in een dwarsdoorsnede voor proefgebied Zwiggelte

Op grond van de geohydrologische opbouw van de dwarsdoorsnede, waarden voor k_h en k_v van de onderscheiden lagen en het totaal beeld van de gemeten stijghoogten is voor alle vier hoekpunten van de dwarsdoorsnede en het midden van de onderrand een stijghoogte vastgesteld. Vervolgens is om een waarde voor alle compartimenten te verkrijgen een interpolatie uitgevoerd; voor de onderrand vanaf het midden naar beide hoekpunten praktisch lineair; voor de zijranden is bij de interpolatie rekening gehouden met het stijghoogteverloop in de filters van de boring. De berekende waarden blijken redelijk overeen te stemmen met de gemeten waarden. Deze toetsing is uitgevoerd voor alle tijdvakken.

7.2 Berekening van stroomlijnen en verblijftijden

In deze paragraaf wordt het accent gelegd op zowel de kwantitatieve als kwalitatieve interactie tussen oppervlakte- en grondwater. Deze interactie is per proefgebied voor de opeenvolgende tijdvakken allereerst afzonderlijk berekend en vervolgens samengevoegd tot een totaal beeld voor de gehele onderzoeksperiode. De berekeningen per proefgebied zijn gestart bij het begin van het eerste tijdvak. De invoer van de gegevens over de geometrie en de hydrologische constanten geschiedt éénmalig, de invoer van de betreffende randvoorwaarden (fluxen en stijghoogten) per tijdvak. De fluxen volgen uit aanhangsel 2. Voor het volgen van het infiltratieproces zijn direct onder de bodem van de waterloop gelijkmatig verdeeld negen punten opgegeven. Deze startpunten geven de situatie weer bij het begin van een tijdvak; door de eindpunten wordt de situatie aan het eind van een tijdvak weergegeven. Bij infiltratie geeft het verschil tussen begin- en eindpunt de afstand aan, waarover een waterdeeltje is verplaatst. Een lijn die de eindpunten met elkaar verbindt, kan worden gerelateerd aan een bepaalde verblijftijd.

Om de grondwaterstroming te volgen in de dwarsdoorsnede zijn tevens startpunten opgegeven voor de filters in de boring naast de waterloop en voor een filter in de raai loodrecht op de waterloop. Het resultaat van de berekeningen voor het eerste tijdvak voor het proefgebied Noordsche Schut is weergegeven in fig. 35.

In deze figuur wordt de verplaatsing van waterdeeltjes vanuit de waterloop naar de ondergrond weergegeven. De lijn die de eindpunten verbindt, geeft een verblijftijd aan van 45 dagen (tabel 17). De eindpunten van het eerste tijdvak zijn vervolgens als startpunt voor het tweede tijdvak beschouwd (fig. 36).

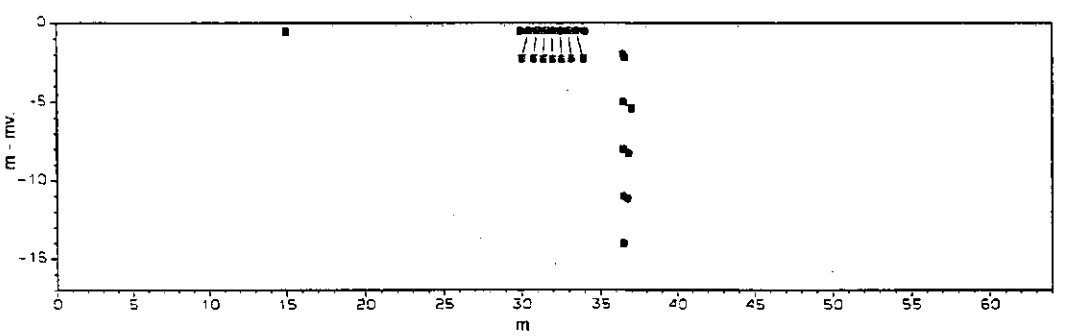


Fig. 35 Verplaatsing van waterdeeltjes in het eerste tijdvak (Noordsche Schut)

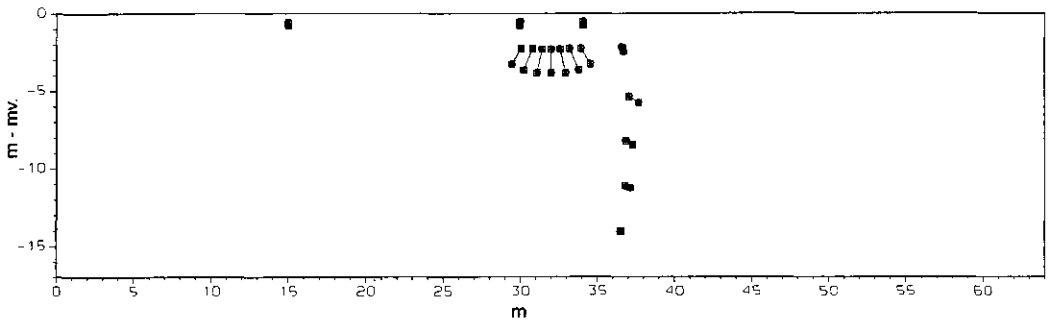


Fig. 36 Verplaatsing van waterdeeltjes in het tweede tijdvak (Noordsche Schut)

Uit fig. 35 en 36 volgt dat de infiltratie in de eerste twee tijdvakken leidt tot een merkbare verplaatsing van waterdeeltjes. De verplaatsing van waterdeeltjes ter plaatse van de filters is veel geringer. Voor het diepste filter in de boring en het filter in de raai wordt geen noemenswaardige verplaatsing berekend. In fig. 37 is het stromingsbeeld in de dwarsdoorsnede weergegeven.

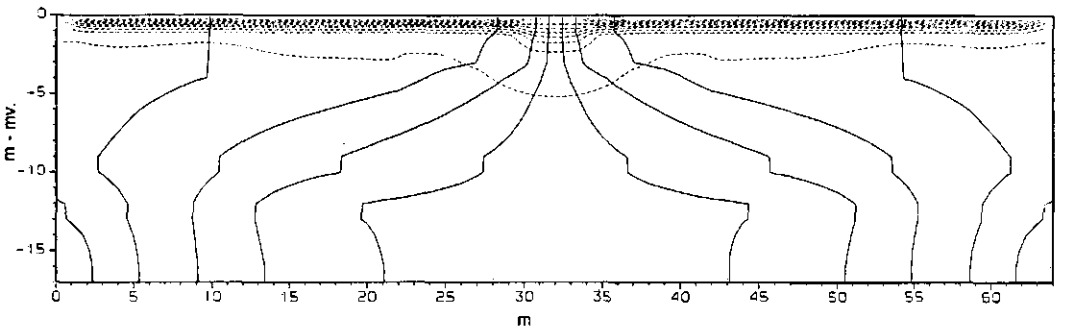


Fig. 37 Het stromingsbeeld in een dwarsdoorsnede voor Noordsche Schut in het eerste tijdvak

De relatief lage doorlatendheid boven in het profiel komt tot uiting in een sterke verdichting van de equipotentiaallijnen. Verder blijkt duidelijk het effect van minder goed doorlatende lagen op het verloop van de stroomlijnen. Voor een toetsing van de rekenresultaten van STRELIN zijn in eerste instantie berekende stijghoogten in compartimenten met filters op dezelfde wijze als in fig. 34 vergeleken met gemeten waarden hiervoor. In tweede instantie is een toetsing uitgevoerd van de gegevens over de waterkwaliteitsparameters uit een periodieke bemonstering van de filters. Vanwege de geringe verplaatsing van waterdeeltjes op een diepte van meer dan 10 m mag worden verwacht dat er tijdens de onderzoeksperiode praktisch geen veranderingen in de beschouwde waterkwaliteitsparameters zullen plaatsvinden. De veranderingen in de waterkwaliteitsparameters worden voornamelijk toegeschreven aan stofstromen onder invloed van het transportmedium water.

In de negen proefgebieden met een mogelijkheid van wateraanvoer zal alleen een infiltratielichaam onder de waterlopen worden gevormd, indien in één of meer tijdvakken infiltratie vanuit de waterlopen voorkomt. Uit aanhangsel 2 blijkt dat dit in de proefgebieden Dalerveen en Eelde in geen enkel tijdvak het geval is. Voor Nijeveen wordt in het eerste tijdvak enige infiltratie gemeten, in de droge zomer van 1989 wordt dit echter niet aangetroffen, zodat het resultaat in het eerste tijdvak twijfelachtig is.

De proefgebieden Dalerveen en Nijeveen zijn duidelijk kwelgebieden, waardoor in deze gebieden overwegend een netto afvoer aanwezig is (tabel 8 en 19). In het proefgebied Eelde komt in geringe mate kwel voor. Dit gebied kan qua terreinvorm tot een beekdal worden gerekend, waardoor in de loop van de zomer een belangrijke uitzakking van het freatisch vlak plaatsvindt. In beekdalen zal in het algemeen geen infiltratie plaatsvinden. Door wateraanvoer is wel een peilregulering mogelijk, waardoor de waterconservering kan worden bevorderd. In het proefgebied Zwiggelte met een geringe kwel vindt in de laatste drie tijdvakken infiltratie plaats. Voor de overige proefgebieden, waarin volgens tabel 19 wegzijging voorkomt, treedt in een aantal tijdvakken infiltratie vanuit de waterlopen op. De proefgebieden met de meeste tijdvakken met infiltratie zijn: Beilen, Geesbrug, 't Haantje, Noordsche Schut en Uffelte.

In fig. 38a, b, c zijn voor zes proefgebieden verschillende fasen weergegeven in de vorming van een infiltratielichaam onder waterlopen. Uit aanhangsel 2 volgt in welk tijdvak met infiltratie een dergelijk proces begint. Door een nummer is het betreffende tijdvak in fig. 38a, b, c aangegeven. In de volgende tijdvakken kan een continue uitbreiding van het infiltratielichaam plaatsvinden, wat alleen geldt voor het proefgebied Uffelte. Het komt echter ook voor dat in de tijdvakken in de winter van 1988/89 door drainage het infiltratielichaam in omvang afneemt of geheel verdwijnt. Indien infiltratie overgaat in drainage of omgekeerd, zijn de ontwikkelingen van het infiltratielichaam in het volgende tijdvak in een nieuwe figuur aangegeven. Door pijltjes is aangegeven of een uitbreiding (infiltratie) dan wel een afname (drainage) plaatsvindt.

Voor het proefgebied Beilen leidt infiltratie in het eerste tijdvak tot de vorming van een infiltratielichaam tot een diepte van globaal 4 m - mv. In het tweede t/m vierde tijdvak vindt drainage plaats, waardoor het in het eerste tijdvak gevormde infiltratielichaam weer geheel verdwijnt naar de waterloop. In het vijfde tijdvak begint opnieuw infiltratie, in dit tijdvak en de daarop volgende breidt het infiltratielichaam zich uit tot een diepte van globaal 7 m - mv. De relatief droge zomer van 1989 leidt tot een grotere uitbreiding van het infiltratielichaam dan in de relatief natte zomer van 1988. Voor de proefgebieden Geesbrug en Noordsche Schut vindt een vergelijkbaar proces plaats. Voor deze proefgebieden vindt in de winter van 1988/89 wel een afname in de omvang van het infiltratielichaam plaats, maar een gedeelte hiervan blijft aanwezig. Voor de proefgebieden 't Haantje en Zwiggelte vindt alleen in de zomer van 1989 de vorming van een infiltratielichaam plaats.

