

Nationaal Hydrologisch  
Instrumentarium - NHI  
Modelrapportage



Deelrapport Freatische Lekweerstand

December 2008



Nationaal Hydrologisch  
Instrumentarium - NHI  
Modelrapportage



Deelrapport Freatische Lekweerstand

versie : NHI\FASE\_1+\2008\DR5\v1.2

December 2008



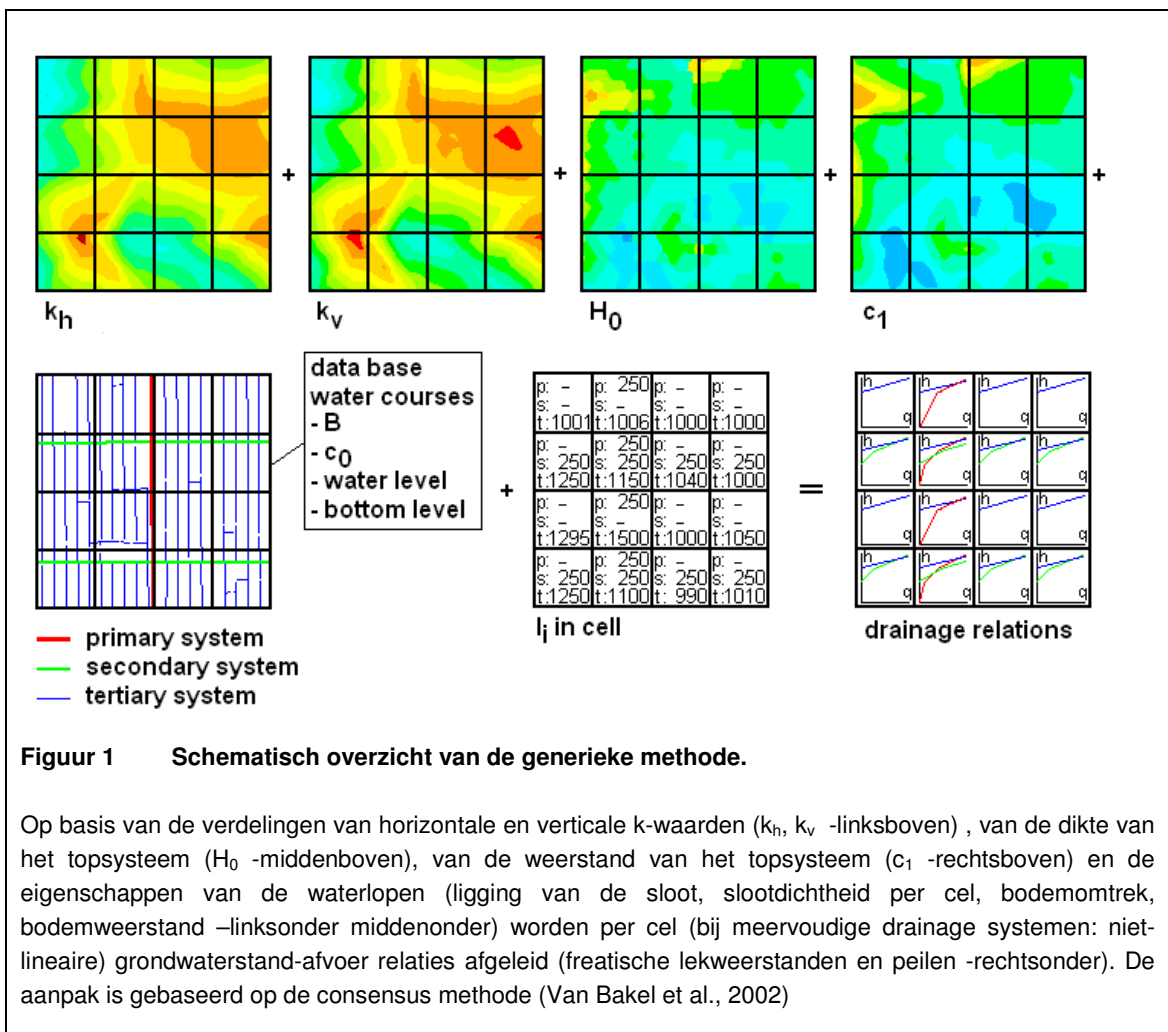
<b>INHOUD</b>	<b>BLAD</b>	
1	INLEIDING	5
1.1	Doel	5
1.2	Aanleiding	6
1.3	Resultaten	7
1.4	Leeswijzer en samenvatting	8
2	BESCHRIJVING GEBRUIKTE METHODE VOOR NHI FASE 1+	10
2.1	Vertaling van NHI freatische lekweerstand naar MODFLOW conductance	10
2.1.1	Vertaling freatische lekweerstand in MODFLOW conductance	11
2.2	GIS gebaseerde berekeningen	16
2.2.1	Bepaling parameter waarden van topsysteem	16
2.2.2	Bepaling van representatieve slootafstand per MODFLOW cel	18
2.3	Gehanteerde formules voor weerstand berekening per cel	20
2.3.1	Berekening weerstand bij alleen het primaire systeem	20
2.3.2	Berekening weerstand bij twee systemen	22
2.3.3	Berekening weerstand bij drie systemen	23
2.4	Toepassingsbereik methode NHI 1+, aanbevelingen en conclusies	25
2.4.1	Toepassingsbereik	25
2.4.2	Plausibiliteit	25
2.4.3	Conclusies	26
3	AANVULLEND ONDERZOEK: GEVOELIGHEIDSANALYSE	27
4	NIEUW ONDERZOEK: WEERSTANDEN VOOR EEN MEERVOUDIG DRAINAGESYSTEEM	31
4.1	Werking van alleen het primaire systeem	32
4.2	Bijschakeling van het secundaire systeem	32
4.3	Bijschakeling van het tertiaire systeem	36
4.4	Plausibiliteit	40
4.4.1	Beschrijving gebruikt model	40
4.4.2	Aannames	41
4.4.3	Beschrijving basis berekeningen	41
4.4.4	Invloed van het neerslagoverschot op de freatische lekweerstand	42
4.4.5	Vlakdrainage	44
4.4.6	Situatie met gelijke peilen	45
4.4.7	Afname weerstand van primair stelsel door bijschakelen secundair stelsel.	46
4.4.8	Situatie met verschillende peilen	47
4.4.9	Conclusies	47
4.5	Toepassingsbereik	48
4.6	Aanbevelingen	48
5	REFERENTIES	49
6	BIJLAGE: FORTRAN PROGRAMMA VOOR FREATISCHE LEKWEERSTAND	51
	COLOFON	62

**NHI**

# 1 INLEIDING

## 1.1 Doel

Het voorliggende deelrapport “**Freatische Lekweerstand**” beschrijft de ontwikkeling van een generieke methode om op basis van GIS-bestanden voor vierkante elementen de drainage relaties tussen het grondwater en de aanwezige oppervlaktewaterstelsels af te leiden. Er wordt gewerkt met drie drainageniveaus (ook wel systemen genoemd): primair, secundair en tertiair. In Figuur 1 is dit schematisch weergegeven.

