

Intreeweerstanden waterlopen

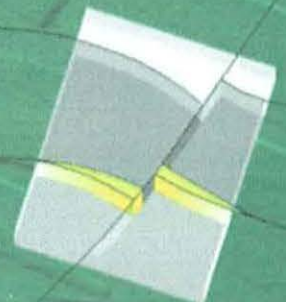
Inventarisatie en analyse



TNO Grondwater en Geo-Energie



sc-dlo



en
DLO-Staring Centrum

TNO-rapport
GG-R-96-15(A)

Intreeweerstand waterlopen

Inventarisatie en analyse

Datum

maart 1996

Auteur(s)

Ir. G. Jousma (TNO-GG)

Ir. H.Th.L. Massop (DLO-SC)

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onder-
zoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toege-
staan.

© TNO

Samenvatting

Het inventarisatie-onderzoek **Intreeweerstanden Waterlopen** is te beschouwen als het belangrijkste researchdeel van het Project 'Informatiesysteem Ontwateringsstelsels'. Dit project had tot doel de criteria te onderzoeken voor het vastleggen van met name de tertiaire ontwateringsstelsels in een landsdekkend informatiesysteem ten behoeve van geohydrologisch (model)onderzoek.

Voor het geohydrologisch modelonderzoek is de interactie tussen oppervlaktewater en grondwater een essentieel element. De gebrekkige beschikbaarheid van gegevens betreffende de ontwateringsstelsels betekent een belangrijke belemmering bij de uitvoering van dit onderzoek. Verwacht werd dat deze belemmering door de opname van de gegevens in een informatiesysteem verkleind zou kunnen worden. Aangezien de verzameling en verwerking van de detailgegevens van de tertiaire stelsels een zeer langdurige en kostbare zaak zou zijn, zou moeten worden onderzocht of opname van de stelsels op een vereenvoudigde maar hydrologisch correcte wijze mogelijk is. De volgende vragen zouden daarbij moeten worden beantwoord:

1. Is het mogelijk de tertiaire ontwateringsstelsels in een informatiesysteem op te nemen in de vorm van eenvoudige gebiedsparameters, zodanig dat de hydrologische werking van de stelsels vereenvoudigd maar voldoende correct wordt weergegeven?
2. Kan er een relatie worden gelegd tussen de te identificeren gebiedsparameters en de gebiedskenmerken, zodanig dat voor de bepaling van de gebiedsparameters van beschikbare gebiedsdekkende informatie gebruik kan worden gemaakt?

Het onderzoek naar deze aspecten heeft geleid tot de volgende resultaten:

Bij de inventarisatie en analyse van in gebruik zijnde wiskundige benaderingen van de relatie oppervlaktewater-grondwater bleek dat er twee veel gebruikte analytische benaderingen zijn om de interactie te beschrijven, namelijk die van Ernst en Bruggeman. De analytische methoden laten zien dat er gebiedsparameters zijn die de functie van ontwateringsstelsels in de grondwaterstroming op een vereenvoudigde maar hydrologisch correcte wijze beschrijven. De betreffende parameters zijn de 'drainageweerstand' en 'voedingsweerstand'.

Het onderzoek naar de numerieke benaderingen blijkt eveneens twee essentieel verschillende benaderingen op te leveren, namelijk de volledig drie-dimensionale en de twee-dimensionaal gelaagde benadering. Deze benaderingen kunnen in principe zowel gebruik maken van de detailgegevens van ontwateringsstelsels, als van de vereenvoudigde weergave van de stelsels door middel van de gebiedspara-

meters drainageweerstand en voedingsweerstand.

Uit een nadere analyse van deze gebiedsparameters volgt verder dat een vereenvoudigde weergave van de ontwateringsstelsels zal moeten berusten op drie groepen van gegevens, namelijk a) de geometrische kenmerken van de stelsels (ligging, dichtheid en diepte ten opzichte van maaiveld), b) de hydrogeologische eigenschappen van de ondergrond, zoals de schematisatie en het doorlaatvermogen en c) informatie over de *intreeweerstand* van de waterlopen.

Aangezien de intreeweerstand door veel onderzoekers werd gezien als het belangrijkste ontbrekende gegeven in de relatie tussen oppervlaktewater en grondwater, is een belangrijk deel van het onderzoek gewijd geweest aan het invullen van dit hiaat in kennis en gegevens. Dit werk heeft geleid tot het hier beschreven inventarisatie-onderzoek naar de intreeweerstand.

De inventarisatie en uitwerking van het onderzoek naar de intreeweerstand omvat meer dan 30 rapporten en verslagen, waarvan het merendeel uit het grijze circuit. Daarnaast zijn gesprekken gehouden met deskundigen. Voorwaarde voor bespreking in het inventarisatierapport was dat het betreffende onderzoek gebaseerd moest zijn op laboratorium- en/of veldmetingen. Hoewel het inventarisatie-onderzoek oorspronkelijk vooral gericht was op de intreewestanden bij tertiaire ontwateringsstelsels/waterlopenstelsels, zijn volledigheidshalve ook de resultaten van het geïnterviewde onderzoek aan de grotere waterlopen weergegeven.

In het verleden uitgevoerd onderzoek varieert van laboratoriumproeven en lokaal onderzoek waarin de intreeweerstand centraal staat, tot uitgebreid, grootschalig veldonderzoek waarin de intreeweerstand slechts één van de vele onderzochte elementen is. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van het geïnterviewde onderzoek waarin verschillende onderzoeksmethoden, dikwijls in combinatie, zijn toegepast. In hoofdstuk 5 zijn de geïnterviewde onderzoeksmethoden geanalyseerd en besproken.

Bij de analyse van de resultaten van het geïnterviewde onderzoek is aandacht besteed aan de opbouw en de bijzondere aspecten van de intreeweerstand (hoofdstuk 6). Het geïnterviewde onderzoek blijkt echter vooral gericht te zijn geweest op het berekenen van de parameters en minder op het analyseren van de onderliggende processen. Een analyse van de voor de intreeweerstand verantwoordelijke factoren aan de hand van de rapporten is danook maar beperkt mogelijk. Over de relatie tussen de intreeweerstand en de gelaagdheid van de waterloopbodem is relatief veel materiaal, maar over de effecten van onderhoud, droogvallen van waterlopen, chemische processen, enz. is weinig te vinden.

Bijzondere aandacht is besteed aan de grootte en variatie van de intreeweerstand bij verschillende klassen van waterlopen (hoofdstuk 7). Het is maar ten dele mo-

gelijk uit de grote hoeveelheid materiaal een goed beeld te scheppen. Van de kleine waterlopen (klasse 1 en 2) is relatief weinig bekend; alleen in het onderzoek Oost Gelderland is aandacht besteed aan deze waterlopen. De intreeweerstanden voor waterlopen tot klasse 3 in zandige ondergrond verschillen niet wezenlijk van elkaar. De gemiddelde weerstanden zijn veelal in de orde van ca 1 dag; in het profiel aanwezige weerstandbiedende laagjes kunnen daarbij voor een verhoging zorgen. De drainerende beken gaven de laagste intreeweerstand te zien: in de twee gevonden gevallen lager dan 0,1 dag.

Bij grote kanalen en rivieren moet onderscheid gemaakt worden naar de methode van onderzoek. De doorlatendheidsmetingen van steekmonsters en locale kwel- of infiltratiemetingen laten een grote variatie van intreewaarden zien. Het grootschaliger veldonderzoek (kanaalproeven en proeven in een geohydrologisch dwarsprofiel) geeft een geringere variatie te zien. De keuze van de proeven kan bij de huidige kennis van zaken beter worden afgestemd op het doel.

In hoofdstuk 8 wordt geëvalueerd wat de onderzoeksresultaten voor de opzet van een informatiesysteem betekenen. Uit het geïnventariseerde onderzoek is duidelijk geworden dat extrapolatie van intreeweerstanden op grond van eenvoudige kenmerken bij afzonderlijke waterlopen niet goed mogelijk is. Voor gebiedsweerstand ligt de zaak anders. In het onderzoek Oost-Gelderland is een begin gemaakt met een methode van extrapolatie, die mits goed onderbouwd, toekomstperspectief kan bieden.

Inhoud

Samenvatting	i
Lijst van figuren	vii
Lijst van tabellen	ix
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond en kader van het onderzoek	1
1.2 Onderzoeksdoel	2
1.3 Rapportopzet	2
2 Probleembeschrijving, Wiskundige benaderingen en definities	5
2.1 Wiskundige benaderingen van grondwaterstroming naar sloten	5
2.2 Gebiedsparameters	7
2.3 Vraag naar weerstandswaarden bij modelgebruik	9
2.4 Gebruikte definities en begrippen	10
3 Intreeweerstanden	13
3.1 Intreeweerstand of bodemweerstand	13
3.2 Vorming van de intreeweerstand	14
3.2.1. Vorming van een sliblaag	14
3.2.2 Bodemverstopping	15
3.3 Factoren die bijdragen tot de vorming van de intreeweerstand	16
4 Overzicht geïnventariseerd onderzoek	19
5 Overzicht onderzoeksmethoden	23
5.1 Doorlatendheidsmetingen aan bodemmonsters	23
5.1.1. Methode	23
5.1.2 Aannamen en foutenbronnen	24
5.1.3 Evaluatie	26
5.2 Kwel- en infiltratiemetingen in waterlopen	26
5.2.1 Methode	26
5.2.2 Aannamen en foutenbronnen	27
5.2.3 Evaluatie	28
5.3 Sloopproeven	29
5.3.1 Methode	29
5.3.2 Aannamen en foutenbronnen	29
5.3.3 Evaluatie	31
5.4 Gebiedsproeven	31
5.4.1 Methode	31

5.4.2	Aannamen en foutenbronnen	33
5.4.3	Evaluatie.....	35
5.5	Geohydrologische dwarsprofielen	35
5.5.1	Methode.....	35
5.5.2	Aannamen en foutenbronnen	37
5.5.3	Evaluatie.....	37
5.6	Indirecte bepalingen uit onderzoek	38
5.7	Classificering van het geïnventariseerde onderzoek.....	38
6	Bijzondere aspecten intreeweerstand	41
6.1	Onderzoek naar het mechanisme van de intreeweerstand	41
6.2	Het effect van onderhoud op de intreeweerstand.....	43
6.3	Intreeweerstand in relatie tot heterogeniteit in bodemopbouw.....	45
7	Intreeweerstand per klasse van waterloop.....	51
7.1	Classificatie van de waterlopen.....	51
7.2	Greppels en kleine sloten - klasse 1 en 2	52
7.3	Grote sloten en tochten - klasse 3	53
7.4	Kleine beken - klassen 3 en 4.....	56
7.5	Wijken - klasse 4.....	56
7.6	Grote kanalen - klassen 5 en 6	57
7.7	Rivieren - klasse 6.....	60
8	Intreeweerstanden en het informatiesysteem ontwateringsstelsels - een evaluatie	61
8.1	Overzicht	61
8.2	Evaluatie onderzoek gebiedsparameters	62
8.3	Evaluatie onderzoek intreeweerstand.....	63
8.4	Evaluatie onderzoek gebiedsparameters versus gebiedskenmerken	63
9	Conclusies en aanbevelingen	65
9.1	Conclusies	65
9.2	Aanbevelingen.....	68
10	Literatuurlijst.....	69
	Bijlagen	
A	Analytische Oplossingen	
B	Samenvattingen geïnventariseerd onderzoek	

Lijst van figuren

Figuur 2.1	Ernst concept	4
Figuur 2.2	Bruggeman concept	4
Figuur 4.1	Overzicht locaties van geïventariseerd onderzoek	20
Figuur 5.1	Gemeten afvoer en gemiddelde grondwaterstand proefgebied Beltrum (uit Massop et al, 1994)	32
Figuur 5.2	Geschematiseerde q-h*-relatie voor proefgebied Beltrum (uit Massop et al, 1994)	32
Figuur 5.3	Schematisatie van een systeem met één watervoerende laag en een kanaal dat niet tot in die laag rijkt (zie ook bijlage A)	36
Figuur 6.1	Voorbeeld van bodemonsters van het Twentekanaal (km 6.5) (uit Wit et al, 1987)	44
Figuur 6.2	Steekmonsters uit het Twentekanaal (uit Massop et al, 1994)	46
Figuur 6.3	Steekmonsters voor verschillende klassen van waterlopen in de proefgebieden Aalten, Beltrum, Borculo en Eibergen (uit Massop et al, 1994)	48

Lijst van tabellen

Tabel 2.1 Enkele voorbeelden van weerstandsverhoudingen	9
Tabel 4.1 Overzicht geïnventariseerd onderzoek.....	21
Tabel 5.1 Indeling onderzoek naar onderzochte waterloopklasse en type onderzoek	39
Tabel 7.1 Classificatie waterlopen volgens Ernst	51
Tabel 7.2 Intreeweerstand greppels en kleine sloten - klasse 1 en 2	53
Tabel 7.3 Intreeweerstand van grote sloten en tochten (klasse 3)	55
Tabel 7.4 Intreeweerstand Oostrumse Beek en Lollebeek - klasse 3 tot 4	56
Tabel 7.5 Intreeweerstand van veenkoloniale wijken - klasse 4.....	57
Tabel 7.6 Intreeweerstand van grote kanalen - klasse 5 en 6.....	59
Tabel 7.7 Intreeweerstand grote rivieren - klasse 6	60
Tabel 9.1 Overzicht intreeweerstand kleine waterlopen	66

1 Inleiding

1.1 Achtergrond en kader van het onderzoek

Het onderzoek naar de *'Intreeweerstand'* is een belangrijk onderdeel van het project 'Informatiesysteem Ontwateringsstelsels'.

Voor het geohydrologisch (model)onderzoek is de interactie tussen oppervlaktewater en grondwater essentieel. In de jaren 80 werd de gebrekkige beschikbaarheid van gegevens betreffende de ontwateringssystemen ervaren als een belangrijke belemmering voor de uitvoering van het grondwatermodelonderzoek. Verwacht werd dat opname van de gegevens in een informatiesysteem deze belemmering zou kunnen wegnemen. Om de situatie te verbeteren werden door TNO Grondwater en Geo-Energie en DLO - Staring Centrum voorstellen gedaan voor nader onderzoek waarmee de correcte opname van gegevens in een informatiesysteem zou kunnen worden onderbouwd. De voorstellen hebben geleid tot het door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Visserij gesubsidieerde onderzoeksproject, waarin beide instituten hebben samengewerkt.

Het opnemen van alle mogelijke details van tertiaire ontwateringsstelsels in een landsdekkend geohydrologisch informatiesysteem werd als niet haalbaar beschouwd, met name omdat de inwinning en verwerking van de gegevens zeer tijdrovend en kostbaar zouden zijn. Daarom moest worden gezocht naar een manier om de ontwateringsstelsels op een vereenvoudigde maar hydrologisch correcte wijze in te voeren. Bij de opzet van het project werden onder meer de volgende vragen gesteld:

- Is het mogelijk de tertiaire ontwateringsstelsels in een informatiesysteem op te nemen in de vorm van eenvoudige gebiedsparameters, zodanig dat de hydrologische werking van de stelsels vereenvoudigd maar voldoende correct wordt weergegeven?
- Kan er een relatie worden gelegd tussen de te identificeren gebiedsparameters en de gebiedskenmerken, zodanig dat voor de bepaling van de gebiedsparameters van beschikbare gebiedsdekkende informatie gebruik kan worden gemaakt?

De opname van gegevens in een informatiesysteem zou apart aandacht vereisen.

Reeds in de beginfase van het onderzoek bleek dat de in gebruik zijnde parameters 'drainageweerstand' en 'voedingsweerstand' het meest in aanmerking komen voor een eenvoudige en hydrologisch correcte weergave van de functie van ontwateringssystemen in de interactie tussen oppervlaktewater en grondwater. Van de benodigde gegevens die tot de berekening van deze parameters leiden, bleek met

name de *intreeweerstand* van open waterlopen en drains in het algemeen een onbekende. Deze parameter werd door veel onderzoekers gezien als het belangrijkste ontbrekende gegeven in de relatie tussen oppervlaktewater en grondwater. De wens om het ontbrekende element in de gebiedsparameters aan te vullen en in het onderzoek te betrekken heeft geleid tot het hier beschreven onderzoek naar de intreeweerstand. In hoofdstuk 8 wordt het resultaat van het onderzoek in een breder kader geëvalueerd.

1.2 Onderzoeksdoel

Het doel van het onderzoek naar de intreeweerstand was tweeledig:

1. Inzicht te verkrijgen in het ontstaan en de werking van de intreeweerstand, en in de onderzoeksmethoden en de veldmetingen om deze te bepalen.
2. Overzicht te verkrijgen van de uit het onderzoek bepaalde weerstanden, bij voorkeur geclassificeerd naar verschillende typen waterlopen en naar verschillende kenmerkende waterhuishoudkundige en geohydrologische situaties.

De inventarisatie en uitwerking van het onderzoek omvat meer dan 30 rapporten en verslagen, waarvan het merendeel uit het grijze circuit. Daarnaast zijn gesprekken gehouden met deskundigen. In het inventarisatierapport worden alleen de rapporten die gebaseerd zijn op laboratorium- en/of veldmetingen besproken. Hoewel het onderzoek weergegeven in deze inventarisatiestudie oorspronkelijk vooral gericht was op de intreeweerstand bij tertiaire ontwateringsstelsels/waterlopenstelsels, is besloten om volledigheidshalve ook de resultaten van het geïnventariseerde onderzoek aan de grotere waterlopen weer te geven.

Uit het onderzoek is duidelijk geworden hoezeer de locale weerstandswaarden het hydrologische beeld kunnen bepalen. Extrapolatie van gevonden parameters bleek dan ook niet zonder meer mogelijk. Het rapport moet daarom worden gezien als een handreiking naar de onderzoekers die een beperkte ervaring hebben met de weerstandsparameters en die toch in het kader van hun (model)onderzoek behoefte hebben aan een beter overzicht.

1.3 Rapportopzet

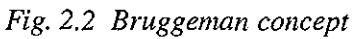
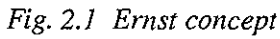
Na de inleiding in hoofdstuk 1, is in hoofdstuk 2 een beknopte beschrijving gegeven van de definities en wiskundige benaderingen van de functie van ontwateringsstelsels in de geohydrologie en van de rol van de gedefinieerde weerstanden daarbij. Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van de intreeweerstand en van de factoren die het ontstaan beïnvloeden.

In het verleden uitgevoerd onderzoek varieert van laboratoriumproeven en lokaal

onderzoek waarin de intreeweerstand centraal staat tot uitgebreid, grootschalig veldonderzoek waarin de intreeweerstand slechts één van de vele onderzochte elementen is. Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van het geïnventariseerde onderzoek waarin verschillende onderzoeksmethoden, dikwijls in combinatie, zijn toegepast. In hoofdstuk 5 zijn de geïnventariseerde onderzoeksmethoden geanalyseerd en besproken. Bij de analyse van de resultaten van het geïnventariseerde onderzoek wordt zowel aandacht besteed aan de bijzondere aspecten van de intreeweerstand (hoofdstuk 6) als aan de grootte en variatie van de intreeweerstand bij verschillende klassen van waterlopen (hoofdstuk 7). In hoofdstuk 8 wordt geëvalueerd wat de onderzoeksresultaten voor een informatiesysteem betekenen.

In de bijlagen is van elk van de geïnventariseerde onderzoeken een beknopte beschrijving gegeven. Daarin zijn het onderzoeksdoel, de belangrijkste onderzoeks elementen, de betreffende geohydrologische situatie, de resultaten en de belangrijkste conclusies weergegeven. De lezer kan op grond van deze beschrijvingen bepalen of het voor hem of haar interessant is om het betreffende rapport nader te raadplegen.

Er is een heel arsenaal aan weerstandstermen en uitdrukkingen in omloop. De auteurs van het inventarisatierapport hebben getracht zoveel mogelijk aan te sluiten bij de algemeen gangbare begrippen; voor zover mogelijk is de Verklarende Hydrologische Woordenlijst aangehouden.



2 Probleembeschrijving, ^wWiskundige benaderingen en definities

De intreeweerstand van waterlopen is een belangrijke onbekende factor in de modellering van de interactie tussen oppervlaktewater en grondwater. In dit hoofdstuk wordt de rol van de intreeweerstand van waterlopen en -leidingen in het stromingsproces aangegeven, en wordt de relatie gelegd naar de zogenaamde gebiedsweerstand, die de grondwatervoeding en -drainage kenmerken.

2.1 Wiskundige benaderingen van grondwaterstroming naar sloten

De ondergrondse toestroming van water naar de ontwateringsmiddelen is in principe een dynamisch (niet-stationair) drie dimensionaal proces. De wiskundige beschrijving van dit proces door middel van formules of modellen vraagt om vereenvoudigde concepten en daarbij passende hydraulische parameters. Ter verduidelijking van het probleem van de ondergrondse toestroming van water naar waterlopen en de daarbij gehanteerde weerstandsparameters, worden de benaderingen door Ernst en Bruggeman kort toegelicht. Voor uitgebreidere beschrijvingen wordt verwezen naar de betreffende literatuur en naar de bijlagen.

Benadering door Ernst

Ernst definieert de zogenaamde 'drainageweerstand', als het quotiënt van de opbolling en de specifieke afvoer. Daarin is de 'opbolling' gedefinieerd als het maximale hoogteverschil tussen de waterstand in de ontwateringsmiddelen en de grondwaterstand daartussen, in een afvoersituatie. De specifieke afvoer is de afvoer per oppervlakte eenheid. De samenhang tussen deze drainageweerstand en de verschillende locale weerstandscomponenten wordt het best verklaard aan de hand van figuur 2.1.

De drainageweerstand Γ wordt opgebouwd gedacht uit vier afzonderlijke weerstandscomponenten (zie Ernst, 1962):

$$\Gamma = \Gamma_v + \Gamma_h + \Gamma_r + \Gamma_l$$

De componenten van de drainageweerstand zijn:

- de verticale weerstandscomponent (Γ_v), die bepaald wordt door de verticale doorlatendheid van de ondergrond, globaal boven de ontwateringsbasis.
- de horizontale weerstandscomponent (Γ_h), die bepaald wordt het (horizontale) doorlaatvermogen van de ondergrond en de afstand tussen de waterlopen.
- een radiale weerstandscomponent (Γ_r), die het gevolg is van de convergentie van stroomlijnen in de omgeving van open waterlopen en drains en die wordt bepaald door de dikte van het watervoerend pakket, de horizontale en verticale

doorlatendheden, de natte omtrek van de waterloop en de afstand tussen de waterlopen.

- de intreeweerstandcomponent (Γ_i), die het gevolg is van de hydraulische weerstand in de overgangszone tussen bodem (of bedding) en open water, veroorzaakt door een sliblaag op de bodem of dichtslibbing van de bodem.

In zekere zin kunnen deze weerstandscomponenten worden gezien als een 'serie van weerstanden', die door het grondwater overwonnen moet worden bij stroming vanaf het freatisch vlak naar de sloot of drain. Vertaald in stijghoogteverval, leveren zij tezamen het totale verschil tussen de freatische grondwaterstand in het midden van de kavel (h_m) en het slootwaterpeil (h_s) aan de buitenzijde.

$$h_m - h_s = \Delta h_v + \Delta h_n + \Delta h_r + \Delta h_i$$

Bij een homogeen dwarsprofiel en een in verhouding grote afstand tussen de sloten speelt de weerstand tegen verticale stroming een kleine rol. De grondwaterstandscurve tussen het midden van het perceel en de sloot is dan opgebouwd uit a) een parabolische deel, samenhangend met horizontale stroming, b) een logaritmische deel, samenhangend met radiale stroming en c) een restdeel, samenhangend met de intreeweerstand. Door het stijghoogteverval voor horizontale toestroming (Δh_n) en voor radiale toestroming (Δh_r) af te trekken van het totale verval, blijft het stijghoogteverval voor de intreeweerstandcomponent (Δh_i) over, waaruit de intreeweerstand voor de waterloop kan worden berekend. Voor de formules wordt verwezen naar bijlage 2.

Voor wat betreft de randvoorwaarden van dit model, gaat Ernst uit van een gesloten onderrand. In meer complexe situaties met twee of meer watervoerende pakketten wordt uitgegaan van een constante flux door de scheidende laag onder het freatische pakket (Ernst, 1962).

Met nadruk wordt de aandacht gevestigd op het feit dat in de formules van Ernst de *specifieke afvoer* (de afvoer per oppervlakte eenheid) wordt gebruikt. Bij de berekening van de intreeweerstand voor de waterloop zelf, kan de afvoer door de bodem van de waterloop worden berekend uit de specifieke afvoer door deze met een factor te vermenigvuldigen. Voor gevallen met een gesloten onderrand, is deze factor bij benadering gelijk aan het quotient van kavelbreedte (L) en slootbreedte (B), zodat geldt: $Q_{\text{sloot}} = (L-B)/B \times Q_{\text{specifiek}}$. Deze afvoer is aanzienlijk hoger dan de specifieke! Omgekeerd heeft dit belangrijke consequenties voor het aandeel van de intreeweerstand in de drainage- en/of voedingsweerstand. Een betrekkelijk lage intreeweerstand (van bijvoorbeeld 1 dag) kan verantwoordelijk zijn voor een zeer groot aandeel in de drainageweerstand (zie tabel 2.1).

Benadering door Bruggeman

In de formules van Bruggeman wordt het driedimensionale stromingsbeeld integraal berekend. De randvoorwaarden zijn dezelfde, met uitzondering van die voor de onderrand. Voor de onderrand geldt in de formulering van Bruggeman een vaste potentiaal, die een variabele flux door de onderrand toelaat. Dit 'topsysteem' (figuur 2.2) sluit beter aan bij de grondwatermodellen die de voeding van het onderliggende watervoerend pakket berekenen als een functie van de stijghoogte in dat pakket (zie ook 2.3).

Als gevolg van de integrale aanpak zijn de formules van Bruggeman veel gecompliceerder. Voor de berekeningen met computers maakt dit niet veel uit, maar het analyseren van de verschillende bijdragen in de drainageweerstand is aanzienlijk minder eenvoudig met deze formules (zie bijlage 1) dan met die van Ernst.

Benadering met numerieke modellen

De ontwikkeling van numerieke modellen heeft de berekeningen van de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater sterk vereenvoudigd, met name voor situaties die niet eenvoudig analytisch zijn te benaderen, zoals situaties met onregelmatige ontwateringsstelsels, onderbroken afsluitende lagen, heterogene ondergrond, enzovoort. De modellen zijn zodanig efficiënt geworden dat zij nu min of meer standaard voor ontwateringsberekeningen worden toegepast.

2.2 Gebiedsparameters

Locale weerstandsparameters kunnen dienen voor het beschrijven en berekenen van de grondwaterstroming naar een enkele watergang of een regelmatig gestructureerd stelsel van ontwateringsmiddelen. Voor de beschrijving van de ontwatering van een geheel gebied, veelal met een heterogene bodem en een onregelmatig stelsel van ontwateringsmiddelen, is een gedetailleerde beschrijving minder geschikt en wordt gebruik gemaakt van gebiedsparameters. Deze gebiedsweerstand geven het verband aan tussen de specifieke toe- of afvoer van water uit het gebied en de peilen van grondwater en oppervlaktewater daarbinnen. Voor de karakterisering van de gebiedsontwatering en -grondwatervoeding zijn gebiedsweerstand benoemd.

De '*drainageweerstand*', in 2.1 geïntroduceerd voor kavels, wordt ook in breder verband als gebiedsparameter gebruikt. De definitie van de weerstandsparameter volgens Ernst blijft daarbij onverminderd van kracht, maar het onderzoek verbreedt zich tot de vaststelling van de parameter voor hellend terrein en onregelmatige ontwateringsstelsels. Voor hellend terrein, waarbij het verschil tussen de grondwaterstand in het gebied en het peil van de waterlopen niet eenduidig is vast te stellen, wordt gebruik gemaakt van de ontwateringsdiepte (afstand grondwaterstand tot maaiveld). In een dergelijk geval wordt gebruik gemaakt van de 'diffe-

rentie benadering', die de relatie legt tussen de differentiewaarde van de drainage-weerstand en de verschillen in afvoer en gemiddelde grondwaterstand (Van Bakel, 1986-1 en Massop 1991-1).

Bij modellering van de regionale voeding van watervoerende pakketten is de zogenaamde '*voedingsweerstand*' in gebruik. De voedingsweerstand vertegenwoordigt de weerstand die het water ondervindt bij stroming uit het 'topstelsel' naar het eerste watervoerend pakket (en omgekeerd). Deze parameter legt het verband tussen a) het stijghoogteverschil van de gemiddelde grondwaterstand in de deklaag (soms vereenvoudigd tot het gemiddeld peil in de waterlopen) en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket, en b) de specifieke voeding (de voeding per oppervlakte eenheid) vanuit het oppervlaktewater naar het watervoerend pakket. De voeding kan ook negatief zijn.

Zowel de '*drainageweerstand*' als de '*voedingsweerstand*' zijn afhankelijk van de diepteligging van de deelnemende waterlopen en drains. Bij een hoge grondwaterstand zullen er meer waterlopen deelnemen aan de ontwatering of de voeding van een gebied, dan bij een lage stand. De weerstand zal daarbij in het algemeen anders zijn. De gebiedsparameters dienen dan ook te worden beschouwd als 'functies' van de afstand tot een horizontaal referentie vlak. De geldigheid van de functies wordt aan de bovenzijde begrensd door het maaiveld, dat tevens als referentievlak kan dienen mits het horizontaal is. De betreffende gebiedsparameters worden vooral bepaald door de eigenschappen van de ontwateringsstelsels (dichtheid van de stelsels, profiel en peilen van de verschillende klassen van sloten, greppels en drains) en door de hydrogeologische opbouw van het gebied.

Om een indruk te geven van het aandeel van verschillende weerstandscomponenten in een gebiedsweerstand, is de opbouw van de drainageweerstand voor twee sterk verschillende gevallen geïllustreerd in tabel 2.1. Voor de voorbeelden zijn de volgende waarden als basis genomen: slootafstand 100 m; slootbreedte 1 m; intreeweerstand (slootbodem) 1 dag. Uit de resultaten blijkt hoe groot de invloed van de intreeweerstand van de slootbodem kan zijn op de drainageweerstand.

Tabel 2.1 Enkele voorbeelden van weerstandsverhoudingen

Situatie kenmerken	drainage weerst. $\Gamma(d)$	vert. weerst. $\Gamma_v(d)$	hor. weerst. $\Gamma_h(d)$	rad. weerst. $\Gamma_r(d)$	intree weerst. $\Gamma_i(d)$
- Dunne dekzandruggen boven scheidende laag ($D = 2$ m; $k_h = 2$ m/dag; $k_v = k_h/2$)	330,3	-	214,7	15,6	100
- Dik watervoerend pakket ($D = 50$ m; $k_h = 20$ m/dag; $k_v = k_h/2$)	104,6	-	1,3	3,6	100

2.3 Vraag naar weerstandswaarden bij modelgebruik

De behoefte aan weerstandsparameters in het modelgebruik vormt één van de belangrijkste redenen voor het uitvoeren van dit inventarisatie-onderzoek. Daarom heeft het zin om deze vraag nader te analyseren.

Van de vier door Ernst gedefinieerde weerstandscomponenten worden de horizontale en verticale weerstand bepaald door de respectievelijke doorlatendheden k_h en k_v . Deze parameters worden uit pompproeven vastgesteld, of op basis van de korrelsamenstelling geschat en door middel van een model geijkt. De overblijvende weerstandscomponenten, die niet automatisch door de bestaande parameters worden afgedekt, zijn de *radiale weerstand* en de *intree weerstand*.

De modelprogramma's verschillen in concept, in numerieke benadering en in de wijze van invoer en verwerking van parameters. Hier wordt niet getracht op de specifieke eisen van het grote aantal bestaande modellen in te gaan, maar zullen alleen de in essentie verschillende benaderingen worden besproken. Het is aan de modelleur om kritisch na te gaan welke eisen door zijn of haar modelprogramma-tuur worden gesteld, en hoe de resultaten en aanbevelingen uit het weerstandsonderzoek moeten worden vertaald naar zijn of haar specifieke situatie.

Er zijn twee principieel verschillende modelbenaderingen die voor wat betreft de vraag naar weerstandsparameters dienen te worden onderscheiden: a) de volledig drie-dimensionale aanpak en de twee-dimensionaal gelaagde of semi drie-dimensionale aanpak.

- Bij de *volledig drie-dimensionale aanpak* wordt ook in de verticale richting de noodzakelijke discretisatie aangebracht. De convergentie van de stroombanen rond de bodem van de waterlopen kan daarmee in principe goed worden bere-

kend. Op deze wijze wordt met de radiale weerstand reeds rekening gehouden. De mate van te behalen nauwkeurigheid houdt uiteraard verband met de horizontale en verticale discretisatie. Bij deze benadering heeft dus voor de radiale weerstand bij de waterlopen geen aparte weerstandswaarde te worden ingevoerd en kan worden volstaan met het invoeren van de intreeweestanden.

- Bij de *twee-dimensionaal gelaagde of semi-drie-dimensionale benaderingen* kan binnen een watervoerend pakket wel een waterloop worden aangebracht, maar de convergentie van stroombanen in de verticaal wordt niet berekend. Dit houdt in dat tezamen met de intreeweestand ook de radiale weerstand dient te worden ingevoerd. Anders gesteld moet de ingevoerde weerstand opgebouwd zijn uit een deel radiale weerstand en een deel intreeweestand.

Het kiezen van de weerstandswaarden is dus sterk gebonden aan de opzet van het model. Het verdient aanbeveling om steeds zeer duidelijk aan te geven welke parameters worden gebruikt en welke componenten deze omvatten, zodat verificatie van de waarden achteraf mogelijk is.

Opmerking. Bij gebrek aan weerstandswaarden zullen de modellen in het algemeen worden gecalibreerd op basis van de beschikbare parameters en variabelen. Calibratie van de modellen op basis van de grondwaterstands- en stijghoogtebeelden alléén kan, bij fouten in het doorlaatvermogen van de ondergrond, gemakkelijk leiden tot berekening van absurde afvoeren. In de calibratie dienen daarom ook de gebiedsafvoeren te worden betrokken. Als met betrekking tot de weerstandsparameters geen nadere gegevens bestaan, dan dient men te zorgen dat de door het model berekende afvoeren een min of meer logisch deel van het neerslagoverschot vormen.

2.4 Gebruikte definities en begrippen

Een van de eerste problemen die men tegenkomt bij vergelijkend onderzoek, is de kwestie van terminologie en definities. Bij het onderzoek naar de weerstandsparameters worden de begrippen als: bodemweerstand, slootweerstand, intreeweestand, enz. door de verschillende auteurs niet altijd voor dezelfde grootheid of op dezelfde wijze gebruikt. In het verleden zijn, onder meer door Ernst, voorstellen gedaan om hierin uniformiteit aan te brengen, maar enige inconsistentie is gebleven.

Terwille van de duidelijkheid volgt onderstaand een opsomming van de belangrijkste definities, zoals zij in het inventarisatie rapport zijn gebruikt. Hierbij is zoveel mogelijk aansluiting gezocht bij de algemeen geaccepteerde definities, zoals die uit de Verklarende Hydrologische Woordenlijst (CHO-TNO).

- ***Intree-/uittreeweerstand:***

Weerstand ondervonden door grondwater bij intreden/uit treden, van een open of gesloten leiding tengevolge van een weerstandbiedende (grens)laag.

Dimensie T; veel gebruikte eenheid: dag (d).

Bij open waterlopen ontstaat de intreeweerstand door een op bodem of taluds gevormde sliblaag of door verstopping van de bodem en het talud als gevolg van binnendringende fijne deeltjes, chemische of biologische processen. Bij 'gesloten leidingen' is de intreeweerstand een functie van het gebruikte buisma-teriaal en van mogelijke wandverstoppingen.