Uit het voorgaande en fig. 38a, b, c volgt dat de intensiteit van de hydrologische processen die zich manifesteren door middel van een infiltratielichaam onder de waterlopen van wisselende omvang, afhankelijk is van de volgende factoren:
- hydrologische situatie (potentiële kwel of wegzijging); op grond van verschillen tussen het freatisch vlak en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket. In een aantal

proefgebieden is het verticaal stijghoogteverschil 0,5 tot 1,0 m en verandert in de onderzoeksperiode niet van teken. Voor het proefgebied Noordsche Schut is de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket ongeveer 1 m lager dan het freatisch vlak (wegzijging) en voor Dalerveen is de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket ongeveer 0,5 m hoger (kwel). Naast de uitgesproken kwel- en wegzijgingsgebieden komen ook gebieden voor met afwisselend kwel en wegzijging. Volgens tabel 19 komt in de proefgebieden Beilen en 't Haantje overwegend wegzijging voor, in natte perioden kan dit omslaan in kwel. In gebieden met wegzijging vindt in meer of mindere mate infiltratie plaats. In gebieden met een grote potentiële wegzijging overheerst infiltratie vanuit de waterlopen. In natte perioden zal het infiltratielichaam wel in omvang kunnen afnemen, maar het zal niet geheel verdwijnen. In gebieden met afwisselend kwel en wegzijging, wat meestal samengaat met een kleine verticale stijghoogtegradiënt, kan het in een droge periode ontstane infiltratielichaam geheel of gedeeltelijk weer worden teruggedrongen naar de waterloop.

- geohydrologische situatie (geometrie, hydrologische bodemconstanten, voedingstype); de diepteligging van slecht doorlatende lagen in het afdekkend pakket en de hydrologische parameters van deze lagen bepalen voor een belangrijk deel de intensiteit van het infiltratieproces en de vorm van het infiltratielichaam. Bij ondiep gelegen slecht doorlatende lagen (voedingstype A2) zijn de ondiepe afvoercomponenten van betekenis. In deze gebieden kan tegelijkertijd ondiepe afvoer naar de waterlopen en infiltratie door de bodem plaatsvinden. In de gebieden met de bovenomschreven situatie (Geesbrug, Noordsche Schut en Uffelte) vindt overwegend een continue uitbreiding van het infiltratielichaam plaats; in natte perioden stagneert dit proces met plaatselijk zelfs een geringe afname. In de gebieden waar slecht doorlatende lagen ontbreken (voedingstype A1, B) kan in droge perioden een infiltratielichaam van een aanzienlijke omvang ontstaan (Beilen). Voor dit gebied is aansluitend op de droge zomer van 1989 een berekening uitgevoerd voor een wintersituatie die gelijk is aan die van 1988/89. In die periode met een geringe kwel en drainage van betekenis wordt door van weerszijden toestromend grondwater het bovenste deel van het voorheen geïnfiltreerde water direct onder de slootbodem teruggedrongen naar de waterloop. Er ontstaat dus een situatie waarin het onderste deel van het infiltratielichaam losraakt van de waterloop en onderdeel kunnen vormen van de regionale grondwaterstroming.
- de weersgesteldheid; het afwisselend voorkomen van natte/droge zomers en natte/droge winters. Uit fig. 38a, b, c volgt dat in de droge zomer van 1989 de uitbreiding van het infiltratielichaam aanzienlijk groter is dan in de natte zomer van 1988. De hoeveelheid neerslag in de aansluitende winterperiode bepaalt in belangrijke mate of het infiltratielichaam in omvang afneemt, geheel verdwijnt of dat een gedeelte daarvan een onderdeel gaat vormen van de regionale grondwaterstroming.
- het peilbeheer; in de zomer wordt het peil in de waterlopen verhoogd om de grondwatersituatie te reguleren zodat eventuele tekorten in de vochtvoorziening van de gewassen worden beperkt. Een peilverhoging heeft een tweëerlei effect:
  - een vermindering van de drainage waardoor de grondwaterstand tengevolge hiervan langzamer daalt;
  - infiltratie vanuit de waterlopen, wat leidt tot een verhoging van de grondwaterstand.

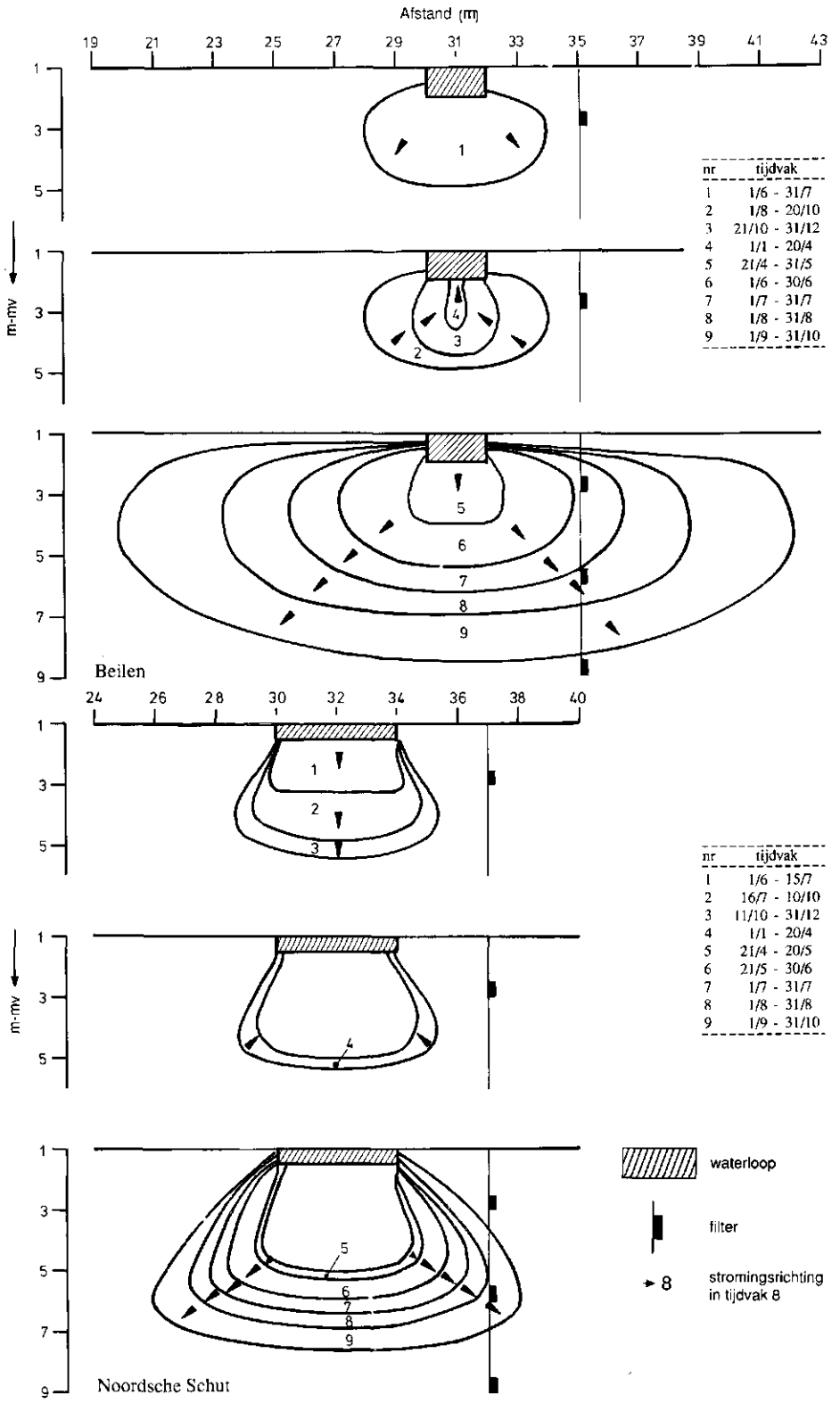


Fig. 38a Verschillende fasen van het infiltratielichaam onder de waterlopen voor Beilen en Noordsche Schut

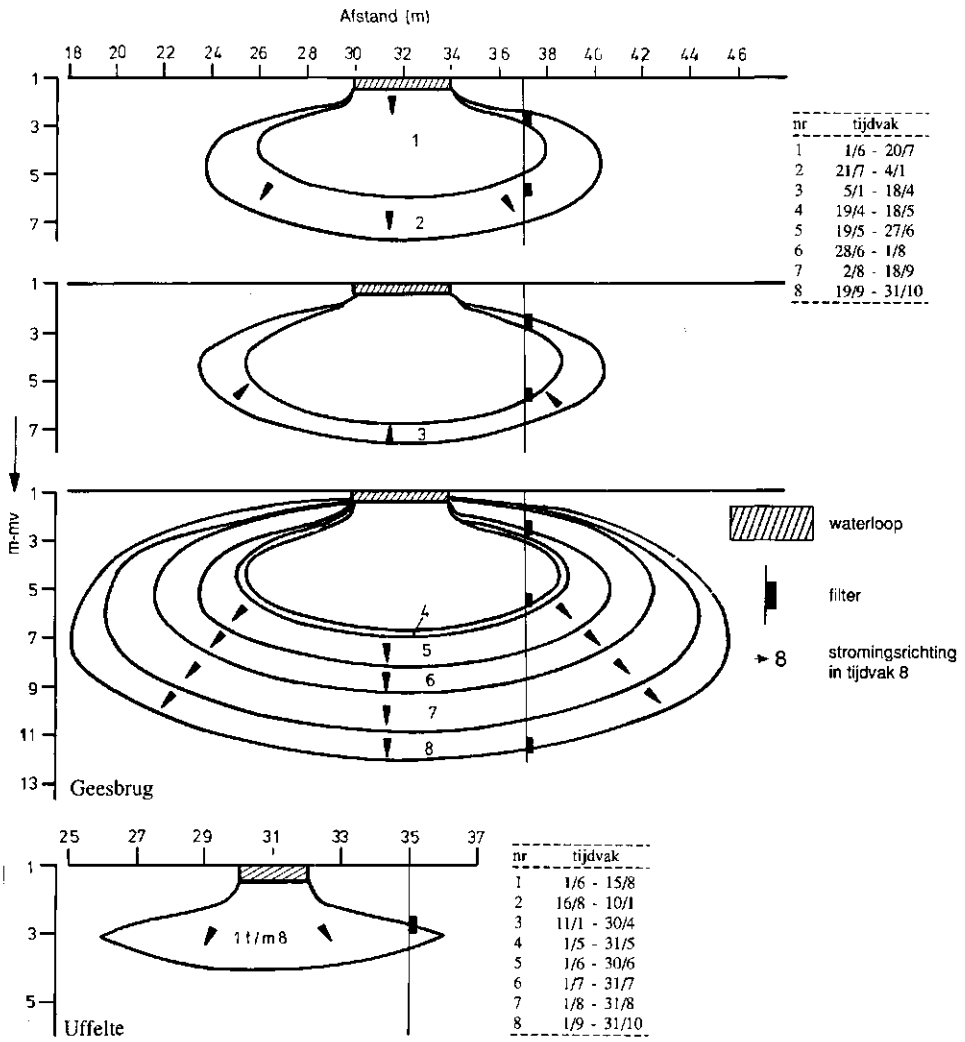


Fig. 38b Verschillende fasen van het infiltratielichaam onder de waterlopen voor Geesbrug en Uffelte