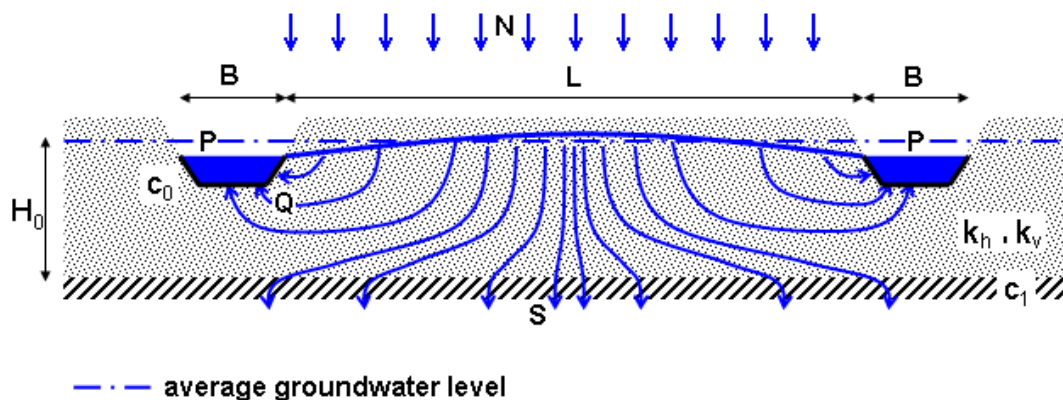


## 1.2 Aanleiding

In de afgelopen jaren is er door de 'Ad hoc werkgroep Consensus Hydrologie' toegewerkt naar een eenduidig concept met betrekking tot de uitwisseling grondwater-oppervlaktewater (zie b.v. de artikelenreeks in Stromingen, 2002), ofwel de freatische lekweerstand (zie tekstbox hieronder).

### **Freatische lekweerstand versus drainage- en voedingsweerstand**

*Dit onderzoek richt zich specifiek op de freatische lekweerstand, dat is de weerstand die het freatische grondwater binnen een cel ondervindt bij stroming naar alle oppervlaktewateren. De term freatische lekweerstand wordt hier gehanteerd om aan te geven dat de cel-weerstand afhangt van de celgrootte en de veldeigenschappen binnen het celgebied (zie De Lange 1997a, Groenendijk et al 2002). Deze is niet gelijk aan de drainage weerstand (Ernst, 1961) omdat die gekoppeld is aan oppervlakte water / drainage stelsels (in veldsituaties) die geheel of gedeeltelijk binnen de cel kunnen vallen.*



**Figuur 2**      **Stroming van grondwater naar een enkelvoudig grondwater afvoer stelsel.**

*De voedingsweerstand is de weerstand tussen de oppervlakte wateren en het grondwater in het onderliggende watervoerend pakket. De voedingsweerstand bestaat uit de som van de freatische lekweerstand en de weerstand tegen verticale stroming door de scheidende laag onder het freatisch pakket. Figuur 2 geeft een overzicht hiervan voor een enkelvoudig grondwater afvoer stelsel.*

In de voorgaande NHI fase (fase 1) is de generieke methode uit MONA (RWS, Vermulst en De Lange 1999) overgenomen waarmee op basis van GIS-bestanden en GIS-scripts de drainagerelaties tussen het grondwater en de aanwezige oppervlaktewaterstelsels worden berekend voor oppervlakte elementen (cellen).

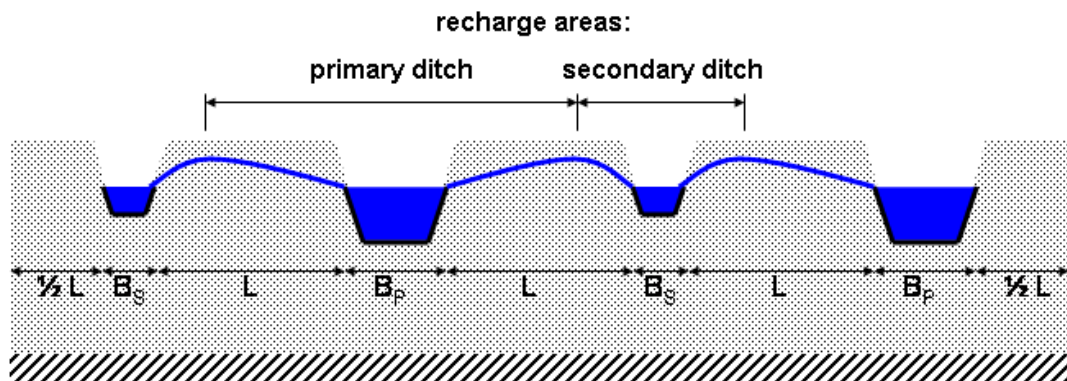
In NHI fase1+ is opnieuw vastgesteld hoe de freatische lekweerstanden worden berekend. Doordat in het NHI een aantal nieuwe partijen (ten opzichte van de "consensus groep", Van Bakel 2002) deelneemt met eigen achtergrond kennis, zijn de inzichten over het gebruik van freatische lekweerstanden vernieuwd en aangevuld. De discussie hierover is nog niet afgerond (hoofdstuk 4) en heeft daarom geleid tot beperkte nieuwe implementaties in NHI 1+ (hoofdstuk 2), mede vanwege de beperkte mogelijkheden tot vernieuwing in NHI 1+.



In deze rapportage is voor de praktische oplossing gekozen om bestaande en nieuwe berekeningswijzen van freatische lekweerstand te splitsen. Hiermee wordt tevens voorkomen dat de nog lopende discussie zich vermengd met de huidige methode die gebruikt is in NHI fase 1+.

### **Samenwerkende drainagesystemen**

De bepaling van de freatische lekweerstand van twee of drie samenwerkende drainagesystemen gebeurt op basis van de intrekgebieden van de afzonderlijke systemen. Daarbij wordt uitgegaan van identieke afstanden tussen parallel liggende drainerende elementen (sloten). Figuur 3 geeft het principe van deze benadering weer.



**Figuur 3 Drainage van grondwater naar een tweevoudig drainagesysteem**

Als beide drainagesystemen in werking zijn, is de verhouding tussen de grootte van beide freatische lekweerstand omgekeerd evenredig met de verhouding tussen beide intrekgebieden.

## **1.3 Resultaten**

De resultaten bestaan uit:

- een GIS methode om de drainagerelaties af te leiden, en
- de parametrisatie voor MODFLOW van de freatische lekweerstand in de vorm van grids op 250x250 m van de conductance (doorlaatvermogen) voor drie drainageniveaus.