- ***Bodemweerstand:***

Weerstand, ondervonden door (grond)water bij in- of uitstromen door de slootbodern.

Dimensie T; veel gebruikte eenheid: dag (d).

De weerstand is in feite dezelfde als de intree-weerstand, maar het gebruik van de termen in de literatuur is enigszins verschillend (zie ook 3.1). Hoewel bij locale proeven veelal onderscheid wordt gemaakt naar de weerstand van bodem en taluds, is het begrip bodemweerstand in veel onderzoek gebruikt om de gemiddelde weerstand van bodem en taluds aan te duiden.

- ***Radiale weerstand:***

Weerstand ondervonden door grondwater bij radiale toestroming naar open of gesloten leidingen, tengevolge van de convergentie van de stroombanen.

Dimensie: T/L; veel gebruikte eenheid: dag per meter (d/m).

De radiale weerstand wordt om voor de hand liggende redenen ook wel convergentieweerstand genoemd. Een meer specifieke definitie wordt gegeven in de Verklarende Hydrologische Woordenlijst, namelijk:

'Het verschil tussen de weerstand die per strekkende meter leiding wordt ondervonden door de werkelijke grondwaterstroming naar een relatief ondiepe leiding en de weerstand bij een evengrote grondwaterstroming naar een denkbeeldige open leiding met verticale taluds en de bodem in de ondoorlatende basis, eveneens per strekkende meter leiding.'

Deze definitie geeft de radiale weerstand als het verschil tussen twee weerstanden, namelijk die bij onvolkomen insnijding van een waterloop in een watervoerend pakket, en die voor volkomen insnijding.

De weerstandsterm wordt gebruikt voor toestroming naar open waterlopen

zowel als drains. Uit de definities mag duidelijk zijn dat deze weerstand wordt bepaald door de geometrische verhoudingen van het doorstroomde profiel.

- **Drainageweerstand:**

Totale weerstand ondervonden door grondwater bij toestroming naar een systeem van open of gesloten leidingen. De drainageweerstand is per definitie te berekenen als het quotiënt van de opbolling van het freatisch vlak tussen de waterlopen, en de specifieke afvoer bij stationaire stroming.

Dimensie T; veel gebruikte eenheid: dag (d). (N.B. De specifieke afvoer is de afvoer per oppervlakte-eenheid van het beschouwde gebied).

Als tegenhanger van de drainageweerstand wordt wel de 'infiltratieweerstand' gebruikt om aan te duiden dat het water in een gebied vanuit de waterlopen naar het grondwater infiltreert. De betreffende definitie en dimensie zijn vergelijkbaar.

- **Voedingsweerstand:**

Totale weerstand ondervonden door grondwater bij stroming vanuit de deklaag naar het bovenste watervoerend pakket.

De voedingsweerstand wordt algemeen gedefinieerd als het quotiënt van het stijghoogteverschil over de deklaag en de voeding van het watervoerend pakket vanuit de deklaag. Het stijghoogteverschil over de deklaag wordt op zijn beurt bepaald als het verschil tussen de gemiddelde grondwaterstand in de deklaag en de stijghoogte in het bovenste watervoerend pakket daaronder. De grondwaterstand, zijnde het gewelfde vlak tussen de waterlopen of drains, wordt bij grondwatermodeltoepassingen wel vereenvoudigd weergegeven als het slootwaterpeil; de modelformules zijn dan daarop aangepast.

Dimensie T; veel gebruikte eenheid: dag (d).

u.d. Eetenheemt vragen
we nota B.M. Haager.

3 Intreeweerstanden

3.1 Intreeweerstand of bodemweerstand

De intreeweerstand of bodemweerstand op de grens van slootbodem en water kan ontstaan door de vorming van een sliblaag of door verstopping van de slootbodem en taluds door indringing of neerslag van materiaal in de oorspronkelijke grondlagen. De termen intreeweerstand en bodemweerstand worden in de geïnventariseerde rapporten door elkaar gebruikt, enigszins afhankelijk van de invalshoek.

- De term *bodemweerstand* wordt in het algemeen gebruikt bij kwel-, infiltratie-, en doorlatendheidsproeven. De weerstand kan worden berekend als quotiënt van de dikte van de beproefde laag (d) en de doorlatendheid (k) daarvan.
- De term *intree-/uittreeweerstand* wordt veelal gebruikt bij bepalingen van de gemiddelde weerstand over de bodem van een waterloop (of de grenslaag van een drain) uit het peilverschil tussen het water in de waterloop of drain en de grondwaterstand ter plaatse, en de flux door de bodem. De intree- of uittreeweerstand is in dat verband gelijk aan het stijghoogteverlies over de grenslaag van de waterloop gedeeld door de flux.

Tegen het gebruik van de term 'bodemweerstand' in meer algemene zin zijn wat bezwaren. In de eerste plaats wordt ook in de bestaande literatuur het begrip bodemweerstand niet consequent voor de weerstand over de bodem gebruikt. Dikwijls wordt met het begrip de gemiddelde intreeweerstand over bodem en talud bedoeld. In de tweede plaats wordt het begrip 'bodem' in de geohydrologie in verschillende betekenissen gebruikt en is ook om die reden enigszins verwarrend. De term intreeweerstand heeft niet deze bezwaren en leent zich daarnaast voor aanduiding van de weerstand bij andersoortige ontwateringsmiddelen, zoals greppels en drains.

Ter vermindering van misverstanden is door de auteurs van het inventarisatierapport zoveel mogelijk de meer algemene term 'intreeweerstand' gebruikt voor aanduiding van de weerstand over een grenslaag tussen grond en water, met name waar het gaat om de evaluatie van de resultaten van het geïnventariseerde onderzoek.

Onder de intreeweerstand is verstaan de weerstand op de grens tussen grond en water, die wordt veroorzaakt door de vorming van een sliblaagje of door dichtslibbing van het oorspronkelijke bodemprofiel. Het betreft hier dus niet de hydraulische weerstand van de oorspronkelijke bodemlagen, maar een toegevoegde weerstand, die het gevolg is van een verandering in de situatie.

In de praktijk van het veldonderzoek blijkt dat de intreeweerstand niet gemakkelijk zuiver is te bepalen. Bij doorlatendheidsproeven en kwelmetingen (zie hoofd-

stuk 5) wordt de intreeweerstand bepaald als de totale hydraulische weerstand over de laag die is samengesteld uit de sliblaag en de oorspronkelijke bodem van de waterloop. De doorlatendheid van de slootbodem wordt dan dus mede bepaald door de doorlatendheid van de oorspronkelijke grondlagen onder de slootbodem. De onderzochte rapporten geven geen duidelijke definitie en er zijn klaarblijkelijk geen duidelijke afspraken met betrekking tot de vaststelling van een grenslaagdikte waarover de weerstand geldt (zie verder hoofdstukken 5 en 6).

In gebieden met een dikke kleiige deklaag valt de intreeweerstand van een sliblaagje in het niet ten opzichte van de hydraulische weerstand van het onderliggende kleipakket. De extra weerstand in de grenslaag speelt dan veelal geen belangrijke rol. De meeste onderzoeken, die op het terrein van de intreeweerstand zijn verricht, concentreren zich dan ook op gebieden met goed doorlatende lagen in de bovengrond.

3.2 Vorming van de intreeweerstand

3.2.1. Vorming van een sliblaag

Intreeweerstanden kunnen worden veroorzaakt door het ontstaan van een sliblaag op de bodem van de waterlopen. Dit slib wordt in suspensie aangevoerd met het water, waarna het zich afzet op de bodem op plaatsen waar de stroomsnelheden afnemen en/of de waterkwaliteit sterk verandert. Na verloop van tijd ontstaat hierdoor een laagje van geaccumuleerd bodemslib.

Dikte, vorm en doorlatendheid van deze laag worden bepaald door factoren als: de hoeveelheid en samenstelling van het aangevoerde slib (geërodeerd, industrieel of plantaardig materiaal), de stroomsnelheid in de betreffende waterloop (ook verbandhoudend met de functie van de waterloop: watervoerend, scheepvaart, etc.) en van de chemische en biologische processen in de waterloop.

Ten aanzien van de herkomst van het slib kan onderscheid worden gemaakt naar de volgende bronnen:

- *Erosieproducten.* Ten gevolge van de erosie van het oppervlak en de omtrek van waterlopen ontstaan erosieproducten die door het water worden meegevoerd. Dit proces speelt vooral een rol waar het terrein of de ontwateringsmiddelen pas zijn aangelegd en de begroeiing nog onvoldoende is. Bij pas aangelegde drains vindt uitspoeling van fijne deeltjes plaats via de openingen tussen de drains waardoor in de directe omtrek porien en fijne kanaaltjes ontstaan. Tegenwoordig wordt veel aan erosiebestrijding gedaan en neemt de hoeveelheid slib af als gevolg van de toenemende aanleg van zandvangen.

- *Lozingen.* Onder de lozingen op het oppervlakte water vallen de lozingen door de industrie, de rioleringen en de rioolzuiveringsinstallaties. In het verleden was de hoeveelheid slib afkomstig van menselijke lozingen aanzienlijk. Door het toenemende aantal zuiveringsinstallaties is de hoeveelheid slib echter sterk gereduceerd. Verwacht wordt dat de intree weerstanden na het opschonen van de waterlopen minder snel én minder sterk zullen toenemen als gevolg van deze maatregelen.
- *Dode plantenresten.* Dode plantenresten kunnen na afsterving naar de bodem zakken en daar een laagje organisch materiaal vormen, dat bijdraagt tot de vorming van de intree weerstand. Voor de hierop van invloed zijnde processen wordt verwezen naar hoofdstuk 3.3.
- *Mineraal neerslagen.* Bij kwel van grondwater naar sloten kan neerslag van mineralen optreden als gevolg van oververzadiging van het water met carbonaten en fosfaten of door oxidatie van opgelost gereduceerd ijzer. Lokaal kunnen daardoor, bijvoorbeeld bij sprengen, dikke ijzerhoudende banken ontstaan. De invloed van deze banken op de intree weerstand is in dergelijke gevallen veelal van lokale aard. In het algemeen zijn de hoeveelheden meestal gering en wordt de invloed van de millimeters dunne laag op de bodem weerstand niet erg belangrijk geacht.

3.2.2 Bodemverstopping

Een weerstandbiedende zone kan in principe ook ontstaan door binnendringing van fijne deeltjes uit het water in de oorspronkelijke bodemlaag. De voorwaarden daarvoor zijn:

- Er moet een overdruk in de waterloop of drain bestaan, waardoor het water infiltreert door de leidingwand naar het omringende grondwater. Dit peilverschil zal tenminste gedurende een deel van het jaar aanwezig moeten zijn.
- In het water van de waterloop of drain moeten voldoende fijne opgeloste deeltjes aanwezig zijn om de verstopping te realiseren.

Bij het inventarisatieonderzoek is aan dit mechanisme aandacht besteed door voor elk van de geanalyseerde rapporten zoveel mogelijk de hydraulische condities voor 'normale' en 'proef'condities te noteren (zie de bijlagen).

3.3 Factoren die bijdragen tot de vorming van de intreeweerstand

Een groot aantal factoren kunnen de grootte en de verdeling van de intreeweerstand of bodemweerstand beïnvloeden. Aan de hand van het onderzoek kunnen de volgende worden genoemd.

- *Stroomsnelheden.* De belangrijkste factoren bij de afzetting van een sliblaag zijn de aanwezigheid van gesuspendeerd materiaal in het water en de condities waaronder het materiaal zich afzet. Op het eerste is reeds in hoofdstuk 3.1 ingegaan. De condities voor de afzetting worden bepaald door de diameter en het soortelijke gewicht van het gesuspendeerde materiaal en de stroomsnelheid van water. Het slib bestaat in het algemeen uit materiaal van een zeer geringe diameter ($< 0,016$ mm) en zal in het algemeen pas bij lage snelheden worden afgezet.

De optredende stroomsnelheden hangen af van het verhang van de waterspiegel, de natte omtrek en de ruwheid van het bed. De snelheid van het water bepaalt welke deeltjes zich nog kunnen afzetten en welke zullen worden meegevoerd. Bij wisselende afvoeren kan depositie van materiaal worden afgewisseld met het opnieuw afvoeren daarvan. Ook de chemie van het water speelt daarbij een rol: in het kustgebied kan de elektrische lading van de deeltjes wisselen, waardoor depositie of juist afvoer plaatsvindt (zie chemie van het water).

In de hogere delen van Nederland hebben sommige natuurlijk afstromende beken een stroomsnelheidsregiem dat de afzetting van fijn slib gedurende lange perioden kan verhinderen. Treedt afzetting van fijn materiaal in droge perioden toch op dan zal dit bij de eerstvolgende natte periode weer worden verwijderd. Verwacht mag worden dat in dergelijke gevallen geen constante intreeweerstand van enige betekenis kan worden opgebouwd.

In het overgrote deel van Nederland geldt dat het peil van de waterlopen gedeeltelijk of geheel wordt beheerst. In deze delen is de afzetting van slib een functie van de sterk geregelde afvoeren en zal in de regel een duidelijke opbouw van een sliblaag mogen worden verwacht.

- *Stijghoogteverschillen.* Als gevolg van een positief stijghoogteverschil tussen het peil van de waterloop en de stijghoogte van het grondwater kan bij infiltrerende waterlopen binnendringing van fijne deeltjes in poriën van de bodem en taluds van de waterloop plaatsvinden met als gevolg een verstopping van de bodemlagen en de vorming van een bodemweerstand. Onder drainerende condities (een hogere grondwaterstijghoogte) kan deze verstopping in feite niet plaatsvinden. Deze condities kunnen verschillend zijn voor de normaal heersende omstandigheden en de situatie tijdens een proef. Bij de evaluatie van de resultaten van de verschillende onderzoeken zijn deze condities zoveel mogelijk meegenomen (zie de hoofdstukken 6 en 7).

- *Chemie van het water.* Depositie of afvoer van deeltjes kunnen ook ontstaan doordat de elektrische lading van de door het water meegevoerde deeltjes wisselt. Dit kan leiden tot neerslag van deeltjes, waardoor een weerstandsbiedende laag kan worden gevormd. Voorbeelden zijn waar een zure zijstroom uitmondt in een basische hoofdstroom, of waar zoet en zout water bij elkaar komen. Daarnaast kan afzetting van mineralen optreden op plaatsen waar zuurstofarm water in een zuurstofrijk milieu belandt. Afzetting van ijzeroxide is daarvan een voorbeeld. Door het veelal plaatselijke karakter van de afzettingen zal het effect op de intreeweerstand van een ontwateringsstelsels naar verwachting in het algemeen gering zijn.
- *Chemische en biologische processen.* Chemische en biologische processen beïnvloeden de vorming van de sliblaag. Tengevolge van oxidatie van het organische materiaal op de slootbodem (mineralisatie genoemd) worden de plantenresten afgebroken. Het proces kent een sterke seizoensafhankelijkheid. Het groeiseizoen neemt een aanvang in het late voorjaar en bereikt haar hoogtepunt in de zomer. In het najaar en de winter is er nagenoeg geen biologische activiteit. In *eutrofe sloten* is de groei van algen en andere waterplanten in het bloeiseizoen dusdanig groot dat het licht de slootbodem niet meer bereikt en oxidatie/mineralisatie door gebrek aan licht en zuurstof gelimiteerd is. Dan treedt er aan het einde van de zomer telkens afsterving en bezinking van algen op zonder veel mineralisatie van het afgestorven organisch materiaal in het volgende bloeiseizoen. Om opeenhoping van organisch materiaal te beperken worden de sloten daarom in het najaar uitgebaggerd. In *oligotrofe sloten* is de balans tussen afstervend organisch materiaal en microbiële afbraak veelal beter. Dit evenwicht in afbraak bestaat niet voor sloten in hoogveengebied.
- *Droogvallen van waterlopen.* Het droogvallen van waterlopen doet zich vooral in hellende gebieden tijdens de zomerperiode voor, maar er zijn ook andere situaties denkbaar. Bij het droogvallen van de waterloop kan de sliblaag inklinken, afbreken of scheuren gaan vertonen. De invloed van inklinking op de grootte van de intreeweerstand zijn niet bekend. Afbraak kan plaatsvinden, doordat de sliblaag onder invloed van de grotere hoeveelheid zuurstof oxideert; de bodemweerstand zal daardoor geleidelijk afnemen. Scheuring van de sliblaag treedt op bij sterke uitdroging; een tijdelijke vermindering van de bodemweerstand kan daarvan het gevolg zijn.
- *Onderhoud aan waterlopen.* De aanwezigheid van een sliblaag (en derhalve een intreeweerstand) is direct gerelateerd aan de onderhoudstoestand van de waterlopen. Aangetoond is dat het onderhoud tevens effect heeft op de afwatering van een gebied, en daardoor indirect op de toestand van ontwatering. Bij beschrijving van veldwerk lijkt het dan ook wenselijk de onderhoudstoestand zoveel mogelijk als gegeven te noteren. Het uitbaggeren van een kanaal heeft een sterk verlagend effect op de intreeweerstand.

- *Scheepvaart.* In kanalen waar scheepvaart plaatsvindt zullen de veroorzaakte grote stroomsnelheden en turbulentie van invloed zijn op de slibafzettingen. Ook de beroering en het omwoelen van de bodem door scheepsschroeven en ankers hebben een grote invloed op de heterogeniteit van de bodem en de sliblaag (zie de rapporten van de grote kanalen).

Bij de inventarisatie is nagegaan of het geïnterviewde onderzoek met betrekking tot de invloed van de verschillende bovengenoemde factoren harde aanwijzingen geeft (zie hoofdstuk 6).

4 Overzicht geïnventariseerd onderzoek

Bij de inventarisatie van het onderzoek naar de intreeweestanden werden 22 rapporten geselecteerd. Het criterium voor selectie van de rapporten voor dit onderzoek was dat de rapporten alle zijn gebaseerd op veldgegevens. Figuur 4.1 geeft een overzicht van de locaties van de geïnventariseerde onderzoeksgebieden. Daarnaast is het onderzoeksrapport gebaseerd op artikelen (zie de referentielijst).

In sommige gevallen bestaan van een onderzoek verschillende rapporten, zoals bijvoorbeeld van het onderzoek in het Waterschap 'De Veenmarken'. In dat geval is een keuze van rapporten gemaakt die elkaar aanvullen. Een overzicht van de geselecteerde rapporten is gegeven in tabel 4.1.

Bij het geïnventariseerde onderzoek zijn tot nu toe slechts enkele rapporten gevonden die gegevens bevatten over de intreeweestanden van de *kleine waterlopen* (klassen 1 t/m 3). Met name het gebrek aan gegevens betreffende deze groep van waterlopen vormt het belangrijkste aandachtspunt voor het onderzoek. Vooral recentelijk wordt meer aandacht besteed aan deze waterlopen (zie 1991-1 en 1994-1). De grotere waterlopen (klasse 4 en hoger) worden veelal individueel onderzocht. Deze waterlopen zijn in het algemeen onderzocht om hun invloed op het diepere grondwater of het effect van een voorziene ingreep te bepalen.

Een aantal onderzoeken heeft een regionaal karakter (De Veenkoloniën, Drenthe en Oostelijk Gelderland). Hierbij wordt de relatie oppervlaktewater - grondwater onderzocht aan de hand van representatieve gebiedjes.

De onderzochte rapporten vertegenwoordigen een selectie uit een waarschijnlijk grotere hoeveelheid werk.

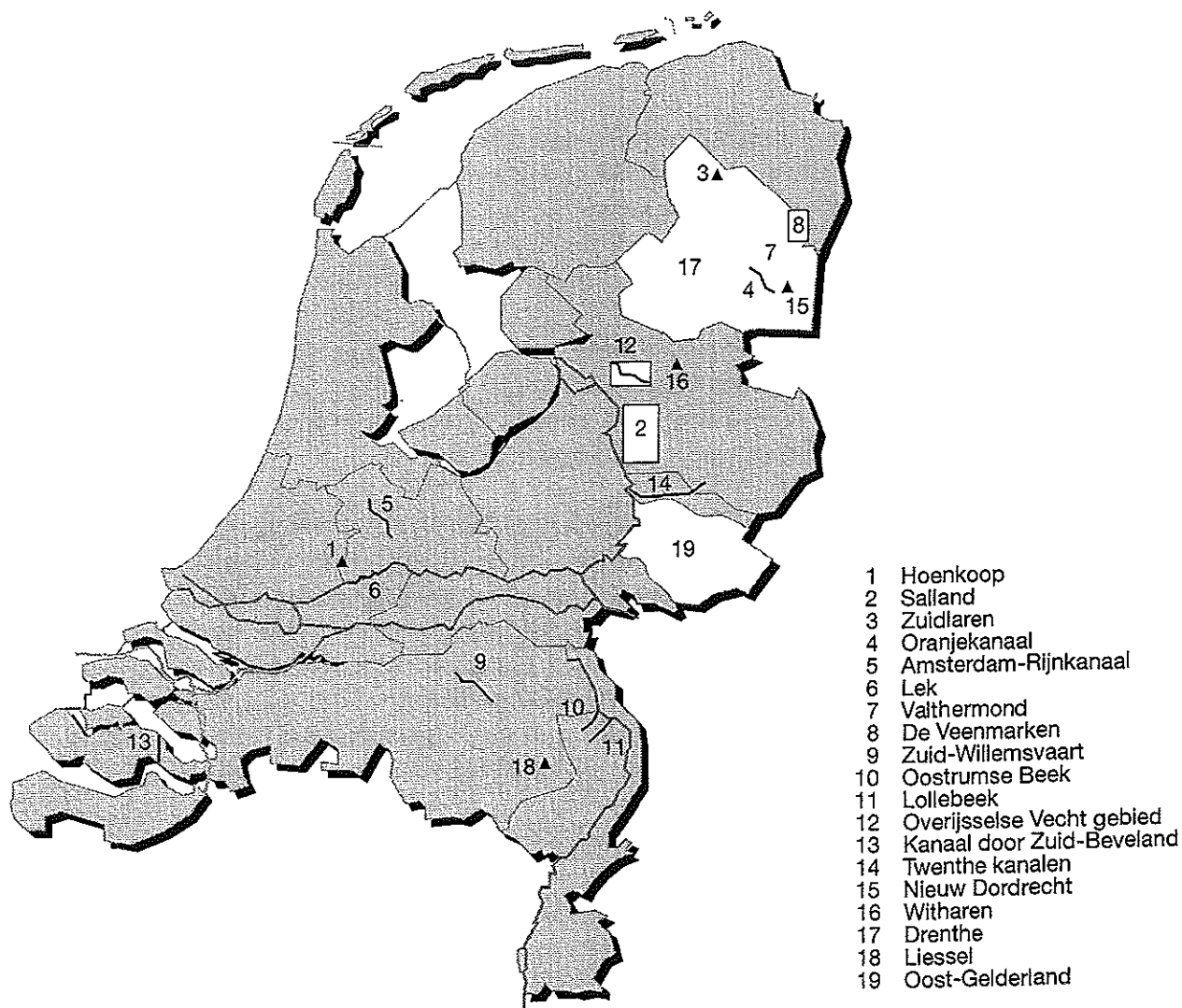


Fig. 4.1 Overzicht locaties van geïnventariseerd onderzoek

Tabel 4.1 Overzicht geïnventariseerd onderzoek

Nr.	Locatie	Inst.	Auteur(s)	Titel
1969-1	Hoenkoop	ICW	J.Wesseling	Enkele resultaten van het hydrologisch onderzoek op het ontwateringsobject Hoenkoop.
1972-1	Salland	ICW	H. Fonck	Een onderzoek naar de grootte van de weerstanden in de slootbodem bij infiltratie vanuit een sloot.
1973-1	Salland	ICW	H. Fonck	Een onderzoek naar de grootte van de infiltratie vanuit watervoerende leidingen in het Waterschap Salland.
1973-2	Zuidlaren	ICW	R.A.Feddes et al	Infiltratie proefveld 'De Groeve'.
1974-1	Oranjekanaal	ICW	B vd Weerd	Onderzoek naar de wegzijging in het Derde pand van het Oranjekanaal.
1980-1	A-R kanaal, Lek, Leidsche Rijn	RID	G.J.Hey et al	De hydrologische interactie tussen de grotere waterlopen en het grondwater in West-Utrecht.
1982-1	Valthermond & Zuidlaren	HBCS Velp	A.Bartels et al	Drainage- en infiltratie weerstanden in het veenkoloniaal gebied. (Onderzoek in Valthermond en 'De Groeve', Zuidlaren).
1982-2	Valthermond, De Veenmarken	ICW	T v. Keulen	Bepaling van geohydrologische grootheden uit waterbalansen en grondwaterstanden van het wateraanvoergebied 'De Monden'.
1983-1	Z-Willemsvaart, Den Dungen-Erp	ICW	K.E.Wit	Berekening van de kanaalweerstand van de Zuid-Willemsvaart in het traject Den Dungen - Erp.
1985-1	Oostrumse Beek, (L)	KIWA	H.J.Vinkers	Bepaling van de slootweerstand van de Oostrumse Beek tussen de stuwen 09 en 010.
1985-2	Lollebeek, (L)	KIWA	H.J.Vinkers	Bepaling van de slootweerstand van de Lollebeek tussen de stuwen L10 en L9.
1985-3	Overijsselse Vecht gebied	RIVM	K.G.Lamsvelt	Bepaling van de bodemweerstand in en onder watergangen door middel van infiltratie proeven in het gebied van de Overijsselse Vecht - West.
1986-1	Waterschap De Veenmarken	ICW	P.J.T.van Bakel	Planning , Design and Operation of Surface Water Management Systems.
1987-1	Kanaal door Zuid-Beveland	DBW/ RIZA	B.P.C. Steenkamp	Inschatting van de Kwelverandering langs het Kanaal door Zuid-Beveland als gevolg van verbeteringswerken.
1987-2	Twenthekanalen, Eefde - Lochem	ICW	K.E.Wit et al	Hydrologische en bodemfysische parameters in de omgeving van het hoofdkanaal van Twenthekanalen (traject Eefde - Lochem).

Vervolg tabel 4.1

Nummer	Locatie	Inst	Auteur(s)	Titel
1988-1	Valthermond, De Veenmarken	HBCS	HBCS Velp	Drainage - infiltratie proefveld Valthermond; Veldonderzoek betreffende drainage- omhullingsmaterialen in de Veenkoloniën.
1988-2	Waterschap Salland	WMO	onbekend	Infiltratie proeven Waterschap Salland
1989-1	Nieuw Dordrecht	SC- DLO	K.E.Wit et al	Onderzoek naar de effecten van beheersmaatregelen op de conservering van een Neolithische veenweg bij Nieuw-Dordrecht.
1989-2	Witharen	KIWA	B.A.J.Meeuwis sen et al	Onderzoek naar de waarden van belangrijke geo- hydrologische parameters in het gebied Witharen
1991-1	Provincie Drenthe	SC- DLO	K.E.Wit et al	Relatie tussen oppervlakte- en grondwater in de Provincie Drenthe.
1992-1	Liessel, Waterschap De Aa, (NB)	SC- DLO	J.G.te Beest et al	Gevolgen van maatregelen om hydrologische effecten van een ontgroning te Liessel te compen- seren.
1994-1	Oost-Gelderland	SC- DLO	H.Th.L.Massop et al	Hydrologisch onderzoek naar de drainageweestan- den van het tertiair ontwateringssstelsel in Oost- Gelderland

5 Overzicht onderzoeksmethoden

Het geïnventariseerde onderzoek varieert van kleinschalig laboratorium onderzoek tot grootschalig gebiedsonderzoek. Dit onderzoek wordt veelal uitgevoerd ter ondersteuning van geohydrologisch (vervolg)onderzoek. Er kan onderscheid gemaakt worden naar het onderzoek aan individuele waterlopen en het meer gebiedsgericht onderzoek aan ontwateringsstelsels. De lokale doorlatendheidsmetingen en kwelmetingen worden vrijwel altijd uitgevoerd in een groter kader.

De onderzoeksmethoden hebben gemeen dat de intreeweerstand in principe wordt bepaald uit het quotiënt van stijghoogteverschillen en doorstroomdebieten. Onvolgende kennis van de situatie en van de beperkingen van de proeven kan tot een foute interpretatie van de resultaten leiden. Daarom zal aan de aard van de proeven, de aannamen en foutenbronnen, alsmede aan de representativiteit van de resultaten in dit en de volgende hoofdstukken aandacht worden besteed.

De verschillende onderzoeksmethoden worden hier in de volgorde van klein naar groot besproken.

5.1 Doorlatendheidsmetingen aan bodemmonsters

5.1.1 Methode

Bij deze methode worden grondmonsters van de bodem of de taluds van een waterloop in het laboratorium onderzocht op hun doorlatendheid. Daarbij wordt ook de lithologische opbouw onderzocht. In de rapporten wordt dikwijls de term 'bodemweerstand' gebruikt.

De bodemmonsters worden veelal gestoken met een slagvaste pvc-buis van ca 5 cm diameter en vervolgens, goed verpakt en voor uitdroging behoed, naar het laboratorium getransporteerd. Daarbij wordt min of meer standaard, veelal onafhankelijk van de grootte van de onderzochte waterloop, een bodemmonster van ca 1 m genomen. In het laboratorium wordt een potentiaalverschil gecreëerd, waardoor water door het monster stroomt. De intreeweerstand wordt berekend uit quotient van het verschil in potentiaal aan de boven- en onderzijde van het monster, en de doorgevoerde hoeveelheid water.

Er zijn bij deze proef twee gangbare methoden, namelijk a) met een constant potentiaalverschil en b) met een in de tijd afnemend potentiaalverschil (zie o.a. 1987-2). De methode met een constant potentiaalverschil is bewerkelijker, omdat voor elk bodemmonster een afzonderlijke proefopstelling nodig is. De methode met afnemend potentiaalverschil leent zich beter voor het tegelijkertijd beproeven van een groot aantal bodemmonsters en is derhalve meer in trek.

5.1.2 Aannamen en foutenbronnen

De doorlatendheidsproef is hier bedoeld om de intreeweerstand/uittreeweerstand van de grenslaag te bepalen aan ongestoorde monsters. Daarbij doen zich in de praktijk een aantal problemen voor, die onderstaand worden toegelicht.

Invloed van de steekmonsterhoogte op de proefresultaten

De intreeweerstand geldt als de weerstand, die optreedt bij de waterbodem als gevolg van de vorming van een sliblaag of van het dichtslibben van de bovenste laag van de oorspronkelijke bodem. Deze weerstand staat in theorie los van de hydraulische weerstand van de 'ongestoorde' ondergrond (horizontale, verticale en radiale componenten).

Een probleem bij de uitwerking van de proeven is dat de dikte van weerstandslaag (de sliblaag en/of van de beïnvloede bodemlaag) niet van tevoren bekend is en soms moeilijk is vast te stellen. Bij doorlatendheidsproeven aan bodemmonsters wordt de intreeweerstand bepaald als het quotient van het stijghoogteverschil over de beproefde kolom en het doorgelaten debiet. Bij bodembemonstering wordt min of meer standaard, veelal onafhankelijk van de grootte van de onderzochte waterloop, een bodemmonster van ca 1 m genomen. Daarbij kan niet worden voorkomen dat een deel van de bij de proef bepaalde weerstand wordt geleverd door de oorspronkelijke bodemlagen. De bovengevonden waarde voor de intreeweerstand vraagt dus in feite om een correctie.

Doordat tijdens de proef niet goed bekend is hoe de bodem is samengesteld - de steekmonsters worden pas na de proef doorgezaagd en onderzocht - is correctie pas achteraf mogelijk. Een correctie op basis van gemeten resultaten is slechts mogelijk als de stijghoogte ook als functie van de hoogte van het boormonster wordt gemeten. Dit betekent dat peilbuisjes verdeeld over het steekmonster moeten worden aangebracht.

De vraag is hoe belangrijk de fout is die gemaakt wordt bij het ontlenen van de intreeweerstand aan steekmonsters van ca 1 m. Aangezien de weerstanden van de verschillende laagjes een serie van weerstanden vormen, zal de berekende weerstand bij een groot contrast in de doorlatendheden van a) de sliblaag en de verdichte bodem en b) de onbeïnvloede bodem niet tot grote fouten in de berekende weerstand leiden. Dit is eenvoudig na te gaan aan de hand van een voorbeeld met een slecht doorlatende sliblaag ($k_v = 0.01 - 0.1$ m/dag) en een goed doorlatende bodem ($k_v = 1 - 10$ m/dag). De vastgestelde weerstand komt dan redelijk met die van de waterbodem overeen. Waar de oorspronkelijke bodem minder doorlatend is of waar bij de bodem behorende weerstandsbiedende laagjes in het steekmonster voorkomen, worden met deze methode te hoge waarden aan de intreeweerstand toegekend, hetgeen eveneens eenvoudig is na te gaan. In dergelijke gevallen zal

dus in feite een correctie nodig zijn.

Een juiste correctie kan worden uitgevoerd door op regelmatige afstand aan de monsterbuis een stijgbuisje te bevestigen en deze tijdens de proef waar te nemen. Dit is evenwel bewerkelijk en daardoor kostbaar. Daarom kan ook een correctie op basis van lithologie worden overwogen, door voor de doorlatendheid van de oorspronkelijke bodem een aanname te doen.

Als alternatief voor de correctie kan worden overwogen om de definitie van de intreeweerstand aan te passen aan de praktijk van het veldonderzoek en een steekmonsterlengte te kiezen die in overeenstemming is met de klasse van de onderzochte waterloop. De lengte zou dan bij kleine waterlopen standaard niet meer mogen bedragen dan bijvoorbeeld 50 % van de bodembreedte, waardoor de intreeweerstand niet in belangrijke mate interfereert met de verticale weerstand van de oorspronkelijke bodemlagen. Bij grote waterlopen is de steekmonsterlengte van een meter veelal voldoende, zoals uit het geïnventariseerde onderzoek blijkt (zie 1987-2).

De conclusie moet zijn dat bij het onderzoek naar de intreeweerstand aan de hand van steekmonsters, over de gedane aannamen, de onderzochte en/of geschatte foutenmarge in de metingen, en de eventueel daarvoor ingevoerde correcties, duidelijk dient te worden gerapporteerd.

Problemen bij de uitvoering

- *Verstoring van het bodemmonster.* Het gestoken monster kan te zeer verstoord zijn om als representatief te gelden. In het algemeen zal altijd een zekere verstoring optreden. De ernst daarvan is niet goed te controleren. Om het gestoken monster lithologisch te kunnen analyseren wordt de plastic pijp met het monster na de proef in de lengte doorgezaagd. Dit geeft weliswaar enig inzicht in eventueel bij het steken opgetreden verstoring, hoewel er door het zagen een nieuwe bron van verstoring ontstaat.
- *Uitdroging van het bodemmonster.* Tijdens het transport en de opslag kunnen monsters geheel of gedeeltelijk uitdrogen. Daardoor kunnen tijdens de proef 'kortsluitingen' langs de plastic wand optreden, die de proefresultaten sterk zullen beïnvloeden.
- *Luchtinsluitingen.* Tenslotte kunnen zich tijdens de proef luchtinsluitingen voordoen, waardoor slechts een deel van de doorsnede van de kolom voor watertransport wordt benut. Dit resulteert in een te lage doorlatendheid en in te hoge berekende weerstand.

In sommige rapporten wordt op deze foutenbronnen ingegaan. Een voorbeeld is het uitdrogen van bodemmonsters genoemd in rapport 1972-1, waarbij tijdens de

doorlatendheidsmetingen kortsluitstromen worden vermoed, die de resultaten verstoren. Deze praktische problemen kunnen deels door zorgvuldigheid bij de proefopstelling worden voorkomen.