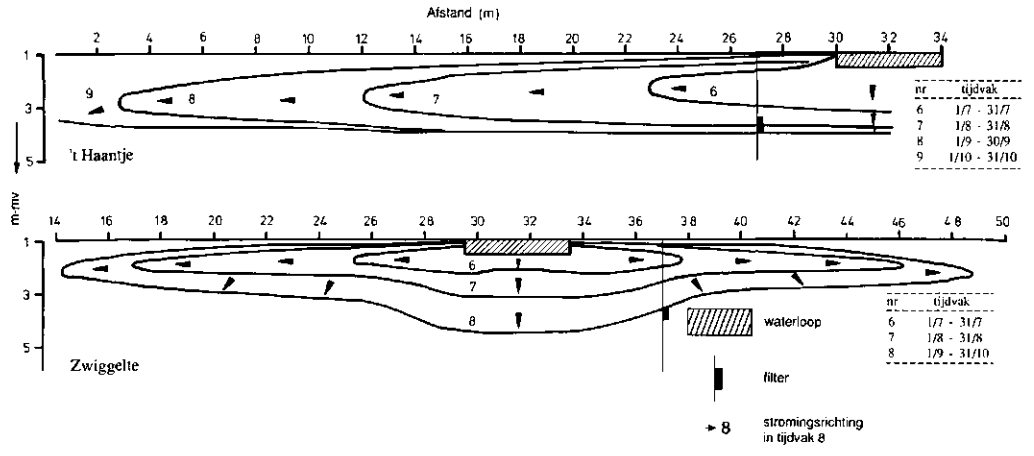


Fig. 38c Verschillende fasen van het infiltratielichaam onder de waterlopen voor 't Haantje en Zwiggelte

Beide effecten beogen een verhoging van de grondwaterstand waardoor een gunstiger situatie wordt gecreëerd voor de capillaire opstijging vanuit het freatisch vlak naar de wortelzone. Het accent zal veelal liggen op een verhoging van de grondwaterstand door infiltratie. De mate waarin hangt naast de peilverhoging nauw samen met de hydrologische en geohydrologische omstandigheden. Uit tabel 8 volgt dat de infiltratie in met name de wegzijgingsgebieden in orde van grootte 0,1-0,3 mm/d bedraagt. De geringe infiltratie zal leiden tot een beperkte grondwaterstandsverhoging, waardoor de wegzijging in lichte mate zal toenemen. Het gedeelte van de infiltratie dat ten goede komt aan de vochtvoorziening van de landbouwgewassen zal derhalve lager zijn dan de aangegeven waarden in tabel 8. Voor de betreffende proefgebieden zijn de hydrologische en geohydrologische omstandigheden dus niet optimaal voor wateraanvoer.

7.3 Kwaliteitsaspecten

Indien het geïnfiltreerde water vanuit de waterlopen voor de beschouwde kwaliteitsparameters kenmerkend verschilt van het grondwater ter plaatse kunnen veranderingen in het infiltratielichaam qua vorm getoetst worden aan veranderingen in de betreffende parameters. In fig. 38a, b, c zijn de vormveranderingen van het infiltratielichaam in de onderscheiden tijdvakken weergegeven. In principe zijn de waterdeeltjes gevolgd vanaf het begin van het eerste tijdvak met infiltratie. Voor dit eerste tijdvak heeft het water binnen het infiltratielichaam betrekking op het geïnfiltreerde water in dat tijdvak. Om de totale verplaatsing van het infiltratielichaam te kunnen aangeven uit het eerste tijdvak in het daaropvolgende tijdvak met infiltratie moet zowel de verplaatsing van de waterdeeltjes onder slootbodem als op de begrenzing van het infiltratielichaam worden gevolgd. Indien echter meer tijdvakken met infiltratie voorkomen, zou het aantal lijnen in fig. 38a, b, c zodanig toenemen dat dit de duidelijkheid aantast.

Om uit fig. 38a, b, c de benodigde informatie af te leiden over de verblijftijden, gerekend vanaf het eerste tijdvak met infiltratie, om zodoende een koppeling te leggen met de kwaliteit van het oppervlaktewater, is een werkwijze gevolgd die voor het gebied Beilen zal worden toegelicht. In het eerste tijdvak vindt infiltratie plaats, wat leidt tot de vorming van een infiltratielichaam. De begrenzing kan worden gerelateerd aan een verblijftijd van 0 tot 61 dagen, gelijk aan de lengte van het tijdvak. Bij de slootbodem is de verblijftijd nul dagen, in het tussenliggend gebied is geen nadere differentiatie aangegeven. In het eerste tijdvak is er dus een relatie tussen de kwaliteit van het oppervlaktewater en dat van het infiltratielichaam. In het tweede t/m het vierde tijdvak verdwijnt het infiltratielichaam door drainage naar de waterloop. In het vijfde t/m het negende tijdvak vindt continue infiltratie plaats. De toename van de oppervlakte van het infiltratielichaam in een bepaald tijdvak is gelijk aan de oppervlakte van in dat tijdvak geïnfiltreerd water en het poriënvolume. Tussen de begrenzing van deze oppervlakte en de begrenzing van het infiltratielichaam komt een waterkwaliteit voor die samenhangt met infiltratie in de voorafgaande tijdvakken. In het negende tijdvak vindt de grootste uitbreiding plaats. Binnen de begrenzing kunnen zones worden onderscheiden met een waterkwaliteit die gelijk is aan de kwaliteit van het oppervlaktewater in bepaalde infiltratietijdvakken.

In de gebieden met geen of geen noemenswaardige infiltratie vertoont het verloop in de waterkwaliteitsparameters een vrij permanent karakter. Uit tabel 8 volgt dat dit geldt voor de gebieden Dalerveen, Eelde en Nijeveen (zie fig. 23). Voor de resterende gebieden zal nader worden ingegaan op de kwaliteitsaspecten van het grondwater als gevolg van infiltratie van min of meer gebiedsvreemd water. Hierbij wordt getracht een aansluitende verklaring te geven voor de behandelde kwaliteitsaspecten in paragraaf 6.7.

Proefgebied Beilen
De eerste bemonstering op 6 juni 1988 in proefgebied Beilen geeft als resultaat relatief hoge EC-waarden voor de onderste drie filters, die in de loop van de zomer betrekkelijk snel afnemen. In de zomer van 1988 vindt in beperkte mate infiltratie plaats. De oorzaak van de hoge waarden moet worden gezocht in de voorliggende jaren. De benodigde gegevens voor het uitvoeren van simulaties zijn echter niet beschikbaar, zodat een bevredigende verklaring achterwege moet blijven. In de winter van 1988/89 heeft de situatie zich gestabiliseerd. In het verdere verloop van de onderzoeksperiode vanaf juni tot november in 1989 vindt een aanzienlijke infiltratie plaats. Uit fig. 38a volgt dat in het negende tijdvak de begrenzing van het infiltratielichaam een diepte bereikt van 8 tot 9 m - mv. De bemonstering in hetzelfde tijdvak resulteert in een verandering van de waterkwaliteit tot eveneens een diepte van 9 m - mv.

Proefgebied Geesbrug
Voor proefgebied Geesbrug is de spreiding in EC-waarden tijdens de eerste bemonstering aanzienlijk geringer dan voor Beilen (fig. 24). Voor de filters op een diepte van 12 en 15 m - mv. zijn enigszins hogere waarden gemeten, vergelijkbaar met de situatie bij Beilen. Hierin treedt tot 9 juni 1989 weinig verandering op. In de zomer van 1988 treedt in de eerste twee tijdvakken infiltratie op. Voor het filter op 3 m - mv. wordt een toename van de EC-waarde geconstateerd. De EC-waarde van het oppervlaktewater wordt in de zomer van 1988 mede beïnvloed door de ondiepe afvoercomponenten en is daardoor lager dan in de zomer van 1989, waarin deze componenten praktisch geen rol spelen. In de winter 1988/89 (derde tijdvak) vindt in beperkte mate drainage plaats, waardoor een zeer geringe afname van het infiltratielichaam is berekend. Vanaf het vierde t/m negende tijdvak vindt een continue infiltratie plaats. Uit fig. 38b volgt een uitbreiding tot een diepte van 10 tot 11 m - mv. Dit is in overeenstemming met het gewijzigde beeld in de gemeten EC-waarden.

Proefgebied 't Haantje
Voor het proefgebied 't Haantje zijn op 6 m - mv. en dieper de EC-waarden relatief laag en vertonen praktisch geen verandering. Hieruit volgt direct de conclusie dat de beïnvloeding van het grondwater beperkt blijft tot een diepte van 3 tot 4 m - mv.

Proefgebied Noordsche Schut
Het proefgebied Noordsche Schut is voor de hydrologische processen in de omgeving van de waterlopen vergelijkbaar met het proefgebied Geesbrug, maar de veranderingen in het infiltratielichaam zijn geringer. Uit de bemonstering van de filters volgt een scherpe overgang in gemeten EC-waarden van 12 tot 15 m - mv. Op dit niveau bevindt zich een slecht doorlatende laag die de verticale grondwaterstroming stagneert. De relatieve hoge EC-waarden voor de filters op 9 en 12 m - mv. boven deze laag handhaven zich grotendeels tijdens de gehele onderzoeksperiode. De uitgevoerde

modelberekeningen geven aan dat deze waterlaag met hoge EC-waarden kan worden verklaard door infiltratie in het verleden in een aantal aansluitende droge jaren. Als voorwaarde dienen dan dezelfde of hogere EC-waarden in het oppervlaktewater voor te komen. De invloed van het geïnfiltreerde water is beperkt.

Proefgebied Uffelte
Uit fig. 38b volgt dat in alle tijdvakken infiltratie plaatsvindt in proefgebied Uffelte. Het gevormde infiltratielichaam is van beperkte omvang en bereikt een diepte van 3 tot 4 m - mv. De EC-waarden van de monsters uit het filter op 3 m - mv. zijn in grootte orde gelijk aan die van het oppervlaktewater.

Proefgebied Zwiggelte
Het beeld van gemeten EC-waarden aan monsters van het oppervlaktewater en de filters vertoont een vrij permanent karakter in proefgebied Zwiggelte. Alleen in de laatste drie tijdvakken komt infiltratie voor. Het oppervlaktewater heeft in die periode een relatief hoge EC-waarde, het filter op 3 m - mv. wordt hierdoor beïnvloed. Het infiltratielichaam in fig. 38c komt hiermee overeen.

7.4 Conclusies

Het effect van wateraanvoer op de oppervlaktewaterkwaliteit binnen een proefgebied is duidelijk merkbaar, aangezien de beschouwde kwaliteitsparameters van het aangevoerde (gebiedsvreemd) water in het algemeen afwijken van die van het gebiedseigen water.