## 1.4 Leeswijzer en samenvatting

In **hoofdstuk 2** wordt gedocumenteerd hoe in NHI fase 1+ de freatische lekweerstand worden berekend en worden vertaald naar MODFLOW invoerparameters. Hierbij zijn enkele vereenvoudigingen toegepast ten opzichte van het oorspronkelijke (RWS/RIZA) instrumentarium.

Het resultaat van dit onderdeel is dat voor 250 bij 250 meter cellen kan worden beredeneerd dat vooralsnog met een eenvoudige bepaling van de slootafstand – dwz. binnen een celoppervlak - kan worden volstaan. Het is bekend dat in principe ook informatie van buiten de cel nodig is. Of dit ook binnen NHI schaal en kaders van belang is, wordt in fase 2 nader onderzocht.

**Hoofdstuk 3** doet verslag van aanvullend onderzoek dat is uitgevoerd naar het belang van verschillende parameters in een gevoeligheidsanalyse. Dit kan als aanvulling worden gezien op eerdere gezamenlijk rapportage, bijvoorbeeld die in Stromingen (Groenendijk et al 2002).

**Hoofdstuk 4** wordt een nieuwe methode voor de samenstelling van meerdere drainagesystemen uitgewerkt. Deze methode heeft veel belovende aspecten maar is nog niet zodanig uitgerijpt binnen de NHI partners dat het in fase 1+ kan worden geïmplementeerd.

Het resultaat van dit onderdeel is dat een nieuwe methode is gevonden om de waarden van primaire, secundaire en tertiaire weerstanden te bepalen, waarbij vooral de verdeling van het gedraineerde oppervlak per systeem anders wordt bepaald. Deze methode zal in fase 2 nader onderzocht worden ten behoeve van acceptatie bij alle partners. Ook bevat de methode uit dit onderdeel de terugkoppeling dat die weerstanden afhankelijk zijn van het aantal drainagesystemen dat actief is. D.w.z. de weerstand voor het primaire systeem verandert als het secundaire wordt bijgeschakeld, en verandert nog een keer als daarna het tertiaire systeem ook actief wordt. Hetzelfde geldt voor het secundaire systeem als het tertiaire systeem wordt bijgeschakeld (zie toelichting in tekstbox hieronder). Zoals bekend komt dit doordat de slootafstand ook voor het reeds werkende systeem verandert en gelijk wordt aan die van het fijnste drainage netwerk. De implementatie van deze methode vergt door deze terugkoppeling meer werk dan voorzien in fase 1+ en is mede daarom niet uitgevoerd.

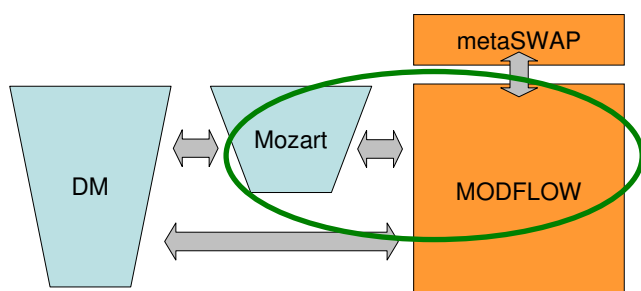


## 2 BESCHRIJVING GEBRUIKTE METHODE VOOR NHI FASE 1+

Binnen het NHI is gekozen om per cel de representatieve freatische lekweerstand te bepalen op basis van een semi 3-dimensionale opschaling van de grondwaterstroming binnen een cel. Daarbij wordt de 3-dimensionale grondwaterstroming tussen de sloten en het onderliggende watervoerend pakket vertaald in een 1-dimensionale weerstand-peil relatie. In paragraaf 2.1 wordt beschreven hoe de interactie tussen grond- en oppervlaktewater werkt in termen van MODFLOW. In de paragrafen 2.2 en 2.3 worden de handelingen en formules beschreven, welke geleid hebben tot parametrisatie van de freatische lekweerstand.

### 2.1 Vertaling van NHI freatische lekweerstanden naar MODFLOW conductance

De uitwisseling met het oppervlaktewatersysteem vindt in het NHI grotendeels plaats met behulp van de offline koppeling tussen MOZART en MODFLOW (Figuur 4).



**Figuur 4** Plaats van uitwisseling oppervlaktewater-grondwater in NHI model

Via de offline koppeling worden fluxen vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater doorgegeven van MODFLOW naar MOZART, en krijgt MODFLOW aan het begin van de volgende 10-daagse tijdstap nieuwe oppervlaktewaterpeilen terug. De fluxen vanuit het grondwater naar het oppervlaktewater en vice versa worden in MODFLOW bepaald.

Een uitzondering vormen de grote rivieren, meren en estuaria. Deze wateren zitten niet in MOZART, maar in het DM model. Voor deze wateren kent MODFLOW vaste peilen. De parametrisatie van deze wateren is beschreven in deelrapport 6 'Kenmerken landelijk oppervlaktewater'.

Voor de uitwisseling tussen het grondwater en het oppervlaktewater wordt gebruik gemaakt van 3 MODFLOW packages:

- RIV: river package voor afvoer en aanvoer via waterlopen;
- DRN: drainage package voor afvoer via (buis)drainage in landelijk en stedelijk gebied;
- SOF: saturated overland flow package voor afvoer via maaiveld als de grondwaterstand boven maaiveld komt. De SOF package is geen standaard MODFLOW package, maar een door Deltares toegevoegde package met dezelfde werking als de DRN package, maar apart genomen om het onderscheid tussen (buis)drainage en maaiveldafstroming te behouden in modelinvoer en -uitvoer. (SOF wordt verder in deze rapportage niet specifiek behandeld, met betrekking tot de werking van het concept kan waar 'DRN' staat ook 'SOF' gelezen worden.

Cellen kunnen maximaal 5 oppervlaktewatersystemen bezitten:

1. Primaire waterlopen > RIV
2. Secundaire waterlopen > RIV
3. Tertiaire waterlopen > RIV
4. (Buis)drainage > DRN
5. Maaiveldafstroming > SOF

#### *Uitwisselingsrelaties*

Het oppervlaktewater in een cel (via RIV of DRN) is verbonden met een rekenknooppunt (centrale punt in een cel) door middel van een afvoer- of aanvoerflux ( $Q_{riv}$ ,  $Q_{drn}$ ). De flux wordt bepaald uit een eenvoudige relatie tussen het oppervlaktewaterpeil<sup>1</sup>, de grondwaterstand en een conductance ( $c_{riv}$ ,  $c_{drn}$ ) welke de sterkte van de uitwisseling bepaalt.

In Figuur 5 is grafisch weergegeven hoe de afvoer ( $Q$  is negatief) of infiltratie ( $Q =$  positief) varieert met de grondwaterstand voor de RIV package. Wanneer de grondwaterstand (horizontale as) hoger is dan het peil zal er afvoer (verticale as) plaatsvinden. Wanneer de grondwaterstand lager is dan het peil zal er infiltratie plaatsvinden. Wanneer de grondwaterstand onder de bodemhoogte komt wordt de infiltratieflux constant. Voor de DRN en SOF package ziet de grafiek er soortgelijk uit als het gedeelte onder de horizontale as; DRN en SOF kunnen namelijk geen infiltratie veroorzaken.