5.1.3 Evaluatie

Bij de berekening van de intreeweerstand uit de doorlatendheid van steekmonsters van de slootbodem, doet zich de moeilijkheid voor dat de gevonden intreeweerstand in theorie dient te worden gecorrigeerd voor het deel van de weerstand dat door de niet verdichte bodemlagen wordt geleverd. Deze correctie is niet eenvoudig uit te voeren en is niet in alle gevallen even noodzakelijk. Een goede remedie is kostbaar en tijdrovend. Geconcludeerd wordt dat de mogelijke foutenmarge en de eventueel ingevoerde correctie in de betreffende onderzoeksrapportage aandacht verdienen.

In de praktijk blijken zich ook moeilijkheden voor te doen bij het steken, transport en beproeven van de steekmonsters. Het steken van zogenaamde 'ongerode' monsters blijft een probleem. De problemen van uitdroging en luchtinsluitingen kunnen grotendeels door een zorgvuldige uitvoering worden vermeden.

5.2 Kwel- en infiltratiemetingen in waterlopen

5.2.1 Methode

Hierbij worden met speciaal daarvoor ontworpen apparaten in-situ metingen gedaan van locale kwel- of infiltratiedebieten. Om de intreeweerstand te kunnen berekenen wordt daarbij ook het verschil tussen slootwaterpeil en stijghoogte in de bodem gemeten. Er zijn in de loop der tijd verschillende meetopstellingen ontwikkeld.

- *Gesloten kwelmeter.* Een bekend meetinstrument is de zogenaamde 'kwelmeter', een van boven gesloten ronde metalen bak met een rand die in de bodem van een waterloop wordt gedrukt. Het apparaat is door middel van een slang verbonden aan een met water gevulde ballon, die zich in een houder eveneens onder water bevindt. Via een driewegkraan in de slang kan de ingesloten lucht uit de metalen bak worden gelaten. Het door de kwelmeter opgevangen water verzamelt zich in de ballon, zodat na verloop van tijd het toegenomen volume kan worden vastgesteld. (Bij infiltratie levert de ballon het water aan de kwelmeter en wordt een afnemend volume bepaald). Door de constructie met de ballon ondervindt het door de meter opgevangen kwelwater in principe dezelfde tegendruk als het kwelwater daar buiten. De proef voldoet daarmee aan de natuurlijke condities buiten de opstelling. De kwel of infiltratie wordt berekend als de hoeveelheid uittredend, respectievelijk intredend water per oppervlakte eenheid en per tijdseenheid. De stijghoogte wordt bepaald met een apart peil-

buisje en een puntfilter. Bij slappe slootbodems wordt dit buisje over enige afstand (20 - 30 cm) in de bodem gedrukt.

Door de gebrekkige controlemogelijkheden bij de proef kunnen zich lucht- of gasinsluitingen voordoen, waardoor een ongewenste tegendruk ontstaat, die de kwelstroom beïnvloedt en foute proefresultaten geeft. Een gedeelte van de variatie in gevonden debieten kan een effect zijn van dergelijke problemen. Het voorkomen van deze problemen blijkt in de praktijk zeer moeilijk uitvoerbaar, hetgeen een nadeel is bij deze kwelmeter. Bij het doen van verscheidene metingen binnen een kort tijdsbestek op dezelfde plaats is gebleken dat de proefresultaten nogal sterk kunnen afwijken van elkaar (dit is de ervaring bij het SC volgens een mondelinge mededeling). Aangezien er geen duidelijke conditionele gronden waren voor deze verschillen, wordt geconstateerd dat het meten met deze kwelmeter gevoelig is. De in sommige kringen gehanteerde bijnaam 'kommer-en-kwelbak' heeft daar alles mee te maken.

- *Open kwelmeter.* Om aan de onzekerheidsproblemen bij de debietmetingen van de gesloten kwelmeter te ontkomen, wordt recentelijk steeds meer gewerkt met open cilindervormige kwelmers (buizen), die iets dieper in de bodem kunnen worden ingelaten en beter controleerbaar zijn. Het waterpeil in de cylinder wordt met een regelunit en een toevoersysteem op dezelfde hoogte gehouden als het peil van de waterloop daarbuiten. De kwel of infiltratie wordt bepaald als de ingelaten of uitgelaten hoeveelheid water per tijdseenheid en per oppervlakte-eenheid. Naast de buis wordt met behulp van puntfilters de grondwaterstand in de bodem gepeild.

Hoewel deze methode robuuster is, is zij tevens meer omvangrijk, tijdrovender, en om praktische redenen niet altijd toepasbaar (bijvoorbeeld in diepe kanalen met veel scheepvaartverkeer). Ten behoeve van een goede stabiliteit moet het apparaat een minimale afstand in de bodem worden gedreven, waardoor een deel van de oorspronkelijke bodem deelneemt in de gemeten intreeweerstand.

Voor beide typen kwelmers kan de bodemweerstand worden berekend als het quotient van het verschil tussen slootpeil en grondwaterstijghoogte in de bodem enerzijds, en het kweldebiet anderzijds. De duur van deze proeven is veelal enkele dagen.

5.2.2 Aannamen en foutenbronnen

De bepaling van de intreeweerstand berust op twee metingen: die van het kwel-/infiltratiedebiet, en die van het stijghoogteverschil tussen slootwaterpeil en grondwaterstijghoogte in de slootbodem. Daarbij is de totale dikte van de sliblaag en het mogelijk dichtgeslibde deel van de slootbodem een onbekende factor.

- *Kwelmelingen.* Bij de kwelmeter wordt aangenomen dat de kwel onder de slootbodem ongeveer verticaal opkwelt. De indringingsdiepte, mits niet te groot, zal daarbij in het algemeen geen grote foutenbron zijn. Bij proeven met de cilindervormige kwelmeter, mag de indringingsdiepte met name bij kleine waterlopen niet te groot zijn (b.v. niet meer dan 25 cm), omdat anders geen representatieve toestroming wordt verkregen. De cylinder dwingt tot een verticale doorstroming, terwijl het stromingsveld daar buiten bij kleine waterlopen in belangrijke mate radiaal kan zijn. Aangenomen wordt dat het stromingsbeeld geen geweld wordt aangedaan zolang de diepte een fractie is van de bodembreedte (bijvoorbeeld 25 %).
- *Stijghoogtebepaling.* De stijghoogtebepaling in de slootbodem is sterk afhankelijk van de diepte waarop dit gebeurt. Bij de bepaling van de intreeweerstand is de juiste diepte van belang. Bij de vaststelling van deze diepte stoot men op dezelfde onbekende factor als die welke bij de doorlatendheidsproeven wordt ondervonden, namelijk de onbekendheid van de laagdikte waarin de intreeweerstand optreedt. De minimale diepte die voor de stijghoogte dient te worden genomen is de diepte die overeenkomt met de onderkant van de sliblaag. Speelt ook inslibbing een rol, dan dient de diepte meer te zijn.

De ervaring met de open kwelmeters in het onderzoek te Liessel (1992-1) waren positief: bij proeven die kort na elkaar en op korte afstand van elkaar werden uitgevoerd bleken de resultaten goed overeen te komen. Bij metingen met de gesloten kwelmeters bestaan wisselende ervaringen.

Als gevolg van de onzekerheid in, met name, de dikte van de laag waarover de intreeweerstand optreedt, kunnen in de berekende intreeweerstand gemakkelijk variaties optreden in de orde van enkele tientallen procenten. Bij de interpretatie van de uitkomsten dient met deze onzekerheid rekening te worden gehouden.

5.2.3 Evaluatie

De kwelmelingen kunnen indirect worden gebruikt voor het berekenen van de intreeweerstand op locaties. Hoewel de gesloten kwelmeter gemakkelijker verplaatsbaar is, zijn de metingen gevoelig voor fouten (lucht- en gasinsluitingen). De open kwelmeter is veel minder flexibel in gebruik, maar de metingen zijn beter controleerbaar, waardoor de betrouwbaarheid van de resultaten in het algemeen veel beter is. Het gemeten stijghoogteverschil hangt mede af van de gekozen diepte. Het maken van duidelijke afspraken daaromtrent zal onduidelijkheden in de proefresultaten nog aanmerkelijk kunnen verkleinen.

5.3 Sloopproeven

Naast de term slootproef zijn andere termen zoals kanaalproef, etc. in gebruik.

5.3.1 Methode

Bij de slootproef wordt de totale kwel of infiltratie over een afgebakend traject berekend uit de uitgelaten, respectievelijk ingelaten, hoeveelheid water. Het stijghoogteverschil tussen slootpeil en grondwaterstand onder de slootbodem wordt als een gemiddelde over het betreffende traject berekend. Als proefresultaat wordt een 'gemiddelde intreeweerstand' gevonden voor bodem en taluds.

Deze proef wordt veelal uitgevoerd om de invloed van een waterloop op de grondwatersituatie te testen. Hoewel dit voor de bepaling van de intreeweerstand niet strikt noodzakelijk is, wordt de proef dikwijls uitgebreid met grondwaterstands- en stijghoogtemetingen in raaien loodrecht op de as van de waterloop, waarmee tevens inzicht wordt verkregen in de verhouding tussen de horizontale, verticale en radiale weerstandscomponenten van de drainageweerstand (zie ook 5.4).

5.3.2 Aannamen en foutenbronnen

Bij slootproeven wordt een afgebakend traject van de waterloop genomen en worden de toegevoerde of afgevoerde hoeveelheden water bepaald. Daarnaast worden neerslag en verdamping bepaald. Hieruit worden de hoeveelheden water bepaald die door de bodem en taluds van de waterloop intreden of uittreden. De flux door de bodem en taluds wordt berekend als het quotient van de ingetreden/uitgetreden hoeveelheden water en het natte contactoppervlak van het betreffende sloottraject (natte omtrek maal lengte traject). De bodemweerstand wordt berekend als het quotient van het stijghoogteverschil (het verschil tussen het open waterpeil van de sloot en de stijghoogte onder de bodem van de waterloop) en de berekende flux.

Relatief grote foutenmarges kunnen optreden in de afvoermetingen (bij een enkele meting en een ongunstig gekozen locatie kan deze fout gemakkelijk oplopen tot meer dan 25 %). Vooral als de afvoer uit het sloottraject of de toevoer naar het sloottraject wordt berekend uit het verschil van afvoermetingen kan de foutenmarge hoog zijn. Deze fouten worden in evenredige mate in de intreeweerstand teruggevonden. Het is dus van groot belang om aan een zorgvuldige uitvoering van de metingen aandacht te besteden. Keuze van een goede locatie en herhaling van metingen zullen daarin bijdragen.

Het peilverschil tussen slootpeil en grondwaterstand zal in het algemeen redelijk nauwkeurig kunnen worden bepaald; de voorkeursdiepte voor de stijghoogtemeting dient duidelijk te worden aangegeven.

Bij slootproeven wordt veelal uitgegaan van een relatief korte periode. Dit is van belang om de invloed van niet-stationaire gedrag te beperken. Bij proeven van enkele dagen onder dezelfde weersomstandigheden, zal in het algemeen aan deze conditie wel voldaan. De onzekerheid in de resultaten wordt verhoogd naarmate minder of niet aan deze condities wordt voldaan.

Invloed van de taluds

In een enkel onderzoek is aangetoond dat de hydraulische weerstand van de taluds aanzienlijk kleiner was dan de weerstand over de bodem, waardoor een sterkere afvoer plaatsvindt via de taluds (zie 1985-3). De invloed van de taluds kan met name belangrijk zijn bij smalle en relatief diepe waterlopen, waarbij de intree-weerstand voornamelijk gevormd wordt door een op de bodem liggende sliblaag en waarbij het natte deel van de taluds een groot deel van de natte omtrek bepaalt. Bij grote verschillen in de intreeweerstand van bodem en taluds, zal de intree-weerstand in principe als een functie van de waterdiepte in de waterloop moeten worden opgevat. Bij de meeste brede waterlopen met een in verhouding geringe diepte is de foutenmarge kleiner. Foutenmarges zijn zeer situatie gebonden en kunnen het best van geval tot geval worden bepaald.

Differentiatie in de weerstandseigenschappen van bodem en taluds is alleen mogelijk door aanvullend kwelmetingen uit te voeren in bodem en taluds, of door aannamen te doen ten aanzien van de doorlatendheidsverhouding van bodem en taluds (bijvoorbeeld op basis van dikte van de sliblaag).

Buitengewone proefcondities

Bij slootproeven worden soms doelbewust buitengewone situaties gecreëerd door peilen op te zetten of water aan te voeren. Het verhogen en verlagen van het peil kan betekenen dat tijdens de proef andere hydrologische condities gelden dan onder normale omstandigheden (zie 1985-3). Opzetten van het peil heeft eveneens effect op de natte omtrek van de waterlopen en op de verhouding van de bijdragen van bodem en talud in de onderzochte weerstand. Het is van belang dat zowel de normale hydrologische condities als die waaronder de proeven zijn gedaan, worden genoteerd. Daardoor wordt herinterpretatie van de gegevens mogelijk, indien dit nodig of gewenst mocht zijn.

Uitbreiding van de proef

Door de grondwaterstanden te meten in raaien over de betreffende waterloop, kan tevens inzicht worden verkregen in de verhoudingen tussen intreeweerstand en horizontale, verticale en radiale weerstand. Dergelijke berekeningen hebben zin als de resulterende weerstanden voor modelstudies worden gebruikt waarbij het onderscheid tussen radiale en intreeweerstand van belang is (zie ook de opmerkingen over radiale en intreeweerstand in modellen, hoofdstuk 2.3).

5.3.3 Evaluatie

De slootproef (kanaalproef, enz.) leent zich goed voor het bepalen van de interactie tussen oppervlaktewater en grondwater voor belangrijke wateren. De intree-weerstand wordt bepaald als een 'gemiddelde' over bodem en taluds. Deze kan bij smalle diepe waterlopen, als gevolg van de bijdrage van bodem en taluds, een functie van de diepte zijn. De afvoer- en weerstandsverhouding tussen bodem en taluds vormen daarom een punt van aandacht. Als er afvoermeetpunten aanwezig zijn, is de slootproef relatief eenvoudig uitvoerbaar. Als het sloottraject nog van een of meer afvoermeetpunten moet worden voorzien, is de proef bewerkelijk, kostbaar en tijdrovend. Een belangrijke potentiële foutenbron schuilt in de afvoermetingen.

De representativiteit van de proef voor andere waterlopen is gering, wellicht met uitzondering van situaties waarbij waterlopen in exact dezelfde condities voorkomen (gebieden met een gelijkvormig waterlopenpatroon onder dezelfde hydrogeologische condities).

5.4 Gebiedsproeven

5.4.1 Methode

De gebiedsproeven hebben vrijwel altijd een meer omvattend karakter, waarbij de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater wordt gekarakteriseerd en veelal een uitgebreide analyse van deelaspecten wordt ondernomen. Naast de drainage-weerstand en/of voedingsweerstand voor het gebied worden daarbij de invloeden van de meer specifieke weerstanden als de radiale en de intreeweerstand onderzocht.

Bij de gebiedsproeven wordt een geheel gebied als proefeenheid genomen en worden de door de waterlopen gedraineerde of geïnfilterde hoeveelheden water met behulp van een waterbalansberekening uit de gebiedsafvoer bepaald. De drainageweerstand wordt berekend uit de gebiedsafvoer en de gemiddelde opbolling van het freatisch vlak over het gebied. De componenten van de drainage-weerstand (verticale, horizontale en radiale weerstanden en de intreeweerstand) worden vervolgens bepaald uit analyses van het stijghoogteverval in peilbuisraaien over representatieve waterlopen (zie ook de onderzoeken Drenthe (1991-1) en Oost Gelderland (1994-1). Voor bepalingen van de voedingsweerstand is tevens de stijghoogte van het water in onderliggende watervoerend pakketten nodig.

Na een inventarisatie van het waterlopenstelsel in de gebieden (ligging, afmetingen, etc.) wordt een meetprogramma opgezet. De metingen omvatten a) de gebiedsafvoer, b) het oppervlaktewaterpeil in de waterlopen en c) de grondwaterstanden en -stijghoogten over het gebied (figuren 5.1 en 5.2). De metingen b) en c) worden veelal in representatieve raaien uitgevoerd. De peilbuizen in de raaien

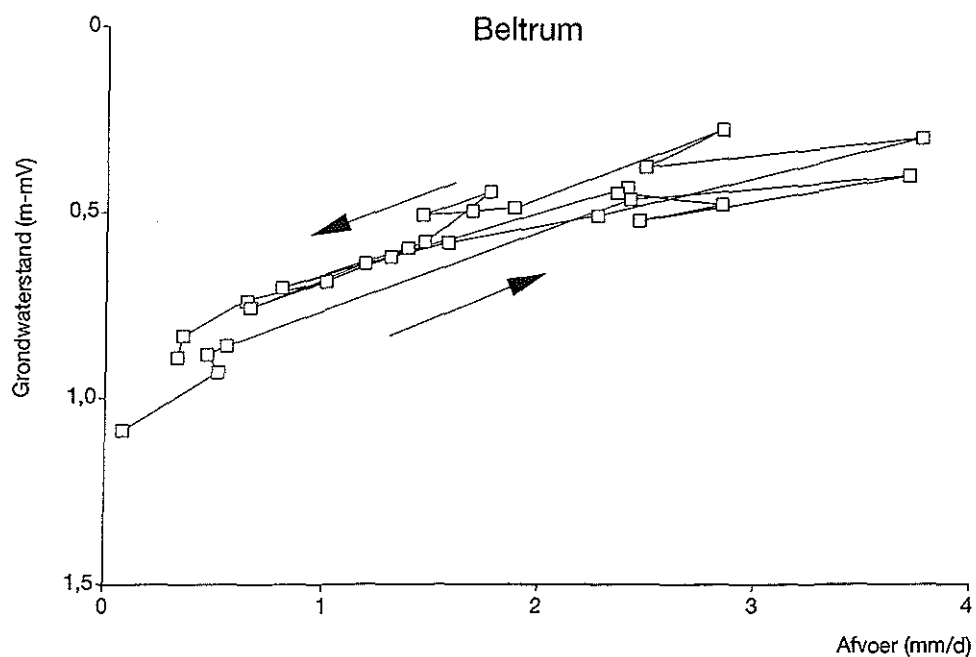


Fig. 5.1 Gemeten afvoer en gemiddelde grondwaterstand proefgebied Beltrum (uit Massop et al, 1994)

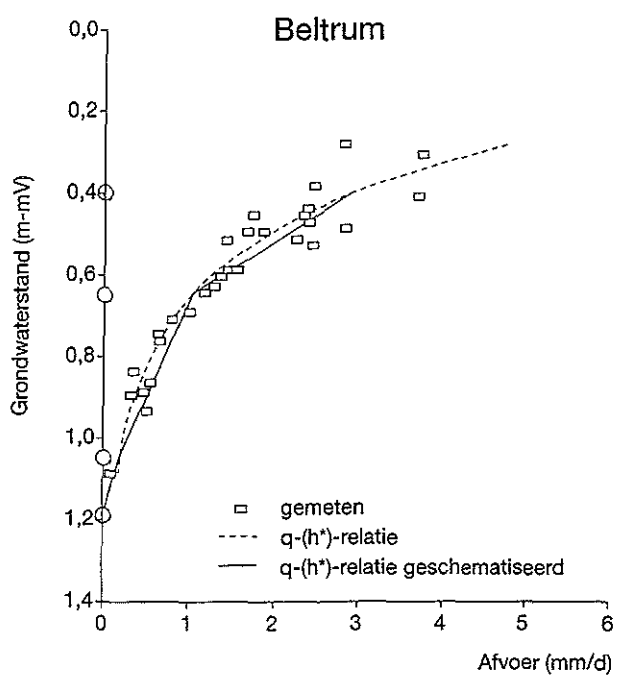


Fig. 5.2 Geschematiseerde q -(h^*)-relatie voor proefgebied Beltrum (uit Massop et al, 1994)

worden op bepaalde afstanden van de waterlopen gezet; bij de keuze van de afstanden wordt rekening gehouden met de hydrogeologische opbouw van het gebied. Een van de peilbuizen wordt in de bodem van de waterloop aangebracht. Daarnaast wordt van meteorologische gegevens gebruik gemaakt en wordt uitgegaan van geohydrologische kennis van het gebied.

5.4.2 Aannamen en foutenbronnen

Gebiedsweerstand

Uitgangspunt bij deze onderzoeken is dat het onderzochte gebied een redelijke mate van homogeniteit vertoont voor wat betreft de geohydrologische en waterhuishoudkundige situatie. Voor de berekening van een drainageweerstand zijn in principe slechts de maximale opbolling en de gebiedsafvoer benodigd. Zodra men ook de weerstandscomponenten wil specificeren, zijn meer gedetailleerde gegevens van het gebied noodzakelijk.

De drainageweerstand is een functie van de diepte van de grondwaterstand onder maaiveld. Indien het ontwateringsstelsel bestaat uit waterlopen van verschillende klassen (eventueel met detailontwatering van greppels of drains), bestaat een geknikte of gekromde ontwateringskarakteristiek (afvoer-grondwaterstandsrelatie) en zal moeten worden onderzocht welke ontwateringsmiddelen bij een gegeven grondwaterstand nog aan het afvoerproces deelnemen en gedurende welke periodes.

Voor wat betreft de hydrogeologische kennis van de ondergrond, dient een goede indruk te bestaan van de gelaagdheid van de deklaag en van de watervoerende en slecht waterdoorlatende lagen in de ondergrond. Zonder deze kennis is een verdere uitsplitsing in de verschillende componenten van de drainageweerstand en/of voedingsweerstand niet goed mogelijk.

Bij de ruimtelijke interpolatie van de grondwaterstandsgegevens over het gebied treedt een onnauwkeurigheid op. Het meetprogramma is vrijwel altijd sterk gelimiteerd door het beschikbare budget. De natuurlijke variabiliteit in neerslag en verdamping en in de heterogeniteit van de ondergrond zorgt voor variatie in het stromingsbeeld en voor locale afwijkingen in de grondwaterstand. Keuze van onvoldoende of niet-representatieve locaties voor grondwaterstandsbuizen zal in het algemeen tot onbekende afwijkingen leiden.

Er bestaan een aantal benaderingsmethoden voor het vaststellen van weerstanden aan de hand van veldgegevens.

- *Momentopnamen.* Bij deze benadering worden de weerstandswaarden berekend over een korte periode (maximaal enkele dagen). Uitgangspunt daarbij is dat het ontwateringsproces over de gekozen periode min of meer stationair verloopt. Aangenomen wordt dat de gebiedsafvoer hoort bij de uit metingen bere-

kende grondwaterstandsopbolling. In het algemeen zal dit als gevolg van lokale verschillen in voeding van het grondwater, heterogeniteit van de bodem en de invloed van (niet-stationaire) bergingsverschijnselen niet het geval zijn. Van de gemaakte fout kan slechts door middel van een groot aantal metingen een goede indruk worden verkregen. Een gevoeligheidstest met een stochastisch model is een andere mogelijkheid.

- *Representatieve periode.* De weerstandsmethoden worden berekend over een representatieve periode. Aangenomen wordt dat het effect van de berging (het niet-stationaire deel van de ontwatering) te niet gedaan kan worden door een representatieve periode van bijvoorbeeld een hydrologisch jaar te kiezen. De berging zou aan het begin en het einde van de periode gering en ongeveer hetzelfde moeten zijn. Deze methode vraagt om regelmatig meten van de betreffende variabelen. Een belangrijke voorwaarde is dat de hydrologische condities (infiltratie of drainage) niet in belangrijke mate wisselend mogen zijn over de gekozen representatieve periode.

Hoe groter de schaal van het onderzoeksgebied, des te groter worden ook de kansen op variaties in de hydrogeologische opbouw, de waterhuishoudingskenmerken, enz. Dit kan nopen tot een grotere mate van detaillering in het meetprogramma, en bijvoorbeeld tot vermeerdering van het aantal afvoermeetlocaties, waardoor de proefgebieden verder worden onderverdeeld.

Intreeweerstand

De intreeweerstand wordt, evenals de radiale, de horizontale en verticale weerstand, bepaald uit analyses van het stijghoogteverval in peilbuisraaien over representatieve waterlopen (zie hoofdstuk 2.2). Daarbij moeten aannamen worden gedaan met betrekking tot een homogeen hydrologisch gedrag van het gebied, ten aanzien van de voeding vanuit het neerslagoverschot en ten aanzien de grondwaterstroming (zie ook onderzoek Oost-Gelderland, 1994-1). Door een aantal momentopnamen te maken voor zomer- en wintercondities kan de drainageweerstand worden vastgesteld als een functie van de grondwaterstandsdiepte tot maaiveld. Door daarbij ook de deelnemende waterlopen te noteren kan voor verschillende klassen een intreeweerstand worden bepaald. De berekeningen kunnen met de analytische formules van Ernst of Bruggeman geschieden, of met behulp van numerieke modellen.

De foutenbronnen zijn gerelateerd aan de verschillende aannamen, zowel als aan de uitvoering van het onderzoek.

- De aannamen van een hydrologisch homogeen functionerend gebied houden een grove benadering in, die zich vertaalt naar de gevonden weerstandswaarden. De gevonden intreeweerstand voor een bepaalde klasse van waterlopen moet dan ook worden gezien als een gebiedsgemiddelde. Wordt deze berekend voor een bepaalde waterloop, waarvoor een meetraai bestaat, dan wordt uitge-

gaan van een geïnterpoleerde afvoer, waarbij een zekere mate van onzekerheid behoort.

- Het onderzoek zelf kan gebaseerd zijn op (te) weinig metingen om goede conclusies te trekken ten aanzien van de uitkomsten. De onzekerheid in de resultaten kan daardoor enorm toenemen. Een gedegen statistisch onderzoek naar de spreiding van waarden is niet gevonden. Het wordt van belang geacht te onderzoeken welke variatie in de weerstandsgegevens moet worden verwacht, en wat dit betekent voor de relatie tussen het aantal metingen en de onzekerheid in de resultaten.

Op de vele mogelijkheden om meetfouten te maken wordt hier niet ingegaan.

5.4.3 Evaluatie

Bij de gebiedsproeven worden de intreeweestanden onderzocht in relatie tot de drainageweerstand. De proeven kunnen worden gebruikt voor de vaststelling van de drainageweerstand en, indien ook de diepe grondwaterstijghoogte wordt gemeten, ter bepaling van de voedingsweerstand naar diepere watervoerende pakketten.

De waarde die voor de intreeweerstand wordt gevonden is een gemiddelde waarde per klasse van participerende waterloop. Hoewel deze in het modelonderzoek zeer bruikbaar is, heeft deze mogelijk weinig lokale betekenis. De intreeweerstand van lokale waterlopen kan alleen worden bepaald als het onderzoek wordt uitgebreid met afvoermetingen en grondwaterstandsmetingen voor de betreffende waterlopen. De betrouwbaarheid waarmee de drainageweerstand en de intreeweerstand kunnen worden berekend, wordt in hoge mate bepaald door de intensiteit, verdeling en nauwkeurigheid van de metingen.

5.5 Geohydrologische dwarsprofielen

5.5.1 Methode

Het onderzoek naar de invloed van grote waterlopen op het grondwater heeft geleid tot de ontwikkeling van een methode waarbij de hydraulische weerstand van de waterloopbodem wordt afgeleid uit de grondwaterstroming in een dwarsprofiel (figuur 5.3).

De waterloop ligt in het algemeen tussen dijken in een slechtdoorlatende deklaag boven een watervoerend pakket. De berekeningen berusten op waargenomen grondwaterstanden en -stijghoogten in de verschillende watervoerende pakketten en op de transmissiviteit daarvan. In tegenstelling tot eerdere methoden (5.2 t/m 5.4) wordt dus niet uitgegaan van gemeten oppervlaktewaterafvoeren maar van de evenwichtssituatie in de toe- en afvoer van het grondwater onder en in de omgeving van de waterloop.

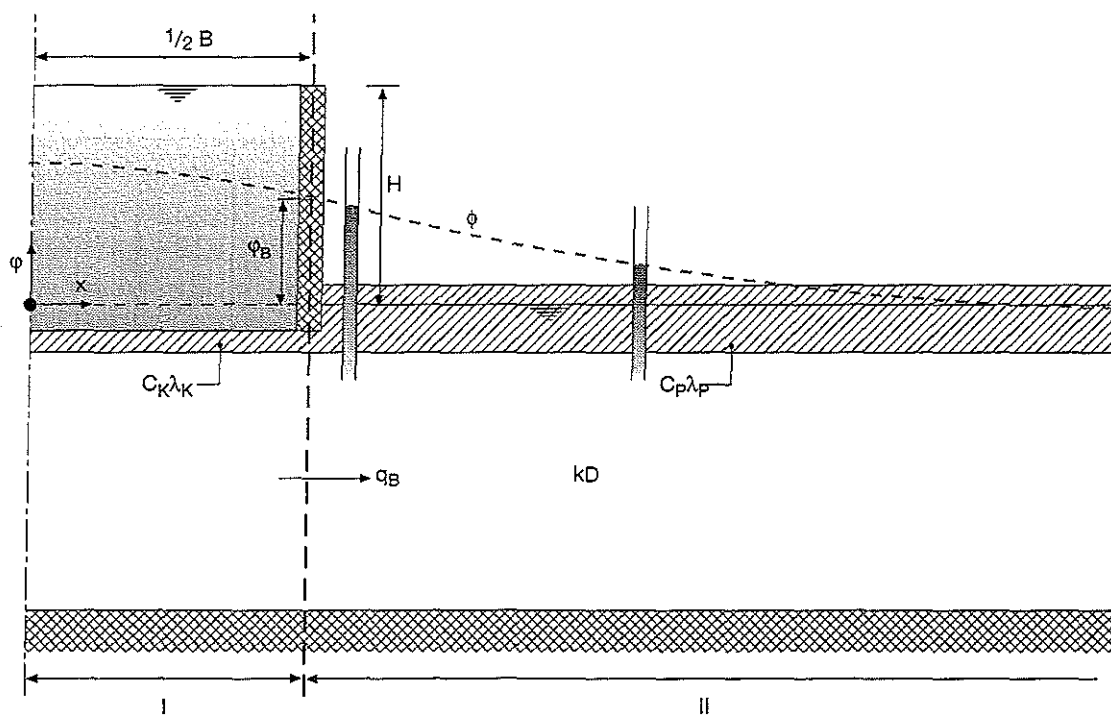


Fig. 5.3 Schematisatie van een systeem met één watervoerende laag en een kanaal dat niet tot in die laag rijkt (zie ook bijlage I)

De berekening van de hydraulische weerstand onder de bodem geschiedt op basis van de in bijlage A opgenomen formules. In de rapporten 1980-1 en 1987-1 vindt men praktijkvoorbeelden van dit onderzoek.

5.5.2 Aannamen en foutenbronnen

De dikte van de kanaal- of rivierbodem onderscheidt zich van de dikte van de deklaag in de omgeving door een gedeeltelijke ingraving. De 'bodemweerstand' onderscheidt zich van die in de omgeving door a) het verschil in hydraulische weerstand en b) de mogelijke extra weerstand van sliblagen of bodemverdichting.

Door de methode en schaal van het onderzoek kan geen onderscheid gemaakt worden tussen a) de *intreeweerstand* als gevolg van een sliblaag en/of verdichting van de kanaal- of rivierbodem en b) de hydraulische weerstand van het resterende deel van de afsluitend laag. De weerstand die in dit soort onderzoek wordt aangeduid als 'bodemweerstand' moet dan ook gezien worden als een combinatie van beide.

Aangezien wordt uitgegaan van de evenwichtssituatie in de toe- en afvoer van grondwater, zijn de berekeningsresultaten daarmee sterk afhankelijk van de juistheid van de geohydrologische schematisatie en van de bijbehorende hydraulische parameters. Onzekerheden in de doorlatendheid vertalen zich direct in onzekerheden in de hydraulische weerstand van de bodem (zie de formules).

De variatie in weerstandswaarden kan als gevolg van dit samenspel van de bodemweerstand en de hydraulische weerstand van de onderliggende lagen groot zijn (zie de resultaten bij grote waterlopen, hoofdstuk 7.6 en 7.7). Daarom verdient het aanbeveling om goed aan te geven welke lagen en mechanismen voor de hydraulische weerstand van de bodem verantwoordelijk worden gehouden. Deze 'bodemweerstand' die binnen modelstudies een onontbeerlijk gegeven vormt, mag dus niet over een kam geschoren worden met de eerder besproken intreeweerstand.

5.5.3 Evaluatie

Voor de bepaling van de 'bodemweerstand' van grote kanalen en rivieren, gelegen in een slecht doorlatende deklaag, is een methode ontwikkeld die berust op de afvoer van grondwater door het onderliggende watervoerende pakket.

De methode is geschikt voor de bepaling van de 'bodemweerstand' van de waterloop ten behoeve van modelstudies. De grote variatie in de gevonden bodemweerstand is met name het gevolg van de variatie in de hydraulisch weerstand van de resterende deel van de afsluitende laag onder de waterloop. Deze weerstand mag niet zonder meer vergeleken worden met de intreeweerstand.

5.6 Indirecte bepalingen uit onderzoek

Gebiedsparameters kunnen ook worden vastgesteld via modelberekeningen waarvoor geen speciale meetprogramma's zijn uitgevoerd maar waarvoor algemeen beschikbare gegevens (meteorologische, topografische, waterhuishoudkundige, bodemkundige en geohydrologische gegevens worden gebruikt. Dergelijke berekeningen verschaffen inzicht in de orde van grootte van de waterbalanstermen en daaruit af te leiden waarden voor drainage- en voedingsweerstand. De gevonden waarden moeten met grote voorzichtigheid worden gehanteerd. De resultaten zijn indicatief voor het onderzochte gebied. Met betrekking tot de locale weerstandsparementers geeft de methode geen gedetailleerde informatie, tenzij daarnaast veldmetingen worden uitgevoerd. Op deze methode zal vanwege de gemaakte rapportselectie (zie 4.1) niet verder worden ingegaan.

5.7 Classificering van het geïnventariseerde onderzoek

In tabel 5.1. is een overzicht van het geïnventariseerde onderzoek gegeven met daaraan toegevoegd een classificatie van de bij het onderzoek betrokken waterloopklasse(n) en een indeling volgens de in dit hoofdstuk beschreven methoden. Voor de classificatie is de indeling volgens Ernst gevolgd (zie hoofdstuk 7.1)

Tabel 5.1 Indeling onderzoek naar onderzochte waterloopklasse en type onderzoek

Nummer	Locatie	Auteur(s)	Klasse waterloop						Type onderzoek				
			K1	K2	K3	K4	K5	K6	D	K/I	S	G	P
1969-1	Hoenkoop	J.Wesseling		?	?							B*	
1972-1	Salland	H. Fonck			?				D	K			
1973-1	Salland	H. Fonck			?					K/I			P
1973-2	Zuidlaren	R.A.Feddes et al			?							G	
1974-1	Oranjekanaal	B vd Weerd					x			K/I			P
1980-1	A-R kan., Lek, L. Rijn	G.J.Hey et al					x	x					P
1982-1	Valthermond & Zuidlaren	A.Bartels et al				x				K/I	S	?	
1982-2	Valthermond	T v. Keulen			?	x					S	G	
1983-1	Z-Willemsvaart	K.E.Wit					x		D				P
1985-1	Oostrumse Beek	H.J.Vinkers				x					S		
1985-2	Lollebeek, (L)	H.J.Vinkers			x ?						S		
1985-3	Ov. Vecht gebied	K.G.Lamsvelt			x				D		S		
1986-1	De Veenmarken	P.J.T. van Bakel				x						G	
1987-1	Kan. Z-Beveland	B.P.C. Steenkamp					x						P
1987-2	Twenthekanaal	K.E.Wit et al					x		D				
1988-1	De Veenmarken	HBCS-Velp				x						G	
1988-2	Salland	WMO, onbekend			x							G	
1989-1	Nieuw Dordrecht	K.E.Wit et al			?						S		
1989-2	Witharen	B.A.J. Meeuwissen et al				?					S		P
1991-1	Prov. Drenthe	K.E.Wit et al			x				D	I		G	
1992-1	Liessel	J.G.te Beest et al			?					I		G	
1994-1	Oost-Gelderland	H.Th.L.Massop et al	x	x	x				D			G	

D : Doorlatendheidsmetingen;

G : Gebiedsproef

K/I : Kwel of infiltratieproef

P : Geohydrologisch profiel

S : Slootproef;

B* : Bijzondere proef

6 Bijzondere aspecten intreeweerstand

6.1 Onderzoek naar het mechanisme van de intreeweerstand

De intreeweerstand van waterlopen, volgens de hier gehanteerde definitie, kan het gevolg zijn van twee oorzaken: de aanwezigheid van een slecht doorlatende sliblaag of de verstopping van de bodem als gevolg van binnen gedrongen deeltjes of van chemische processen. Welke van deze twee oorzaken in bepaalde situaties overheerst is niet goed duidelijk.