In een droge periode zal het aangevoerde water, afhankelijk van het inlaatdebiet, in wegzijgingsgebieden grotendeels de kwaliteit van het oppervlaktewater binnen een proefgebied gaan bepalen. In kwelgebieden zal, afhankelijk van de kwelintensiteit, de beïnvloeding door het ingelaten water zich allereerst manifesteren in de hoofdwaterlopen, met name als deze waterlopen dienen voor wateraanvoer naar aangrenzende gebieden. De kwaliteit van het aangevoerde water is niet constant, maar vertoont fluctuaties in de beschouwde parameters.

In afwisselend droge en natte perioden met wateraanvoer vermengt zich het gebiedsvreemde met het gebiedseigen water, waardoor het effect op de oppervlaktewaterkwaliteit minder duidelijk wordt.

Het effect van wateraanvoer op de grondwaterkwaliteit wordt in eerste instantie bepaald door de beïnvloeding van de oppervlaktewaterkwaliteit en in tweede instantie door de intensiteit van infiltratie vanuit de waterlopen.

De mate van infiltratie hangt af van de weersgesteldheid en wordt verder bepaald door de hydrologische situatie (kwel of wegzijging) en de hydrologische eigenschappen van de waterlopen en het afdekkend pakket.

In de proefgebieden met kwel van betekenis vindt praktisch geen infiltratie plaats. Het

aangevoerde water wordt weer afgevoerd. Beïnvloeding van het grondwater is niet blijvend. In de proefgebieden met een geringe kwel vindt alleen in relatief droge zomers enige infiltratie plaats. Het gevormde infiltratielichaam zal in de daarop volgende winter door drainage weer geheel verdwijnen.

In de proefgebieden met wegzijging is veelal infiltratie van het aangevoerde water geconstateerd; de mate waarin wordt voor een belangrijk deel bepaald door de geometrie en de hydrologische eigenschappen van de bodemlagen onder de waterlopen ofwel door het voedingstype en de bodemweerstand. Bij de voedingstypen A1, A2 en B kan infiltratie van betekenis voorkomen, bij het voedingstype C2 is dit in veel mindere mate mogelijk.

In de proefgebieden met wegzijging en goed doorlatende lagen onder de waterlopen (voedingstype A1 en B) hangt het in de zomer gevormde infiltratielichaam qua omvang nauw samen met de weersgesteldheid. Een in een natte zomer gevormd infiltratielichaam zal in de daarop volgende winter weer geheel verdwijnen door drainage. In een relatief droge zomer kan het infiltratielichaam echter een dergelijke omvang bereiken dat bij optredende drainage alleen het gedeelte onder de slootbodem verdwijnt. Dit is met name het geval bij een homogene ondergrond (voedingstype A1) of wanneer de weerstandbiedende laag bij voedingstype B op relatief grote diepte voorkomt en de c-waarde hiervan laag is. Bij een ondiepe ligging van de weerstandbiedende laag van betekenis bij voedingstype B, maar ook bij een heterogene opbouw van de ondergrond bij voedingstype A1 met relatief goed doorlatende lagen op geringe diepte, heeft het infiltratielichaam tot op geringe diepte onder de slootbodem een aanzienlijke verbreiding in horizontale richting. Bij drainage zal het infiltratielichaam weer geheel verdwijnen.

In de proefgebieden met een hoge potentiële wegzijging met voedingstype A2 vindt overwegend een permanente infiltratie plaats van afwisselend gebiedsvreemd water en/of gebiedseigen water.

De intensiteit van de infiltratie is, zelfs in een relatief droge zomer, laag te noemen. Een belangrijk deel hiervan dient voor grondwateraanvulling, een fractie is beschikbaar voor de vochtvoorziening van landbouwgewassen.

De lage infiltratie en afvoer van geïnfiltreerd water onder de waterloop door drainage in de winter kunnen de grondwaterkwaliteit onder de waterlopen tijdelijk beïnvloeden. Bij de voedingstypen A1 en B kan, afhankelijk van de geometrie en hydrologische eigenschappen van de ondergrond, een deel van het geïnfiltreerde water de grondwaterkwaliteit meer permanent beïnvloeden. Deze mogelijkheid is ook aanwezig voor het voedingstype A2.

8 BEREKENING VAN VOEDINGS- EN/OF DRAINAGEWEERSTANDEN

In hoofdstuk 3 is een theoretische beschouwing gegeven over voedings- en drainageweerstanden, waaruit blijkt dat deze weerstanden op verschillende wijze kunnen worden berekend en dat daarvoor specifieke gegevens nodig zijn. In dit hoofdstuk zal aandacht worden besteed aan de toegepaste berekeningsmethoden met aansluitend daarop een toelichting op de verkregen resultaten.

8.1 Methode

Met de formule van Ernst is de differentie-benadering van de drainageweerstand op de volgende wijze bepaald:
- met (10) uit een q(h)-relatie;
- met (8) uit de specifieke afvoer en het gemiddelde verschil in hoogte tussen de grondwaterstand en het peil in de waterlopen.

De q(h)-relatie is verkregen uit gemeten netto-afvoeren, opgenomen grondwaterstanden en de ontwateringsbasis binnen de proefgebieden. De klassen van de waterlopen zijn ingedeeld in twee groepen: de klassen 0 en 01, en de klassen ≥ 1. Hiermee samenhangend is de q(h)-relatie geschematiseerd tot één of twee rechten, afhankelijk van het voorkomen van beide groepen en de diepteligging van de ontwateringsbasis (fig. 39).

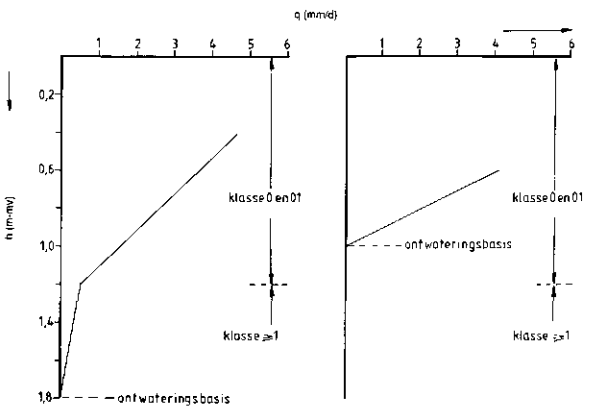


Fig. 39 Schematisatie van de q(h)-relatie door één of twee rechten

Met lineaire regressie is een waarde voor γ^* berekend. Indien de relatie door twee rechten is weergegeven wordt een waarde voor de winter en de zomer verkregen. Deze situatie komt voor als de waterlopen in de klassen 0 en 01 in de loop van het voorjaar droogvallen. Indien de waterlopen in de voorkomende klassen het gehele jaar watervoerend zijn, is de relatie door een rechte weergegeven. Dit betekent een praktisch

constante waarde voor γ^*. In de aanvoergebieden zijn de grotere waterlopen altijd watervoerend. In de afvoergebieden is de hydrologische situatie hierop van invloed, daarom is voor deze proefgebieden eveneens getracht een waarde voor de kwel of wegzijging uit de waterbalans te bepalen. Voor Uffelte is geen q(h)-relatie bepaald, omdat is gebleken dat de waterlopen in dit proefgebied permanent infiltreren. Tengevolge van het voorkomen van het voedingstype A2/B kan in natte perioden tijdelijk afvoer naar de waterlopen optreden.

Bij de tweede methode is voor de wintersituatie een waarde voor γ^* berekend uit de gemeten afvoer en het gemiddelde verschil in hoogte tussen de grondwaterstand en het peil in de waterlopen. Voor de netto-afvoer uit de debietmetingen is een gemiddelde waarde vastgesteld voor de periode van medio april 1989 tot medio mei 1989. Voor dezelfde periode is een gebiedsgemiddelde voor de grondwaterstand en het peil in de waterlopen beneden maaiveld vastgesteld.

Hierbij is gebruik gemaakt van raaien grondwaterstandsbuizen loodrecht op de klassen van waterlopen en gegevens uit een inventarisatie van het waterlopenpatroon. Met (8) is vervolgens een waarde voor γ^* te berekenen. Deze waarde geldt voor de wintersituatie.

Uit het voorgaande volgt dat met (8) en (10) twee waarden zijn verkregen voor de wintersituatie; het gemiddelde hiervan is gebruikt voor de berekening van de voedingsweerstand. Voor de zomersituatie is de met (10) verkregen waarde gebruikt. Voor de berekening van de voedingsweerstand is aan γ^* een waarde toegevoegd, die betrekking heeft op de verticale weerstand van eventuele weerstandbiedende lagen onder de bodem van de waterlopen. Voor het voedingstype A2 is geen voedingsweerstand berekend. Afhankelijk van de diepteligging van de weerstandbiedende lagen kunnen binnen hetzelfde proefgebied voor de onderscheiden klassen waterlopen meer voedingstypen voorkomen. Voor de aanvoergebieden is hierover complete informatie verkregen. Voor de proefgebieden met alleen afvoer is uit de ondiepe boorgegevens, verkregen bij het plaatsen van de grondwaterstandsbuizen, een indicatie aan te geven over het voedingstype. Voor het toekennen van een c-waarde voor de lagen onder de waterlopen zijn de hierboven verkregen gegevens van de proefgebieden 1 t/m 9 gebruikt. Aangezien bij deze procedure rekening dient te worden gehouden met een bepaalde marge, zijn de voedingsweerstanden door een interval weergegeven. De voedingsweerstanden zijn berekend voor de zomer- en wintersituatie.

Met de formules van Bruggeman zijn met uitzondering van de voedingstypen C1 en C2 voor de voorkomende klassen in de proefgebieden 1 t/m 9 waarden voor γ^* en de voedingsweerstand berekend. Voor het voedingstype A2 is γ^* buiten beschouwing gelaten. Bij de berekeningen zijn gegevens over de bodemweerstand, de doorlatendheid en de diepteligging en de c-waarde van weerstandbiedende lagen gebruikt. Voor de proefgebieden met afvoer zijn alleen berekeningen uitgevoerd voor het voedingstype A2. Voor de toepassing van de formules van Bruggeman is een interactief computerprogramma gebruikt.

8.2 Uitgevoerde berekeningen

8.2.1 Bepaling q(h)-relaties

In hoofdstuk 6 zijn de basisgegevens uit het veldonderzoek behandeld. Hieruit blijkt dat voor de gebieden met een mogelijkheid voor wateraanvoer op dagbasis netto-afvoeren beschikbaar zijn van 1 juni 1988 tot 31 oktober 1989. Voor de gebieden met overwegend afvoer zijn eveneens dergelijke gegevens beschikbaar, maar voor een kortere periode, namelijk van 1 december 1988 tot 15 mei 1989. De gegevens van de gemiddelde grondwaterstand zijn ontleend aan opnamen van de grondwaterstand in strategisch geplaatste buizen in de proefgebieden. De frequentie van de opnamen was veelal wekelijks en de grondwaterstand is voor alle gebieden van medio maart tot medio mei 1989 opgenomen. Uit het gegevensbestand kunnen gemiddelde waarden voor de grondwaterstandsdiepte en de daarbij behorende afvoer per proefgebied worden verkregen. Aangezien de frequentie van de opgenomen grondwaterstanden lager ligt dan de afvoeren op dagbasis is de reeks van wekelijks gemeten grondwaterstanden aangevuld. Hiervoor zijn dagelijks opgenomen grondwaterstanden in Duiven en Zetten gebruikt. Voor de meetdagen zijn de waarnemingen in de twee genoemde plaatsen gecorreleerd met die voor de 19 proefgebieden in Drenthe. De resultaten zijn opgenomen in tabel 20.