De conductance in MODFLOW is de hellingshoek van de  $Q(h)$  functie (Figuur 6) en bepaalt de sterkte waarmee afvoer of infiltratie plaatsvindt bij een bepaald drukhoogteverschil tussen de grondwaterstand en het oppervlaktewaterpeil. De conductance is de grote onbekende met betrekking tot de relatie grond- en oppervlaktewater.

### 2.1.1 Vertaling freatische lekweerstand in MODFLOW conductance

Oppervlaktewaterpeilen en bodemhoogten worden in NHI vast opgelegd op basis van  $Q$ - $h$  relaties voor vrij-afwaterend Nederland en op basis van vaste peilen in peilbeheerst Nederland. De toekenning wordt besproken in deelrapport 4.

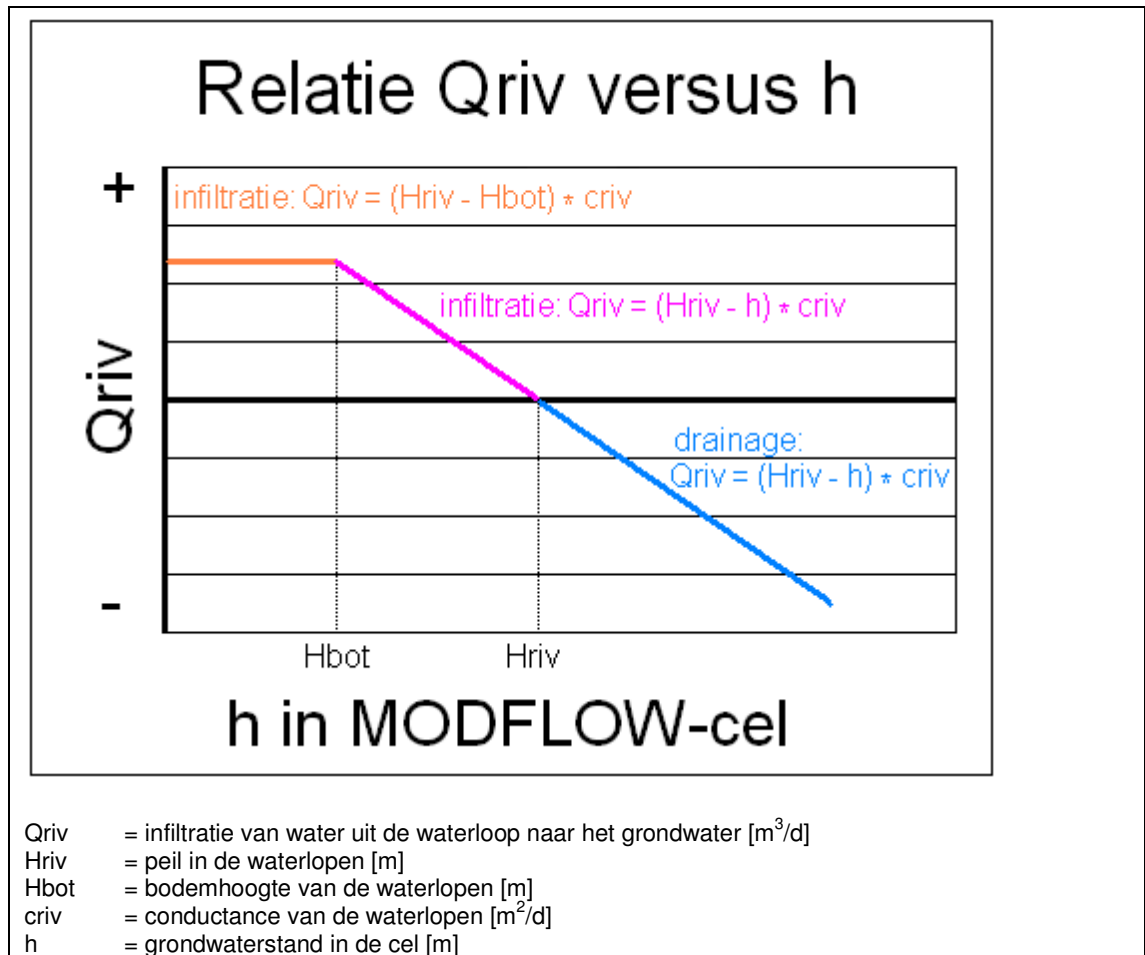
De conductance is de reciproke van de weerstand die de grondwaterstroming uit de onderliggende aquifer (verdeeld over het gehele celoppervlak) ondervindt om de waterloop te bereiken. Deze weerstand noemen we de freatische lekweerstand (zie tekstbox in paragraaf 1.2).

De conductance per cel wordt uit de freatische lek weerstand bepaald met behulp van de onderstaande formule:

$$c_{riv} = A / W_{f-lek}$$

waarin  $A$  de cel-oppervlakte is en  $W_{f-lek}$  gelijk is aan  $c_{f-lek}$  (symbolisch voor de freatische lekweerstand) als beschreven in paragraaf 2.3.1 formule (1), dan wel volgt uit de  $W$ 's in de vervolgstappen aangegeven in paragraaf 2.3.2.

<sup>1</sup> Bij infiltratie vanuit de waterlopen naar het grondwater wordt in de RIVER package ook de bodem van het oppervlaktewatersysteem gebruikt in de bepaling van de uitwisselingsflux.

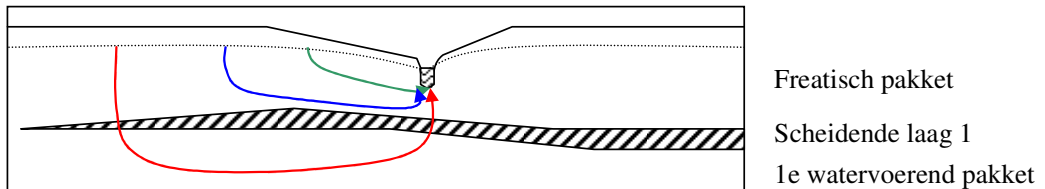


**Figuur 5** Grafiek met de relatie tussen de grondwaterstand ( $H$ ) in een MODFLOW cel en de flux van en naar het oppervlaktewater ( $Q_{riv}$ ).