In de verwachting dat een verdere ontrafeling van het mechanisme van slibafzetting en verstopping zou kunnen leiden tot meer algemene regels ten aanzien van de oorzaak en de sterkte van de bodemweerstand, zijn bij de analyse van het geïnventariseerde onderzoek de hydrologische condities waaronder de proeven zijn gehouden, voor zover deze te achterhalen waren, genoteerd (zie bijlage 1 en de tabellen in hoofdstuk 7). Dit onderscheid betreft de in het proefgebied normaal heersende hydrologische condities (kwel of infiltratie) en de condities tijdens de proef. Verwacht werd dat met name met betrekking tot verstopping uit het onderzoek duidelijk zou worden wanneer deze optreedt en hoe belangrijk dit fenomeen is. Door het onderscheid zou wellicht ook over het belang van de sliblaag een meer gedetailleerd inzicht kunnen worden verkregen.

Slibafzetting of bodemverstopping

Naar analogie van het optreden van wandverstopping bij boringen, mag worden verondersteld dat verstopping slechts optreedt onder infiltratie condities. Verstopping kan niet optreden wanneer een waterloop permanent grondwater draineert (permanente kwelcondities). Dit aspect moet duidelijk te constateren zijn bij de bovenloop van beken waar door de stroomsnelheden slibafzettingen beperkt zijn. De rapportjes van de Oostrumse beek en de Lollebeek (rapporten 1985-1 en 1985-2) geven inderdaad een aanwijzing in deze richting: voor zover bekend was er tijdens de proef geen sliblaag aanwezig en de bodemweerstand van het onderzochte beektraject bleek zeer gering tot nihil te zijn. Het omgekeerde, namelijk een verstopping van de bodem onder permanente infiltratie condities is geconstateerd (en benut) bij enkele belangrijke kanalen waarvan het waterpeil hoger is dan dat van de omgeving, bijvoorbeeld voor het Oranjekanaal (rapport 1974-1) en het Twenthekanaal (Haersma Buma, 1951). Volledige verstopping van de bodem kan bij voldoende overdruk in enkele dagen optreden, zoals ook gebleken is bij werkzaamheden aan het Amsterdams-Rijn Kanaal (mondelinge informatie van het Staring Centrum).

Hoogte van de intreeweerstand in relatie tot slibafzetting

De relatie tussen de hoogte van de intreeweerstand en de aanwezigheid van de sliblaagjes in de bodem is in sommige rapporten gelegd (zie bijvoorbeeld rapporten 1974-1, 1983-1, 1985-3, 1987-2 en 1992-1). Uit de rapporten blijkt dat de intreeweerstand wel een relatie tot de aanwezigheid van sliblagen heeft, maar dat het verband tussen dikte en intreeweerstand niet eenduidig is; ook de samenstelling en hydraulische weerstand van de sliblagen spelen blijkbaar een grote rol.

Dikke sliblagen en hoge intreeweerstanden worden aangetroffen bovenstrooms van stuwen. Uit het geïnventariseerde onderzoek is niet duidelijk geworden welk mechanisme hierbij verantwoordelijk is, de afzetting van de sliblaag of de verstopping van de bodem. Het is waarschijnlijk dat de hoge weerstanden in elk geval ten dele worden veroorzaakt door verstopping van de bodem als gevolg van het stijghoogteverschil tussen oppervlaktewaterpeil en grondwaterstand in dit deel van het kanaalpand. Er moet rekening mee worden gehouden dat de slibafzettingen die bovenstrooms van de stuw zijn afgezet bij hogere afvoeren gedeeltelijk worden opgeruimd.

Hoge intreeweerstanden tot 1000 dagen, met een enkele uitschieter naar 5000 dagen, werden aangetroffen bij onderzoek aan het Oranjekanaal, waar een relatief groot stijghoogteverschil van 2 tot 5 m bestaat tussen het waterpeil van het kanaal en de grondwaterstijghoogte in de omgeving (zie rapport 1974-1).

Verstopping door biologische processen

Doordat voor biologische processen zuurstof nodig is, zijn deze processen in de eigenlijke bodemlagen beperkt tot enkele centimeters diepte. Aangenomen wordt dat de invloed van de processen op verstopping van de bodem gering is. Uit het geïnventariseerde onderzoek zijn met betrekking hiertoe geen aanwijzingen verkregen.

Dikte beïnvloede zone

De zone waarin de intreeweerstand kan optreden kan sterk variëren. Bij kleine waterlopen wordt, afhankelijk van het onderhoud, een sliblaagdikte van enkele centimeters tot enkele decimeters gevonden. Ook de verstopte laag van de bodem is hier, voor zover aan te tonen, in de regel beperkt (volgens mondelinge informatie). Uit het inventarisatie-onderzoek blijkt dat met name bij de grotere waterlopen een bodemverdichting met sliblaagjes tot op behoorlijke diepte in de bodem optreedt. Uit steekmonsters van de kanaalbodem van het Twentekanaal (1987-2) blijkt dat sliblaagjes plaatselijk tot op een diepte van meer dan een meter in de kanaalbodem kunnen zijn afgezet. Bij vergelijking met boorkolommen in de omgeving van het kanaal blijkt dat de laagjes daarin niet worden aangetroffen.

Aangenomen wordt dat de diepteligging van deze laagjes het gevolg is van de aanwezigheid van textuurverschillen in de oorspronkelijke bodem en/of van turbulente stroming bij scheepvaart. De dikte van de grenslaag waarin de intreeweerstand is geconcentreerd, kan alleen door bodembemonstering goed worden vastgesteld.

Samenvatting

Samenvattend kan worden gesteld dat de analyse van het geïnventariseerde onderzoek, mede als gevolg van een gebrek aan gegevens, slechts vage aanwijzingen heeft geleverd ten aanzien van de aandelen van slibafzetting en verstopping in de intreeweerstand, en ten aanzien van de relatie tussen de dikte van de sliblaag en de hoogte van de weerstand.

6.2 Het effect van onderhoud op de intreeweerstand

Een van de belangrijkste factoren die de sliblaag en daarmee de intreeweerstand beïnvloeden is het periodieke onderhoud van de waterloop.

Wanneer de zich op de bodem van de waterloop gevormde sliblaag periodiek wordt verwijderd, zal de intreeweerstand niet tot een grote waarde kunnen aangroeien. Ten aanzien van het onderhoud dient onderscheid worden gemaakt naar de klasse van waterlopen:

- Het meest frequente onderhoud wordt gepleegd aan waterlopen waarvoor bij het waterschap duidelijke regels bestaan; dit zijn de waterlopen van klasse 3, die voor de afwatering van een gebied van groot belang zijn. Deze waterlopen worden jaarlijks opgeschoond.
- Bij de grotere waterlopen (wijken, vaarten, kanalen) is het onderhoud voornamelijk beperkt tot de kanten en vindt uitbaggering, op een enkele uitzondering na, slechts met zeer grote tussenposen plaats. De bodemweerstand kan daardoor hoog oplopen. Bij sommige kanalen kan de intreeweerstand oplopen tot tientallen dagen.
- De kleinste waterlopen komen veelal op het derde plan. Het onderhoud aan deze waterlopen is minder aan regels gebonden en sterker afhankelijk van de eigenaren; de variatie in onderhoudstoestand is daardoor groter.

Hoewel er in het algemeen consensus bestaat over de validiteit van de meeste bovenaangehaalde aspecten, is er voor zover bekend weinig onderzoek verricht aan het effect op de bodemweerstand als gevolg van onderhoud aan de waterlopen. Een uitzondering vormen het onderzoek naar het effect van onderhoud van de veenkoloniale wijken (Landinrichtingsdienst, 1983) en enkele studies aan het uitbaggeren van kanalen.

Locatie km 6.5

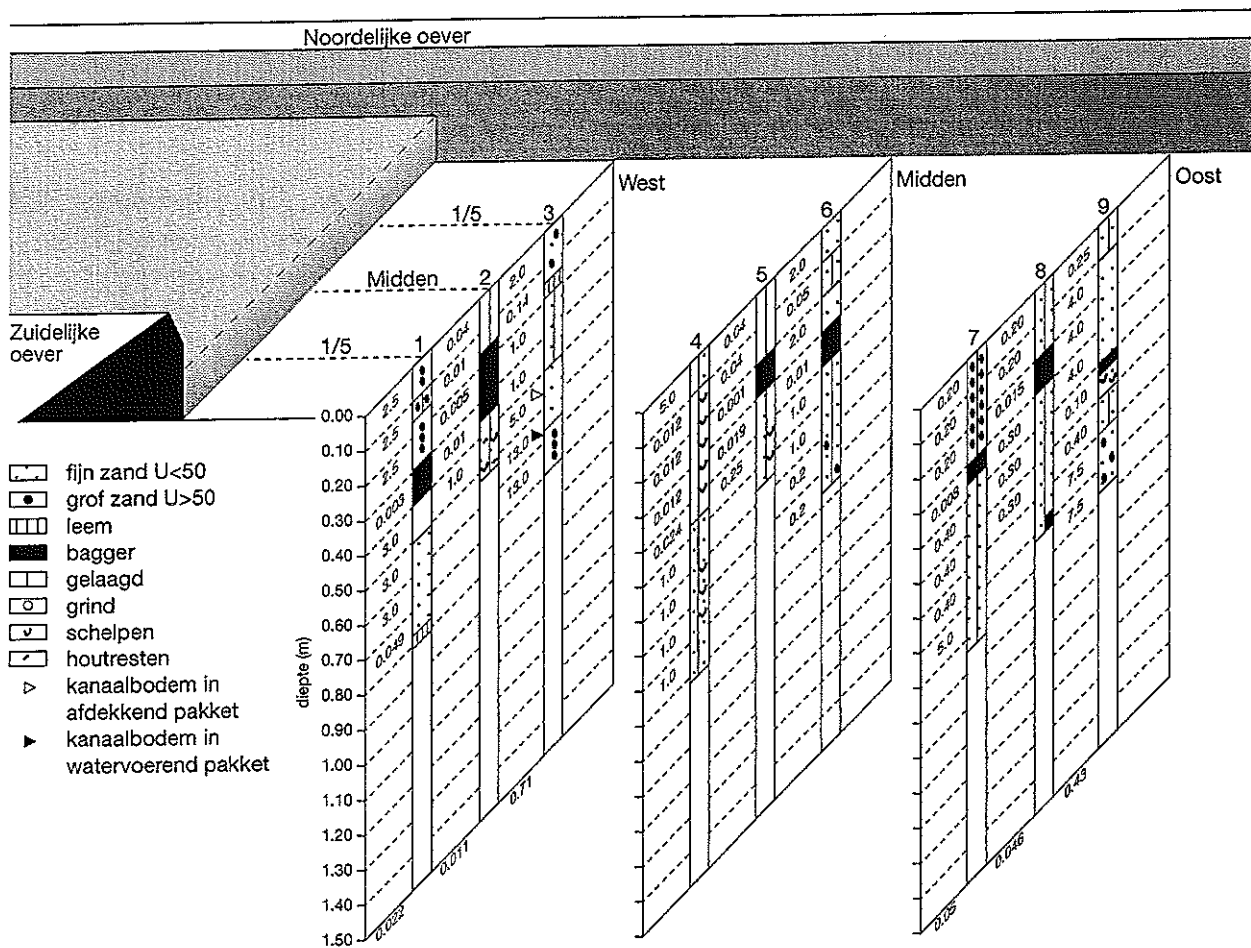


Fig. 6.1 Voorbeeld van bodemmonsters van het Twentekanaal (km 6.5)
(uit Wit et al, 1987)

6.3 Intreeweerstand in relatie tot heterogeniteit in bodemopbouw

De spreiding van intreeweerstandswaarden neemt aanzienlijk toe naarmate de waterlopen groter worden. Voor tertiaire stelsels (globaal klassen 1 t/m 3) variëren de gevonden bodemweerstandsen tussen 0,5 en 3 dagen met uitschieters naar 10 dagen. Voor grote kanalen en rivieren is de spreiding groter, globaal tussen 1 en 40 dagen, evenwel met lokale uitschieters naar 500 a 1000 dagen (zie bijvoorbeeld het onderzoek aan het Twentekanaal, 1987-2). Voor deze variatie in intreeweerstandsen van de waterbodem zijn een aantal oorzaken aan te wijzen:

- *Bodemsamenstelling.* Met name grotere waterlopen (klasse 3 en groter) snijden veelal diep in de deklaag in. De deklaag bestaat op vele plaatsen uit fluviale of periglaciale sedimenten, die worden gekenmerkt door een sterke afwisseling van zandige en kleiige laagjes, zowel in laterale als in verticale zin. Dit geeft een natuurlijke variatie in textuurkenmerken van een waterbodem, die ook de verstopping mede beïnvloed. Naarmate de waterlopen van een hogere klasse zijn, neemt bovendien de kans op het doorsnijden van oude geulenpatronen met lagen van verschillend materiaal toe. De combinatie van waterloopklasse en opbouw van de deklaag zijn dan ook factoren die sterk bepalend zijn voor de heterogeniteit van de waterbodem.

De door middel van lokale proeven bepaalde intreeweerstand weerspiegelt het effect van de bodemsamenstelling. In de eerste plaats wordt verstopping er door beïnvloed. In de tweede plaats zijn de intreeweerstand en de hydraulische weerstand van de waterbodem in het algemeen niet nauwkeurig van elkaar te scheiden (zie bijvoorbeeld 1987-2).

- *Vorming van een sliblaag.* De vorming van de sliblaag op de bodem is afhankelijk van een groot aantal condities (zie 3.2), die van plaats tot plaats sterk kunnen verschillen. Bij kleine waterlopen zijn dit met name de afzettingscondities en het onderhoud, die in het algemeen redelijk tijdsafhankelijk zijn. Bij grotere waterlopen worden de storende invloeden, zoals die door scheepvaart belangrijker. Dit komt tot uitdrukking in de grote variatie van lokale steekmonsters. Uit proeven in grote kanalen blijkt dat slib- of baggerlaagjes tot op enige diepte (0,5 tot meer dan 1m) in het profiel van de bodem kunnen voorkomen (zie 1983-1, 1987-2 en figuren 6.1 en 6.2). De dikte van in het profiel voorkomende sliblagen heeft een grote invloed op de weerstandsverhouding.

Voor de hoge zandgronden met een dunne deklaag van fijn materiaal is de situatie totaal verschillend van die in het rivieren gebied en het zeeleigebied met een veelal dikke deklaag van kleiig materiaal. In het eerste geval snijden ook de kleine waterlopen op vele plaatsen door de deklaag (zie bijvoorbeeld rapport Drenthe, 1991-1); in het laatste geval zijn dit veelal slechts de grootste klassen van waterlopen.

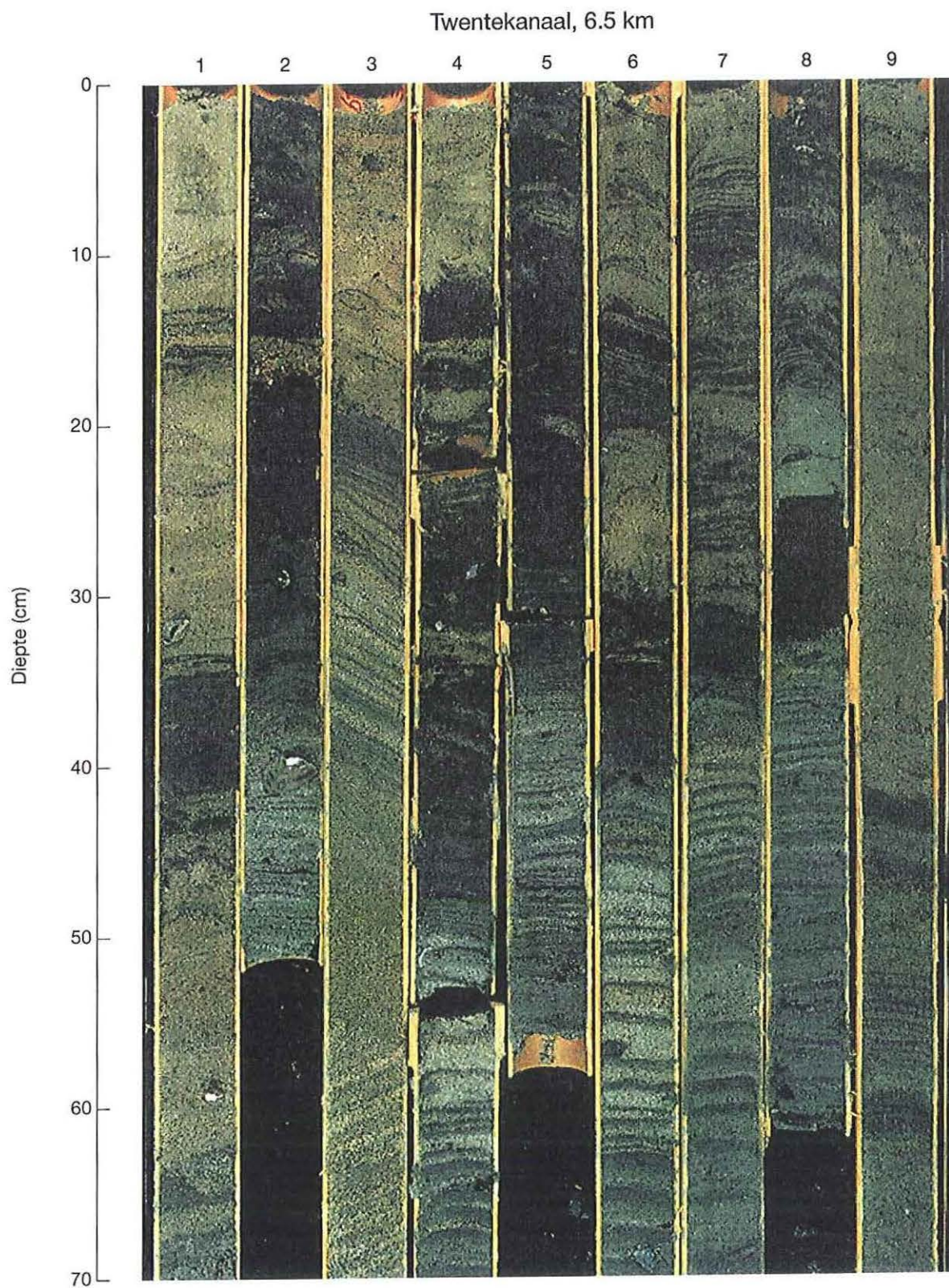


Fig. 6.2 Steekmonsters uit het Twentekanaal (uit Massop et al, 1994)

De relatie tussen bodemsamenstelling en bodemweerstand bepaald uit de doorlatendheid van een steekmonster is vrij sterk (1987-2). Lage bodemweerstand (tot 5 dagen) komen overeen met een zandig profiel met weinig slib. Weerstand tussen 5 en 50 dagen worden veroorzaakt door dunne sliblagen en slibhoudend zand. Zeer hoge waarden komen overeen met dikke sliblagen van ca 1 m. De spreiding in de bepaalde bodemweerstand is zo groot dat men zonder nader (geo)statistisch onderzoek geen vergaande conclusies kan trekken. Verwacht wordt dat de voorgestelde correctie om te komen tot de intreeweerstand (5.1.2) in dit licht weinig kan toevoegen.

De volgende rapporten geven meer inzicht in de heterogeniteit van de bodem en de variatie van weerstandswaarden. Voor kleine waterlopen zijn de rapporten 1972-1, 1991-1 en 1994-1 van belang; voor grote kanalen wordt verwezen naar de rapporten 1983-1 en 1987-2.

- *Rapport 1972-1, Onderzoek Salland.* Door het ICW is een onderzoek uitgevoerd naar de weerstand van de slootbodem in het waterschap Salland. Bij het eerste onderzoek (Fonck, 1972-1) is getracht inzicht te krijgen in de relatie tussen a) de bodemweerstand bepaald uit doorlatendheidsmetingen aan bodemonsters en b) de doorlatendheden bepaald uit infiltratiemetingen met kwelmers in de sloot. De conclusie van dit onderzoek is dat het materiaal afkomstig uit steekmonsters een zeer grote spreiding vertoonde, deels als gevolg van uitdroging van de bodemonsters. Daardoor kon geen goede relatie tussen de gemeten doorlatendheden worden vastgesteld.
- *Rapport 1994-1, Onderzoek Oost Gelderland.* Het onderzoek omvat onderzoek naar de drainageweerstand in 15 proefgebiedjes in oostelijk Gelderland. Uit het onderzoek blijkt dat de bodemsamenstelling voor de verschillende waterlopen sterk kan verschillen (zie ook figuur 6.3); of dit ook het geval is voor verschillende locaties van dezelfde sloot, is onbekend. De berekende intreewestanden voor waterlopen in zandige ondergrond zijn in het algemeen niet hoog: 1 tot 2 dagen. Uitzondering hierop zijn de waterlopen waarbij zich in het uitgegraven profiel weerstandbiedende laagjes bevinden.
- *Rapport 1983-1, Onderzoek Zuid-Willemsvaart.* Het onderzoek is uitgevoerd aan een kanaaltraject waar de ondergrond uit zand bestaat. De gestoken bodemonsters geven een zeer gedetailleerd beeld van de bodemsamenstelling in 26 raaien van het kanaal op een onderlinge afstand van 200 m. De heterogeniteit van de bodem blijkt aanzienlijk. De dikte en diepte van de slibhoudende laagjes varieert sterk van plaats tot plaats. De gemiddelde bodemweerstand van het kanaal bepaald uit doorlatendheidsmetingen is slechts 0,7 d. De lokale variatie van de intreeweerstand is van 0,1 tot meer dan 100 dagen, met uitschieters tot ruim 500 dagen. De gemiddelde kanaalweerstand tussen kanaal en eerste watervoerend pakket, berekend uit dwarsprofielen, ligt tussen 0,5 en 1,3

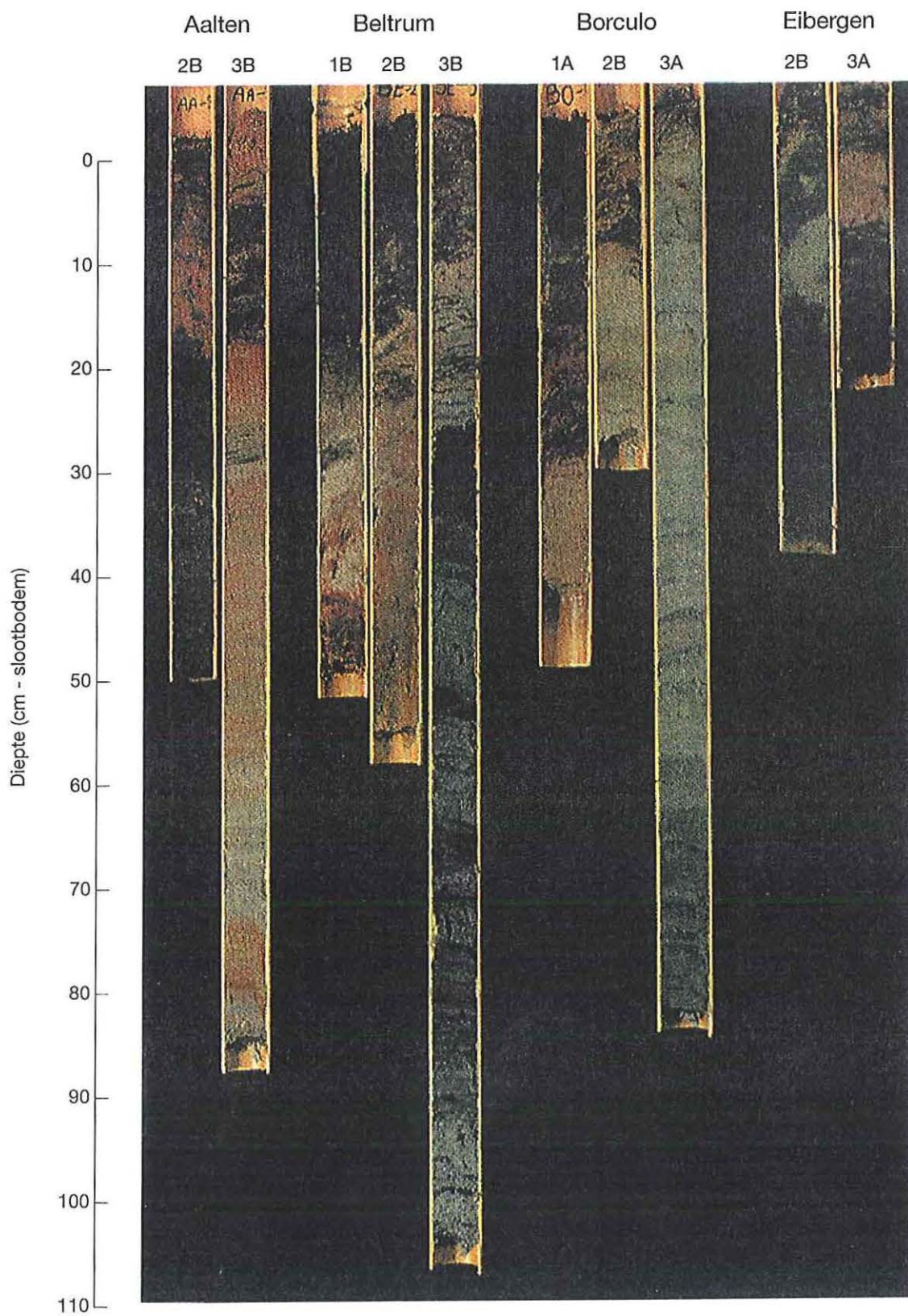


Fig. 6.3 Steekmonsters voor verschillende klassen van waterlopen in de proefgebieden Aalten, Beltrum, Borculo en Eibergen (uit Massop et al, 1994)

dag/m. Bij een natte omtrek van ca 30 m, betekent dit een hydraulische weerstand van de scheidende laag tussen kanaal en eerste watervoerend pakket van 15 - 39 dagen. In het rapport wordt gewezen op het verband tussen deze weerstand en in de ondergrond voorkomende leemlagen.

- *Rapport 1987-2, Onderzoek Twentekanaal.* De bodemweerstand van het Twentekanaal is onderzocht aan de hand van doorlatendheidsmetingen aan steekmonsters op 21 locaties van het kanaal met een tussenafstand van 500 m. Per locatie werden 3 x 3 monsters gestoken in lengte variërend van ca 0,30 tot 1,0 m. Uit de doorlatendheidsproeven blijkt dat baggerlaagjes (in het kanaal afgezette laagjes van organisch materiaal) de belangrijkste weerstandbiedende laag in de kanaalbodem vormen. Daarnaast zorgen in het profiel voorkomende leemlagen voor een hogere weerstand (zie ook figuren 6.1 en 6.2 van km 6,5). Uit het feit dat zelfs de langste monsters niet altijd de oorspronkelijke bodemlagen bereiken, mag worden afgeleid dat de waterloopbodem, mede als gevolg van scheepvaart, tot op relatief grote diepte kan zijn verstoord. Baggerlaagjes komen lokaal tot op een diepte van 0,50 tot 0,70 m onder de bodem voor (bij de stuw is dit zelfs meer dan 1 m). De doorlatendheid van de baggerlaagjes varieert tussen 0,001 en 0,02 m/d, waardoor een grote variatie in de bodemweerstand ontstaat. De kanaalbodemweerstand varieert van 0,1 d tot ca 5 d, op plaatsen waar de bodem uit grof zand bestaat, met uitschieters tot 15 d. Waar meer dan 10 cm slib in de bodem aanwezig is, ligt de weerstand tussen 5 en 50 d met uitschieters tot meer dan 100 d. Het onderzoek laat zien dat zelfs na middelen over 9 metingen een grote variatie overblijft: weerstanden tussen 0,5 en ca 30 d. Zelfs de trajectgemiddelden van de intreeweerstand variëren nog tussen 1 en 10 dagen. Het onderzoek toont aan hoe groot de variatie in bodemweerstand is voor dit soort grote kanalen.

Uit de praktijk van het veldwerk blijkt dat de locale proeven (doorlatendheidsmetingen aan bodemmonsters of kwel/infiltratiemetingen) met name het inzicht in de heterogeniteit en de locale intreeweerstand van de bodem verhogen. Voor het berekenen van in het geohydrologisch onderzoek bruikbare parameters is dit onderzoek niet altijd efficiënt. Hoewel niet ontkend kan worden dat de proeven veel inzicht in de plaatselijke condities geven, is voor het berekenen van in de praktijk bruikbare parameters grootschaliger onderzoek dikwijls te verkiezen.

- Voor het bepalen van de bijdrage van de kleine waterlopen in de gebiedsafvoeren kunnen gebiedsproeven, zoals uitgevoerd in het onderzoek Oost-Gelderland, zinvol zijn (zie ook paragraaf 8.3).
- Bij het onderzoek naar de interactie tussen de grote kanalen en het grondwater in hun omgeving moet onderscheid worden gemaakt naar de plaatselijke situatie. Waar een relatief dikke scheidende laag (1 tot enkele meters) tussen de kanaalbodem en het eerste watervoerend pakket bepalend is voor de weerstand, vormen goed gedefinieerde kanaalproeven of dwarsprofielproeven een goede

methode om de noodzakelijke parameters vast te stellen. Waar de weerstand in een zandige ondergrond voornamelijk bepaald wordt door de intreeweerstand van een sliblaag of dichtslibbing, winnen de locale proeven aan kracht.

Het gebruik van locale proeven is verder nuttig in het vooronderzoek of als aanvulling op gebieds-, kanaal- of dwarsprofielproeven.

7 Intreeweerstand per klasse van waterloop

7.1 Classificatie van de waterlopen

Bij het tot stand komen van de intreeweerstand vormen de topografische gradiënt en de mate van beheersing van de afvoeren van de waterlopen belangrijke condities (zie 3.3), reden waarom bij de indeling van het onderzoek met deze aspecten rekening is gehouden. De dikte van de grenslaag en de variatie van de intreeweersstanden vertonen tevens verschillen die samenhangen met de grootte en het type van de waterlopen, zodat ook de indeling in klassen voor de toelichting op de onderzoeksresultaten van belang werd geacht. Voor de indeling van het onderzoek is gebruik gemaakt van de klasse-indeling volgens Ernst, waarbij om eerder genoemde redenen onderscheid is gemaakt naar topografische gradiënt en de mate waarin waterbeheersing plaatsvindt. De classificatie volgens Ernst omvat 6 klassen van waterlopen die zijn ingedeeld op basis van het dieptebereik (tabel 7.1).

Tabel 7.1 Classificatie waterlopen volgens Ernst

Klasse	Diepte bodem in m t.o.v. maaiveld		Omschrijving waterloop	
	min.	max.	Vlak gebied	Hellend gebied
1	0,40	0,65	kleine sloot, greppel	kleine sloot, greppel
2	0,65	1,05	middelgrote sloot	kleine beek, middelgrote sloot
3	1,05	1,75	grote sloot	kleine beek, grote sloot
4	1,75	2,70	wijk, vaart, etc.	middelgrote beek (b.v. Leerinkbeek)
5	2,70	4,00	middelgroot kanaal (b.v. Oranje kanaal)	kleine rivier (b.v. Berkel)
6	4,00	8,00	grote rivier (b.v. Rijn, IJssel) en groot kanaal (b.v. A.R.Kanaal)	grote rivier (b.v. Rijn, IJssel) en groot kanaal (b.v. A.R.Kanaal)

In sommige studies wordt een verdere onderverdeling van de kleinere waterlopen gegeven. Een duidelijke aanduiding van het type waterloop is voor het onderzoek van belang in verband met de functie(s) van de waterloop, het karakter (natuurlijk of kunstmatig), het feit of deze het gehele jaar door of slechts een deel daarvan watervoerend zijn, en de wijze waarop onderhoud wordt gepleegd. Al deze elementen kunnen van belang zijn voor de bodem- of intreeweerstand.

7.2 Greppels en kleine sloten - klasse 1 en 2

Met uitzondering van het onderzoek in Salland, Drenthe en Oost-Gelderland is in de onderzochte rapporten over deze kleine waterlopen geen informatie gevonden.

- *Rapport 1991-1, Onderzoek Drenthe.* Het rapport is opgezet om de relatie oppervlaktewater grondwater in de provincie te onderzoeken, gebaseerd op veldwerk in 19 geselecteerde gebiedjes. Daarbij zijn onder andere de intreeweestanden en de drainageweerstand onderzocht. Met het oog op een zinvolle verdeling van de natte omtrek wordt in het rapport een onderverdeling van waterlopen in klassen 0, 01 en 1 aangehouden, die met name een onderverdeling van klasse 3 vormen en slechts in enkele gevallen met klasse 2 volgens Ernst overeenkomen (zie aanhangsel 1 van het betreffende rapport). De reden dat de kleinere klassen waterlopen min of meer ontbreken, is dat de bodem in de onderzochte gebieden in het algemeen goed doorlatend zijn en detailontwatering in meer dan de helft van de gebieden plaatsvindt door drains. Met betrekking tot de intreeweerstand van de kleine waterlopen geeft het rapport verder geen concrete informatie. Deze kon ook niet uit de gegevens worden afgeleid.
- *Rapport 1994-1, Onderzoek Oost-Gelderland.* Dit is het enige rapport waarin de kleine klassen waterlopen apart aandacht hebben gekregen, ondermeer als gevolg van het parallel lopende onderzoek naar de intreeweestanden. Het rapport geeft een overzicht van de onderzoeksresultaten in 15 proefgebiedjes. Daarin is de relatie gelegd tussen de gebiedskenmerken (eigenschappen ontwateringsstelsels, grondwatertrappen en hydrogeologische opbouw) en de drainageweerstand. Het meetprogramma van de verschillende gebiedjes is zodanig ingericht dat met betrekking tot de intreeweestanden van de verschillende klassen waterlopen gegevens werden verkregen. De resultaten geven een relatief grote spreiding van intreeweestanden te zien, die mede het gevolg zijn van de grote verschillen in hydrogeologische condities van de verschillende proefgebiedjes en verder van beperkingen in het meetprogramma: er werd noodgedwongen gebruik gemaakt van momentopnamen, terwijl de kleinere waterlopen slechts korte tijd aan het afvoerproces meedoen.

Bij een dik freatisch watervoerend pakket worden intreeweestanden gevonden van gemiddeld 0,7 d, met uitlopers tot 2,4 d; er is geen significant verschil tussen de waterlopen van klassen 3, 2 en 1. Bij dunne watervoerende pakketten is de variatie groter. In geval van kleilaagjes is de situatie plaatsafhankelijk.