De correlatie-coëfficiënten waren voor Eelde, 't Haantje, Borger, Smilde en Wijster dusdanig laag dat hiermee niet is gerekend. Voor de overige proefgebieden zijn uit het grondwaterstandsverloop te Duiven en Zetten aanvullende grondwaterstanden berekend. Uitgaande van de oorspronkelijke reeks grondwaterstandsdiepten en de op de dagbasis aangevulde reeks zijn q(h)-relaties samengesteld. In fig. 40 en 41

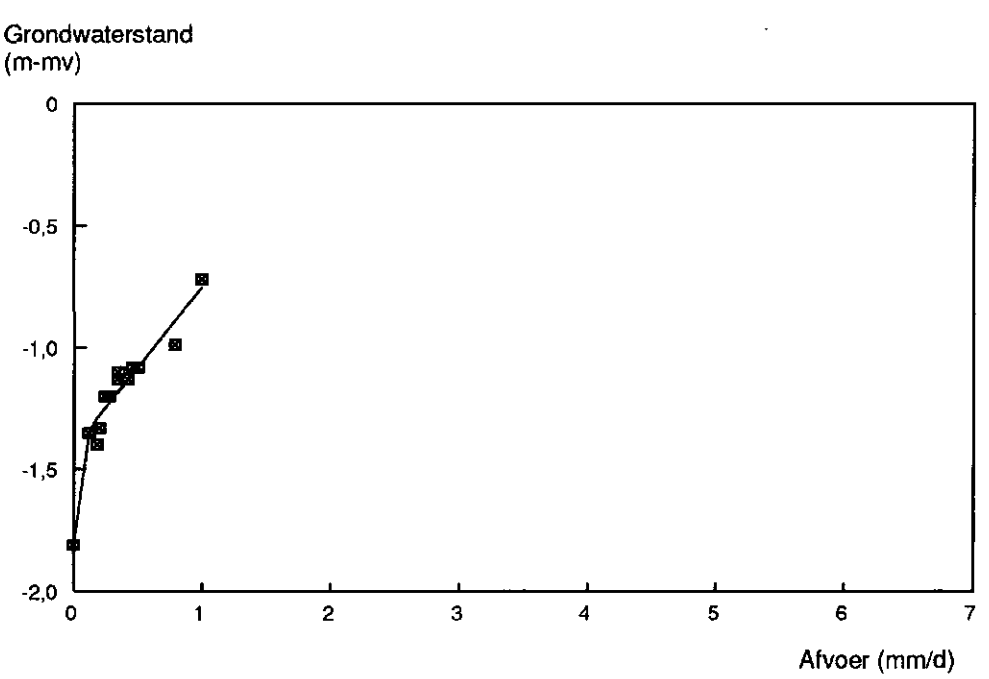


Fig. 40 q(h)-relatie voor Anderen (oorspronkelijke meetreeks)

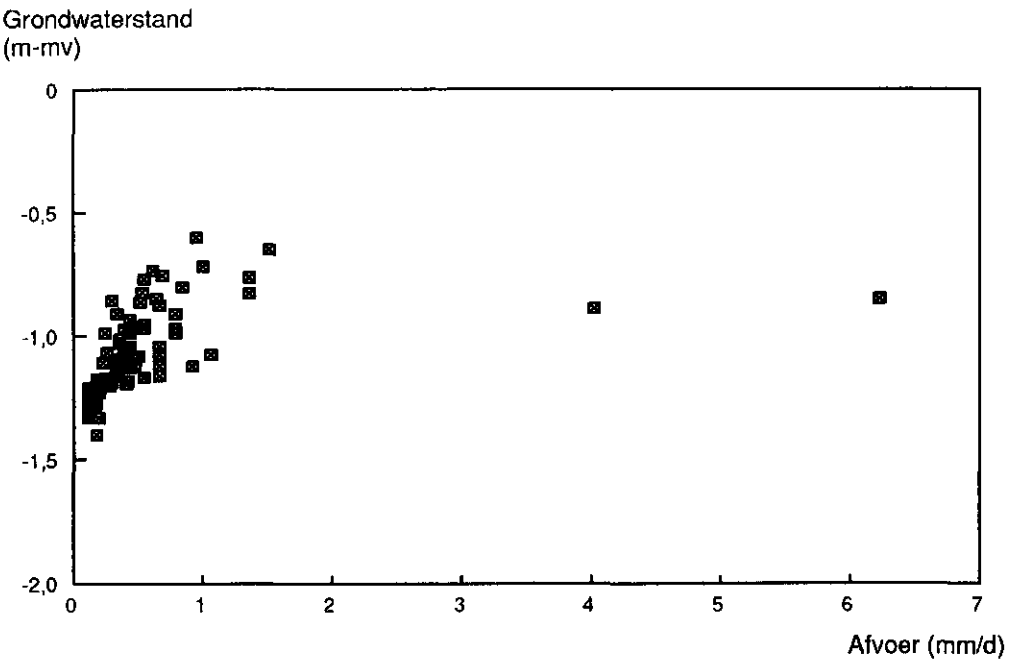


Fig. 41 q(h)-relatie voor Anderen (aangevulde meetreeks)

zijn voor het proefgebied Anderen deze relaties weergegeven. In fig. 41 zijn alleen de punten weergegeven als aanvulling op fig. 40. Bij de berekening van de differentie-benadering van de drainageweerstand is alleen de oorspronkelijke meetreeks gebruikt.

Tabel 20 Correlatie-coëfficiënten (r) voor gemeten grondwaterstanden

Nr.	Afvoergebied (Y)	Duiven/Zetten (X)	Aantal waarn.	r	Regressie-coëfficiënt	Regressie-constante
1	Beilen	Duiven	10	0,82	0,44	40,85
2	Dalerveen	Duiven	8	0,98	1,53	-125,61
3	Eelde	Duiven	6	0,63	0,68	-15,18
4	Geesbrug	Duiven	8	0,99	1,75	-155,70
5	Noordsche Schut	Duiven	8	0,93	2,02	-131,57
6	Nijeveen	Zetten	8	0,95	2,14	-255,32
7	't Haantje	Duiven	8	0,65	0,13	65,15
8	Uffelte	Duiven	8	0,84	0,84	-21,80
9	Zwiggelte	Duiven	8	0,91	0,62	6,19
10	Anderen	Duiven	12	0,82	1,33	-83,34
11	Borger	Duiven	9	0,32	0,15	66,61
12	Brunsting	Zetten	9	0,83	0,24	32,18
13	Gieten	Duiven	8	0,88	0,49	10,72
14	Gieterveen	Duiven	13	0,91	1,60	-101,64
15	Noord-Sleen	Duiven	9	0,99	1,02	-35,85
16	Smilde	Duiven	9	0,55	0,23	66,60
17	Tynaarlo	Duiven	12	0,88	0,80	6,86
18	Veenhuizen	Duiven	11	0,95	1,69	-136,07
19	Wijster	Duiven	9	0,65	0,27	34,72

Uit fig. 41 blijkt dat op een beperkt aantal dagen relatief hoge afvoeren kunnen voorkomen. Dit is voor meerdere proefgebieden waargenomen. De hoge waarden kunnen wellicht worden toegeschreven aan een snelle afvoercomponent (surface-runoff en interflow). De spreiding van de punten voor de aangevulde reeks is iets groter dan de reeks met alleen de meetwaarden. Bij de berekening van de differentie-benadering voor de drainageweerstanden zijn deze extreme waarden buiten beschouwing gelaten.

Vergelijkbaar met het voorbeeld in fig. 39 zijn de punten met als grensvlak een waarde van 1,2 m voor h opgedeeld in twee groepen, indien de ontwateringsbasis beneden het niveau van klasse 0 en 01 ligt. Indien de ontwateringsbasis hierboven ligt, is een opdeling achterwege gelaten. In beide gevallen is q = 0, wanneer h gelijk is aan de diepte van de ontwateringsbasis. Bij twee rechten is de bovenste toegekend aan een wintersituatie en de onderste aan een zomersituatie. Indien de relatie door een rechte wordt weergegeven, is de γ^* waarde voor de winter en zomer aan elkaar gelijk. In de proefgebieden met wateraanvoer kan de diepte van de ontwateringsbasis worden beïnvloed door het stuwbeheer. Indien de grondwaterstand beneden de ontwateringsbasis daalt, zal infiltratie op gaan treden. Als globale benadering kan de bepaalde drainageweerstand voor de zomer gelijk worden gesteld aan de infiltratieweerstand.

In de afvoergebieden vindt vrije drainage plaats. Door peilbeheer wordt getracht om in het voorjaar het ontwateringsproces te vertragen of de waterconservering te bevorderen. Een belangrijk aspect hierbij is de hydrologische situatie (kwel of wegzijging).

Voor de proefgebieden met wateraanvoer was een geschikte meetperiode beschikbaar om de kwel en wegzijging als restterm uit een waterbalans te bepalen. Voor de afvoergebieden was slechts een korte meetreeks beschikbaar (december 1988 tot medio mei 1989). Voor de aanvoergebieden is van december 1988 tot medio 1989 een periode geselecteerd, waarvoor dezelfde waarden voor de kwel en wegzijging (tabel 19) werden berekend als voor de balansperiode indertijd. De meest geschikte periode was december 1988 t/m april 1989; voor deze periode is voor de afvoergebieden met (32) een waarde voor de kwel en wegzijging bepaald (tabel 21).

Tabel 21 Berekende kwel (mm/d) en wegzijging (mm/d)

Nr.	Gebied	Kwel	Wegzijging
10	Anderen		0,65
11	Borger	1,02	
12	Brunsting		0,14
13	Gieten	2,00	
14	Gieterveen		0,47
15	Noord Sleen	0,56	
16	Smilde	0,18	
17	Tynaarlo		0,23
18	Veenhuizen		0,32
19	Wijster		0,23

In de proefgebieden zonder aanvoer met een wegzijging groter dan 0,2 mm/d kunnen

alle waterlopen in de loop van de zomer droogvallen. Voor deze proefgebieden is de q(h)-relatie met behulp van (10) getransformeerd in een γ^*(h)-relatie. Voor de te verwachten grondwaterstanden in de zomer is een γ^*-waarde benaderd voor deze proefgebieden. In tabel 22 zijn de verkregen drainageweerstanden weergegeven.