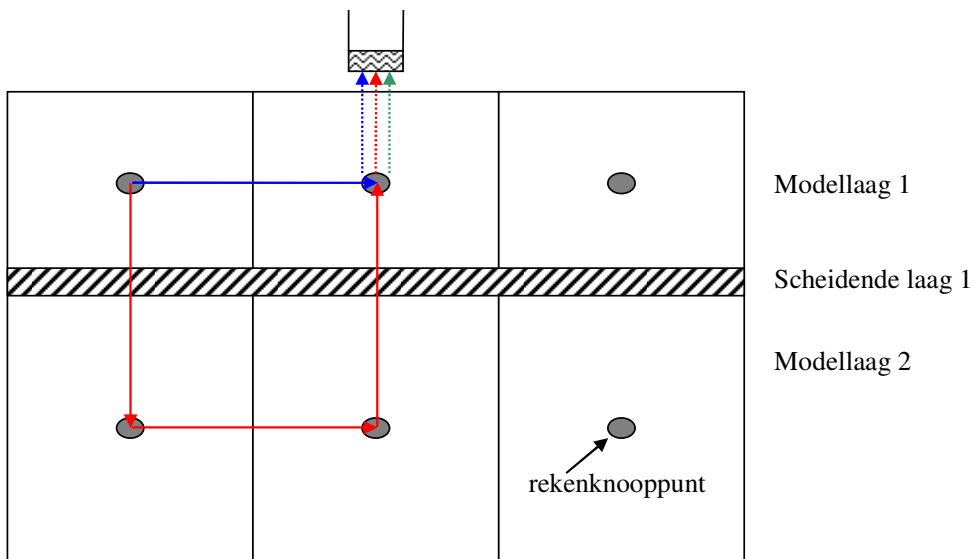
In Figuur 6 zijn drie stroombanen getekend. De weerstand die het 'groene' water ondervindt om van de cel in het oppervlaktewater te komen is de freatische lekweerstand. Het 'blauwe' en 'rode' water ondervindt nog extra weerstand doordat het van de ene naar de andere cel stroomt alvorens het in de cel met het oppervlaktewater de freatische lekweerstand krijgt toegekend.

De standaard MODFLOW omrekening van conductance binnen de RIVER en DRAINAGE packages (zie Harbaugh en al., 2000) is gebaseerd op 1-dimensionale verspreiding vanuit de sloot over de hele cel oppervlakte. De freatische lekweerstand, zoals gebruikt binnen het NHI is gebaseerd op een 2-dimensionale spreiding in een verticale sectie dwars over de sloten en kan door de juiste bepaling van de representatieve slootafstand zelfs als (semi-) 3-dimensionaal worden gekarakteriseerd. De verschillen tussen de eenvoudige MODFLOW verschaling en de NHI benadering kunnen aanzienlijk zijn, zoals is gepresenteerd in De Lange 1998.

Drie stroombanen in een eenvoudig geohydrologisch systeem:



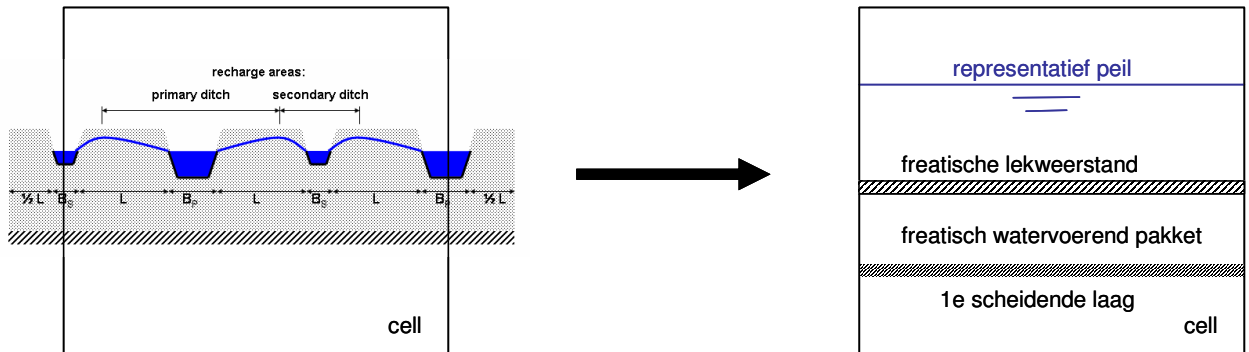
Vertaling naar dit systeem in MODFLOW:



**Figuur 6 Strooming door MODFLOW cellen naar een waterloop: werkelijkheid (boven), modelschematisatie (onder).**

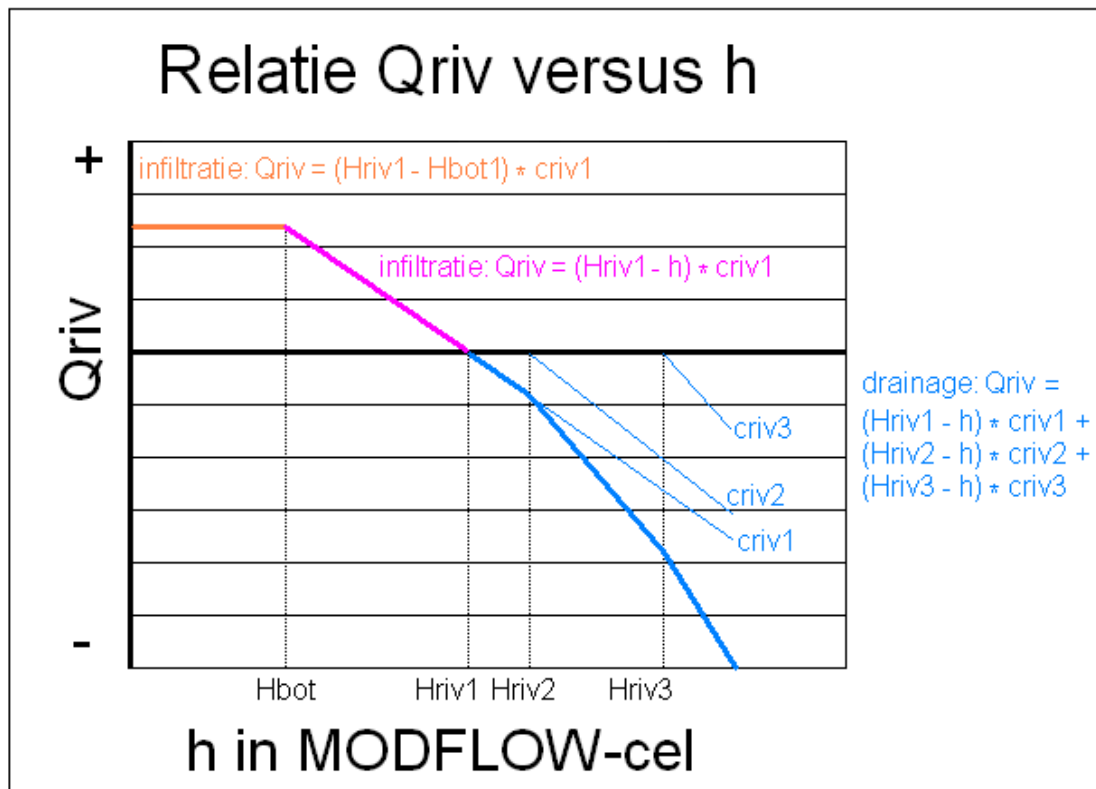
Bovenstaande betekent dat de bovengenoemde freatische lekweerstand gelden over het gehele cel-oppervlak. In feite, wordt dan in de MODFLOW RIVER en DRAINAGE packages aangegeven dat het oppervlaktewater boven het hele cel-oppervlak staat. Met andere woorden, er wordt gewerkt met vlakgemiddelde waarden, ook voor de peilen.