Tabel 7.2 Intreeweerstand greppels en kleine sloten - klasse 1 en 2

Jaar	Onderzoek/locatie	Klasse waterloop	Bodem	Hydrol. condities		Intree weerstand (dagen)	Opm.
				normaal	proef		
1994-1	Oostelijk Gelderland - diverse proefgebieden	2	zand	drainage /droog	drainage /droog	0,2 - 2,4	gem. 0,7
	Idem	1	zand	drainage /droog	drainage /droog	0,1 - 1,4	gem. 0,7

7.3 Grote sloten en tochten - klasse 3

In het verleden zijn een aantal onderzoeken gedaan naar de intreeweerstanden van de grotere waterlopen. De resultaten van de proeven zijn gegeven in onderstaande tabel. Voor een beknopte beschrijving van het onderzoek wordt verwezen naar de appendices.

De geïnventariseerde onderzoeken betreffen in het algemeen situaties waarbij de bodem van de waterlopen in een zandige ondergrond is gelegen. In een enkel geval wordt het gebied waarin de onderzochte waterlopen liggen aangeduid als veengebied, maar snijden de waterlopen door de deklaag heen tot in het zand (zie rapport Overijsselse Vecht). In het onderzoek Drenthe zijn ook waterlopen betrokken, die in slecht doorlatende lagen liggen of deze doorsnijden.

- *Rapport 1985-3, Onderzoek Overijsselse Vechtgebied.* De proefcondities van de slootproeven zijn te onnauwkeurig bepaald om de resultaten als voorbeeld aan te halen. Er zijn aanwijzingen dat de intreeweerstand hoger is voor gebieden waarin normaal infiltratiecondities heersen.
- *Rapport 1991-1, Onderzoek Drenthe.* Het rapport beschrijft het onderzoek in 19 deelgebieden van de provincie. Uit het rapport blijkt hoe moeilijk het is om met betrekking tot de intreeweerstand eensluidende conclusies te trekken, aangezien steeds uitzonderingen voorhanden zijn, die het beeld verstoren. Enkele algemene indrukken uit het rapport zijn:
 - 1) Uit metingen in raaien blijkt dat de slootweerstand (intreeweerstand en radiale weerstand) van waterlopen klasse 3, liggend in een open zandbedding (voedingstypen A1, A2 en B) variëren tussen 0,5 en 1,0 dag. De slootweerstand van waterlopen die een slecht doorlatende laag doorsnijden of daarin liggen (voedingstypen C1 en C2), ligt tussen 1,3 en 2,9 dagen. Dit geeft aan dat de intreeweerstand in geen geval hoger zal zijn.

- 2) Er zijn geen aanwijzingen dat de weerstand bij sloten die beurtelings water toevoeren (infiltreren) en afvoeren (draineren), verschilt van die welke het gehele jaar door afvoeren.
 - 3) Het is opvallend dat de intreeweerstand bepaald met de infiltratiecilinder aanmerkelijk hoger is dan die uit de gebiedsproeven/raaimetingen. Dit kan mede het gevolg zijn van beschouwde laagdikte (de diepte van de cylinder in de bodem).
- *Rapport 1994-1, Onderzoek Oost-Gelderland.* Dit is het enige rapport waarin de kleine klassen waterlopen apart aandacht hebben gekregen, onder meer als gevolg van het parallel lopende onderzoek naar de intreewestanden (zie ook 7.2). Het rapport geeft een overzicht van de onderzoeksresultaten in 15 proefgebiedjes. Bij een dik freatisch watervoerend pakket worden voor water-lopen van klasse 3 intreewestanden gevonden van gemiddeld 0,7 d, met uitlopers tot 2,4 d. Bij dunne watervoerende pakketten en kleilenzen is de variatie groter.

Met enige voorzichtigheid kan worden geconcludeerd dat de intreeweerstand van grote sloten met een zandige bodem (klasse 3) in het algemeen ligt tussen 0,5 en 3 dagen. Voor sloten met een dunne baggerlaag (goed onderhouden sloten) is deze waarschijnlijk niet hoger dan 1 dag.

Tabel 7.3 Intreeweerstand van grote sloten en tochten (klasse 3)

Jaar	Onderzoek/locatie	Klasse waterloop	Bodem	Hydrol. condities		Intree weerstand (dagen)	Opm.
				normaal	proef		
1972-2	Salland	3/4	zand	infiltr.	infiltr.	0,9 - 3,2	1)
1985-3	Overijsselse Vecht West						
	- K. Kloosterweg	3	zand	drainage	infiltr.	(1,6 - 0,3)	2)
	- Stadsweg	3	zand	drainage	infiltr.	(0,9 - 0,5)	2)
	- Schapendijk	3	zand	infiltr.	infiltr.	(3,5 - 0,3)	2)
	- Weemerveldweg	3	zand	infiltr.	infiltr.	(7 - 2,7)	2)
1991-1	Drenthe,						
	- infiltratieproeven	3	zand	inf+dr	infiltr.	2,3 - 7,5	3)
	- metingen in raaien	3	zand	inf/dr	inf/dr	0,6 - 4,7	4)
1992-1	Liessel	3	zand	infiltr.	infiltr.	0,2 - 0,7	5)
						1,8	5)
							6)
1994-1	Oost-Gelderland	3	zand	drainage	drainage	0,2 - 2,1	

Opm.1: De dikte van het sliblaagje is geschat.

Opm.2: Er bestaat onduidelijkheid over de stromingssituatie onder de bodem van de waterloop tijdens de proef. Daarom zijn de berekende intreeweerstanden voor de verzadigde zowel als de onverzadigde stroming gegeven. De proefresultaten worden niet als erg degelijk beschouwd.

Opm.3: De waarden zijn ontleend aan infiltratie proeven, waarbij een cylinder tot een diepte van 0,30 - 0,44 m in de slootbodem is gedrukt. De waarden geven een gemiddeld beeld van 5 gebiedjes.

Opm.4: De waarden zijn ontleend aan meetraaien en gebiedsafvoeren.

Opm.5: De waarden zijn vastgesteld uit infiltratiemetingen met een cylinder tot 0,20 m in de bodem. De intreeweerstand van 0,2 - 0,7 d geldt voor een dunne baggerlaag van enkele centimeters; 1,8 d geldt voor een aanzienlijke baggerlaag van naar schatting 5 - 10 cm.

Opm.6: Als gevolg van weinig waarnemingen bij grondwaterstanden dieper dan 1,05 kon geen duidelijk onderscheid worden gemaakt naar afvoeren door klasse 2 en klasse 3 waterlopen. Er is daarom een benadering voor de combinatie gekozen.

7.4 Kleine beken - klassen 3 en 4

Ten behoeve van een studie naar de invloed van de waterwinning te Breehei (nabij Venray), zijn aan de Oostrumse beek en aan de Lollebeek 'slootproeven' uitgevoerd. In de lengterichting van de beken is over het beschouwde traject nauwelijks peilverschil. De grondwaterstandssituatie aan de Lollebeek is niet erg duidelijk door het voorkomen van lemlagen. Aan de hand van de proeven is de slootweerstand (het totaal van de intreeweerstand en de radiale weerstand) voor een traject van de beide beken berekend. De uit afvoermetingen en peilverschillen berekende slootweerstand (uitgedrukt in dagen) is voor het onderzochte traject van de Oostrumse beek gemiddeld 1,7 dag en voor de Lollebeek gemiddeld 1,5 dag. Uit het zeer geringe hoogteverschil tussen beekpeil en stijghoogte naast de beken kon worden afgeleid dat de slootweerstand vrijwel geheel wordt gevormd uit radiale weerstand en dat de intreeweerstand zeer gering moet zijn (minder dan 0,05 dag).

Tabel 7.4 Intreeweerstand Oostrumse Beek en Lollebeek - klasse 3 tot 4

Jaar	Onderzoek/locatie	Klasse waterloop	Bodem	Hydrol. condities		Sloot weerstand C_s (d)	Intree weerstand (dagen)
				normaal	proef		
1985-1	Oostrumse Beek	3/4	lemig zand	drainage	drainage	1,5 - 2,0	nihil
1985-2	Lollebeek	3	zand	drainage	infiltr.	1,2 - 2,2	0,05

Op grond van het onderzoek aan deze twee beken mogen geen verstrekkende conclusies worden getrokken. Het ligt evenwel voor de hand dat bij natuurlijk gevormde beken die een drainerende invloed op hun omgeving hebben alle condities gunstig zijn voor een zeer lage intreeweerstand.

7.5 Wijken - klasse 4

In het kader van de nieuwe functietoedeling van de oude veenkoloniën is onderzoek gedaan naar de effecten van het opschonen van de wijken in dit gebied. Deze wateren die tot klasse 3 of 4 behoren, hebben zowel een ontwaterings- en afwateringsfunctie als een transport functie. Zij zijn daardoor relatief breed (8 - 10 m). Hoewel in de deklaag van het gebied nog steeds dunne veenlagen voorkomen, liggen de wijkbodems in het algemeen in de onderliggende zandlagen.

Tabel 7.5 Intreeweerstand van veenkoloniale wijken - klasse 4

Jaar	Onderzoek/locatie	Klasse waterloop	Bodem	Hydrol. condities		Intree weerstand (dagen)	Opm.
				normaal	proef		
1986-1	Waterschap Veenmarken	3/4	zand	infiltr.	infiltr.	0,9 - 3,2	
1989-1	Nieuw Dordrecht	3 ?	zand	infiltr.	infiltr.	0,4	

7.6 Grote kanalen - klassen 5 en 6

De grote kanalen zijn meestal individueel onderzocht in het kader van voorgenomen veranderingen aan de kanalen zelf, in verband met onderzoek voor de watervoorziening of in verband met wijzigingen in de waterhuishouding van het gebied waarin ze liggen. De grote kanalen die in de inventarisatie zijn genoemd, hebben alle een scheepvaartfunctie en zijn daarom relatief breed.

De bodem van veel grote kanalen is in belangrijke mate heterogeen. De kanalen doorkruisen door hun grote lengte en dikwijls aanzienlijke insnijding veel oude landschapselementen en stroomgeulpatronen. Daarbij komt dat afzettingen van bodemslib door de invloeden van scheepvaart en onderhoud worden omgewoeld en verplaatst. In bodemonsters en kwel- en infiltratiemetingen veroorzaakt deze heterogeniteit dan ook een relatief grote spreiding van waarden.

Daarnaast zijn de kanaalpeilen veelal aanzienlijk hoger dan de slootwaterpeilen en grondwaterstanden in de omgeving, waardoor grote drukverschillen ontstaan en dichtslibbing van de bodem snel plaatsvindt. Als gevolg van dit mechanisme van verstopping, kunnen de intreeweerstanden bij kanalen met een groot drukhoogteverschil zeer hoog zijn. Dit fenomeen treedt ook op direct bovenstrooms van sluizen.

De grote heterogeniteit is duidelijk waargenomen bij de onderzoeken aan het Oranjekanaal (1974-1), de Zuid-Willemsvaart en het Twenthekanaal. Hoge intreeweerstanden werden gevonden bij het Oranjekanaal.

In het geval van de Zuid-Willemsvaart zijn over het 5 kilometer lange traject Den Dungen - Erp in 26 raaien metingen gedaan. Per raai werden 3 bodemonsters onderzocht. De variatie in intreeweerstand is enorm: voor de locaties in één raai kunnen de hoogste waarden het dertigvoudige van de laagste waarden bedragen. Zelfs na berekening van de gemiddelde waarden per raai worden dezelfde grote verschillen tussen de raaien onderling gevonden. Voor het Twenthekanaal is de

toestand niet beter.

Het vaststellen van de relatie tussen de intreeweerstand en de monsterbeschrijving is maar gedeeltelijk mogelijk. Dit houdt in dat extrapolatie van de gevonden weerstanden naar andere kanalen of zelfs andere secties van hetzelfde kanaal op basis van bodemonsters in het algemeen niet mogelijk is.

Het moge duidelijk zijn dat de bepaling van de intreeweerstand op grond van bodemonsters voor dergelijke grote kanalen alleen met een zekere mate van nauwkeurigheid kan worden bepaald indien een zeer dichte, goed verdeelde bemonstering wordt toegepast. Voor grootschalig onderzoek kan echter ook de minder gedetailleerde methode van bepaling van de intreeweerstand uit stijghoogteverschillen en kanaalverliezen worden toegepast (zie o.a. het onderzoek aan het Oranjekanaal en het Amsterdam-Rijn Kanaal (1974-1 en 1980-1). Gecombineerd versterken deze methoden elkaar.

Tabel 7.6 Intreeweerstand van grote kanalen - klasse 5 en 6

Jaar	Onderzoek/locatie	Klasse waterloop	Bodem	Hydrol. condities		Intree weerstand c_b^* (dagen)	Opm.
				normaal	proef		
1974-1	Oranjekanaal, 3e pand	5	zand	infiltr.	infiltr.	400 - 1000	1), 3)
1980-1	Amsterdam - Rijn Kanaal, traject Utrecht - Breukelen	6	zand/veen	infiltr.	infiltr.	10 - 250	1), 4)
1983-1	Zuid-Willemsvaart, traject Den Dungen - Erp	5	zand	infiltr.	infiltr.	15 - 40 0,7 (0-34)	1) 2)
1985-4,	Twentekanaal	6	zand	infiltr.	infiltr.	1 - 30	2)
1987-2	en zijkanaal	5	zand	infiltr.	infiltr.	1 - 200	
1987-1	Kanaal door Z-Beveland	5	zand ?	infiltr.	Infiltr.	30	1)

- Opm.1: Van het Oranje Kanaal, het Amsterdam - Rijn Kanaal, de Zuid Willemsvaart en het Kanaal door Zuid-Beveland zijn de kanaalbodemweerstand en de stijghoogte waarnemingen in geohydrologische profielen berekend. De intreeweerstand c_b^* vertegenwoordigt hier de totale hydraulische weerstand tussen het kanaal en het eerste watervoerend pakket (een combinatie van de intreeweerstand en de hydraulische weerstand van de scheidende laag).
- Opm.2: De aangeduide waarden zijn de intreewestanden c_b onderzocht door middel van doorlatendheidsmetingen aan bodemonsters van het Twentekanaal, het zijkanaal en de Zuid-Willemsvaart.
- Opm.3: Proeven met een kwelmeter op 16 plaatsen verdeeld over het betreffende traject van het Oranjekanaal geven een zeer geringe doorlatendheid te zien, die wijst op een sterke verdichting van de kanaalbodem. De extreem hoge intreeweerstand moet daaraan worden geweten. Aangenomen wordt dat het aanzienlijke stijghoogteverschil tussen kanaalpeil en grondwaterstijghoogte hiervoor medeverantwoordelijk is.
- Opm.4: De kanaalbodemweerstand van het A.R.Kanaal loopt in noordelijke richting op van 10 dagen bij Utrecht tot 250 dagen nabij Breukelen.

7.7 Rivieren - klasse 6

Het enige tot nu toe beschikbare rapport waarin de intreeweerstand van een grote rivier bepaald is, is rapport 1980-1 over een onderzoek naar de intreeweerstand van ondermeer de Lek tussen Vreeswijk en Schoonhoven (RID-mededelingen 80-7: De hydrologische interactie tussen de grote waterlopen en het grondwater in West-Utrecht).

Tabel 7.7 Intreeweerstand grote rivieren - klasse 6

Jaar	Onderzoek/locatie	Klasse waterloop	Bodem	Hydrol. condities		Intree weerstand c_s^* (dagen)	Opm.
				normaal	proef		
1980-1	Lek, traject Vreeswijk-Schoonhoven	6	zand	infiltr.	infiltr.	70 - 150	1)

Opm. 1: De intreeweerstand van de Lek, berekend uit stijghoogtegegevens van raaien neemt in westelijke richting geleidelijk toe van 70 dagen bij Vreeswijk tot 150 dagen bij Schoonhoven. Deze weerstanden zijn lager dan men op grond van het verschil in diepte van het afdekkende Holocene in de aangrenzende polders en die van de rivier zelf zou verwachten. Een verklaring wordt gezocht in het feit dat de rivier in een zandbedding ligt.

8 Intreeweerstanden en het informatiesysteem ontwateringsstelsels - een evaluatie

8.1 Overzicht

Doel van het onderzoek 'Informatiesysteem Ontwateringsstelsels' was na te gaan hoe tertiaire ontwateringsstelsels op een vereenvoudigde, maar hydrologisch correcte wijze in een informatiesysteem kunnen worden opgenomen ten behoeve van geohydrologisch (model)onderzoek.

Het project kreeg daarom als doelstelling mee: aan te geven hoe de ontwateringsstelsels in een informatiesysteem zouden moeten worden opgenomen, zodanig dat dit vanuit het oogpunt van geohydrologisch (model)onderzoek zo correct mogelijk en vanuit het oogpunt van gegevensinwinning zo eenvoudig en efficiënt mogelijk zou geschieden.

Bij de opzet van het onderzoek zijn onder meer de volgende vragen gesteld:

1. Is het mogelijk de tertiaire ontwateringsstelsels in de vorm van eenvoudige gebiedsparameters in een informatiesysteem op te nemen, zodanig dat de hydrologische werking van de stelsels vereenvoudigd maar voldoende correct wordt weergegeven?
2. Uit het onderzoek met hydrologische modellen is bekend dat de intreeweerstand van waterlopen een belangrijke, maar veelal onbekende factor is. Kunnen inzicht en kennis in deze parameter worden aangevuld?
3. Kan er een relatie worden gelegd tussen de te identificeren gebiedsparameters en de gebiedskenmerken, zodanig dat voor de bepaling van de gebiedsparameters van beschikbare gebiedsdekkende informatie gebruik kan worden gemaakt?
4. Hoe kunnen de gegevens in een informatiesysteem worden opgenomen op zodanige wijze dat het geohydrologisch (model)onderzoek daarvan efficiënt gebruik kan maken?

Het hier gerapporteerde onderzoek heeft zich met name bezig gehouden met beantwoording van de eerste twee vragen.

In de periode van het project is door het Staring Centrum een onderzoek naar de drainageweerstand in Oost Gelderland uitgevoerd (Massop, 1994), waarbij onder meer het probleem van extrapolatie van de drainageweerstand op basis van gebiedskenmerken is toegepast. In dezelfde tijd is bij TNO Grondwater en Geo-Energie een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de interactie tussen oppervlak-

tewater en grondwater in het hoge deel van Nederland (Gomez del Campo, 1993). Aan de opname van oppervlaktewatergegevens in het REGIS informatiesysteem werd bij TNO veel aandacht besteed, zodat dit onderdeel in het kader van het project niet verder is onderzocht.

In dit hoofdstuk wordt de betekenis van het onderzoek naar de intreeweerstand in het bredere verband van het project toegelicht.

8.2 Evaluatie onderzoek gebiedsparameters

De vraag of het mogelijk zou zijn de tertiaire ontwateringsstelsels in de vorm van eenvoudige gebiedsparameters in een informatiesysteem op te nemen, zodanig dat de hydrologische werking van de stelsels vereenvoudigd maar voldoende correct wordt weergegeven kon reeds in een vroeg stadium van het project positief worden beantwoord.

Om het antwoord op deze vraag te kunnen geven zijn de bestaande mathematische beschrijvingen van de functie van ontwateringsstelsels geanalyseerd. Van de analytische benaderingen zijn met name de principieel verschillende benaderingen door Ernst en Bruggeman geanalyseerd. De numerieke modeltoepassingen zijn eveneens terug te voeren tot twee principieel verschillende benaderingen: de volledig drie-dimensionale en de twee-dimensionaal gelaagde of semi-drie-dimensionale benadering.

Twee gebiedsparameters komen uit dit onderzoek naar voren als mogelijkheden voor een vereenvoudigde invoering van tertiaire ontwateringsstelsels in de geohydrologische modellen: de 'drainageweerstand' die vooral in de ontwateringsproblematiek een rol speelt en de 'voedingsweerstand', die bij regionale geohydrologische modellen is geïntroduceerd voor gevallen waarin een duidelijke deklaag aanwezig is boven het watervoerend pakket. Hoofdstuk 2 van dit rapport geeft van de verschillende benaderingen een korte samenvatting; voor meer detail wordt verwezen naar de bestaande literatuur. Daarin wordt de relatie tussen de gebiedsparameters en de daartoe benodigde gegevens en parameters aangegeven, waarmee het in principe mogelijk is een vereenvoudigde gebiedsparameter te berekenen voor een modelsegment, indien de gegevens beschikbaar zijn.

Beide gebiedsparameters zijn een functie van de diepte tot maaiveld doordat bij hoge waterstanden in het algemeen meer waterlopen deelnemen aan het ontwateringsproces dan bij lage waterstanden. Bij opname in een informatiesysteem van de gebiedsparameters, of van de gegevens waaruit zij zijn opgebouwd, dient deze afhankelijkheid van de diepte tot uiting te komen.

- Bij uit veldwerk berekende gebiedsparameters zullen de parameters moeten worden vastgelegd als functie van de diepte tot NAP, waarbij de maaiveldhoog-

te als de bovengrens van het geldigheidsgebied wordt gehanteerd.

- Bij het opnemen van de gegevens waaruit de gebiedsweerstand zijn opgebouwd is de diepte-dichtheidsverhouding van het ontwateringsstelsel een bepalende factor die in het informatiesysteem moet worden opgenomen.

8.3 Evaluatie onderzoek intreeweerstand

Dit is het belangrijkste onderwerp van het hier gepresenteerde rapport. De gebrekkige kennis van de intreeweerstand werd gezien als de belangrijkste ontbrekende factor in de informatie betreffende waterlopen en drains. De invloed van deze parameter op de gebiedsweerstand is relatief groot, zoals in tabel 2.1 voor de drainageweerstand wordt gedemonstreerd. Het werd dan ook als een prioriteit gezien om meer inzicht te verkrijgen in het mechanisme en de grootte van de parameter.

In het onderzoek is niet alleen de intreeweerstand zelf onderzocht maar tevens de relatie tot de belangrijkste gebiedsparameter: de drainageweerstand. Ten behoeve van het modelonderzoek is tevens de intreeweerstand van grotere wateren in kaart gebracht.

De resultaten van het onderzoek zijn uitgebreid beschreven. Voor wat betreft het geohydrologisch (model)onderzoek zijn de belangrijkste resultaten uit de inventarisatie als volgt.

- De grootte van de intreeweerstand blijkt zeer afhankelijk te zijn van de plaatselijke condities die de oorzaak zijn van een grote variatie in waarden. Daardoor is slechts een orde van grootte van de te verwachten weerstand te geven voor de verschillende klassen van waterlopen. Dit is niet goed mogelijk voor de grootste waterlopen.
- Ook na een intensieve analyse van het beschikbare laboratorium- en veldonderzoek blijkt dat het mechanisme van de intreeweerstand en de invloeden daarop slechts in kwalitatieve zin bekend zijn. Een betere schatting van de weerstand op grond van aanvullende informatie is dan ook vooralsnog niet goed mogelijk.

Deze resultaten houden in dat voor nauwkeurig geohydrologisch (model)onderzoek aanvullend veldonderzoek noodzakelijk blijft. Het hier gepresenteerde rapport geeft daarbij zoveel mogelijk ondersteuning.

8.4 Evaluatie onderzoek gebiedsparameters versus gebiedskenmerken

De vraag is kunnen de geïdentificeerde gebiedsparameters uit gebiedskenmerken worden afgeleid zodat van beschikbare gebiedsdekkende informatie gebruik kan

worden gemaakt.

Er is in het onderzoek naar de drainageweerstand in Oost-Gelderland (1994-1) een begin gemaakt met de ontwikkeling van methoden voor de extrapolatie van de drainageweerstand van bemeten gebieden naar niet bemeten gebieden.

Uit de formules van Ernst en Bruggeman kan worden afgeleid dat hydrologisch correcte toekenning van gebiedsweerstandspareters (bijvoorbeeld de drainage-weerstand) gebaseerd dient te zijn op de hydrogeologische schematisatie van de ondergrond en de dichtheid en diepteligging van het ontwateringsstelsel.

De in het onderzoek Oost-Gelderland toegepaste methode van onderzoek (selectie van proefgebieden, extrapolatie van de drainageweerstand, etc.) houdt hiermee reeds rekening. Mede om budgetaire redenen is het veldwerk in de 15 proefgebiedjes beperkt gebleven tot een eenvoudige opzet en een relatief gering aantal metingen per gebied. Het beperkte aantal metingen biedt nu onvoldoende mogelijkheden voor een gedegen evaluatie van de methode en de ontwikkeling van een degelijker aanpak.

Het verdient aanbeveling om meer onderzoek te verrichten naar de mogelijkheden van het kwantificeren van de gebiedspareters op basis van de minimaal noodzakelijke gebiedskenmerken en -gegevens. Dit zou moeten leiden tot de ontwikkeling van een goed gefundeerde onderzoeks- en meetstrategie. Deze ontwikkeling zal in eerste instantie gebaseerd moeten zijn op voldoende en voldoende nauwkeurige waarnemingen in een beperkt aantal proefgebieden. Een grotere dichtheid aan gegevens zou tevens de noodzakelijke statistische bewerkingen beter tot hun recht doen komen. Op grond van de resultaten kan vervolgens worden gewerkt aan een meer optimale aanpak: een maximaal resultaat bij een minimaal aantal metingen.

9 Conclusies en aanbevelingen

9.1 Conclusies

Het geïnventariseerde onderzoek

1. *Het onderzoek naar de intreeweestanden is in het verleden sterk geconcentreerd geweest op het hoge deel van Nederland.*

Een reden voor het gebrek aan onderzoek in het vlakke westen van Nederland kan zijn dat de rol van de intreeweestand in de ontwatering van deze gronden gering is ten opzicht van de hydraulische weerstand van de ondergrond. Dit geldt vooral voor gebieden met een dikke deklaag van kleiig materiaal (klei- en klei-op-veen-gebieden).

2. *Er is weinig onderzoek bekend van de intreeweestand van kleine waterlopen en greppels (klasse 2 en kleiner).*

Enige uitzondering hierop vormt het onderzoek naar de drainageweestanden van het tertiair ontwateringssysteem in Oost-Gelderland (Massop, 1994).

De hoogte van de intreeweestand

3. *De intreeweestanden van kleine en matig grote waterlopen zijn volgens het geïnventariseerd onderzoek in het algemeen beperkt tot enkele dagen (zie tabel 9.1). Bijzondere omstandigheden als kleilenzen in het profiel en gebrek aan onderhoud kunnen reden zijn voor hogere intreeweestanden.*

Tabel 9.1 Overzicht intreeweestanden kleine waterlopen

Type waterloop:	Topografie	Bodem	Intreeweestand c_s (dagen)	
			gemiddeld	globale begrenzing
Sloten, klassen 1, 2 en 3	licht hellend tot nagenoeg vlak	zandgrond	0,7 - 1	0,2 - 3
Natuurlijke beken, klassen 3 en 4	licht hellend	zandgrond	< 0,5	onbekend
Wijken, klasse 4	vlak	zandgrond	1 - 2	< 5

4. De intreeweestanden van grote tot zeer grote waterlopen vertonen een grote variatie. De gevonden variatie wordt toegeschreven aan de heterogeniteit van de bodems, de invloeden van scheepvaart en het feit dat de intreeweestand niet goed te scheiden is van de hydraulische weerstand van de onderliggende bodem. Er is niet zonder meer een orde van grootte van de intreeweestand te geven.

De intreeweestand van de grote kanalen en rivieren is zodanig afhankelijk van de plaatselijke condities dat geen orde van grootte gegeven kan worden. De weerstand zal voor deze waterlopen afzonderlijk moeten worden onderzocht. Daarbij dient onderscheid gemaakt te worden naar de bodemdikte en samenstelling (zie 6.3). Voor een overzicht van de gevonden waarden wordt verwezen naar de tabellen 7.5 en 7.6.

Bijzondere aspecten van de intreeweestand

5. In het onderzoek met betrekking tot de intreeweestand van waterlopen dient onderscheid gemaakt te worden naar de aard van de ondergrond.
- Als de waterlopen in zandige ondergrond liggen, wordt de intreeweestand met name bepaald door de overgangswaarde op de grens van water en slootbodem; deze is het gevolg van de sliblaag of van verstopping van de bovenste bodemlaag.
 - Als de waterlopen zijn ingebed in kleiige of venige ondergrond, wordt de intreeweestand, die veroorzaakt wordt door sliblagen en dichtslibbing, overtroffen door de hydraulische weerstand van de ondergrond.

6. *Bijzondere condities kunnen de intreeweerstand plaatselijk sterk beïnvloeden.*

- Weerstandsbiëdende lenzen ter hoogte van de bodem of taluds kunnen een sterk verhoogde intreeweerstand veroorzaken bij kleine waterlopen.
- Het doorsnijden van oude geulafzettingen kan zowel een hogere als een lagere intreeweerstand veroorzaken.
- Kunstwerken kunnen plaatselijk en veelvoud van de intreeweerstand veroorzaken: bovenstrooms van stuwen zijn waarden gemeten van meer dan 500 dagen.
- Scheepvaart heeft een verstorend effect. De aanwezigheid van sliblagen op enige diepte in de kanaalbodem moet waarschijnlijk daaraan worden geweten.

7. *Algemeen wordt aangenomen dat de intreeweerstand wordt beïnvloed door de onderhoudstoestand.*

Het geïnventariseerde onderzoek geeft alleen informatie over het onderhoudseffect bij wijken in het veenkoloniale gebied. Het effect van onderhoud bleek daar vooral uit een betere afwatering te bestaan. Het effect op de intreeweerstand was marginaal.

Betekenis voor een informatiesysteem - een evaluatie

8. *De gebiedsparameters 'drainageweerstand' en 'voedingsweerstand' lenen zich in principe voor het hydrologisch correct weergeven van ontwateringsstelsels in een informatiesysteem.*

Beide gebiedsparameters zijn een functie van de diepte tot een horizontaal referentievlak doordat bij hoge waterstanden in het algemeen meer waterlopen deelnemen aan het ontwateringsproces dan bij lage waterstanden. Bij opname in een informatiesysteem van de gebiedsparameters, of van de gegevens waaruit zij zijn opgebouwd, dient deze afhankelijkheid van de diepte tot uiting te komen.

9. *De gebiedsparameters 'drainageweerstand' en 'voedingsweerstand' zijn sterk afhankelijk van de intreeweerstand van de waterlopen. Doordat de intreeweerstand niet zonder uitvoering van veldwerk nauwkeurig kan worden vastgesteld, geldt dit ook voor de betrouwbaarheid van de gebiedsparameters.*

De gebiedsparameters 'drainageweerstand' en 'voedingsweerstand' zijn sterk afhankelijk van de intreeweerstand van de waterlopen, zoals uit de formules van Ernst en Bruggeman blijkt. De hoogte van het aandeel van de intreeweerstand in de gebiedsparameters ligt veelal tussen 20 en 80 % (zie ook tabel 2.1). Ten gevolge van de grote variaties in de intreeweerstand is deze zonder de uitvoering van veldwerk niet nauwkeurig te schatten. Deze regel geldt ook voor

een betrouwbare opgave van de gebiedsparameters.

- 10. Er is een begin gemaakt met de ontwikkeling van methoden voor de extrapolatie van de drainageweerstand van bemeten gebieden naar niet bemeten gebieden.*

Deze methoden zijn gebaseerd op de belangrijkste gebiedskenmerken: de dichtheid en diepteligging van de tertiaire waterlopen en de hydrogeologische opbouw van de ondergrond.

9.2 Aanbevelingen

- 1. Het verdient aanbeveling nader veldonderzoek naar de intreeweerstand vooral te richten op het aandeel van deze parameter in het geohydrologisch proces, daarbij geleid door gevoeligheidsonderzoek met grondwatermodellen.*

De intreeweerstand kan, zoals uit het geïnventariseerde onderzoek blijkt, lokaal sterk variëren en is daarom moeilijk te extrapoleren. Voor praktisch geohydrologisch onderzoek is geen grote mate van detail nodig maar is juist het aandeel van de intreeweerstand in de gebiedsparameters van groot belang. Met name gebiedsproeven (zie hoofdstuk 5) vormen de juiste methode om de achterstand aan veldgegevens weg te nemen. Aanbevolen wordt de uitvoering van deze proeven te baseren op gevoeligheidstests met modellen.

- 2. Er is een begin gemaakt met de ontwikkeling van methoden voor de extrapolatie van de drainageweerstand van bemeten gebieden naar niet bemeten gebieden (zie 1994-1). Het verdient aanbeveling om deze methoden kritisch te evalueren en verder te ontwikkelen.*

Uit de formules van Ernst en Bruggeman kan worden afgeleid dat een hydrologisch correcte bepaling van gebiedsweerstandsparemeters (bijvoorbeeld de drainageweerstandsfunctie) gebaseerd dient te zijn op de hydrogeologische schematisatie van de ondergrond en de dichtheid en diepteligging van het ontwateringssstelsel. De in het onderzoek Oost-Gelderland toegepaste methode van extrapolatie van de drainageweerstand houdt hiermee reeds rekening, maar is zeer globaal. Het verdient aanbeveling om onderzoek te verrichten naar de ontwikkeling van een goed gefundeerde methode en een passende meetstrategie. Deze ontwikkeling zal in eerste instantie gebaseerd moeten zijn op voldoende en voldoende nauwkeurige waarnemingen in een of meer proefgebieden.

vd. Eerenbeemt e.a.

10 Literatuurlijst

- Bakel, P.J.T.; 1986. Planning, design en operation of surface water management systems. Wageningen. ICW, Rapport 13.
- Bartels A., H. Merkens, H. Schiltkamp en T. Wolters; 1982. Drainage- en infiltratieweerstanden in het veenkoloniale gebied. Een onderzoek naar de mogelijkheden om het grondwaterpeil te beïnvloeden door middel van infiltratie via opgeschoonde wijken en drains. Velp. Afstudeerverslag deel 1 (Valthermond) en deel 2 (proefgebied De Groeve), HBCS Velp.
- Beest, J.G. te en K.E. Wit; 1992. Gevolgen van maatregelen om hydrologische effecten van een ontgronding te Liessel te compenseren. Wageningen, Staring-Centrumrapport 220.
- 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. Quarterly Report nr. 15. Voorburg, RID.
- Commissie Hydrologisch Onderzoek TNO; 1986. Verklarende hydrologische woordenlijst. Delft. TNO Rapporten en nota's no 16.
- Dreise, G.; 1988. Drainage-infiltratie proefveld Valthermond. Veldonderzoek betreffende drainage-omhullingsmaterialen in de Veenkoloniën. Velp. Stageverslag HBCS.
- Ernst, L.F.; 1962. Grondwaterstroming in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen. Wageningen. Proefschrift.
- Ernst, L.F.; 1978. Drainage of undulating sandy soils with high groundwater tables. Formula based on a constant hydraulic head ratio. Journal of Hydrology 39.
- Feddes, R.A. en M.G. van Steenbergen; 1973. Infiltratieproefveld 'De Groeve'. Wageningen. ICW-nota 735.
- Fonck, H.; 1972. Een onderzoek naar de grootte van de weerstanden in de slootbodem bij infiltratie vanuit een sloot. Wageningen. ICW-nota 710.
- Fonck, H.; 1973. Een onderzoek naar de grootte van infiltratie vanuit watervoeerende leidingen in het waterschap Salland. Wageningen. ICW-nota 731.
- Gomez del Campo E, G. Jousma en H.Th.L. Massop; 1993. Sensitivity analysis of the surface water-groundwater interaction for the sandy area of the Netherlands. Delft. TNO Institute of Applied Geoscience, unpublished document.
- Haersma Buma, W.W.; 1951. Opheffing van de kwel langs de zijtak van het Twenthekanaal. Weg en Waterbouw, Jaargang 11, No. 9-10, sept./okt. 1951
- Hey, G.J. en C.G.M. Kester; 1980. De hydrologische interactie tussen de grotere waterlopen en het grondwater in West-Utrecht. RIVM, Bilthoven. RID-mededeling 80-7.
- Keulen, T. van; 1982. Bepaling van geohydrologische grootheden uit waterbalansen en grondwaterstanden van het waterafvoergebied 'De Monden'. Wageningen. ICW-nota 1363.
- Landinrichtingsdienst Utrecht; 1983. Opschonen Wijken - Verslag van een proef

Krager, B.M., 1982?