8.2.2 Specifieke grondwaterafvoer en drukverschil

Voor de bepaling van een waarde voor γ^* uit het gemiddeld drukverschil tussen de grondwaterstand, het peil in de waterlopen en de specifieke grondwaterafvoer met (8), is als meetperiode medio maart tot medio mei 1989 beschouwd. Voor het vaststellen van een gemiddelde waarde voor de specifieke afvoer in deze periode zijn beschikbare debietgegevens op dagbasis gebruikt. De extreme afvoeren, die niet passen in de q(h)-relatie, zijn bij deze middeling niet meegenomen. Een gemiddelde waarde voor het verschil in hoogte tussen het grondwatervlak en de peilen in waterlopen in vlakke gebieden is betrekkelijk eenvoudig te verkrijgen. Binnen de proefgebieden die hiertoe kunnen worden gerekend, blijkt uit de geregistreerde peilen en incidentele opnamen bij benadering hetzelfde peil voor te komen. Voor deze gebieden is een waarde voor het gemiddeld drukverschil verkregen uit een gemiddelde grondwaterstand, een peil ten opzichte van NAP en maaiveld en uit gegevens hiervoor uit raaien loodrecht op de waterlopen. Voor de hellende proefgebieden zijn vooral veldopnamen gebruikt, waarbij de diepteligging van en de waterhoogte in de waterlopen zijn opgemeten. Met de lengte van de waterlopen, volgens de onderscheiden klasse, is rekening gehouden om een gemiddelde waarde voor het peil beneden maaiveld te bepalen. Het verschil tussen deze waarde en de gemiddelde grondwaterstandsdiepte levert het gemiddeld drukverschil. In tabel 22 zijn naast basisgegevens de berekende drainageweerstanden weergegeven; door een * is aangegeven welke waarden zijn bepaald uit de γ^*(h)-relatie.

Tussen de $\gamma^* r_w$- en $\gamma^* h_w$-waarden voor de wintersituatie is in het algemeen een redelijke overeenkomst, waarbij de $\gamma^* h_w$-waarden veelal op een hoger niveau liggen. Voor de proefgebieden Nijeveen, Borger en Gieten met een kwel > 1,0 mm/d worden de laagste drainageweerstanden aangetroffen. De waarde voor het proefgebied Beilen valt enigszins uit de toon. Hier kan sprake zijn van een overdimensionering van het waterlopenpatroon voor drainage. Voor de later te berekenen voedingsweerstand in de winter is het gemiddelde van $\gamma^* r_w$ en $\gamma^* h_w$ genomen, weergegeven door $\gamma^* w$. Voor de zomersituatie is in de proefgebieden met wateraanvoer de $\gamma^* r_z$-waarde, die bij benadering gelijk is aan de infiltratieweerstand, relatief hoog. Een uitzondering vormt Nijeveen, maar daar vindt praktisch geen infiltratie plaats vanwege de relatief hoge kwel. De hoge infiltratieweerstand geeft voor een belangrijk deel een verklaring voor de geringe infiltratie in de aanvoergebieden.

Tabel 22 Berekende drainageweerstanden (γ) volgens formule 8 en 10

Nr.	Gebied	Volgens (10)		Volgens (8)			Gemiddelde van 8 en 10
		$\gamma^* r_w$ (d)	$\gamma^* r_z$ (d)	q (mm/d)	$(h_{om}-h_{os})$ (m)	$\gamma^* h_w$ (d)	$\gamma^* w$ (d)
1	Beilen	90	1540*	0,33	0,04	120	110
2	Dalerveen	300	930	1,19	0,50	420	360
3	Eelde	310	2600	0,88	0,52	590	450
4	Geesbrug	410	2040	0,48	0,15	310	360
5	't Haantje	570	570	0,43	0,25	590	580
6	Noordsche Schut	500	5000	0,31	0,21	670	590
7	Nijeveen	80	80	1,17	0,10	80	80
8	Uffelte			1,26			
9	Zwiggelte	110	1650	1,01	0,36	360	240
10	Anderen	560	4000*	0,43	0,32	740	650
11	Borger	50	1280	2,55	0,22	90	70
12	Brunsting	300	2000	1,36	0,30	220	260
13	Gieten	100	180	2,61	0,66	250	180
14	Gieterveen	380	5000*	0,62	0,25	400	390
15	Noord-Sleen	240	240	1,78	0,39	220	230
16	Smilde	330	2060	1,63	0,66	400	370
17	Tynaarlo	370	4000*	0,93			370
18	Veenhuizen	330	1740	0,60	0,13	220	280
19	Wijster	320	5000*	1,13	0,57	510	420

8.2.3 Bepaling van de voedingsweerstand

De wijze waarop de voedingsweerstand is berekend en de hiervoor benodigde gegevens, hangen nauw samen met het voedingstype. Binnen een proefgebied kunnen voor de onderscheiden klassen van waterlopen meer voedingstypen voorkomen. In eerste instantie zijn dan ook de voedingstypen per proefgebied vastgesteld. Voor de proefgebieden met wateraanvoer is hiervoor voldoende informatie verkregen, voor de afvoergebieden zijn alleen gegevens verkregen over de ondiepe profielopbouw. Dit heeft voor deze laatste proefgebieden geleid tot het aangeven van meerdere voedingstypen. De aldus verkregen voedingstypen zijn opgenomen in tabel 23. In deze tabel zijn tevens de voedingstypen vermeld, zoals die voorkomen in het Grondwaterplan (bijlage 5).

Een + teken achter het voedingstype in tabel 23 voor de proefgebieden 1 t/m 9 betekent, dat op een bepaalde diepte nog een weerstandbiedende laag voorkomt. Voor de proefgebieden 10 t/m 19 zijn hierover geen gegevens verkregen, derhalve zijn twee situaties onderscheiden: geen of wel een weerstandbiedende laag. Dit is aangegeven door het voedingstype A1 of B of door toevoeging van een + teken. Het voedingstype in de rechtse kolom is enigszins vergelijkbaar met die van de klasse ≥ 1, hierbij dient echter wel de schaal, waarop het onderzoek is uitgevoerd, te worden betrokken. Voor zeven proefgebieden is de mogelijkheid aanwezig voor een identiek voedingstype.

Tabel 23 Voedingstypen van de waterlopen uit veldonderzoek en volgens het Grondwaterplan

Nr.	Gebied	Veldonderzoek		Grondwaterplan
		Klasse 0 en 01	Klasse ≥ 1	
1	Beilen	B	B	C1
2	Dalerveen	C2	C2	B
3	Eelde	A1	A1	A1/C1
4	Geesbrug	C2+	A2+	B
5	't Haantje	A1	A1	A1
6	Noordsche Schut	C2+	A2+	C1
7	Nijeveen	B	B	A1
8	Uffelte	C2+	A2+	B
9	Zwiggelte	B	B	C1
10	Anderen	A1/B	A1/B	A1/B
11	Borger	A1/B	A1/B	B
12	Brunsting	A1/B	A1/B	A1
13	Gieten	C2/C2+	C2/C2+	B
14	Gieterveen	A1/B	A1/B	A1
15	Noord Sleen	A1/B	A1/B	C1
16	Smilde	A1/B	A1/B	B
17	Tynaarlo	A1/B	A1/B	A1
18	Veenhuizen	C1/C1+	A2/A2+	C1
19	Wijster	C2/C2+	C2/C2+	C1

Voor een berekening van de voedingsweerstand, met uitzondering van A2, dient aan de γ^*-waarden uit tabel 22 nog een c-waarde te worden toegevoegd, indien weerstandbiedende lagen onder de bodem van de waterlopen of het drainagesysteem voorkomen. Voor de eerste negen proefgebieden is hierover informatie verkregen (tabel 24).

Tabel 24 Verticale weerstanden (c en c_b) en doorlaatfactoren (k_h en k_v)

Nr.	Gebied	Klasse 0 en 01		Klasse ≥ 1					
		c	diepte	c	diepte	k_h	k_v	c_b	c_b tabel 12
		(d)	(m- mv.)	(d)	(m- mv.)	(m/d)	(m/d)	(d)	(d)
1	Beilen	40	6,5-8	40	6,5- 8	8	4	3,3	(1,8)
2	Dalerveen	280	1 -8	280	1 - 8	8	4		(2,8)
3	Eelde					5	2,5		(2,6)
4	Geesbrug	500/ 50	1 -2 / 3- 4	50	3 - 4	1	0,5	2,8	(2,9)
5	't Haantje					5	2,5	0,4	(0,5)
6	N.Schut	1670/ 40	1 -2 /10-14	40	10 -14	3	1	52	
7	Nijeveen	180	3 -3,5	180	3 - 3,5	6	3		(1,4)
8	Uffelte	100/100	1 -2 / 3-10	100	3 -10	0,5	0,25	50	
9	Zwiggelte	1000	7,5-8	1000	7,5- 8	5	2,5	0,5	(0,6)

In tabel 24 staat tussen haakjes de waarde voor c_b uit tabel 12 vermeld; de andere waarden zijn afgeleid uit de k_v-waarden zoals deze zijn gebruikt bij de modellering met STRELIN. Indien het voedingstype van de klasse 0, 01, en ≥ 1 dezelfde is, wordt de voedingsweerstand voor zomer en winter verkregen door toevoeging van een c-waarde aan $\gamma^* r_z$ en $\gamma^* w$.

Voor de proefgebieden in tabel 24 zijn c-waarden beschikbaar, deze waarden zijn gebruikt voor de resterende proefgebieden. De c-waarde van een weerstandbiedende laag onder de bodem van de waterlopen (voedingstype B) varieert van 40 tot 180 d met een extreme waarde van 1000 d voor Zwiggelte. Als waarde is de mediaan van 80 d aangehouden. Voor de proefgebieden 10 t/m 19 voor het voedingstype B of als een + teken voorkomt, wordt 80 d toegevoegd aan de drainageweerstand. Voor de waterlopen met voedingstype C2 is eenzelfde procedure uitgevoerd; als mediaan van de c-waarde is 390 d verkregen. Voor deze proefgebieden wordt aan de drainageweerstand 390 d toegevoegd met nog eens 80 d extra als een + teken voorkomt. Voor Veenhuizen met voedingstype C1 voor de waterlopen in klasse 0 en 01 is eveneens een c-waarde van 390 d aangehouden. Voor alle proefgebieden met uitzondering van die met voedingstype A2 is nu de voedingsweerstand voor winter en zomer te berekenen. Aangezien voor de proefgebieden 10 t/m 19 geen zekerheid is over de aanwezigheid van weerstandbiedende lagen, en de c-waarde hiervan, is een bepaalde marge aangehouden.

Voor de proefgebieden met voedingstype A2 en voor Beilen, Eelde,'t Haantje, Nijeveen en Zwiggelte is de drainageweerstand berekend met de formules van Bruggeman (tabel 25).