De freatische lekweerstand bevat dus alle weerstanden die binnen het topsysteem optreden, dat wil zeggen: de intree-/ uittreeweerstand, radiale weerstand voor water dat binnen de cel stroomt, de horizontale weerstand en de verticale weerstand, voorzover die binnen het freatisch pakket optreedt. De verticale weerstand van de onderliggende scheidende laag wordt apart ingevoerd. De radiale en andere weerstand van strooming buiten de cel moet door de cellen die het betreffende gebied afdekken worden gesimuleerd.



**Figuur 7** Freatische lekweerstand bedekt gehele cel; “alsof het een meertje is”

Ieder systeem (primaair, secundair, tertiair, buisdrainage en overland flow) heeft zijn eigen freatische lekweerstand, zodoende ontstaat er een meervoudige relatie in een cel. Voor drie waterlooppniveaus is een voorbeeld van een meervoudige relatie opgenomen in Figuur 8. De primaire waterloop in deze cel kan infiltreren en afvoeren. De secundaire en tertiaire waterlopen kunnen alleen afvoeren als de grondwaterstand respectievelijk boven Hriv2 dan wel Hriv3 komt. De totale flux is weergegeven in de dikke lijn, de deel-fluxen in de gestippelde lijnen.



**Figuur 8** Grafiek met de relatie tussen de grondwaterstand (h) in een MODFLOW cel en de flux van en naar het oppervlakte water (Qriv).



In werkelijkheid ligt dit gecompliceerder, omdat de stelsels elkaar beïnvloeden. Zodra een stelsel "bijgeschakelt" gaan de tot dat niveau al werkende stelsel relatief minder water leveren. Ook het bijgeschakelde stelsel levert minder dan het zou dan als de andere stelsels afwezig waren.

## 2.2 GIS gebaseerde berekeningen

### 2.2.1 Bepaling parameter waarden van topsysteem

Zoals in paragraaf 2.3.1 zal worden beschreven wordt de freatische lekweerstand berekend op basis van de parameters die in tabel 1 zijn weergegeven.

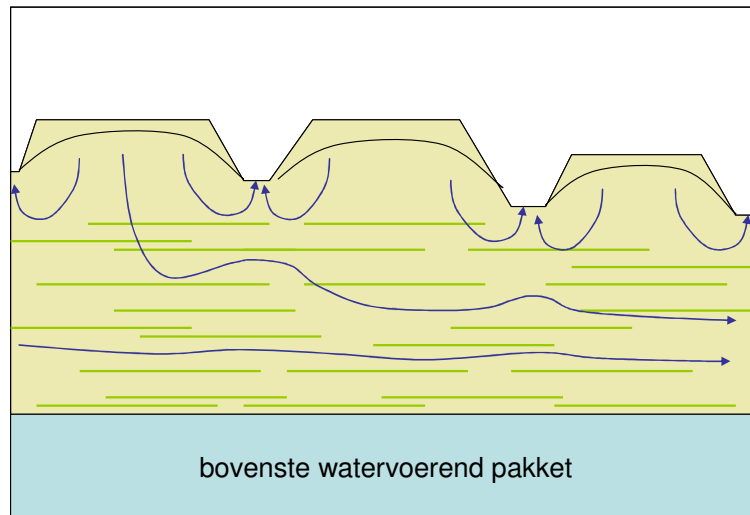
**Tabel 1 Belangrijkste invoer en uitvoer van het programma NHI\_drainageweerstand**

Naam	Eenheid	Beschrijving
<u>KD1-lek</u>	m <sup>2</sup> /d	Effectieve transmissiviteit van de toplaag
<u>C1-lek</u>	d	Weerstand van de eerste scheidende laag
<u>D1-lek</u>	m	Doorstroomde dikte
<u>Lengte</u>	m	Slootlengte per systeem
<u>Breedte</u>	m	Slootbreedte per systeem
<u>Intreeweerstand</u>	d	Intreeweerstand van de slootbodem
<u>Conductance</u>	m <sup>2</sup> /d	Conductance per systeem (uitvoer)

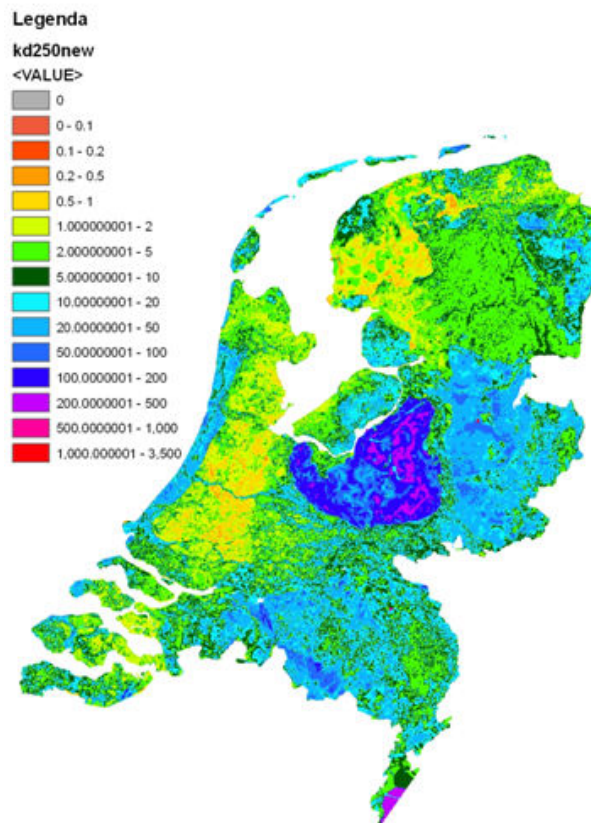
De bepaling van de slootbreedte is gebaseerd op 2 bronnen. Als basis is Alterra-rapport 1397 (Massop et al., 2007) gebruikt. Hierin is voor de combinatie hydrotype en top-10 vectorklasse een inschatting gemaakt van de slotdimensies. Voor de hoofdwaterlopen in het vrij afwaterende deel van Nederland zijn deze gegevens vervangen door de waterloopdimensies die zijn bepaald ten behoeve van MOZART (zie deelrapport 4, regionale oppervlakte wateren). De intreeweerstanden zijn overgenomen uit Alterra-rapport 1339 (Van der Gaast et al., 2006). Hierin is een kennistabel opgesteld met een relatie tussen de intreeweerstand en de bodemfysische eenheid. Een beschrijving van de bepaling van de slootlengte staat in de volgende paragraaf beschreven.