- in de Drentse Veenkoloniën. Mededelingen Landinrichtingsdienst Utrecht, no 146.
- Lamsvelt, K.G.; 1985. Bepaling van de bodemweerstand in en onder watergangen door middel van infiltratieproeven in het gebied van de Overijsselse Vecht-West. Bilthoven. RIVM, deelrapport 840344005.
- Massop H.Th.L. en P.A.J.W de Wit; 1994. Hydrologisch onderzoek naar de drainageweerstanden van het tertiair ontwateringsstelsel in Oost-Gelderland. Wageningen. Staring-Centrumrapport 373.
- Meeuwissen B.A.J. en A. Kap; 1989. Onderzoek naar de waarden van belangrijke geohydrologische parameters in het gebied Witharen. KIWA. Nieuwegein. Nota SWO-89.220.
- Steenkamp, B.P.C.; 1987. Inschatting van de kwelverandering langs het kanaal door Zuid- Beveland als gevolg van verbeteringswerken. DBW/RIZA, Lelystad, notitie 87.028X.
- Vinkers, H.J.; 1985. Bepaling van de slootweerstand van de Oostrumse Beek tussen de stuwen O9 en O10. Nieuwegein. KIWA.
- Vinkers, H.J.; 1985. Bepaling van de slootweerstand van de Lollebeek tussen de stuwen L10 en L9. Nieuwegein. KIWA.
- Waterschap Salland; 1988. Infiltratieproeven Waterschap Salland.
- Weerd, B. van der; 1974. Onderzoek naar de wegzijging in het derde pand van het Oranjekanaal. Wageningen. ICW-nota 826.
- Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum; 1988. Cultuurtechnisch Vademecum. Utrecht. Cultuurtechnische Vereniging.
- Wesseling, J.; 1969. Enkele resultaten van het hydrologisch onderzoek op het ontwateringsproject Hoenkoop. Wageningen. ICW-nota 510.
- Wit, K.E.; 1983. Berekening van de kanaalweerstand van de Zuid-Willemsvaart in het traject Den Dungen - Erp. Wageningen. ICW-nota 1427.
- 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.
- Wit, K.E., H.Th.L. Massop en J.G. te Beest; 1989. Onderzoek naar effecten van beheersmaatregelen op de conservering van een Neolithische veenweg bij Nieuw-Dordrecht. Wageningen. Staring-Centrumrapport 25.
- Wit, K.E., H.Th.L. Massop en J.G. te Beest; 1991. Relatie oppervlaktewater- en grondwater in de provincie Drenthe. Wageningen, Staring-Centrumrapport 134.

Werkgroep Opschue wijte >

Bijlage A Analytische Oplossingen

Formules van Ernst

De formule van Ernst voor een 1 en 2 lagen profiel is als volgt (zie figuur 2.1):

$$\gamma = \frac{L^2}{8k_h D} + L\left(\Omega + \frac{c_b}{B}\right) \quad (1)$$

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

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

De gebruikte parameters zijn:

γ	= drainageweerstand volgens Ernst	(d)
L	= slootafstand	(m)
D	= dikte van de doorstroomde laag	(m)
B	= natte omtrek sloot	(m)
c_b	= intreeweerstand (slootbodem)	(d)
k_h	= horizontale doorlatendheid	(m.d ⁻¹)
k_v	= verticale doorlatendheid	(m.d ⁻¹)
k_r	= radiale doorlatendheid	(m.d ⁻¹)
α	= geometrie factor	(-)

Formules van Bruggeman

De formules van Bruggeman die de grondwaterstroming beschrijven volgens figuur 2.2 zijn:

$$q = \frac{[(c + \frac{D}{k_v})(1 - \frac{B}{L}) - BS]N - h_s}{\frac{(Lc_b)}{B} + (c + \frac{D}{k_v}) + SL} \quad (4)$$

Waarbij:

$$S = \frac{AL^2}{\pi^3 B^2 k_v} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin^2\left(\frac{n\pi B}{L}\right) F(n, o) \quad (5)$$

$$F(n, o) = \frac{(n\alpha_1 + 1)e^{n\alpha_2} + (n\alpha_1 - 1)e^{-n\alpha_2}}{(n\alpha_1 + 1)e^{n\alpha_2} - (n\alpha_1 - 1)e^{-n\alpha_2}} \quad (6)$$

$$\alpha_1 = \frac{2\pi k_v c}{AL} \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \frac{2\pi D}{AL} \quad (8)$$

$$A = \sqrt{\frac{k_v}{k_h}} \quad (9)$$

$$v_z = (1 - \frac{B}{L})N - q \quad (10)$$

$$(h_b - h_s) = \frac{qLc_b}{B} \quad (11)$$

$$\gamma^I = \frac{(\bar{h} - h_s)}{q} \quad (12)$$

Waarin:

γ^I = drainageweerstand volgens Bruggeman	(d)
L = slootafstand	(m)
D = dikte van de doorstroomde laag	(m)
B = natte omtrek sloot	(m)
N = voeding freatisch vlak	(m.d ⁻¹)
q = specifieke grondwaterafvoer	(m.d ⁻¹)
v_z = wegzijging c.q. kwel door weerstandbiedende laag	(m.d ⁻¹)
z = niveau onder maaiveld waarvoor $F(n,o)$ van toepassing	(m)
$\bar{h}_s$ = slootpeil t.o.v. referentieniveau	(m)
$\bar{h}$ = gemiddelde stijghoogte t.o.v. referentieniveau	(m)
c = weerstand slecht doorlatende laag	(d)
c_b = intreeweerstand (slootbodem)	(d)
k_h = horizontale doorlatendheid	(m.d ⁻¹)
k_v = verticale doorlatendheid	(m.d ⁻¹)
k_r = radiale doorlatendheid	(m.d ⁻¹)

Berekening van de intree weerstand van een rivier of een kanaal in een één-laagsysteem (uit Hey, 1980)

Voor de berekening wordt uitgegaan van het in de figuur gegeven schema.

De betekenis van de gebruikte symbolen is als volgt:

- x = horizontale afstand uit het hart van de rivier;
- ϕ = stijghoogte van het grondwater in het ondiepe pakket, t.o.v. het rivierpeil;
- H = verschil tussen rivierpeil en polderpeil;
- kD = doorlaatvermogen van het pakket;
- B = breedte van de rivier;
- c_p = weerstand tegen verticale grondwaterstroming van de afdekkende laag in de polder;
- $\lambda_p = \sqrt{kDc_p}$: spreidingslengte van de afdekkende laag in de polder;
- c_r = weerstand van de rivierbodem;
- $\lambda_r = \sqrt{kDc_r}$: spreidingslengte t.p.v. de rivier.

Voor de berekening zijn voorts de volgende aannamen gedaan:

- Er is symmetrie t.o.v. de rivieras.
- De polder strekt zich oneindig ver uit.
- Het watervoerend pakket wordt aan de onderzijde begrensd door een ondoorlatende basis.
- De rivieroever is ondoorlatend.
- De grondwaterstroming is stationair.

Voor de stijghoogte van het grondwater onder de rivier is af te leiden:

$$\varphi = A_1 \cosh \frac{x}{\lambda_r} \quad (1)$$

en ter plaatse van de polder:

$$\varphi = A_2 e^{-\frac{x}{\lambda_p}} + H \quad (2)$$

Hierin zijn A_1 en A_2 constanten.

Uit de continuïteitsvoorwaarde t.p.v. de oever ($x = \frac{1}{2}B$) volgt nu:

$$\left(\frac{d\varphi}{dx} \right)_{\text{rivier}} = \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)_{\text{polder}} \quad (3)$$

Differentiëren van (1) levert:

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{A_1}{\lambda_r} \sinh \frac{x}{\lambda_r}$$

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{\varphi}{\lambda_r} \tanh \frac{x}{\lambda_r}$$

Uit (1) volgt:

$$A_1 = \frac{\varphi}{\cosh \frac{x}{\lambda_r}}$$

Differentiëren van (2) levert:

$$\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{A_2}{\lambda_p} e^{-\frac{x}{\lambda_p}}$$

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{H - \varphi}{\lambda_p}$$

Uit (2) volgt:

$$A_2 = e^{-\frac{x}{\lambda_p}} + H$$

(3) wordt hiermee:

$$\frac{\varphi_b}{\lambda_r} \operatorname{tgh} \frac{B}{2\lambda_r} = \frac{H - \varphi_b}{\lambda_p}$$

ofwel:

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_p} \frac{H - \varphi_b}{\varphi_b} = \operatorname{tgh} \frac{B}{2\lambda_r} \quad (4)$$

Voor kleine waarden van $\frac{B}{2\lambda_r}$ geldt bij benadering:

$$\operatorname{tgh} \frac{B}{2\lambda_r} = \frac{B}{2\lambda_r} \quad (5)$$

Voor $B = \lambda_r$ wordt door deze benadering een fout van ca. 8% gemaakt.

Voor $\lambda_r > B$ is (5) derhalve een redelijke benadering. Als resultaat wordt dan verkregen:

$$\frac{\lambda_r}{\lambda_p} \frac{H - \varphi_b}{\varphi_b} = \frac{B}{2\lambda_r}$$

ofwel:

$$\lambda_r = \lambda_p \frac{B}{2} \frac{\varphi_b}{H - \varphi_b} \quad \text{als } B < \lambda_r \quad (6)$$

Voor grote waarden van $\frac{B}{2\lambda_r}$ geldt bij benadering:

$$\operatorname{tgh} \frac{B}{2\lambda_r} = 1 \quad (7)$$

Als ondergrenswaarde, waarvoor betrekking (7) nog redelijk nauwkeurig is kan bijvoorbeeld worden genomen: $B = 3\lambda_r$. Hierbij is de fout ca. 9%.

$$(7) \text{ ingevuld in (4) levert: } \frac{\lambda_r}{\lambda_p} \frac{H - \varphi_b}{\varphi_b} = 1$$

ofwel:

$$\lambda_r = \lambda_p \frac{\varphi_b}{H - \varphi_b} \quad \text{als } B > 3\lambda_r \quad (8)$$

Bijlage B Samenvattingen geïnventariseerd onderzoek

LEESWIJZER

De bijlage omvat alleen samenvattingen van rapporten en verslagen van onderzoek waarbij van veldmetingen gebruik gemaakt is. Indeling en inhoud van de samenvattingen zijn daarbij als volgt:

Het kader

In het kader zijn de belangrijkste verwijzingen naar het onderzoeksrapport gegeven. Deze moeten de lezer in staat stellen het betreffende rapport bij de uitvoerende instantie op te vragen. Met nadruk wordt vermeld dat de rapporten niet worden verstrekt door TNO of Staring Centrum, behalve wanneer het onderzoek door deze instellingen is uitgevoerd.

Aard en omvang Onderzoek

Onder aard en omvang van het onderzoek wordt een beknopt, maar volledig, overzicht gegeven van de essentiële kenmerken van het geanalyseerde onderzoek. De lezer krijgt hier een indruk van de doelstellingen en inhoud van het onderzoek en van de geohydrologische condities in het proefgebied. Deze gegevens zijn van belang bij de evaluatie van de resultaten.

Resultaten en Conclusies

Onder dit hoofd wordt een beknopt overzicht gegeven van de resultaten en conclusies voor zover zij van belang zijn voor het onderzoek naar de weerstandsparementen.

- In enkele gevallen is ook het geanalyseerde onderzoek uitsluitend op dit thema gericht geweest; dan wordt een min of meer volledig beeld van de onderzoeksresultaten gegeven.
- In andere gevallen omvat het geanalyseerde onderzoek meer onderwerpen; dan beperkt de samenvatting zich voornamelijk tot de resultaten en conclusies die van belang zijn voor het onderzoek naar de weerstandsparementen.

Het is van belang op te merken dat in dit deel de resultaten en conclusies van het betreffende rapport worden gegeven, zoals zij door de auteurs van het rapport zijn beschreven.

Evaluatie

Onder dit hoofd is een interpretatie en evaluatie gegeven van de betekenis van de het betreffende geanalyseerde onderzoek en de onderzoeksresultaten voor het onderzoek naar de weerstandsparementen. Hierin worden de resultaten beoordeeld in het kader van het inventarisatie onderzoek naar de weerstandsparementen en wordt voor zover nodig een kwaliteitsoordeel gegeven. In sommige gevallen worden de resultaten in een ander daglicht gezien.

Nummer:	1969-1
Locatie:	Hoenkoop, Lopikerwaard, ZH
Titel:	ENKELE RESULTATEN VAN HET HYDROLOGISCH ONDERZOEK OP HET ONTWATERINGSOBJECT HOENKOOP
Uitv. inst.:	ICW
Auteur(s):	dr J. Wesseling
Public. nr:	Nota 510

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Bestudering effect ontwateringsstelsel teneinde na te gaan of het slotenstelsel voldoende is.

Belangrijkste onderwerpen: Kwel; ontwatering; peilbeheer; berging.

Essentie van het onderzoek:

Afvoerrelaties en bergend vermogen worden berekend voor verschillende perceelbreedten (sloot- en drainafstanden), gebruikmakend van de formules van Hooghoudt en Ernst. Uit de 'a' en alfa factoren worden de sloot en drainweerstand berekend.

Geohydrologische situatie:

- Het profiel bestaat vanaf maaiveld uit 0,5m klei, 4 tot 5m veen, 2m klei, grof zand en grind. De hydraulische weerstand van de twee meter dikke kleilaag wordt geschat op 2800 dagen.
- De diepe stijghoogte is ca NAP - 1.70 m in de zomer en NAP - 1.50 m in de winter. Het slootwaterpeil is gemiddeld 0.20 tot 0.80 m lager zodat er een opwaartse kwel is.

Gebruikte gegevens:

- Grondwaterstanden uit 80 peilbuizen verdeeld over 14 percelen;
- Slootpeilen;
- zie verder ICW nota 503.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

Intreeweerstanden sloten:

Aangezien er geen slootafvoeren gemeten waren, kon alleen de combinatie van intree- en radiale weerstand worden afgeleid. Deze bleek relatief hoog (2.8 - 6.0 d/m, gemiddeld 4.5 d/m) te zijn.

Intreeweerstanden drains:

Intreeweerstanden konden worden berekend uit stijghoogtes in en naast de drains.

- De intreeweerstanden berekend voor drains gelegen in gerijpt veen zijn in de orde van 2 tot 5 d per m drain met uitlopers tot 9 d.
- De berekende intreeweerstanden van drains in ongerijpt veen zijn in de orde van 4 tot 12 d per m drain.

Andere:

- De rol van de kwel op de ontwatering van de percelen was niet duidelijk.
- Het ontwateringssysteem wordt gekenmerkt door relatief hoge grondwaterstanden.
- De bergingsfactor van de grond is relatief hoog (0.05 - 0.08).
- De kD waarde van het pakket is ca 5 m²/dag; k-waarde veen ca 1m/dag.

EVALUATIE

- De berekende waarden (met name de intreeweerstanden zijn bruikbaar als referentie waarden voor veenbodems.
- De intreeweerstanden voor de sloten konden niet apart worden berekend, maar de gevonden waarden kunnen dienen als bovengrens.

Nummer:	1972-1
Locatie:	Waterschap Salland
Titel:	EEN ONDERZOEK NAAR DE GROOTTE VAN DE WEERSTANDEN IN DE SLOOTBODEM BIJ INFILTRATIE VANUIT EEN SLOOT
Uity. inst.:	ICW
Auteur(s):	Fonck
Public. nr:	Nota 710

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Inzicht te verkrijgen in de mate van infiltratie vanuit een watervoerende leiding wanneer de grondwaterspiegel in de aangrenzende percelen lager is dan het slootpeil.

Onderzoek naar de effecten van het opzetten van de slootpeilen in Salland ter opheffing van het dreigende industriewatertekort in Twente.

Belangrijkste onderwerpen: Infiltratiemetingen, doorlatendheidsproeven, bodemonsters

Essentie van het onderzoek:

- Analyse van de relatie tussen doorlatendheidsmetingen aan steekmonsters van de slootbodem en infiltratiemetingen met een kwelmeter.

Geohydrologische situatie:

- Niet bekend

Gebruikte gegevens:

Gegevens uit 20 proefgebieden waarvan 10 in de omgeving van stuwen.

- Infiltratiemetingen met een kwelmeter in de slootbodem.
- Grondwaterstandsmetingen in peilbuizen, in raaien loodrecht op de sloot ter plaatse van de infiltratiemetingen.
- Doorlatendheidsmetingen op het punt van de infiltratiemetingen. De steekmonsters werden getrokken met een steekapparaat van 5 cm doorsnede. De monsters werden doorgemeten in het laboratorium voor 0-5, 5-15, 15-25, 25-35 cm diepte.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

Algemeen

- Er treedt een zeer grote spreiding in waarden op, zowel van de doorlatendheden van de bodemmonsters als van de resultaten van de infiltratieproeven.
- De spreiding in de doorlatendheid van de bodemmonsters wordt deels geweten aan uitdroging van de monsters en de daardoor ontstane ruimte tussen monster en wand, waardoor geen representatieve doorlatendheden worden gemeten.
- De spreiding van de infiltratiewaarden wordt geweten aan heterogeniteit van de bodem en voor een deel aan onvolkomenheden tijdens de proeven.

Correlatie

- De relatie tussen de gemeten doorlatendheden *per laagje* van de slootbodern en die van de kwelmeter, uitgezet op dubbel logaritmisch papier blijkt geen noemenswaardige correlatie op te leveren; correlatiecoëfficiënten liggen tussen 0,10 en 0,40.
- De relatie tussen doorlatendheid en diepte van het monster levert niets op.
- De resultaten worden niet veel beter na wat kunstgrepen.

Conclusies

- Het materiaal uit de steekproeven vertoont een zeer grote spreiding in de berekende doorlatendheden.
- De kansverdelingen van deze meetresultaten tonen aan dat de verwachte zeefwerking van het organisch sliblaagje op de bodern niet duidelijk optreedt, maar vermoedelijk de aanwezige doorlatendheid ongeveer halveert.

EVALUATIE

- De proeven laten een geweldige spreiding in uitkomsten zien. Het is niet duidelijk welk deel aan de proefcondities zelf te wijten is.
- Het is evenmin duidelijk waarom niet geprobeerd is eerst de relatie tussen de infiltratie uitkomsten en de totale weerstand van de steekmonsters te bepalen. Dit zou waardevolle informatie geweest zijn, die als basis had kunnen dienen voor verder detailonderzoek.
- De verkregen resultaten zijn helaas niet overtuigend.

Nummer:	1973-1
Locatie:	Waterschap Salland
Titel:	EEN ONDERZOEK NAAR DE GROOTTE VAN INFILTRATIE VANUIT WATERVOERENDE LEIDINGEN IN HET WATERSCHAP SALLAND
Uitv. inst.:	ICW
Auteur(s):	ing. H. Fonck
Public. nr:	Nota 731

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en): Inzicht te verkrijgen in de mate van infiltratie vanuit watervoerende leidingen in het Waterschap Salland.

Belangrijkste onderwerpen: Infiltratieweerstanden.

Essentie van het onderzoek:

- Het doen van infiltratiemetingen in leidingpanden (sloten) bij uiteenlopende infiltratie-intensiteiten, als vervolg op onderzoek in 1971 (zie 1972-1).
- Bepalingen van de infiltratie boven de stuw en de kwel beneden de stuw met behulp van waterbalansberekeningen.
- Onderzoek naar de infiltratieintensiteit in verschillende door stuwen begrensde leidingpanden, onder wisselende inlaatcondities.

Geohydrologische situatie:

- De bodem bestaat uit zand waarin tot op een diepte van ca 5 m geen leem- of veenlagen zijn gevonden. Dit blijkt uit de boringen op 25 plaatsen in het waterschap.
- In de zomer wordt een slootpeil gehandhaafd dat boven het grondwaterpeil ligt.

Gebruikte gegevens:

- Infiltratiemetingen uit kwelmers: per onderzocht leidingvak met 6 kwelmers op 3 tijdstippen, n.l. juni, augustus en september 1972.
- Grondwaterstandsgegevens in dwarsraai (100m, 20m, 5m, 2m uit het hart van de sloot), alsmede in een lengteraai langs het werkpad.
- Debietmetingen bij stuwen.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

Algemeen:

De stroming van infiltrerend water is onderhevig aan twee weerstanden, namelijk (zie ook het onderzoek uit 1971):

- 1) weerstand van de dunne organisch sliblaag op de bodem, waarvan de werkzame dikte hier visueel op ca 10 cm is gesteld, en
- 2) de doorlatendheid van het ongestoorde bodemprofiel waarin leiding is gegraven. In het kader van het onderzoek zijn geen doorlatendheidsmetingen van het profiel verricht.

Intreeweerstanden sloten:

- De gemiddelde doorlatendheid van het sliblaagje op bodem van de waterloop bedraagt, bij visueel vastgestelde dikte van 5 à 10 cm, ca 0,04 m/d, hetgeen overeenkomt met een bodemweerstand van 1,25 tot 2,5 dag. (Dit geldt in feite voor de werkzame grenslaag bestaande uit sliblaagje en dichtgeslibd profiel)
- De doorlatendheid van het ongestoorde profiel is op grond van optredende potentiaalverschillen berekend op 4,10 m/d. De doorlatendheid van het sliblaagje is hiervan slechts 1/100, zodat het sliblaagje in zeer belangrijke mate verantwoordelijk is voor de bodemweerstand.

Er is bij de berekeningen geen onderscheid gemaakt naar de weerstand van bodem en talud.

EVALUATIE

- Het onderzoek in dit rapport lijkt op veel betere gegevens te zijn gebaseerd, en maakt daardoor een degelijker indruk dan het onderzoek samengevat in appendix 1972-1.
- Het toepassen van de formules voor radiale uitstroming die gebaseerd zijn op een homogeen isotroop profiel, is misschien niet geheel juist; mogelijk was dit wel de beste benadering.

Voor het onderzoek naar de intree- of bodemweerstanden geeft het rapport waardevolle informatie met betrekking tot de weerstand van de grenslaag onder infiltratie condities.

Nummer:	1973-2
Locatie:	Zuidlaren
Titel:	INFILTRATIE PROEFVELD 'DE GROEVE'
Uitv. inst.:	ICW
Auteur(s):	dr R.A. Feddes; mej. M.G. van Steenberg
Public. nr:	Nota 735

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

1. Het bepalen van het verlies aan water uit de bovengrond als gevolg van de wateronttrekking aan het diepe grondwater en de invloed die het aanwezige slotenstelsel daarop heeft,
2. De vaststelling van de landbouwkundige gevolgen van de onder 1 genoemde verschijnselen,
3. Het nagaan om doormiddel van peilverhoging in de open leidingen het verlies te compenseren, zodat enerzijds de gevolgen voor de landbouw worden opgeheven en anderzijds meer water aan de diepe ondergrond kan worden onttrokken.

Belangrijkste onderwerpen: Infiltratieweerstand, drainageweerstand.

Essentie van het onderzoek:

- In het invloedsgebied van de waterwinning is een proefveld aangelegd, waarin de sloten ten behoeve van metingen zijn afgedamd.
- Het onderzoek concentreert zich op het door middel van slootproeven onderzoeken van de invloed van het slotenstelsel op het verlies van water uit de bovengrond. Zie verder de doelstellingen.

Geohydrologische situatie:

Het proefveld ligt in het dal van de Hunze. De bodem is als volgt opgebouwd (STIBOKA rapport 1039):

- Een heterogene bovengrond, bestaande uit 1) veengrond (11,2 ha), tenminste 40 cm moerig materiaal voorkomend tot een diepte van minder dan 80 cm - maaiveld, 2) moerige gronden (ca 2,9 ha) en 3) zandgronden (ca 1,8 ha) voorkomend als ruggen;
- Fijne zanden, met plaatselijk een leemlaag of een laag van minder doorlatend materiaal tot op een diepte van 2 tot 4 m.
- Fijne slibhoudende zanden, kleien en plaatselijk grove zanden (Formaties van Peel, Eemien en Weichselien, vanaf een diepte van ca 4,5 m tot een diepte tussen 30 en 50 m - maaiveld.
- Op grotere diepte het watervoerend pakket van grove grindhoudende zanden (F. van Enschede en Zuidlaren)

Gebruikte gegevens:

- In- en uitlaatgegevens van de afgedamde slootcompartimenten;
 - Peilen van buitenwater, binnenwater en de inlaatkom;
 - Freatische grondwaterstanden in twee raaien;
 - De diepe stijghoogte;
 - Gammametingen ter bepaling van bodemvocht;
 - Meteorologische gegevens.
-

RESULTATEN EN CONCLUSIES

De verzamelde gegevens zijn voor twee raaien uitgewerkt. Er zijn echter geen slootbodemweerstanden bepaald.

- De afgeleide waarden voor de drainageweerstand bedragen respectievelijk 309 en 252 dagen.
 - De radiale weerstand bedraagt resp 3,16 en 2,7 dagen per m.
-

EVALUATIE

Hoewel het proefgebied zelf wellicht geschikt is voor het bepalen van de bodemweerstand of de intreeweerstand van de sloten, heeft deze zaak in het rapport nauwelijks aandacht gehad. Het rapport is voor het onderzoek naar deze parameters dan ook van weinig directe waarde.

Nummer:	1974-1
Locatie:	Oranjekanaal, bij Emmen
Titel:	ONDERZOEK NAAR DE WEGZIJGING IN HET DERDE PAND VAN HET ORANJEKANAAL
Uitv. inst.:	ICW
Auteur(s):	ing. B. van der Weerd
Public. nr:	Nota 826

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

De mogelijkheden van aanvulling van grondwater door middel van infiltratie vanuit het Oranjekanaal te onderzoeken, ten behoeve van de waterwinning langs het kanaal.

Belangrijkste onderwerpen: Weerstand kanaalbodem; wegzijging.

Essentie van het onderzoek:

- Over een traject van 6 km zijn in totaal op 16 plaatsen, gelijkelijk verdeeld over de kanaallengte, metingen verricht met behulp van een kwel-wegzijgingsmeter met een diameter van 0,50 m. De bedoeling is de metingen te herhalen na het opschonen van de bodem, zodat de effecten daarvan kunnen worden bepaald.
- Aan de hand van de gedane infiltratie/wegzijgingsmetingen is voorts de mate van ondergrondse afstroming vanuit het derde pand van het Oranjekanaal onderzocht.
- Tenslotte zijn berekeningen uitgevoerd naar de uittreewerstand van het kanaal en van de hydraulische weerstand van de deklaag in de omgeving van het kanaal.

Geohydrologische situatie:

Het peil van het Oranjekanaal is 1.7 m boven het peil van het grondwater in het noordelijke deel van het proefgebied tot ca 5 m in het zuidelijke deel. De kanaalbreedte is 20 m. De oorspronkelijke bodemsoort wordt in het rapport niet genoemd maar is waarschijnlijk zandig, hetgeen kan worden afgeleid uit de doorlatendheidsfactoren terzijde van het kanaal.

Gebruikte gegevens:

- Kwelmetingen in de bodem van het Oranjekanaal op 16 locaties, over een afstand van 6 km; tijdsduur metingen 16 uur.
- Stijghoogte diepe grondwater in raaien;

RESULTATEN EN CONCLUSIES

- De wegzijging, gemeten met de kwel-wegzijgingsmeter, blijkt zeer gering te zijn; de gevonden waarden voor de wegzijging variëren van 0 tot 15,9 mm/d.
- De geringe wegzijging wordt verklaard uit een verdichting van de kanaalbodem; de gevonden k -waarde is $< 0,001$ m/d (uitgaande van een dikte van 0,5 m), terwijl de doorlaatfactoren terzijde van het kanaal 60-70 m/d zijn.
- Voor een 5-tal trajecten zijn de gemiddelde waarden voor de kanaalweerstand bepaald (weerstand per strekkende meter kanaal). De gevonden waarden zijn resp 44, 19, 32, 54 en 245 dagen per meter kanaal. Bij een kanaalbreedte van ca 20 m houdt dit in dat c_b (bodemweerstand) varieert tussen ca 400 en 5000 dagen.
- Er is geen direct aantoonbare relatie tussen gemeten infiltratie-intensiteiten en het peilverschil.
- De berekende hydraulische weerstand van de deklaag in de omgeving van het kanaal, berekend uit gegevens van de WMD (kD en spreidingslengte) varieert tussen 43 - 160 dagen.

EVALUATIE

- Het aantal metingen is relatief gering en de spreiding van waarden is groot. De verkregen bodemweerstand hebben daardoor vooral een indicatieve waarde voor de situatie die kan worden aangetroffen bij grote kanalen.
- De proeven tonen echter aan dat zeer hoge bodemweerstand kunnen ontstaan als gevolg van een verdichting van de kanaalbodem onder voortdurende inzijgingscondities en bij een relatief groot drukverschil tussen kanaalpeil en diepe stijghoogte.
- Metingen met de kwelmeter zijn problematisch, aangezien het moeilijk is te zien of er luchtinsluiting plaatsvindt.

Nummer:	1980-1
Locatie:	A'dam-Rijn Kanaal (A.R.K.), gekanaliseerde Leidsche Rijn, Lek.
Titel:	DE HYDROLOGISCHE INTERACTIE TUSSEN DE GROTERE WATER- LOPEN EN HET GRONDWATER IN WEST-UTRECHT
Uitv. inst.:	RID
Auteur(s):	G.J.Hey; C.G.M.Kester
Public. nr:	RID mededelingen 80-7

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en): Het onderzoeken van de invloed van de grotere waterlopen in West-Utrecht op de grondwaterstroming.

Belangrijkste onderwerpen: Intreeweerstand; infiltratie.

Essentie van het onderzoek:

- Voor *Leidsche Rijn*, *A.R.K.* en *de Lek* werden de gegevens van raaien geanalyseerd. De intreeweerstanden tussen de rivier/kanalen en het eerste watervoerend pakket werden benaderd met een analytische formule voor een één-laag model. De ijking werd gedaan op numerieke wijze met de iteratieformule van Newton-Raphson.
- Voor de Lek mocht in feite niet worden uitgegaan van een één-laag model. Daarom werd gebruik gemaakt van een stationair tweelagen model en halftij waarnemingen. Met dit model werden zowel voor *de Lek* als voor *het A.R.K.* intreeweerstanden berekend.

Geohydrologische situatie:

De geologie van het gebied (belangrijk bij grote kanalen en rivieren) is als volgt:

Het westelijk deel van Utrecht maakt deel uit van het primair gebied, waarin geen mariene afzettingen voorkomen maar waar de sedimentatie van de bovenste lagen wel onder invloed van de zeespiegelrijzing tot stand is gekomen.

Bovenop de grove pleistocene zanden werden tijdens het Oud-Holocene zandige kleien en mogelijk zware kleien afgezet. Elders vindt men dekzanden met daarop dikke veenpakketten. Door riviererosie zijn deze pakketten plaatselijk weggeërodeerd en vervangen door zandige en kleiige rivierafzettingen. Deze rivieractiviteit heeft vooral plaatsgevonden ten zuiden van de huidige Oude Rijn.

De hydrogeologische situatie. Deze kan worden geschematiseerd als een deklaag, waarin zich de kanalen bevinden, met daaronder twee watervoerende pakketten, gescheiden door een slecht doorlatend pakket.

De bodem van de grote waterlopen. Deze is in het algemeen zeer heterogeen. Als gevolg van de relatief grote diepte snijden zij lokaal diep in de Holocene deklaag, die in West-Utrecht in het verleden op vele plaatsen door vroegere Rijnarmen is weggeërodeerd en opgevuld met riviermateriaal (zandbanen). De bodem van de waterlopen is als volgt:

- . A.R.K.: bodem voornamelijk zand tussen Utrecht en Maarssen, daarna in noordelijke richting veen van toenemende dikte op zand (dikte tot ca 3 m bij Breukelen);
- . Leidsche Rijn: bodem voornamelijk zand tot aan het Pleistoceen;
- . Lek: Holocene deklaag, met een dikte van ca 1m dik bij Vreeswijk tot ca 6m bij Nieuwpoort, waarschijnlijk voornamelijk bestaand uit zand en kleiig zand.

De peilen. Als gevolg van inklinking in de omgeving van de kanalen onder invloed van bemaling zijn de peilen van de waterlopen hoger dan de grondwaterstanden in de omgeving. Er heerst dus in principe een toestand van infiltratie.

Gebruikte gegevens:

- Rivier- en kanaalpeilen;
- Freatische grondwaterstanden, geschat a.d.h.v. polderpeilen;
- Boorstaatgegevens van o.m. 24 ondiepe boringen in raaien;
- Stijghoogtegegevens van het diepe grondwater in raaien;
- Doorlaatvermogen en isohypsen van het bovenste watervoerend pakket.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

Tabel 1. Berekende intreeweerstand

Kanaal	Breedte (m)	Diepte (m)	Dikte bodem boven zand (m)	Intree weerstand (d)
Leidsche Rijn (gekanaliseerde deel)	10-29	> 1,4	verwaarl.	ca 10
Amst.Rijn Kanaal (Utrecht-Breukelen)	> 75	ca 4	0 - 3 (klei/veen)	10-250
Lek (Vreeswijk- Nieuwpoort)	400-900	ca 4	1 - 6	70-150

Ter vergelijking: de hydraulische weerstanden van de Holocene deklaagen in de aangrenzende polders variëren van 2000 - 3000 dagen.

Uit waarnemingen wordt geconcludeerd dat het Amsterdam-Rijnkanaal (met uitzondering van het traject bij de polder Maarssenbroek), de Hollandse IJssel en de Vecht de stijghoogte van het ondiepe grondwater niet of nauwelijks beïnvloed. Dit betekent dat de intreeweerstand van deze waterlopen terplaatse hoog zijn. Als oorzaak worden genoemd het dichtgeslibd zijn van de bodem, of de geringe insnijding in de Holocene deklaag.

Voor de Hollandse IJssel wordt nauwelijks kwel geconstateerd in de polders langs de rivier, ook niet als gevolg van baggerwerkzaamheden of verhoging van het rivierpeil.

Uit de modelberekeningen blijkt verder dat de invloed van de Lek op het grondwater belangrijk is in het onderzochte traject.

EVALUATIE

- Het rapport geeft belangrijke informatie over de intreeweestanden van enkele van de grootste waterlopen in Nederland.
- De bepaling van de intreeweestanden via modellering is in het algemeen niet erg sterk doordat een groot beroep wordt gedaan op de nauwkeurigheid van andere parameters in het model zoals het doorlaatvermogen. Voor een indruk van de orde van grootte van de waarden voldoet de berekening.
- Helaas ontbreekt in het rapport een beschrijving van de rivierbodem van de Lek (wellicht in andere rapporten?). Dit gebrek aan informatie maakt het niet eenvoudig om de weerstanden te vergelijken met soortgelijke situaties.

Nummer:	1982-1A
Locaties:	Valthermond, Waterschap De Veenmarken
Titel:	DRAINAGE- EN INFILTRATIE WEERSTANDEN IN HET VEENKOLONIALE GEBIED Een onderzoek naar de mogelijkheden om het grondwaterpeil te beïnvloeden door middel van infiltratie via opgeschoonde wijken of drains.
Uitv. inst.:	HBCS, Velp
Auteur(s):	A.Bartels, H.Merkens, H.Schiltkamp, T.Wolters
Public. nr:	- ; eindverslag studie, deel 1

AARD EN OMVANG ONDERZOEK - Deel 1

Doelstelling(en):

Het bepalen van het effect van het opschonen van wijken in de veenkoloniën op de weerstand die het water ondervindt bij drainage en infiltratie.

Belangrijkste onderwerpen: Drainageweerstand; infiltratieweerstand; intree-/uittreeweerstand.

Essentie van het onderzoek:

- Analyse van de weerstandsverhoudingen voor en na de opschoning van de wijken te Valthermond en Valther blokken, gebruik makend van stationaire en niet-stationaire methoden.
- Analyse van de kwel en wegzijging in beide gebieden, gebruikmakend van kwelmers.