Tabel 25 Drainageweerstanden γl in d berekend met formules van Bruggeman

Gebied	Voedingstype	Klasse 0, 01 en ≥ 1	Klasse ≥ 1
Beilen	**B**	**550**	**890**
Eelde	**A1**	**490**	**1010**
Geesbrug	**A2**	**570***	**1470**
't Haantje	**A1**	**300**	**450**
Noordsche Schut	**A2**	**1160***	**2290**
Nijeveen	**B**	**80**	**90**
Uffelte	**A2**	**-**	**12400**
Zwiggelte	**B**	**340**	**1010**
Veenhuizen	**A2**	**390***	**850**

*** combinatie van de formules van Ernst en Bruggeman**

De berekening van de drainageweerstand voor de wintersituatie, indien voor de waterlopen in de klasse ≥ 1 het voedingstype A2 voorkomt, is op de volgende wijze uitgevoerd. Met (de formules van) Ernst is de drainageweerstand bepaald voor de winter- en zomersituatie: voor Geesbrug respectievelijk 360 en 2040 d. De drainageweerstand voor de winter is opgesplitst in een diepe weerstand (voor klasse ≥ 1) en een ondiepe weerstand (klasse 0 en 01), waarbij de reciproke waarde voor de ondiepe en diepe weerstand gelijk is aan de reciproke waarde voor de drainageweerstand in de winter. Dit geeft een ondiepe weerstand van 440 d voor de klasse 0 en 01. Aan deze waarde is vervolgens 500 d toegevoegd voor de c-waarde van de weerstandbiedende lagen tussen de slootbodem van klasse 0, 01, en ≥ 1. De verkregen waarde wordt aangeduid als een fictieve drainageweerstand voor de klasse 0 en 01. De berekende waarde van 1470 d voor de klasse ≥ 1 voor het voedingstype A2 van Geesbrug met Bruggeman kan eveneens als een fictieve drainageweerstand worden beschouwd. Als alle klassen watervoerend zijn, wordt een fictieve drainageweerstand berekend uit de som van de reciproke waarden van de fictieve drainageweerstand van beide klassen. De hiervoor verkregen waarde bedraagt 570 d.

Om een voedingsweerstand te verkrijgen dient aan de waarden in tabel 25 nog een c-waarde te worden toegevoegd, indien in tabel 23 als voedingstype B voorkomt of als achter het voedingstype een + teken staat. De aldus verkregen voedingsweerstanden zijn vermeld in tabel 26. In deze tabel zijn tevens voedingsweerstanden opgenomen voor niet permanent en permanent voedende waterlopen, die zijn verkregen uit kaarten van het Grondwaterplan.

Tabel 26 Voedingsweerstanden in d volgens Ernst, Bruggeman en Grondwaterplan

Nr.	Proefgebied	Ernst		Bruggeman		Grondwaterplan	
		winter	zomer	winter	zomer	niet permanent	permanent
1	Beilen	150	1580	590	930		500-2000
2	Dalerveen	640	1210				285- 800
3	Eelde	450	2600	490	1010	40- 390	600-2325
4	Geesbrug			620	1520		465-1610
5	't Haantje	580	570	300	450		470-1640
6	Noordsche Schut			1200	2330		910-3125
7	Nijeveen	260	260	260	270		20- 200
8	Uffelte				12500	5000-8000	200- 500
9	Zwiggelte	1240	2650	1340	2010		500-2000
10	Anderen	650/ 730	4000/4080			150-1050	
11	Borger	70 / 150	1280/1360			950-3330	
12	Brunsting	260/ 340	2000/2080			20- 200	210- 540
13	Gieten	570/ 650	570/ 650			20- 200	1490-4545
14	Gieterveen	390/ 470	5000/5080			2630-5880	310- 910
15	Noord Sleen	230/ 310	240/ 320			760-2780	
16	Smilde	370/ 450	2060/2140			30- 280	345-1050
17	Tynaarlo	370/ 450	4000/4080			700-2630	
18	Veenhuizen			390/ 470	850/ 930		4440-8000
19	Wijster	810/ 890	5390/5470			2080-5550	3330-7140

Uit tabel 26 blijkt in grote lijnen een overeenkomst tussen de met Ernst en Bruggeman berekende voedingsweerstanden voor winter en zomer voor de proefgebieden Beilen, Eelde, 't Haantje, Nijeveen en Zwiggelte. De met Ernst berekende waarde voor de winter in het proefgebied Beilen wijkt sterk af. Dit is toe te schrijven aan uiteenlopende waarden voor de berekende drainageweerstand volgens Ernst en Bruggeman. Bij een vergelijking van de waarden uit het onderzoek met die uit het Grondwaterplan zijn de zomersituatie en de permanent voedende waterlopen beschouwd. In fig. 42 zijn de waarden of de mediaan van het interval voor de voedingsweerstand volgens Ernst en Bruggeman uitgezet tegen de mediaan van het interval van de voedingsweerstand uit het Grondwaterplan. De spreiding is groot, wat voor een belangrijk deel samenhangt met de verschillende schalen waarop het onderzoek is uitgevoerd en de grote variatie in de voedingsweerstanden in de zomer. Het gemiddeld beeld geeft globaal een overeenkomst aan.

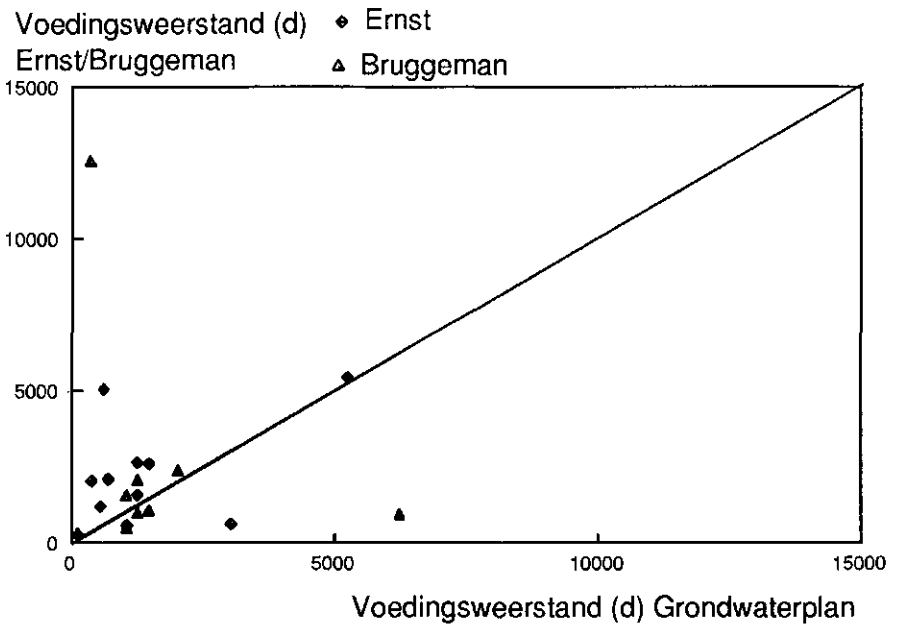


Fig. 42 Het verband tussen voedingsweerstanden uit het verrichte onderzoek en de waarden hiervoor uit het Grondwaterplan

8.3 Conclusies

Uit afvoermetingen blijkt dat in praktisch alle proefgebieden incidenteel hoge afvoeren voorkomen, die niet verklaard kunnen worden door de verkregen q(h)-relaties. Deze extremen kunnen wellicht worden toegeschreven aan snelle afvoercomponenten (surface-runoff en interflow). De gemiddelde frequentie in de periode 1 februari - 31 mei 1989 is twee afvoertoppen met een gemiddelde gebiedsafvoer van 8,2 mm/d.

De opbouw van de ondiepe ondergrond wordt gekenmerkt door een heterogene samenstelling. Dit komt tot uiting in meer voedingstypen binnen hetzelfde proefgebied.

Uit het onderzoek is niet gebleken dat de bodemweerstand van waterlopen, die alleen draineren, verschilt van die van waterlopen die afwisselend draineren en infiltreren.

Voor proefgebieden met wegzijging leidt de geringe infiltratie grotendeels tot een extra aanvulling van de grondwatervoorraad. Slechts een fractie hiervan komt ten goede aan de vochtvoorziening van de gewassen.

De dichtheid van het waterlopenstelsel wordt naast de hydrologische (kwel/wegzijging) en waterhuishoudkundige situatie eveneens bepaald door de geomorfologie en het voedingstype. Voor gebieden met microreliëf is de slootafstand groter dan voor vlakke gebieden. Voor gebieden met voedingstype B wordt de kleinste slootafstand gevonden, terwijl voedingstype A1 de grootste slootafstand heeft. Voedingstype A2 en C2 verschillen nauwelijks qua slootafstand en bevinden zich tussen voedingstype A1 en

B. Voor het watervoerend karakter blijkt dat voor klasse 1 voornamelijk de geomorfologie hierop van invloed is.

In proefgebieden zonder aanvoer met een wegzijging >0,2 mm/d zijn in de zomer de waterlopen niet watervoerend, wat leidt tot een extreem hoge waarde voor de drainage- en voedingsweerstand.

In vlakke gebieden is de bepaling van drainage- en voedingsweerstanden eenvoudiger uit te voeren dan in hellende gebieden.

Een combinatie van de formules van Ernst en Bruggeman biedt perspectieven bij het onderzoek naar drainage- en voedingsweerstanden.

In een deel van de Veenkoloniën zijn gunstige omstandigheden aanwezig voor infiltratie vanwege overwegend het voedingstype A1 en een relatief dicht waterlopenstelsel. Uit onderzoek van Van Keulen (1982) volgt voor dit gebied een drainage/infiltratieweerstand van 150-350 d. Voor het grootste deel van de provincie en met name in het centrum zijn in de zomer de drainage- en infiltratieweerstanden dermate hoog, dat slechts een geringe infiltratie kan plaatsvinden.

LITERATUUR

BAKEL, P.J.T., VAN, 1985. *Effecten van peilbeheer in het gebied "De Monden" (Drenthe).* Wageningen, ICW. Rapport 15.

BOITEN, W., 1987. "Debietmeting met klepstuwen". *Cultuurtechnisch Tijdschrift.* Jaargang 27 nr. 1.

BRUGGEMAN, G.A., 1978. *Analytical solution of the recharge of an aquifer from the overlying semi-permeable top layer with partially penetrating ditches to be used in a numerical model.* RID. Quarterly Report nr. 15.

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO, 1986. *Verklarende woordenlijst.*

ERNST, L.F., N.A. DE RIDDER, AND J.J. DE VRIES, 1970. *A geohydrologic study of East Gelderland.* Wageningen, ICW. Verspreide overdrukken 115.

KRUSEMAN, G.P. AND N.A. DE RIDDER, 1970. *Analysis and evaluation of pumping test data.* Wageningen, ILRI. Bulletin 11.

NIJLAND, G., R.J. DE LANGE EN J.C. SMITTENBERG, 1982. *Milieukartering Drenthe 1974-1978, III, Fysische Geografie.* Rapport Provinciale Planologische Dienst van Drenthe.

ROLF, H.M., 1981. *Modelonderzoek Over-Betuwe, Model voor grondwaterstroming en verdamping. Deel I: Geohydrologie van de Over-Betuwe en de Zuidelijke Veluwezoom.* Basisrapport Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland.

RIDDER, N.A. DE AND K.E. WIT, 1965. "A comparative study on the hydraulic conductivity of unconsolidated sediments". *J. Hydrol.* 3: 180-206. *Techn. Bull.*, ICW 42.

TECHNISCHE WERKGROEP GRONDWATERPLAN, 1985. *Rapport van de technische werkgroep Grondwaterplan, deel 1, 2 en 3.* Provinciaal Bestuur van Drenthe, Assen.

WARMERDAM, P.M.M., 1974. *Handleiding voor debietmetingen in open leidingen.* Wageningen, LUW. Vakgroep Hydraulica en Afvoerhydrologie.