De waarde van KD1-lek is na uitvoerige analyse niet gelijk gebleken aan de KD1-modflow in het verzadigde model (zie rapport 1 Ondergrond model). De oorzaak hiervan ligt in het feit dat voor de freatische lekweerstand het gaat om de water verspreiding tussen drain of sloot en het onderliggende watervoerend pakket, terwijl in het verzadigde grondwater model het gaat om transport in het watervoerend pakket op de schaal van celgroottes. Vooral in laag-Nederland (figuur 9) blijkt de water verspreiding op zeer kleine afstand te gebeuren (10 – 30 meter, versus celgrootte can 250 meter). Deze verspreiding gebeurt daar vrijwel alleen in de bovenste delen van de toplaag, die veelal samengesteld is uit goed- en slechtdoorlatende laagjes. De bovenste goeddoorlatende laagjes zijn relevant voor de freatische lekweerstand. De laagjes daaronder werken nauwelijks in de verspreiding mee, maar zijn wel belangrijk voor het horizontale transport in het topsysteem. In hoog Nederland is het onderscheid minder relevant en komen beide KD1's meestal beter overeen. Voor het afleiden van de parameters om de freatische lekweerstand te berekenen, zoals D, kv en kD, is gebruik gemaakt van beschikbare kaarten, zoals hydropekaart, kD-kaart en diktekaart (Massop et al, in prep). De diktekaart van de deklaag is voor een aantal gebieden aangepast. Voor het lage deel van Nederland is in de kleigebieden de dikte van de relevante toplaag beperkt tot 2 m en voor veengebieden tot 1 m. Verder is een minimale dikte gehanteerd van 1 m. Voor hoog Nederland is alleen voor West-Brabant (Kedichem-Tegelen profiel) een maximale dikte van 5 m gehanteerd, voor de overige gebieden is de dikte overgenomen. De aangepaste dikte is tevens gebruikt om de kD-waarde aan te passen. De verhouding tussen aangepaste en uitgangsdikte is gebruikt om de kD aan te passen. Om een kv-waarde toe te kennen is per hydrotype een keuze gemaakt in klei, veen, grof zand (stuwwallen) en fijn zand (overig Pleistoceen en Duinen). Aan deze vlakken is op

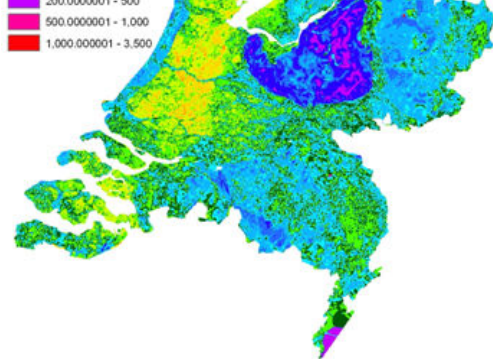
basis k-waarde tabel een  $k_v$ -waarde toegekend. De c-waarde is niet aangepast. In figuur 10 is de resulterende verdeling van de  $kD$  voor de berekening van de freatische lekweerstand weergegeven.



**Figuur 9.** Waterstroming in kleihoudend topsysteem (laag Nederland). De verdeling van grondwater nabij een drainerend of infiltrerend oppervlakte water gebeurt vooral in het bovenste (veelal bewerkte) deel. Stroming over grotere afstand gebeurt vooral in de diepere laagdelen.



**Figuur 10.** Verdeling van  $kD$  gebruikt voor de bepaling van de Freatisch Lekweerstand.



## 2.2.2 Bepaling van representatieve slootafstand per MODFLOW cel

De bepaling van de freatische lekweerstand is gebaseerd op vereenvoudiging van de drie dimensionale stroming tussen sloten en watervoerend pakket binnen een cel tot een eenvoudige een-dimensionale peilweerstand relatie. Als eerste stap wordt in het horizontale vlak de representatieve slootafstand bepaald. Die wordt in de volgende stap (sectie 2.1.3) gebruikt in de formule die de stroming in een verticale sectie dwars op een sloot vertaald in de bovengenoemde een-dimensionale relatie.

Omdat sloten in Nederland in het algemeen niet parallel en op gelijke afstand lopen (figuur 11) zal de representatieve slootafstand binnen een willekeurig vierkant oppervlak (cel van 250x250m) niet direct kunnen worden bepaald. Voor willekeurig gelegen sloten bestaat een eenvoudige rekenregel om de representatieve slootafstand voor gebruik in de berekening van de freatische lekweerstand (De Lange 1996 proefschrift).

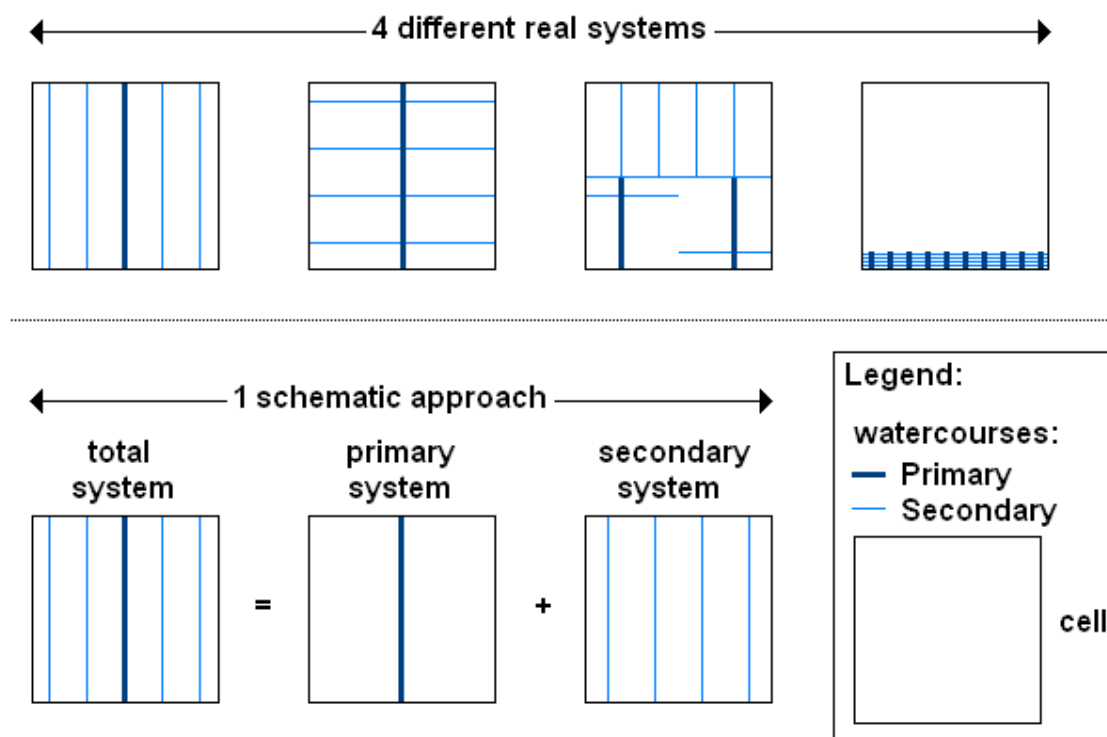
$$L = A/\Sigma l_i$$

Waarin

L = representatieve slootlengte [meters]

A = beschouwde oppervlakte [meters<sup>2</sup>]

$\Sigma l_i$  = sommatie van lengtes van individuele sloten [meter]



**Figuur 11** Schematische weergave van verschillende slootsystemen die vertaald worden met behulp van de hier beschreven methode.