Geohydrologische situatie:

- Het profiel van de ondergrond is in de studie niet goed beschreven. De ondiepe ondergrond bestaat van boven naar onderen uit:
 - weinig leemarm fijn zand
 - vast veen vanaf 0,3 - 1,0 m onder mv.
 - zand, te oordelen aan de relatief hoge berekende kD waarden.
- Voorkomende grondwatertrappen: III, V en VI.
- In normale omstandigheden bestaat een toestand van infiltratie in Valthermond en kwelt in Valtherblokken water op dat is geïnfilteerd in de Hondsrug.

Gebruikte gegevens (in de proefgebieden te Valthermond en Valtherblokken):

- Aanvoer- en afvoergegevens;
- Open waterpeilen;
- Grondwaterstanden;
- Kwelmetingen.

RESULTATEN EN CONCLUSIES - Deel 1

Proeven ter bepaling van hydrologische effecten van opschoning van wijken

Op twee locaties zijn metingen uitgevoerd nl op het proefproject Valtherblokken en Valthermond (Landinrichtingsdienst, 1983). Op beide locaties zijn metingen verricht aan respectievelijk 3 en 4 wijken, waarvan 1 wijk niet is opgeschoond (0-wijk). Op beide locaties zijn twee raaien geplaatst op resp 1/4 en 3/4 van de lengte van de wijk. De afstand tussen de wijken bedraagt ca 160m. Op afstanden van 1, 3, 5, 10, 20 m van de wijkrand en midden tussen de wijken is het grondwaterstandverloop gemeten, zowel voor het opschonen (zomer 1981) als na het opschonen (zomer 1982). Verder zijn locatie Valthermond metingen verricht in winter 1981/1982.

Zowel met betrekking tot Valthermond als Valtherblokken blijkt:

- De uittreeweerstand (W_u) zijn zowel voor als na het opschonen laag, en variëren van 2 tot 15% (nulwijk 15%) van de totale drainageweerstand.
- Het verschil in uittreeweerstand (en drainage weerstand) tussen wel en niet opgeschoonde wijken is *niet significant*.

Proef ter bepaling van het verschil in kwel en wegzijging

Deze proef werd uitgevoerd in wijken A en D en later in wijk B te Valthermond met het volgende resultaat: De infiltratieweerstanden zijn ca 10% lager dan de overeenkomstige drainageweerstand; dit is echter geheel te verklaren uit een toename van de natte omtrek van de waterloop als gevolg van opgezette waterpeilen.

Proef ter bepaling van het eventueel oplopen van de infiltratieweerstand gedurende het seizoen mei tot september 1982

Tijdens dit onderzoek in Valthermond is geen aantoonbare verhoging van de intreeweerstand opgetreden.

Kwelmetingen te Valthermond en Valtherblokken

- In Valthermond blijkt een situatie van infiltratie te bestaan.
- In Valtherblokken heerst een kwelsituatie.
- Uit vergelijking van de metingen met de ingepompte c.q. afgevoerde hoeveelheden bleek een relatief grote onnauwkeurigheid in de metingen. De berekende wegzijging uit de kwelmetingen bedraagt de helft van het ingepompte water. Door dit grote onverklaarde verschil kunnen in absolute zin geen gedetailleerde conclusies worden getrokken.
- Bij verhoging van het peil bleken de toegevoegde infiltratiestroken een bijna tweemaal grotere infiltratiesnelheid hebben.

Samenvatting

Als goede benadering voor het aandeel van de bodemweerstand in de drainageweerstand in het veenkoloniale gebied geldt een waarde van 20 d.(Van Bakel, 1986), Deze waarde is zowel af te leiden uit de metingen op basis van de geohydrologische situatie. De totale drainageweerstand bedraagt ca 120d. Bij een gemiddelde slootafstand van 160 m bedraagt de intreeweerstand 0,125 d/m, hetgeen bij een wijkbreedte van 8 m betekent dat $c_b = 1$ d.

De diepte van de bodem van de wijk t.o.v. maaiveld is voor wijk te Valtermond 2,6-2,8 m-mv en voor een wijk te Valtherblokken 2,0 m-mv, zodat de wijken overwegend gerekend kunnen worden tot *klasse 4*.

EVALUATIE (Deel 1)

- De resultaten van deel 1 van het onderzoek zijn van direct belang voor de inventarisatie studie.
- De bodemopbouw is onvolledig beschreven, hetgeen een degelijke evaluatie van de resultaten in de weg staat.
- De resultaten zijn weinig gedifferentieerd voor zulke uitgebreide proeven. Dit moet waarschijnlijk worden geweten aan grote variatie in de uitkomsten.

Nummer:	1982-1B
Locaties:	Zuidlaren, proefgebied 'De Groeve,
Titel:	DRAINAGE- EN INFILTRATIE WEERSTANDEN IN HET VEENKOLONIALE GEBIED Een onderzoek naar de mogelijkheden om het grondwaterpeil te beïnvloeden door middel van infiltratie via opgeschoonde wijken of drains.
Uitv. inst.:	HBCS, Velp
Auteur(s):	A.Bartels, H.Merkens, H.Schiltkamp, T.Wolters
Public. nr:	- ; eindverslag studie - deel 2

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Het bepalen van het verlies van water uit de bovengrond als gevolg van diepe onttrekking en de invloed die de aanwezige sloten en drains daarop hebben.

Belangrijkste onderwerpen: Drainageweerstand; infiltratieweerstand drains en sloten; intree-/uittreeweerstand.

Essentie van het onderzoek:

- Onderzoek naar verschillen in infiltratieweerstand bij drains en sloten en de invloed van mengwoeling op de infiltratie aan de hand van gegevens van het proefveld.

Geohydrologische situatie:

- Voor de profielopbouw wordt verwezen naar 1973-2.
- De drains en sloten liggen in een matig doorlatende heterogene deklaag, waarin naast zand veen voorkomt.
- Het proefperceel (600 m x 60 m) is door een infiltratie sloot verdeeld in twee delen van elk 300 m waarvan een deel wel en een deel niet is gemengwoeld. Beide delen zijn vanaf de infiltratiesloot voor de helft van drains voorzien; drains evenwijdig aan de lengtesloten op afstand van 10 m.
- De deklaag verliest water aan het onderliggende watervoerend pakket; dit verlies is in rekening gebracht.

Gebruikte gegevens:

- Aanvoer- en afvoergegevens;
- Open waterpeilen;
- Grondwaterstanden.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

Bij de proef werd de waterstand van de sloten op peil gehouden. Het peil van de infiltratiesloot kan op een hoger peil worden gebracht en verliezen konden worden gemeten. De intreeweerstand kon niet afzonderlijk worden berekend.

Tabel 1: Intreeweerstand (d) bij infiltratie vanuit drains of sloten

Jaar	Infiltratie vanuit drains		Infiltratie vanuit sloten	
	gemengwoeld	niet gemengwoeld	gemengwoeld	niet gemengwoeld
1980	7,3	6,1	33,6	49,0
1981	31,8	31,0	74,5	148,1

Uit de berekeningen blijkt het volgende:

- In het gedraineerde deel had mengwoelen geen invloed op de infiltratieweerstand vanuit drains.
- In het niet gedraineerde gedeelte was de infiltratieweerstand een factor 1,5 - 2 lager bij mengwoelen.

EVALUATIE - Deel 2 (voor deel 1 zie 1982-1A)

- De bodemopbouw is onvolledig beschreven, hetgeen een degelijke evaluatie van de resultaten in de weg staat.
- Wat betreft de bodemweerstand van de waterlopen geeft dit deel van het onderzoek geen nieuws.

Nummer:	1982-2
Locatie:	Waterschap Veenmarken, Valthe/Musselkanaal
Titel:	BEPALING VAN GEOHYDROLOGISCHE GROOTHEDEN UIT WATER-BALANSEN EN GRONDWATERSTANDEN VAN HET WATERAFVOERGE-BIED 'DE MONDEN'
Uitv. inst.:	ICW
Auteur(s):	ir. T. van Keulen
Public. nr:	Nota 1363

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Bepaling hydrologische eigenschappen, zoals c-waarden, kD-waarden en infiltratie en drainageweerstanden tbv hydrologisch model van het gebied.

Belangrijkste onderwerpen: Hydraulische weerstand, doorlaatvermogen.

Essentie van het onderzoek:

Het gebied is in horizontale zin ingedeeld in peilvakken en in verticale zin in 3 watervoerende pakketten, gescheiden door slecht doorlatende lagen.

Aan de hand van waterbalansberekeningen zijn vervolgens de kwel of wegzijging over de scheidende lagen bepaald. De weerstand van de scheidende lagen is vervolgens bepaald uit het gemeten potentiaalverschil over de scheidende laag en de berekende kwel/wegzijging.

Geohydrologische situatie:

- In het gebied kunnen drie watervoerende pakketten worden onderscheiden, gescheiden door twee slecht doorlatende lagen.
- Het oppervlaktewatersysteem ligt in het freatische (1^e) watervoerend pakket en staat nergens in rechtstreeks contact met het 2^e watervoerend pakket.

Gebruikte gegevens:

- Grondwaterstanden en stijghoogten;
- Afvoeren van stuwen;
- Open water peilen.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

Hydraulische weerstanden:

Voor twee perioden zijn waterbalansen opgesteld. Hierdoor was het mogelijk een waarde voor de kwel/wegzijging af te leiden.

Uit de stijghoogte midden in het perceel, het oppervlaktewaterpeil en de gemiddelde afvoer over de balansperiode is vervolgens een waarde voor drainageweerstand/ontwateringsweerstand vastgesteld.

Uit de potentiaal verschillen over de scheidende lagen en de berekende kwel of wegzijgingsstromen is per peilvak een waarde voor de hydraulische weerstand bepaald.

Slootbodemweerstanden:

De slootbodemweerstanden zijn in het onderzoek niet bepaald en zijn bij gebrek aan gegevens van de waterlopen en het stijghoogteverloop onder de slootbodem ook achteraf niet zonder meer te bepalen.

EVALUATIE

- Het rapport geeft informatie over de berekende hydraulische weerstanden van de scheidende lagen, die uit waterbalansen zijn berekend. Zoals uit de resultaten blijkt zijn de variaties zeer groot. Deze grote variatie is vooral te danken aan de onzekerheden gepaard gaande met de opstelling van de waterbalans per peilvak.
- Het rapport geeft geen informatie over de bodemweerstanden, en is als zodanig niet erg waardevol voor dit inventarisatieonderzoek.

Nummer:	1983-1
Locatie:	Zuid-Willemsvaart, traject Den Dungen - Erp
Titel:	BEREKENING VAN DE KANAALWEERSTAND VAN DE ZUID-WILLEMSVAART IN HET TRAJECT DEN DUNGEN - ERP
Uitv. inst.:	ICW
Auteur(s):	K.E.Wit
Public. nr:	ICW Nota 1427

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Bepaling van de kanaalweerstand van de Zuid-Willemsvaart voor het traject Den Dungen-Erp ten behoeve van een modelstudie naar de effecten op het grondwaterregiem van voorgenomen veranderingen in de kanaalsituatie (verbreding, uitdieping, peilverandering).

Belangrijkste onderwerpen: Bodemweerstand, kanaalweerstand

Essentie van het onderzoek:

- Analyse van de bodemweerstand van het kanaal voor het bovengenoemde traject aan de hand van doorlatendheidsmetingen aan bodemmonsters.
- Berekening van de kanaalweerstand, bestaande uit bodemweerstand en radiale weerstand, uit dwarsprofielen.

Geohydrologische situatie:

- De hydrogeologische opbouw bestaat uit een watervoerend pakket met kD -waarde van $2000 \text{ m}^2/\text{d}$, afgedekt door slecht doorlatend pakket ter dikte van 20 m met een c -waarde van 100 d., waarin plaatselijk leemlagen voorkomen.
- De Zuid-Willemsvaart is in het traject van stuwen voorzien, waardoor het kanaalpeil plaatselijk hoger en lager is dan dat van het grondwater gepaard gaande met een situatie van respectievelijk infiltratie en drainage.
- De bodemweerstand van het kanaal heeft betrekking op een bodemlaag die vanaf het begin van het kanaal is ontstaan.

Gebruikte gegevens:

- Doorlatendheidsmetingen aan ongestoorde monsters van de kanaalbodem tussen km 110 en km 115;
- Grondwaterstand, kanaalpeilen en grondwaterstijghoogten in raaien loodrecht op de as van het kanaal, voor vier gebieden;

- Geologische gegevens langs het traject;
 - De Grondwaterkaart van het gebied.
-

RESULTATEN EN CONCLUSIES

Vaststelling van de bodemweerstand d.m.v. metingen aan ongestoorde monsters.

In het beschouwde traject zijn per 200 meter raai 2 tot 3 ongestoorde monsters van de kanaalbodem gestoken, die vervolgens zijn doorgemeten. De op deze wijze vastgestelde c-waarde van de kanaalbodem vertoont een grote spreiding: de gevonden steekmonsterwaarden variëren van 0,1 tot 565 d.

De weerstand per locatie (raai) is vastgesteld uit 2 tot 3 waarden door reciproke middeling. Het grote aantal van 64 monsters geeft wel informatie over de gemiddelde waarde van de bodemweerstand. De waarden variëren tussen 0,2 en 34,4 dagen. Het gemiddelde van het onderzochte traject bedraagt 0,7 dagen.

Bij een natte omtrek van 30 m is de kanaalweerstand 0,02 dag/m. De hoogste waarde van 0,2 dag/m is gevonden voor het traject tussen km 112,0 en km 114,4.

Berekening kanaalweerstand uit dwarsprofielen.

De kanaalweerstand is opgebouwd uit een bodemweerstand en een radiale weerstand. De gevonden waarden blijken min of meer te relateren aan het voorkomen van leemlagen onder de kanaalbodem. De bewerking van grondwaterstandsraaien leverde waarden voor de kanaalweerstand op van 0,5, 0,65 en 1,3 dag/m kanaal, voor resp. gebieden zonder, met plaatselijk of met een aansluitend complex van leemlagen.

Er zijn aanwijzingen dat de kanaalweerstand hoger kan zijn dan de hier berekende.

EVALUATIE

- De vaststelling van de bodemweerstand op basis van steekmonsters leidt tot een enorme spreiding van waarden, die slechts indicatief lijkt voor de kanaalweerstand. Dit ligt mede aan de schaalverschillen.
- Voor het vaststellen van de kanaalweerstand ten behoeve van grootschalig onderzoek, zoals modelberekeningen, lijken metingen in een raai dan ook efficiënter.
- Het betreffende onderzoek heeft grote waarde voor de inzichten in bodemweerstand voor grote kanalen.

Nummer:	1985-1
Locatie:	Oostrumse Beek, Limburg
Titel:	BEPALING VAN DE SLOOTWEERSTAND VAN DE OOSTRUMSE BEEK TUSSEN DE STUWEN O9 EN O10
Uitv. inst.:	KIWA
Auteur(s):	H.J.Vinkers
Public. nr:	- ; Verslag

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en): Vaststellen slootweerstand ten behoeve van studie naar invloed waterwinning Breehei.

Belangrijkste onderwerpen: Sloopweerstand.

Essentie van het onderzoek:

De slootweerstand van de Oostrumse Beek is onderzocht met behulp van de meetraaien O-II en O-III, gelegen tussen de stuwen O9 en O10 (in stroomopwaartse richting).

Geohydrologische situatie:

- In de benedenstroomse raai (O-II) komt op een diepte van 0,80 - 1,20 m een leemlaag voor, die direct langs de beek een dikte heeft van 0,50 tot 0,80 m, en waarvan de dikte varieert en met de afstand tot de beek afneemt. Onder de laag is volgens het rapport sprake van semi-spanningswater, daarboven werd geen freatisch niveau aangetroffen.
- Ter plaatse van de bovenstroomse raai (O-III) is geen leemlaag gevonden. Het freatisch niveau is op deze locatie veel dieper en loopt naar de beek toe af, zodat er sprake is van drainage door de beek.

Gebruikte gegevens:

- Grondwaterstanden in raaien
- Beekafvoeren gemeten bij de stuwen.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

- De gevonden slootweerstand bedragen 1,5 en 2,0 d, bij een natte omtrek van respectievelijk 2,8 m (O-II) en 3,1 m (O-III).
- De grondwaterpotentialen naast de beek zijn even hoog als het beekpeil ter plaatse, hetgeen betekent dat de slootweerstand grotendeels bestaat uit de radiale weerstand en dat de bodemweerstand verwaarloosbaar is.

EVALUATIE

Het verslag is zeer sumier.

Het onderzoek toont het volgende aan:

- . De bodemweerstand van de beek *onder drainerende condities* is verwaarloosbaar is;
- . De beekweerstand (slootweerstand) wordt derhalve voornamelijk gevormd door de radiale weerstand.

Dit zijn interessante uitkomsten voor het inventarisatieonderzoek.

Nummer:	1985-2
Locatie:	Lollebeek, limburg
Titel:	BEPALING VAN DE SLOOTWEERSTAND VAN DE LOLLEBEEK TUSSEN DE STUWEN L10 EN L9
Uitv. inst.:	KIWA
Auteur(s):	H.J. Vinkers
Public. nr:	- ; Verslag

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en): Vaststellen slootweerstand ten behoeve van studie naar invloed waterwinning Breehei.

Belangrijkste onderwerpen: Sloopweerstand.

Essentie van het onderzoek:

De slootweerstand van de Lollebeek is onderzocht met behulp van de meetraaien noord en zuid, gelegen tussen de stuwen L-9 en L-10 (in stroomopwaartse richting).

Geohydrologische situatie:

In het dwarsprofiel van de beek, af te leiden uit de boringen (raaien aan de noordzijde en de zuidzijde), komen twee leemlagen voor.

- Aan de noordkant van de beek (noord-raai) komt op 1m diepte een leemlaag voor met een dikte van enkele decimeters, die aan de zuidzijde niet wordt teruggevonden.
- Aan beide zijden van de beek komt op een diepte van 1,5 a 2,5 m onder maaiveld een leemlaag voor, die onder de bedding van de beek doorgaat. Uit grondwaterstandsgegevens blijkt dat er onder de diepe leemlaag sprake is van semi-spanningswater.

Gebruikte gegevens:

- Grondwaterstanden
- Afvoeren, gemeten bij de stuwen.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

- De gevonden slootweerstand bedragen 1,2 a 2,2 d bij een natte omtrek van 3,25 m.
- De grondwaterpotentialen naast de beek zijn 0.03 m hoger dan het beekpeil ter plaatse, hetgeen wijst op een zeer geringe bodemweerstand. Dit betekent dat de slootweerstand in belangrijke mate wordt gevormd door de radiale weerstand.

EVALUATIE

Het verslag is zeer sumier.

Het onderzoek toont het volgende aan:

- . de bodemweerstand van de beek is, ondanks het feit dat in het betreffende traject volgens de gemeten grondwaterstanden infiltratiecondities gelden, zeer klein ($c_b = 0.05$ d).
- . de beekweerstand (slootweerstand) wordt derhalve voornamelijk gevormd door de radiale weerstand.

Dit zijn interessante uitkomsten voor het inventarisatieonderzoek.

Nummer:	1985-3
Locatie:	Overijsselse Vecht gebied
Titel:	BEPALING VAN DE BODEMWEERSTANDEN IN EN ONDER WATER- GANGEN DOOR MIDDEL VAN INFILTRATIE PROEVEN IN HET GEBIED VAN DE OVERIJSSELSE VECHT - WEST
Uitv. inst.:	RIVM
Auteur(s):	Drs K.G.Lamsvelt
Public. nr:	deelrapport 840344005

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en): Het bepalen van de intreeweerstand (in het rapport bodemweerstand) van de sliblaag onder watergangen door middel van infiltratieproeven.

Belangrijkste onderwerpen: Infiltratie proeven; intree-/uittreeweerstand;

Essentie van het onderzoek:

In vier gebieden zijn slootproeven uitgevoerd:

- twee proeven werden uitgevoerd in laaggelegen veengebieden met een beheerst peil en overwegend kwelstroming (locaties: Stadsweg en Klaas Kloosterweg);
- twee proeven werden uitgevoerd op middelhoge zandgronden met vrije afwatering en overwegend infiltrerend grondwater (locaties: Schapendijk en Wemerveldweg).

De opzet van de proeven bestond uit het oproepen van een kunstmatige grondwaterstroming (d.m.v. een bemaling) rondom een afgesloten slootcompartiment, waarbij de dalingssnelheid van het slootpeil maatgevend is voor de grootte van de intreeweerstand. Als gevolg van de bemaling wordt de grondwaterspiegel naast de sloot verlaagd tot onder de slootbodem.

Geohydrologische situatie:

Op alle bovengenoemde locaties snijden de sloten door de bovenlaag tot in het onderliggende zandpakket. In de bodemlaag onder slootbodem kunnen zich met betrekking tot het grondwater twee verschillende situaties voordoen:

- a. de bodemlaag onder de slootbodem is en blijft verzadigd met grondwater met een potentiaal groter dan nul.
- b. op enige diepte onder de slootbodem is een freatisch vlak ontstaan, waarbij de potentiaal onder de bodem van de sloot gelijk aan nul is; slootwater percoleert door de onverzadigde zone naar de verzadigde ondergrond.

Welke situatie tijdens de proeven van toepassing was is niet bekend door het ontbreken van waarnemingsmiddelen onder slootbodern.

Gebruikte gegevens:

Slootproefgegevens: pompdebiet, slootpeil, grondwaterpeil, dikte sliblaag.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

Tabel 1: Overzicht resultaten

Locatie	c_b verz.	c_b onvz.	d_b	d_t	k_b	k_t	c_b	c_t
Klaas Kloosterweg	1,6	0,3	0,31	0,11	0,6	0,6	0,51	0,18
Stadsweg	0,9	0,5	0,25	0,08	1,3	0,01	0,19	8,0
Schapendijk	3,5	0,26	0,08	0,05	0,24	0,24	0,33	0,21
Weemerveldweg	7,0	2,7	0,36	0,24	0,15	0,15	2,4	1,6

b = bodern; t = talud; d = dikte; k = doorlatendheid; c = hydraulische weerstand

Gezien de onduidelijkheid ten aanzien van de stromingssituatie geven de resultaten slechts het traject aan waarbinnen de bodernweerstand ligt. Uit de tabel blijkt dat de dikte van de sliblaag op de taluds geringer is dan op de bodern. Dit leidt tot lagere weerstanden in taluds dan in de slootbodern bij dezelfde k-waarde.

De slootbodern liggen in alle gevallen in het zand; de diepte van de bovenkant, resp. onderkant van de sliblaag is 1,1 resp. 1,4 m-maaiveld, zodat de sloten behoren tot klasse 3.

Conclusies

In de laaggelegen veengebieden met beheerst oppervlaktewater peil en kwelstroming naar de watergangen bedraagt de orde van grootte van de weerstand van het bodernmedium bij neerwaartse stroming 1 à 2 dagen, en minimaal 0,5 dag.

Op de middelhoge zandgronden met een vrije afwatering en overwegend infiltratie en afstroming naar de watergangen bedraagt de orde van grootte van de weerstand van het bodernmedium bij neerwaartse stroming 3,5 à 7 dagen.

EVALUATIE

De proefresultaten geven een grove indicatie voor de hoogte van intree weerstanden onder verschillende condities. Helaas zijn de piezometrische condities onder de slootbodem (verzadigd/niet verzadigd) niet vastgelegd tijdens de proef, waardoor de interpretatie met een grote onzekerheid omgeven wordt.

Voor de beoordeling van de resultaten kunnen de normaal heersende geohydrologische condities van belang zijn: indien normaal infiltratiecondities heersen, kan een hogere weerstand ontstaan als gevolg van dichtslibbing van de bodem, dan onder kwelcondities mogelijk is.

Locatie	Klasse	Cond. normaal	Dikte slib (m)		Intree weerstand (d)	
			bodem	talud	verz.	Onverz.
Klaas Kloosterweg	3	kwel	0,31	0,11	1,6	0,3
Stadsweg	3	kwel	0,25	0,08	0,9	0,5
Schapendijk	3	inf.	0,08	0,05	3,5	0,3
Weernerveldweg	3	inf.	0,36	0,24	7	2,4

Uit de berekende bodem weerstanden kan met enige reserve worden geconstateerd dat de invloed van de bodemdichtslibbing in infiltratiegebieden in de resultaten tot uiting komt (vergelijk de normaal heersende condities).

Nummer:	1986-1
Locatie:	Waterschap 'De Veenmarken'
Titel:	PLANNING, DESIGN AND OPERATION OF SURFACE WATER MANAGEMENT SYSTEMS
Uitv. inst.:	ICW
Auteur(s):	P.J.T. van Bakel
Public. nr:	ICW, Rapport 13 (speciale uitgave); proefschrift

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Het ontwikkelen van een systematische benadering ter verbetering van de planning, het ontwerp en het gebruik van regionale oppervlakte water beheerssystemen - d.m.v. een case studie.

Belangrijkste onderwerpen: Oppervlaktewaterbeheersing; waterconservering; gecombineerd oppervlaktewater - grondwater model;

Essentie van het onderzoek:

- Geohydrologisch en waterhuishoudkundig onderzoek in het gebied
- Opzet van een waterbeheersmodel voor het gebied, inclusief componenten voor het hydrologische systeem en voor gewasopbrengst.
- Studie van de technische mogelijkheden en de economische effecten van oppervlakte water beheersing in het gebied.

Geohydrologische situatie:

- Een uitgebreid systeem van gegraven kanalen, monden en wijken waarvan de waterbeheersing d.m.v. stuwen kan worden geregeld. Licht hellend tot betrekkelijk vlak terrein tussen NAP + 12 m in het zuiden en NAP + 8 m in het noorden.
- De ondergrond bestaat uit een Holocene bovenlaag van voornamelijk veen en zand. De kanalen snijden daar doorheen tot in het watervoerend pakket. Onder de venige bovenlaag het eerste watervoerend pakket van gemiddeld 16 m dikte, bestaande uit zandige afzettingen Formaties van Drenthe en Peelo. Dit wordt in een deel van het gebied door een laag van Cromerien klei gescheiden van het onderste deel van het watervoerend pakket. Het onderste deel van het watervoerend pakket bestaat uit zandige afzettingen van de Formaties van Enschede, Urk, Harderwijk.

Gebruikte gegevens:

- Waterhuishoudkundige en geohydrologische gegevens van het Waterschap 'De Veenmarken' met name van het gebied 'De Monden' (zie ook rapport 1982-1)

RESULTATEN EN CONCLUSIES

(alleen voor zover voor het bodemweerstandsonderzoek van belang)

- Bij het berekenen van de verschillende weerstanden (horizontale, verticale, radiale en intreeweerstanden) zijn de formules van Ernst gebruikt:
 - . Bij een slootafstand van ca 170 m en een dikte van het eerste watervoerend pakket blijken de verticale weerstanden verwaarloosbaar klein t.o.v. de andere weerstanden te zijn.
 - . De drainage weerstanden liggen tussen 150 en 350 dagen voor dit geval. Er is een redelijke correlatie voor weerstand berekend met het model en die welke zijn afgeleid uit veldwaarnemingen.
- De intreeweerstand (ca 5 - 15% van de totale weerstand) werd niet erg beïnvloed door schoonmaak van de wijken.
- De weerstanden voor infiltratie condities is ca 10% lager dan die voor drainage condities. Deze constatering kan, voor dit geval, worden verklaard uit de toegenomen natte omtrek door het verhoogde peil bij de infiltratieproeven.
- De totale weerstand nam niet toe over een infiltratieperiode van 5 maanden. Dit bevestigt niet het idee dat de intreeweerstand onder infiltratiecondities toeneemt door afzetting van fijn materiaal.
- De verhouding tussen radiale en horizontale weerstand kan sterk veranderen bij aanwezigheid van een slecht doorlatende laag op geringe diepte (voorbeelden zijn uitgewerkt).
- De vormfactor van het freatische vlak is in het betreffende geval niet erg gevoelig voor het verschil in condities tussen drainage en infiltratie.
- De drainage weerstanden berekend uit de zakkingslijn (het uitputtingsverloop) van de grondwaterstand na natte perioden komt goed overeen met de volgens de stationaire methode berekende waarden.

EVALUATIE

- Het rapport geeft een gedetailleerd inzicht in de mogelijkheden van waterbeheersing in de veengebieden.
- In het kader van het onderzoek naar de weerstandsparameters zijn met name het verschaft inzicht in de verhoudingen en de gevoeligheden van de verschillende parameters van belang. Het onderzoek is voor wat betreft intreeweerstanden gebaseerd op vroeger onderzoek.

Nummer:	1987-1
Locatie:	Kanaal door Zuid-Beveland
Titel:	INSCHATTING VAN DE KWELVERANDERING LANGS HET KANAAL DOOR ZUID-BEVELAND ALS GEVOLG VAN VERBETERINGSWERKEN
Uitv. inst.:	DBW/RIZA
Auteur(s):	B.P.C. Steenkamp
Public. nr:	DBW/RIZA notitie 87.028X

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Het geven van een inschatting van de verandering van de kwel vanuit het Kanaal door Zuid-Beveland als gevolg van de verbeteringswerken aan het kanaal en de verlaging van de polderpeilen.

Belangrijkste onderwerpen: Kwel;

Essentie van het onderzoek:

- Afleiding van de hydraulische weerstand van de weerstandbiedende sliblaag onder de kanaalbodem uit berekende en gemeten verhanglijnen buiten het kanaal.
- Berekening van de kwel voor verschillende mogelijke peilen van het Kanaal door Z-Beveland.

Geohydrologische situatie:

- Een Holocene deklaag bestaande uit twee mariene pakketten gescheiden door een veenlaag (Hollandveen). De onderkant ligt op 4 a 5m beneden NAP. Deze laag is doorsneden door met zand gevulde geulen tot op het watervoerend pakket er onder. De bodem van het kanaal ligt, met uitzondering van het traject voor Wemerdinge, lager dan de onderkant van de deklaag. Onder de deklaag het eerste watervoerend pakket. Daaronder een scheidende laag met de bovenkant op ca NAP-40 m. Daaronder een tweede watervoerend pakket tot ca NAP-90 m. Op een diepte van NAP-90 m tot NAP-105 m bevinden zich de Oligocene kleiige zanden, die als hydrologische basis worden beschouwd.
- Het kanaalpeil op NAP + 0,15 m is hoger dan het polderpeil (NAP - 1,80 m), waardoor een kwelstroom naar het omliggende gebied in stand wordt gehouden. Deze kwelstroom wordt verondersteld met name door het eerste watervoerend pakket plaats te vinden. Het kanaalpeil zal afhankelijk worden van dat in het Oosterschelde Bekken.
- Volgens de gegevens lag de bodem van het kanaal in oude toestand vrijwel overal lager dan de onderkant van de slechtdoorlatende deklaag. Over de bodemweerstand van het kanaal waren geen gegevens.

Gebruikte gegevens:

- Waterstaatkundige gegevens en polderpeilen;
 - Bodemkundige gegevens;
 - Geohydrologische gegevens;
-

RESULTATEN EN CONCLUSIES

- Uit vergelijking van de gemeten en de met een analytische formule berekende verhanglijnen buiten het kanaal blijkt dat de beste schatting voor de c-waarde ca 30 dagen is. Deze weerstand wordt toegeschreven aan de sliblaag die uit bezinkende slibdeeltjes op de kanaalbodem is gevormd.
 - Becijferd wordt dat de kwel tot 200 % kan toenemen, bij het grootste verschil tussen kanaalpeil en polderpeil.
-

EVALUATIE

- Het rapport geeft tamelijk globale informatie met betrekking tot de dwarsprofielen en de berekeningen. De berekening van de bodemweerstand van het kanaal is slechts op één plaats in het midden van het kanaal (oostzijde) aan de hand van stijghoogtemetingen gecontroleerd en wordt verder niet door gedetailleerd onderzoek onderbouwd. De calibratie is niet erg nauwkeurig.
- Het rapport is voor het onderzoek interessant als een voorbeeld van de gevolgde methodiek bij grote kanalen. Het onderzoek toont aan dat de bodemweerstand voor de grote kanalen fors kan zijn, met name bij grote potentiaalverschillen.

Nummer:	1987-2
Locatie:	Twenthe kanaal, tussen Eefde en Lochem
Titel:	HYDROLOGISCHE EN BODEMFYSISCHЕ PARAMETERS IN DE OMGEVING VAN HET HOOFDKANAAL VAN DE TWENTHEKANALEN (Traject Eefde Lochem)
Uitv. inst.:	ICW
Auteur(s):	K.E.Wit; H.T.L.Massop; J.G.te Beest; M.Wijnsma.
Public. nr:	ICW nota 1751

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Het bepalen van hydrologische en bodemfysische parameters in de omgeving van het hoofdkanaal van de Twenthekanalen, tussen Eefde en Lochem, ten behoeve van modelstudies.

Belangrijkste onderwerpen: Kanaalweerstand, bodemweerstand, hydraulische weerstand afdekkend pakket.

Essentie van het onderzoek:

- De bodemweerstand van de kanaalbodem is bepaald door middel van doorlatendheidsmetingen aan steekmonsters.
- De hydraulische weerstand van het afdekkend pakket aan weerszijden van het kanaal is bepaald door middel van infiltratieproeven en door middel van doorlatendheidsmetingen aan enkele steekmonsters.
- De bodemfysische eigenschappen van de bovengrond in een strook van 500 m aan weerszijden van het kanaal zijn bepaald uit bodemprofielen.
- De bepaling van het doorlaatvermogen van de watervoerende pakketten in een strook van 500 m ter weerszijden van het kanaal is gedaan aan de hand van boorbeschrijvingen.

Voor het onderhavige onderzoek betreffende de intreewestanden is alleen onderdeel a. van belang.

Geohydrologische situatie:

- Het *afdekkend pakket*. In het westen varieert de dikte hiervan van 4m tot 6m, in oostelijke richting neemt de dikte af tot 1,5 à 3m. De afzettingen bestaan uit slibhoudende fijne zanden met overwegend bovenin plaatselijk veen- en leemlagen (Formatie van Twenthe).
- Het *eerste watervoerend pakket* bestaat uit grove grindhoudende zanden. De laagdikte bedraagt globaal 10 m en de onderkant is gelegen op een diepte van 15 m- maaiveld (Formatie van Kreftenheye).

- De *eerste scheidende laag* komt plaatselijk voor met een dikte van 0,5 tot 2,5 m (Eemformatie). Het tweede watervoerend pakket, dat reikt tot een diepte van 40-50 m, bestaat uit grove grindhoudende zanden.
- Het kanaal ligt met de bodem voor het grootste deel van het traject in het grofzandige bovenste watervoerend pakket. In het westen komen onder de kanaalbodem nog fijnzandige afzettingen van de Formatie van Twenthe voor. De bodem is tamelijk heterogeen. Doorgaans bestaat deze uit een baggerlaagje op, of ingebed in, zand of slibhoudende zandlagen.
- Het peil van het kanaalwater is hoger dan dat van het grondwater in de omgeving, zodat er een kwelstroom vanuit het kanaal naar de omgeving loopt.

Gebruikte gegevens:

- Steekmonsters;
- Infiltratieproeven;
- Bodemkaart;
- Boorbeschrijvingen.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

Deze worden alleen vermeld voor zover ze het onderzoek naar de bodemweerstand van het kanaal betreffen.

- Per proeflocatie werden 9 bodemmonsters goed verdeeld over de kanaalbodem (3 x 3) geanalyseerd. Tengevolge van de geconstateerde grote heterogeniteit van de kanaalbodem is het geometrisch gemiddelde van de 9 bepaalde weerstanden als representatief voor de locatie genomen.
- Met uitzondering van enkele locaties, varieert de resulterende gemiddelde locatie-bodemweerstand van 0,5 tot ca 7,5 dag. De hogere waarden konden worden verklaard uit oude geuldeposities (km 9, 9,5 en 10,5) of uit een sterke infiltratie vlak boven de stuw (km 4).
- Met name de baggerlaagjes leveren een grote bijdrage aan de verticale (bodem)weerstand. De algemene veronderstelling dat op de oorspronkelijke kanaalbodem door inspoeling van fijne deeltjes een weerstandslaagje zou ontstaan, is door het uitgevoerde onderzoek niet bevestigd.
- De auteurs tonen aan dat de gemiddelde weerstand van de bovenste meter van het bodemprofiel maatgevend is voor het kanaal.