WERKGROEP TUS-10-PLAN, 1988. *Water voor Drenthe.* Provinciaal Bestuur van Drenthe, Assen.

WIRDUM G. VAN, 1989. "Ecohydrologische aspecten van waterinlaat in laagvenen". Uit: *Aanvoer van gebiedsvreemd water: omvang en effecten op oecosystemen.* Redactie J.G.M. Roelofs. Proceedings van een symposium gehouden op 21 december 1988. Nijmegen, Katholieke Universiteit.

NIET-GEPUBLICEERDE BRONNEN

BON, J., 1965. *Enige opmerkingen over de afvoeren van beken in de Achterhoek.* Wageningen, ICW. Nota 321.

BON, J. EN H. HUMBERT, 1975. *Het gebruik van algemene afvoerformules voor de bepaling van de afvoer uit overstorten van stuwen.* Wageningen, ICW. Nota 845.

GROENENDIJK, P., 1988. *Onderzoek naar de effecten van wateraanvoer en peilveranderingen in agrarische gebieden op de waterkwaliteit in natuurgebieden. Deel 8. STRELIN, een computerprogrammwa voor de berekening van stroomlijnen, potentialen en verblijftijden.* Wageningen, ICW. Nota 1810.

HOMMA, F., 1981. *Metingen ter bepaling van Q(h)-relaties voor enkele stuwen in het gebied "De Monden".* Wageningen, ICW. Nota 1266.

HUMBERT, H., 1970. *Afvoerberekeningen uit geregistreerde peilen.* Wageningen, ICW. Nota 563.

KEULEN, T. VAN, 1982. *Bepaling van geohydrologische grootheden uit waterbalansen en grondwaterstanden van het wateraanvoergebied "De Monden".* Wageningen, ICW. Nota 1363.

MEYER, H.J., 1980. *De methodiek van de debietmetingen aan inlaatduikers in een aantal polders in Noord-Holland.* Wageningen, ICW. Nota 1167.

OOSTINDIE, K., 1984. *Aspecten van informatieverwerking 50. Een computersysteem voor het berekenen van afvoeren en het manipuleren met grondwaterstanden.* Wageningen, ICW. Nota 1593.

WIT, K.E., H.TH.L. MASSOP, J.G. TE BEEST EN M. WIJNSMA, 1987. *Hydrologische en bodemfysische parameters in de omgeving van het hoofdkanaal van de Twenthekanalen (traject Eefde-Lochem).* Wageningen, ICW. Nota 1751.

AANHANGSEL 1 ***Oppervlakte van de proefgebieden, gegevens over het waterlopenpatroon en het drainagesysteem***

Nr.	Gebied	Opper-vlakte	Klasse	B-gem.	Bodem-ligging (gem.)	Water-diepte (gem.)	Leiding-lengte	L_e
		(ha)		(m)	(m - mv.)	(m)	(m)	(m)
1	Beilen	113	0	0,35	1,05		1800	149
			01	0,74	1,20	0,03	2990	
			1	1,98	1,30	0,17	2800	
	2% drainage	drainafstand 15 m			0,70			
2	Dalerveen	195,5	0	0,40	1,02	0,05	710	194
			01	0,77	1,13	0,08	3750	
			1	1,69	1,40	0,13	4620	
			2	3,80	2,00	0,40	990	
	45% drainage	drainafstand 20 m			0,90			
3	Eelde	182	0	0,39	1,15	0,04	1750	157
			01	0,74	1,20	0,09	6440	
			1	1,77	0,81	0,21	3390	
4	Geesbrug	241,5	0	0,41	1,10	0,04	1600	171
			01	0,71	1,08	0,10	4940	
			1	1,56	1,22	0,19	5440	
			2	4,00	1,74	0,54	2130	
	35% drainage	drainafstand 10 m			0,90			
5	't Haantje	385,5	0	0,34	1,4	0,02	760	472
			01	0,70	1,36	0,07	3480	
			1	1,90	1,52	0,28	2280	
			2	3,30	1,55	0,37	1650	
	2% drainage	drainafstand 15 m			1,30			
6	Noordsche Schut	137	0	0,41	0,77	0,06	210	92
			01	0,77	0,90	0,13	3580	
			1	1,70	1,05	0,30	5940	
			2	3,99	1,27	0,54	4000	
			3	5,70	1,40	0,60	1170	
7	Nijeveen	125,5	0	0,45	1,20	0,01	480	56
			01	0,89	1,04	0,13	3340	
			1	1,74	1,03	0,28	16280	
			2	3,46	1,13	0,47	2430	
8	Uffelte	42	0	0,35	0,90	0,05	100	296
			01	0,78	1,08	0,09	330	
			1	1,98	1,39	0,18	990	
9	Zwiggelte	130	0	0,43	0,90	0,04	2270	136
			01	0,72	1,23	0,09	4200	
			1	1,24	1,37	0,15	3090	
	30% drainage	drainafstand 12 m			1,20			

Vervolg AANHANGSEL 1 Oppervlakte van de proefgebieden, gegevens over het waterlopentroon en het drainagesysteem

Nr.	Gebied	Opper-vlakte	Klasse	B-gem.	Bodem-ligging (gem.)	Water-diepte (gem.)	Leiding-lengte	L_e
		(ha)		(m)	(m - mv.)	(m)	(m)	(m)
10	Anderen	145,5	0	0,42	1,25	0,04	890	462
			01	0,63	1,18	0,06	740	
			1	1,03	1,30	0,09	1520	
	10% drainage	drainafstand 15 m		0,90				
11	Borger	91,5	0					120
			01	0,73	1,21	0,09	4800	
			1	1,62	1,25	0,22	2820	
12	Brunsting	46	0					183
			01	0,56	1,04	0,06	1070	
			1	2,35	1,40	0,43	1220	
			2	3,24	1,40	0,52	230	
13	Gieten	240,5	0	0,43	1,43	0,02	560	188
			01	0,73	1,43	0,06	3510	
			1	1,53	1,44	0,16	8240	
			2				500	
	20% drainage	drainafstand 17 m			1,00			
14	Gieterveen	155	0	0,32	1,20	0,02	1500	279
			01	0,78	1,30	0,06	1250	
			1	1,55	1,38	0,22	2800	
15	Noord-Sleen	162,5	0	0,40	0,70	0,05	230	325
			01	0,77	1,33	0,09	2220	
			1	1,65	1,67	0,13	2550	
	7% drainage	drainafstand 15 m			1,00			
16	Smilde	216,5	0					106
			01	0,70	1,53	0,06	10400	
			1	1,87	1,70	0,20	8700	
			2	4,29	1,70	0,52	1250	
	4% drainage	drainafstand 13 m			1,30			
17	Tynaarlo	233	0	0,46	1,19	0,02	6380	211
			01	0,76	1,23	0,04	2040	
			1	1,50	1,48	0,23	2600	
18	Veenhuizen	151	0	0,38	1,08	0,02	2200	178
			01	0,68	1,20	0,10	800	
			1	1,49	1,34	0,20	5460	
	37% drainage	drainafstand 10 m			0,90			
19	Wijster	292,5	0	0,40	1,11	0,04	3900	161
			01	0,72	1,06	0,08	8270	
			1	1,33	1,13	0,24	5970	

AANHANGSEL 2 Fluxen (mm/d) voor STRELIN-berekeningen over periode 1 juni 1988 t/m 31 oktober 1989.

Beilen

Nr.	tijdvak	q_b	q_l
1	1/6-31/7	-41,0	-1,06
2	1/8-20/10	22,3	-1,06
3	21/10-31/12	52,2	-1,06
4	1/1-20/4	63,4	-1,06
5	21/4-31/5	-29,8	-1,06
6	1/6-30/6	-78,2	-0,38
7	1/7-31/7	-82,0	-0,38
8	1/8-31/8	-119,3	-0,38
9	1/9-31/10	-130,4	-0,38

Dalerveen

tijdvak	q_b	q_l
1/6-31/7	135,5	-0,81
1/8-15/10	155,5	-0,81
16/10-31/12	191,3	-0,81
1/1-30/4	195,3	-0,81
1/5-31/5	107,6	-0,81
1/6-30/6	35,8	-0,81
1/7-31/7	43,8	-0,81
1/8-31/8	23,9	-0,81
1/9-31/10	71,8	-0,81

Eelde

tijdvak	q_b	q_l
1/1-31/8	89,6	-0,88
1/9-31/10	176,4	-0,88
1/11-31/12	170,8	-0,88
1/1-30/4	165,2	-0,88
1/5-31/5	92,4	-0,88
1/6-30/6	64,4	-0,88
1/7-31/7	22,4	-0,88
1/8-31/8	0,0	-0,88
1/9-31/10	0,0	-0,88

Geesbrug

nr.	tijdvak	q_b	q_l
1	1/6-20/7	-73,2	-0,50
2	21/7-4/1	-15,6	-0,50
3	5/1-18/4	20,3	-0,50
4	19/4-18/5	-12,5	-0,50
5	19/5-27/6	-61,0	-0,50
6	28/6-1/8	-71,2	-0,50
7	2/8-18/9	-91,8	-0,50
8	19/9-31/10	-85,6	-0,50
9			

't Haantje

tijdvak	q_b	q_l
1/6-10/9	101,3	-1,06
11/9-31/12	394,9	-1,06
1/1-10/4	361,1	-1,06
11/4-31/5	168,8	-1,06
1/6-30/6	22,5	-0,29
1/7-31/7	-78,8	-0,29
1/8-31/8	-135,0	-0,29
1/9-30/9	-112,5	-0,29
1/10-31/10	0,0	-0,29

Noordsche Schut

tijdvak	q_b	q_l
1/6-15/7	-13,3	-0,60
16/7-10/10	-7,5	-0,60
11/10-31/12	-3,6	-0,60
1/1-20/4	3,4	-0,60
21/4-20/5	-5,0	-0,60
21/5-30/6	-13,1	-0,60
1/7-31/7	-15,7	-0,60
1/8-31/8	-19,5	-0,60
1/9-31/10	-19,8	-0,60

Nijeveen

nr.	tijdvak	q_b	q_l
1	1/6-20/7	-8,7	-0,25
2	21/7-31/12	65,0	-0,25
3	1/4-30/4	47,7	-0,25
4	1/5-31/5	17,3	-0,25
5	1/6-30/6	26,0	-0,25
6	1/7-31/7	4,3	-0,25
7	1/8-31/8	17,3	-0,25
8	1/9-31/10	39,0	-0,25

Uffelte

tijdvak	q_b	q_l
1/6-15/8	-3,1	-0,47
16/8-10/1	-1,6	-0,47
11/1-30/4	-3,1	-0,47
1/5-31/5	-9,4	-0,47
1/6-30/6	-9,4	-0,47
1/7-31/7	-12,5	-0,47
1/8-31/8	-10,9	-0,47
1/9-31/10	-10,9	-0,47

Zwiggelte

tijdvak	q_b	q_l
1/6-10/9	96,7	-1,09
11/9-31/12	193,4	-1,09
1/1-30/4	171,9	-1,09
1/5-31/5	86,0	-1,09
1/6-30/6	43,0	-0,15
1/7-31/7	-21,4	-0,15
1/8-31/8	-53,7	-0,15
1/9-31/10	-53,7	-0,15