EVALUATIE

(Alleen met betrekking tot het onderzoek aan de bodemweerstand)

Met betrekking tot de intreeweerstand van grotere kanalen is het onderzoek zeer interessant.

- De doorlatendheidsmetingen aan steekmonsters zijn uitgebreid en overtuigend gedocumenteerd.
- De resultaten leiden tot de conclusie dat de bodem van het kanaal zeer heterogeen is, des te meer door dat oude beekafzettingen worden doorkruist. Opvallend zijn de lage bodemweerstand: van de 21 locaties zijn er 9 met een bodemweerstand tussen 0,5 en 2 dagen, en hebben 17 een bodemweerstand van minder dan 7 dagen.

- Deze heterogeniteit is de reden van de sterk variabele doorlatendheden. Bij de meer complexe profielen is de correlatie tussen doorlatendheid (of de weerstand) met de monsterbeschrijving niet altijd duidelijk. Er is wel een algemene relatie tussen het voorkomen van slecht doorlatende (bagger)laagjes in het profiel en een gemeten hoge bodemweerstand waarneembaar.

Nummer:	1988-1
Locatie:	Valthermond, Waterschap De Veenmarken
Titel:	DRAINAGE - INFILTRATIE PROEFVELD VALTHERMOND Veldonderzoek betreffende drainage-omhullingsmaterialen in de Veenkolonin
Uitv. inst.:	HBCS, Velp
Auteur(s):	G. Dreise
Public. nr:	- ; stageverslag

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en): Het testen van verschillende omhullingsmaterialen ten behoeve van landbouwdrainage in een drainage/infiltratie proefveld

Belangrijkste onderwerpen: Testen omhullingsmateriaal; Q-h relatie bij drainage buizen (diameter 60mm).

Essentie van het onderzoek:

- Het testen van verschillende volumineuse en dunne omhullingsmaterialen (cerex, typar, cocos, polypropyleen, polystyreen, Big-o-kous), door vergelijking van gemeten Q-h relaties.
- Het testen van de effecten van verkleinde drainafstand (20 m, 10 m).

Geohydrologische situatie:

- Bodemopbouw is niet erg duidelijk uit het rapport
- Overgedimensioneerde wijken. Gestuwd gebied.
- Draindiepte 1.10 - 1.20 m onder maaiveld (NAP + ca 9.5 m); drainafstand 20 m.

Gebruikte gegevens:

- Grondwaterstanden;
- Afvoermetingen in proefveld 'De Veenmarken', Valthermond

RESULTATEN EN CONCLUSIES

Met betrekking tot de omhulling van drains blijkt uit het onderzoek:

- Door aanleg van de drains is er een duidelijke verlaging van de drainageweerstand met gemiddeld 10 - 35%. Voor de beste omhulling zelfs 77%.
- Volumineuze omhullingsmaterialen voldoen beter dan dunne.
- Er werd achteruitgang van dunne materialen in de tijd geconstateerd.

EVALUATIE

De resultaten van het onderzoek zijn bruikbaar als achtergrond informatie bij het onderzoek naar de intreeweerstanden.

Nummer:	1988-2
Locatie:	Waterschap Salland (te Averlo, Boerhaar, Broekland, Luttenberg, Espelo)
Titel:	INFILTRATIEPROEVEN WATERSCHAP SALLAND
Uitv. inst.:	WMO ?
Auteur(s):	Onbekend
Public. nr:	Rapport Raalte 1988

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Het door middel van infiltratieproeven in sloten (slootproeven) vaststellen van het effect een verhoging van het slootpeil op de grondwaterstand.

Belangrijkste onderwerpen: Grondwaterstandsbeïnvloeding; bodemweerstand

Essentie van het onderzoek:

Door opzetting van het waterpeil in het betreffende gebied en het aanvoeren van water door middel van pompen is de totale infiltratie bij een bepaald slootpeil bepaald.

Geohydrologische situatie:

In het beschikbare sumiere verslag zijn deze niet beschreven (Uit andere rapporten is echter bekend dat het bovenste deel van de ondergrond in Salland voornamelijk zandig is).

Ook over de klasse en diepte van de waterlopen is uit het verslag niets bekend.

Gebruikte gegevens:

(Voor de proef te Espelo)

- Wateraanvoergegevens;
- Slootpeilen;
- Grondwaterstanden.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

In het beschikbare verslag wordt een overzichtstabel gegeven van de resultaten van de proeven in de vijf gebieden. De berekeningsmethode voor de eerste vier gebieden wordt niet aangegeven. Bij de 'Infiltratieproef Espelose Broek' is ook de hoeveelheid water gemeten.

Infiltratieproef Espelose broek

Waarnemingen:

- Het verloop van het peil bij stuw 96 B.
- De grondwaterstand in 38 grondwaterstandsbuizen, gesitueerd in een drietal meetraaien loodrecht op de belangrijkste zijarmen van de waterloop.
- De grondwaterstand in een 'referentiebuis' van TNO, ver buiten het door de proef beïnvloede gebied.
- De neerslag
- De vochttoestand van de bodem.

Resultaat:

- Uit de vochtmetingen bleek dat de neerslag geen invloed had op de grondwaterstand in de betreffende periode.
- Per dag verdween door de slootwand een waterschijf van 0,30 m. Dit is de hoeveelheid die via de 10 pompen van de WMO in het proefgebied werd gepompt, gedeeld door het totale natte oppervlak van de waterlopen.
- De uit de infiltratiesnelheid en het gemiddelde peilverschil berekende bodemweerstand c_b bedroeg 1,33 dag.

Overzicht resultaten vijf gebieden

Gebied	Relatie openwater - grondwater			Infiltratie snelheid (mm/dag)	Bodemweerstand (dag)
	Verandering openwaterpeil (m)	Verandering ...grondwaterstand (m)	Afstand tot sloot (m)		
Averlo	0,18	0,14 - 0,10	0 - 400	200 - 300	0,6 - 1,3
Boerhaar	0,28	0,12 - 0,10	0 - 400		1,8 - 2,2
Broekland	0,40	0,12 - 0,05	0 - 400		8,6 - 10,1
Luttenberg	0,45	0,40 - 0,40	0 - 400		2,0 - 2,5
Espelo	0,90	0,55 - 0,30	0 - 400		1,0 - 2,0

- Bij de proeven van Averlo, Boerhaar en Broekland is geen stationaire toestand bereikt en dus ook niet gemeten.
- Het kleine effect van de peilverhoging in Broekland is waarschijnlijk te verklaren uit het feit dat de infiltratieproef net bovenstrooms van een stuw was gesitueerd.
- Het effect van de peilverhoging strekt over een afstand van meer dan 400 m uit.

EVALUATIE

- De beschrijving van de proeven in het beschikbare verslag is te [✓]sumier om een verder waardeoordeel aan de resultaten te koppelen.
- De uitkomsten zijn daardoor voorlopig alleen interessant als referentiewaarden.

?

Nummer:	1989-1
Locatie:	Nieuw-Dordrecht
Titel:	ONDERZOEK NAAR EFFECTEN BEHEERSMAATREGELEN OP DE CONSERVERING VAN EEN NEOLITISCHE VEENWEG BIJ NIEUW-DORDRECHT
Uitv. inst.:	Staring Centrum
Auteur(s):	K.E. Wit; H.Th.L. Massop; J.G. te Beest
Public. nr:	SC rapport 25

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Het vaststellen van de effecten van mogelijke beheersmaatregelen op de conservering van een Neolithische veenweg.

Belangrijkste onderwerpen: Hydraulische weerstand veenlagen; horizontale wateruittreding; voedingsweerstand.

Essentie van het onderzoek:

Het onderzoek was gericht op het vaststellen van de wijze waarop de veenwaterstand permanent boven het niveau van de veenweg kan worden gehandhaafd, alsmede op het vaststellen van mogelijke beheersmaatregelen die leiden tot een verhoging van de stijghoogte in de zandondergrond. Hierbij is nader onderzocht of de waterlopen worden gevoed vanuit de zandondergrond of met horizontaal uittredend water uit het veenpakket aan weerszijden. In concreto bestond het onderzoek uit 8 onderdelen, waaronder:

- Uitvoering van infiltratieproeven voor de vaststelling van de hydraulische weerstand van de verschillende lagen in het veenpakket.
- Inventarisatie van het waterlopen patroon en onderzoek naar de voedingsweerstand.
- Het schematiseren van de ondergrond en het uitvoeren van modelberekeningen.

Geohydrologische situatie:

- Een deels afgegraven hoogveenpakket met een dikte van enkele meters dat uitwigt in de richting van de Hondsrug.
- Onder deze deklaag komen twee watervoerende pakketten voor gescheiden door een scheidende laag. De onderzochte waterlopen snijden het bovenste watervoerende pakket aan.

Gebruikte gegevens:

- Debietmetingen; ,
 - Slooppeilen;
 - Grondwaterstanden.
-

RESULTATEN EN CONCLUSIES

(alleen voor zover wordt ingegaan op intreeweestanden van de waterlopen)

De voeding van de waterlopen kan plaatsvinden via horizontale uittreding van water uit het veen, en via de interactie met de zandige ondergrond. Uit het onderzoek werd gevonden dat de horizontale stroming door en uittreding van water uit het veen praktisch is te verwaarlozen.

De gemeten afvoeren hebben betrekking op slootpanden ter lengte van 750-1000 m. Grondwaterstandsmetingen zijn uitgevoerd in een raai dwars op de sloot. Terwijl de horizontale wateruittreding uit het veen is gemeten met een meetgoot: 60,5 cm breed en 100 cm lang.

De gevonden weerstandswaarden voor de sloten met een slootbreedte van 2 -2,3 m zijn:

- bodemweerstand 0,4 d.
 - radiale slootweerstand 0,4 d m⁻¹
-

EVALUATIE

- De belangrijkste uitkomst voor het onderzoek naar de intreeweestanden is dat de bodemweerstand van de sloten in het veen in het betreffende geval laag is.

Nummer:	1989-2
Locatie:	Witharen
Titel:	ONDERZOEK NAAR DE WAARDEN VAN BELANGRIJKE GEOHYDROLOGISCHE PARAMETERS IN HET GEBIED WITHAREN
Uitv. inst.:	KIWA
Auteur(s):	Ing. B.A.J.Meeuwissen en ing. A.Kap
Public. nr:	SWO-89.220

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

- Het verkrijgen van gegevens betreffende het doorlaatvermogen van het middeldiepe en diepe, en zeer diepe watervoerend pakket en van de hydraulische weerstand van de scheidende lagen, door middel van pompproeven.
- Het verkrijgen van gegevens betreffende de weerstand tussen het stelsel van waterlopen van verschillende afmetingen en het grondwater, door middel van slootproeven.

Belangrijkste onderwerpen: Radiale weerstand; hydrologische situatie aan Peelbreuk; effect compenserende maatregelen.

Essentie van het onderzoek:

- Uitvoering van een pompproef;
- Uitvoering van slootproeven in de Onderhaarse Leiding en het Ommerkanaal en berekening van de weerstanden.

Geohydrologische situatie:

De hydrogeologische opbouw van de ondergrond is als volgt:

- Een ondiep watervoerend pakket tussen NAP + 5 en NAP - 5 m, bestaande uit grove en matig fijn tot fijne zanden van de Formaties van Twente en Kreftenheye, plaatselijk afgewisseld met klei-, leem-, en veenlagen, tot op een diepte van ca 18 m. De klei, slib- en veenlaagjes van de Eemformatie vormen de bovenste scheidende laag.
- Onder de Eemklei volgen het middeldiepe watervoerend pakket (Formaties van Drente, Urk en Harderwijk) tot een diepte van ca 45 m - NAP, een scheidende laag van kleiige afzettingen van Tegelen tot ca 50 m - NAP, het grove deel van het diepe watervoerend pakket (Formatie van Scheemda) tot ca 85 m - NAP, en het fijne deel van het diepe watervoerend pakket (Formatie van Oosterhout).

De belangrijkste waterlopen in het gebied zijn het Ommerkanaal, de Onderhaarse Leiding en de Leiding. De stroming naar deze waterlopen wordt beïnvloed door de aanwezigheid van de Eemklei.

Gebruikte gegevens:

- geohydrologische gegevens
- pompproefgegevens
- oppervlaktewaterpeilen
- afvoergegevens van meetstuwen (z.g. Rossumstuwen)
- grondwaterstanden

RESULTATEN EN CONCLUSIES

(Voor zover van belang voor het onderzoek naar de weerstandsparameters)

Bodemweerstand Onderhaarse Leiding

Als gevolg van de vreemde verhanglijn van de grondwaterstand onder de waterloop kon geen radiale weerstand worden berekend uit de meetraai.

De bodemweerstand is berekend uit de waterbalans van het proeftraject. De voor verschillende perioden (dagen) berekende bodemweerstand varieert, met name als gevolg van de niet-stationaire situatie en meeton nauwkeurigheden in de peilen, tussen 0,24 en 2,62 dagen. De gemiddelde bodemweerstand uit 6 resultaten werd berekend op 1,1 d met een standaardafwijking van 0,9 d.

Bodemweerstand Ommerkanaal

Er is geen goed traject beschikbaar voor een slootproef. Daarom zijn de radiale weerstand en de bodemweerstand bepaald uit metingen in een raai. De bodemweerstand werd berekend met de formule: $c_b = B \times (h - h_0)/q_b$, waarbij q_b wordt berekend uit de grondwaterstroming bij een doorlaatvermogen van 580 m²/dag. De natte omtrek is voor dit geval gelijk aan de bodembreedte, omdat de taluds zijn voorzien van een waterdichte afscherming.

De gemiddelde bodemweerstand van het kanaal (zandige ondergrond, drainage condities) uit 10 bepalingen werd berekend op 2,2 d met een standaardafwijking van 0,7 d.

EVALUATIE

De proef en berekeningen voor het Ommerkanaal (klasse 4) lijken betrouwbaar, maar de uitkomst is sterk afhankelijk van een eerder vastgesteld doorlaatvermogen van de ondergrond. Dit is in feite geen slootproef maar een proef aan een geohydrologische dwarsprofiel. De berekende bodemweerstand is van de verwachte orde van grootte.

Bij de slootproef van de Onderhaarse Leiding zullen de uitkomsten van de berekeningen, als gevolg van de ongunstige niet-stationaire situatie, met een korrel zout moeten worden genomen. De berekende waarden voor de bodemweerstand van de leiding (klasse 3) zijn overigens van de verwachte orde van grootte.

Nummer:	1991-1
Locatie:	Provincie Drenthe
Titel:	RELATIE TUSSEN OPPERVLAKTEWATER- EN GRONDWATER IN DE PROVINCIE DRENTHE
Uitv. inst.:	SC-DLO
Auteur(s):	K.E. Wit; H.Th.L. Massop en J.G. te Beest
Public. nr:	SC rapport 134

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

- Uitvoering van slootproeven om de theoretische waarden voor de voedings- en/of drainageweerstand te onderbouwen;
- Uitvoering van modelonderzoek met het accent op de kwantitatieve en kwalitatieve analyse van de processen bij infiltratie vanuit en drainage naar waterlopen.

Belangrijkste onderwerpen: Voedingstype waterlopen; bodemweerstand; voedings- en drainageweerstand; infiltratielichaam onder sloten.

Essentie van het onderzoek:

- In het onderzoek zijn met behulp van veldmetingen (zie gebruikte gegevens) in een 19-tal proefgebieden de in het grondwaterplan van Drenthe berekende waarden van de voedings- en/of drainageweerstand getoetst. (In het betreffende grondwaterplan zijn de opgegeven waarden per km² berekend op basis van de bodemgesteldheid en van gegevens betreffende het waterlopenstelsel). De bodemweerstand is bepaald 1) uit infiltratieproeven en 2) uit afvoermetingen en grondwaterstandsmetingen in raaien.
- De belasting van het grondwater is afhankelijk van de kwaliteit van het aangevoerde water. Door modelonderzoek is de vorming van een infiltratielichaam onder infiltrerende waterlopen en de beïnvloeding hiervan door drainage in het winterhalfjaar nagegaan.

Aangetroffen geohydrologische situatie:

In de provincie Drenthe wordt op veel plaatsen op geringe diepte in de voornamelijk zandige ondergrond een weerstandbiedende laag aangetroffen (keileem en beekleem). In het grondwaterplan zijn, op basis van de aanwezigheid en diepteligging van de weerstandbiedende lagen ten opzichte van slootbodem, vijf voedingstypen onderscheiden. Deze zijn:

- A1) geen weerstandbiedende laag aanwezig,
- A2) waterlopen doorsnijden/steken door de weerstandbiedende laag,
- B) waterlopen liggen boven de weerstandbiedende laag,

C1/C2 waterlopen liggen gedeeltelijk in de weerstandbiedende laag.

Gebruikte gegevens:

- Infiltratiemetingen in waterlopen;
- Afvoermetingen van stuwen en sloten;
- Grondwaterstand en stijghoogte in raaien;
- Gegevens uit het rapport van de technische werkgroep Grondwaterplan.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

(alleen voor zover van belang voor het onderzoek naar de weerstandsparameters)

- Met behulp van een stalen cylinder zijn op een beperkt aantal locaties in de hoofdwaterloop infiltratieproeven uitgevoerd. De gevonden waarden variëren van 2,3 tot 7,5 dagen en hebben betrekking op de laag van 30-40 cm onder de slootbodem. Deze waarden zijn hoger dan de eerder aan de hand van de stijghoogte in raaien berekende waarden.

Tabel 11 (betreffende rapport): Resultaten van metingen met cylinder

Nr.	Proefgebied	Infiltratie (mm/d)	Lengte (cm)	Drukverschil (cm)	Bodemweerstand c_b (d)	Verticale doorlatendheid k_v (cm/d)
1	Beilen	6	42	4,40	7,4	5,7
4	Geesbrug	70	38	16,10	2,3	16,5
5	't Haantje	25	36	12,70	5,1	7,1
6	Noordsche Schut	26	30	14,70	5,7	5,3
8	Uffelte	1	44	0,75	7,5	5,9

- Voor de vaststelling van de bodemweerstand is het gemiddelde grondwaterstandsverloop in een raai loodrecht op een waterloop bepaald. De grootte van de flux door de slootbodem is berekend uit de totale gebiedsafvoer te vermenigvuldigen met een factor voor de verhouding tussen het gebiedsoppervlak en het totale oppervlak van de sloten. De raai is daarbij als representatief genomen voor het onderzochte gebied. De gevonden waarde voor de bodemweerstand (die in feite ook de radiale weerstandscomponent inhoudt, zie opmerking) varieert tussen 0,3 en 4,7 d.
- Opmerking: In tabel 12 van het rapport wordt de bodemweerstand c_b bepaald uit metingen in een raai. Daarbij is de radiale weerstandscomponent impliciet meegenomen. Indien het resultaat wordt vergeleken met de componenten volgens de formule van Ernst, dan wordt hier in feite het totaal van $B\Omega + c_b$ (het totaal van radiale weerstand en de bodemweerstand, in dagen) bepaald. De feitelijke bodemweerstand zal dus kleiner zijn of maximaal gelijk aan de hier berekende waarden.
- Uit de onderzoeksresultaten is niet gebleken dat de bodemweerstand van waterlopen, die alleen draineren, verschilt van die van waterlopen die afwisselend draineren en infiltreren.
- De heterogene opbouw van de ondergrond geeft aanleiding tot het onderscheiden van meerdere voedingstypen binnen hetzelfde proefgebied. Dit is van belang voor de bepaling van de drainageweerstand en/of voedingsweerstand.

Tabel 12: Bodemweerstanden en drukverschillen, afgeleid uit grondwaterstanden en afvoeren

Nr.	Proefgebied	Flux q (mm/d)	Factor γ	Flux q_b (mm/d)	Hoofdsloot		Zijsloot	
					druk- verschil h_{rad} (m)	bodem- weerstand c_b (d)	druk- verschil h_{rad} (m)	bodem- weerstand 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	Nijveen	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

EVALUATIE

Met betrekking tot de berekende bodemweerstanden wordt een verschil gesignaleerd in de resultaten van verschillende methoden. Geconstateerd wordt dat de bodemweerstand berekend uit infiltratieproeven aanmerkelijk hoger is dan die welke berekend wordt uit de dwarsraaien en de gebiedsafvoeren. De aanduiding van de bodemweerstand in tabel 12 is enigszins misleidend: in feite gaat het om een totaal van een radiale en een bodemweerstandsc component ($B\Omega + c_b$). Waarschijnlijk is de feitelijke bodemweerstand dus kleiner dan de hier berekende. Dit verandert evenwel niet veel aan de conclusie.

Mogelijke verklaringen voor dit verschil zijn:

1. *Het schaalverschil:*

- De infiltratieproeven geven zeer locale waarden die kunnen afwijken van de bodemweerstand van de sloten als geheel, vanwege de heterogeniteit van de slootbodem.
- De meetraaien zijn als representatief beschouwd voor het onderzoeksgebied, maar zij vertegenwoordigen in feite twee dimensionale doorsneden daarvan. Dit kan aanleiding zijn tot verschillen in berekende bodemweerstanden.

2. *Het effect van de taluds.*

In de infiltratieproeven doen de taluds niet mee. Bij de berekening van de bodemweerstand uit de grondwaterstand in raaien en de gebiedsafvoer wel. Ook uit ander onderzoek is gebleken dat de taluds een lagere weerstand kunnen hebben dan de bodem, waardoor de 'gemiddelde weerstand' voor bodem en taluds van waterlopen lager is. Hierdoor zou een groot deel van het verschil kunnen worden verklaard.

Nummer:	1992-1
Locatie:	Liessel, Waterschap De Aa, Noord-Brabant
Titel:	GEVOLGEN VAN MAATREGELEN OM HYDROLOGISCHE EFFECTEN VAN EEN ONTGRONDING TE LIESSEL TE COMPENSEREN
Uitv. inst.:	SC-DLO
Auteur(s):	J.G.te Beest, K.E.Wit
Public. nr:	Rapport 220

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

Onderzoek in aanvulling op eerder hydrologisch onderzoek naar de effecten van uitbreiding van de ontgronding te Liessel (in opdracht van de kalkzandsteen fabriek) op de waterhuishouding in de aangrenzende gebieden. De doelstellingen van het aanvullende onderzoek zijn:

- Het verkrijgen van gedetailleerde gegevens over de geohydrologische situatie;
- Het verkrijgen van inzicht in de maatregelen die de te verwachten grondwaterstandsverlagingen in verband met de uitbreiding kunnen compenseren.

Belangrijkste onderwerpen: Kwel; radiale weerstand; hydrologische situatie aan Peelbreuk; effect comp. maatregelen.

Essentie van het onderzoek:

- Veldonderzoek naar de radiale weerstanden van waterlopen, het doorlaatvermogen van watervoerende pakketten en de hydraulische weerstand van scheidende lagen in het gebied langs de Peelrandbreuk.
- Uitvoering van simulatieberekeningen en validatie van de berekeningen door vergelijking van de uitkomsten met gemeten gegevens.
- Uitvoering van modelberekeningen voor drie scenario's.

Geohydrologische situatie:

- Westelijk van de Peelrandbreuk twee watervoerende pakketten, gescheiden door een slecht doorlatende laag. Oostelijk van de Peelrandbreuk een dunner watervoerend pakket bestaande uit twee lagen (Nuenengroep en Formatie van Veghel en Sterksel).
- De situatie anno 1991 is dat door het relatief lage gehandhaafde peil van de ontstane plas in het gehele omringende gebied kwel bestaat.
- De bemeten sloten snijden door de deklaag tot in het onderliggende watervoerend pakket

Gebruikte gegevens:

- Infiltratiemetingen in sloten;
 - Profielgegevens, peilen en afvoeren van waterlopen;
 - Grondwaterstand en grondwaterstijghoogte;
 - Gegevens van mini-pompproeven.
-

RESULTATEN EN CONCLUSIES

(Voor zover van belang voor het onderzoek naar de weerstandsparameters)

Ten oosten van de Peelrandbreuk (tot aan de erosierand) reiken de grofzandige afzettingen betrekkelijk dicht tot aan het maaiveld. Hierdoor hebben de waterlopen een geringe radiale weerstand en is de grondwaterstand praktisch gelijk aan de stijghoogte. Er is derhalve sprake van één freatisch watervoerend pakket.

Met betrekking tot de intreeweerstanden zijn relatief veel gegevens ingewonnen. Infiltratie metingen werden gedaan op 10 locaties. Bodemonsters werden genomen op 18 locaties in dezelfde sloten. De metingen met infiltratiemeters (cilinders met oppervlak van 0,785 en 0,188 m²) in de sloten en onderzoek naar de samenstelling van de slootbodem tonen aan dat:

- De resultaten van infiltratiemetingen in de afzonderlijke cilinders op enige afstand van elkaar waren zeer homogeen.
- De weerstand van de slootbodem ligt tussen 0,1 en 1,8 dag met een gemiddelde van 0,6 dag voor zandige bodems.
- De radiale weerstand lag voor de onderzochte situatie tussen 0,1 en 1,6 d/m met een gemiddelde van 0,6 d/m.

Met betrekking tot het peilbeheer op de plas zijn een aantal conclusies geformuleerd die aangegeven dat de situatie van kwel en infiltratie 'neutraal' kan worden gemaakt door het plaspeil te handhaven op de gemiddelde grondwaterstand in het gebied.

EVALUATIE

Het rapport is van direct belang voor de studie naar de intreeweerstanden van waterlopen.

Nummer:	1994-1
Locatie:	Oostelijk Gelderland
Titel:	HYDROLOGISCH ONDERZOEK NAAR DE DRAINAGE- WEERSTANDEN VAN HET TERTIAIR ONTWATERINGSSTELSEL IN OOST-GELDERLAND
Uitv. inst.:	DLO-Staringcentrum
Auteur(s):	H.Th.L. Massop en P.A.J.W. de Wit
Public. nr:	DLO-SC, rapport 373

AARD EN OMVANG ONDERZOEK

Doelstelling(en):

- Bepaling van de drainageweerstand van het tertiair waterlopenstelsel uit veldmetingen op een aantal locaties in Oost-Gelderland;
- Berekening van de drainageweerstand in de niet-bemeten gebieden van het onderzoeksgebied, op basis van de gevonden relaties.

Belangrijkste onderwerpen: Geohydrologische gebiedskenmerken, drainageweerstand, intreeweerstand.

Essentie van het onderzoek:

- Voor het gehele onderzoeksgebied van Oost-Gelderland zijn per km² de gebiedskenmerken geohydrologie, dichtheid waterlopenstelsel en grondwatertrap in kaart gebracht. Vervolgens is vastgesteld welke combinaties van gebiedskenmerken voorkomen.
- Voor de 15 combinaties die het grootste oppervlak vertegenwoordigen, zijn proefgebieden geselecteerd.
- In de geselecteerde gebieden zijn de basisgegevens voor het vaststellen van de drainageweerstand en de uitreeweerstand door middel van veldonderzoek verzameld. Uit de gegevens zijn per klasse van waterloop waarden afgeleid voor de drainageweerstand en de intreeweerstand van de slootbodem.
- Tenslotte is de relatie vastgesteld tussen gebiedskenmerken en de drainageweerstand in de bemeten proefgebieden. Op basis van de gevonden relatie en de gebiedskenmerken in het onderzoeksgebied is geëxtrapoleerd naar niet bemeten gebieden.

Geohydrologische situatie:

- Aan het maaiveld komen hoofdzakelijk dekzandafzettingen (Formatie van Twente) voor. In een strook langs de Rijn, IJssel en Oude IJssel komen kleiafzettingen voor aan maaiveld.

- In het westelijk deel van de Oost-Gelderland vinden we hieronder een dik watervoerend pakket met een groot doorlaatvermogen. In het oostelijk deel van de Achterhoek is dit watervoerend pakket dunner ($kD < 100 \text{ m}^2/\text{d}$).
- Onder het watervoerend pakket ligt de als ondoorlatend geklassificeerde basis. In het oosten van de Achterhoek komen hierin plaatselijk diepe geulen voor, waardoor het doorlaatvermogen van het watervoerend pakket terplaatse hoger is.
- Nabij Neede komt een gebied voor waar het dunne bovenste deel van het watervoerend pakket door Eemklei is gescheiden van het onderste diepe deel van het watervoerend pakket.

Gebruikte gegevens:

Voor Oost-Gelderland als geheel:

- dichtheid van de waterlopen;
- grondwatertrappen;
- hydrogeologische gegevens.

Per proefgebied:

- ligging en dimensies van de waterlopen;
- slootwaterpeilen en afvoerperiode;
- gebiedsafvoeren;
- grondwaterstanden:
 - . per klasse van waterloop (Klassen 1, 2 en 3) een filter in de slootbodem
 - . per klasse van waterloop een peilbuis op ca 10 m vanuit de sloot;
 - . per gebied een peilbuis op een 'gemiddelde' locatie.

RESULTATEN EN CONCLUSIES

(alleen voor wat betreft de intreeweestanden)

Voor het vaststellen van de intreeweestand, die gesitueerd wordt gedacht in het overgangsgebied tussen grondwater en oppervlaktewater (slootbodem en sloottalud), zijn gegevens nodig betreffende de grootte van de flux door bodem en talud en van het potentiaalverschil over deze laag.

Per proefgebied is uit de aanwezige klassen van waterlopen van elke klasse een waterloop geselecteerd voor de installatie van meetraaien. Ter bepaling van het potentiaalverschil over de slootbodem is een filter in de bodem geplaatst. Uit de stijghoogte in dit filter en het slootwaterpeil is het potentiaalverschil vastgesteld. De flux is berekend door de gebiedsafvoer te delen door het totale natte oppervlak van de (watervoerende) waterlopen in het gebied waarvoor de afvoer geldt. Daartoe is de relatie bepaald tussen de grondwaterstand en het totale natte oppervlak binnen het proefgebied.

De bodemweerstand c_b is berekend uit het potentiaalverschil over de slootbodem en de flux. De radiale weerstand c_r is berekend door het potentiaalverschil tussen de buis op 10 m uit de sloot en die in de slootbodem, te delen door de flux. Op deze wijze zijn voor meerdere meetdagen waarden afgeleid voor de intreeweestand. Voor de presentatie is vervolgens de mediane waarde geselecteerd. De gevonden waarden zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: Mediaanwaarden van de intreeweerstand en radiale weerstand (in dagen), gegroepeerd per hydrogeologische eenheid

Proefgebied	Hydrogeologische eenheid	klasse 3		klasse 2		klasse 1	
		c_b	c_r	c_b	c_r	c_b	c_r
Giesbeek Zeddam	Dik WVP, kD 1000-4000 m ² /d, kleijge deklaag tot 80 cm	(0,7) 0,7	1,4	1,1 0,8	2,6 0,3		
Zieuwent Lochem Ruurlo Westendorp	Freatisch WVP, kD 1000-4000 m ² /d	0,3 1,9 1,1 (4,0)	1,4 0,3 1,3	0,3 2,4 -	0,3 0,5 0,2	0,2 0,1 (1,4)	0,2 0,3
Winterswijk	Freatisch WVP waarin geulen, kD 500-1500 m ² /d	0,6	0,8	0,7	0,5	1,1	0,2
Aalten Miste	Freatisch WVP waarin geulen, kD 100-500 m ² /d	0,2 0,3	0,9 1,7	0,2 0,5	0,1 4,3	(1,2)	
Beltrum Borculo	Freat WVP met kD<100 m ² /d door Eemklei gescheiden van WVP met kD 1000-2000 m ² /d	1,4 2,1	1,0 1,0	0,2 0,1	0,2 0,8		
Eibergen Rekken Vragender	Freatisch WVP, kD<100 m ² /d	0,2 (4,7) 0,9	2,6 1,7	0,0 0,0 -	3,0 4,0 -	0,2 0,5	2,6 2,8

(4.7) is totaal van c_b en c_r

De resultaten geven een relatief grote spreiding van intreeweerstand te zien, die mede het gevolg zijn van de grote variatie in hydrogeologische condities van de verschillende proefgebiedjes en verder van beperkingen in het meetprogramma: er werd noodgedwongen gebruik gemaakt van momentopnamen en de kleinere waterlopen doen slechts korte tijd mee aan het afvoerproces.

- De totale intreeweerstand varieert tussen 0,3 en 4,8 d.
- Bij een dik freatisch watervoerend pakket worden intreeweerstand gevonden van gemiddeld 0,7 d, met uitlopers tot 2,4 d; er is geen significant verschil in de intreeweerstand van de waterlopen van klassen 3, 2 en 1, alhoewel de laatste op het oog iets lager zijn.
- In gebieden met een dik watervoerend pakket afgedekt door een kleilaag aan maaiveld wordt plaatselijk een hoge weerstandswaarde gevonden voor klasse 2 (slootbodem in klei) tegen een lage waarde voor klasse 3 (slootbodem steekt door kleilaag).
- Voor gebieden met een zeer dun watervoerend pakket, worden vrij hoge waarden gevonden voor de som van radiale en intreeweerstand. De proefgebieden liggen in een hellend gebied waar hoge stroomsnelheden voorkomen in het slotenstelsel (de slootbodem is lokaal bekleed met filterdoek en stenen, zoals in Vragender) en veel materiaaltransport plaatsvindt (zandvang Rekken). Verder zijn lokaal de pakketten zo dun dat de slootbodem in klei/leemondergrond ligt.

EVALUATIE

- Dit is het enige rapport waarin de kleine klassen waterlopen apart aandacht hebben gekregen, ondermeer als gevolg van het parallel lopende project 'Ontwateringsstelsels'. Het rapport geeft een overzicht van de onderzoeksresultaten in 15 proefgebiedjes. Daarin is de relatie gelegd tussen de gebiedskenmerken (eigenschappen ontwateringsstelsels en hydrogeologische opbouw) en de drainageweerstand. Het meetprogramma van de verschillende gebiedjes is zodanig ingericht dat met betrekking tot de intreeweerstand van de verschillende klassen waterlopen gegevens werden verkregen.
- De resultaten geven een relatief grote spreiding van intreeweerstand te zien, die mede het gevolg zijn van de grote variatie in hydrogeologische condities van de verschillende proefgebiedjes en verder van beperkingen in het meetprogramma: er werd noodgedwongen gebruik gemaakt van momentopnamen en de kleinere waterlopen doen slechts korte tijd mee aan het afvoerproces.
- Het is niet goed mogelijk op grond van de gegevens verregaande conclusies te trekken omtrent de verhoudingen in de intreeweerstand van verschillende klassen waterlopen. Een voorzichtige interpretatie toont evenwel dat bij een dik freatisch watervoerend pakket intreeweerstand worden gevonden van gemiddeld 0,7 d, met uitlopers tot 2,4 d. *Er is geen significant verschil gevonden in de intreeweerstand van de waterlopen van klassen 3, 2 en 1.* De som van radiale en intreeweerstand kan plaatselijk oplopen tot ca 5 dagen, als gevolg van de locale condities, waarbij de bodem in de klei ligt.
- De vaststelling van de drainageweerstand van de proefgebiedjes op grond van de afvoeren, de oppervlaktewaterpeilen en de grondwaterstanden in het gebied is een proces waarbij locale verschillen worden uitgemiddeld. Verwacht wordt dat de onbetrouwbaarheidsmarges van deze macroparameter als gevolg van de niet-stationairiteit van de processen, meetfouten, enz. beperkt kunnen worden tot bijvoorbeeld 10 tot 30 % van de waarde.