Voor de bepaling van de slootafstand voor cellen van 250 bij 250 meter is binnen NHI fase 1+ gekeken of die –vanwege de eenvoud bij de overgang van RWS naar Alterra en dus hernieuwde implementatie - mag worden berekend enkel op basis van de slootdichtheid binnen de cel (dwz. zonder de RIZA methode waarin ook buiten de cel wordt gekeken). Hiervoor zijn drie gevallen onderscheiden:

1. Slootafstand is kleiner dan breedte van de cel;
2. Slootafstand is groter dan celbreedte en sloot is langer of gelijk aan celbreedte;
3. Slootafstand is groter dan celbreedte en sloot is korter dan celbreedte.

#### **Ad 1. Slootafstand is kleiner dan breedte van de cel**

Dit geval voldoet aan de uitgangspunten voor de bepaling van de basis formules voor de freatische lekweerstand.

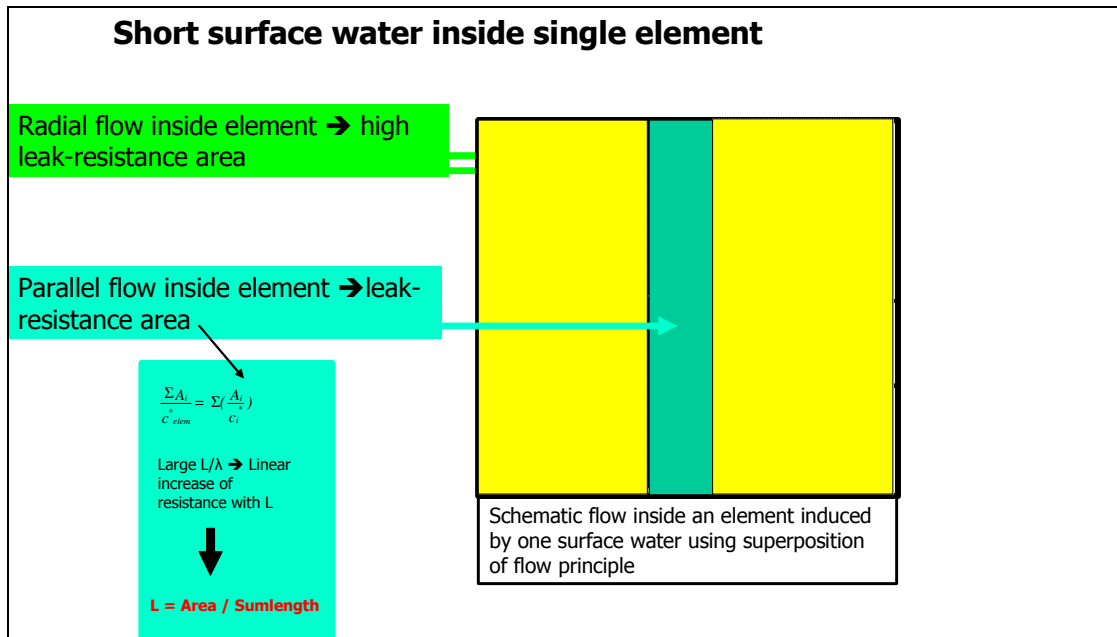
#### **Ad 2. Slootafstand is groter dan celbreedte en sloot is langer of gelijk aan celbreedte**

Bij lange sloten op een afstand groter dan celbreedte geldt de zogenaamde E-correctie term (De Lange, 1997c). Daarbij blijkt uit de bijbehorende analyse dat de weerstand effectief gelimiteerd is door de elementbreedte in het geval van een nauwelijks aanwezige scheidende laag tussen freatisch en onderliggend pakket. Bij een celbreedte van 250 meter volgt een slootafstand van tenminste 250 meter wat in het algemeen duidt op een infiltratiegebied tussen de sloten. De fysieke water verspreiding rond het oppervlakte water wordt niet meer beïnvloed door water er op grote afstand gebeurt. Daarom kan in deze gevallen volstaan worden met de celbreedte te nemen voor de “effectieve” slootafstand (= verspreidingsafstand) in de normale formule voor de freatische lekweerstand.

#### **Ad 3. Slootafstand is groter dan celbreedte en sloot is korter dan celbreedte**

Bij korte sloten kan worden beredeneerd – op basis van de theoretische onderbouwing van het gebruik van de slootdichtheid voor de bepaling van de slootafstand in het proefschrift van De Lange (1996, Hoofdstuk 7) – dat de slootlengte ook kan worden bepaald uit de drainagedichtheid binnen de cel. In het kort komt de verklaring er op neer dat de stroming naar de twee zijden van de sloot voldoet aan de basis voor de formule voor de freatische lekweerstand. De stroming naar de beide uiteinden van de sloot kan als radiale stroming gekenschetst worden en levert een relatief hoge weerstand. Met behulp van oppervlakte evenredige optelling van (parallele) weerstanden kan dan eerdergenoemde rekenregel onderbouwd worden.

Bij totale slootlengtes (gesommeerde lengtes van alle sloten binnen cel) die kleiner zijn dan de celbreedte worden met de gekozen methode slootafstanden berekend die groter zijn dan de celbreedte. Zeker bij relatief kleine slootlengten kan dit leiden tot zeer hoge slootafstanden, en daardoor dus ook tot zeer hoge freatische lekweerstand. In dergelijke gevallen zal door deels radiale toestroming (in het horizontale vlak) de freatische lekweerstand hoger zijn dan in het geval er precies 1 sloot in de cel ligt, waarbij de slootafstand gelijk is aan de celbreedte (minus de slootbreedte). Figuur 2 geeft dit principe weer. Om deze overdrijving te voorkomen, wordt voor de maximale slootlengte de celbreedte genomen. Uit het onderzoek van De Lange (1997c) blijkt dat dit, behalve in enkele uitzonderingsgevallen, een goede eerste orde benadering is voor de exacte waarde van de freatische lekweerstand.



**Figuur 12 Drainage van grondwater naar een korte sloot**

In fase 2 van het NHI zal verder worden onderzocht welke impact de vereenvoudiging heeft binnen de huidige schaal van berekening van het NHI. Voor fase 1+ is uitgegaan van een maximale slootafstand die gelijk is aan de celbreedte.

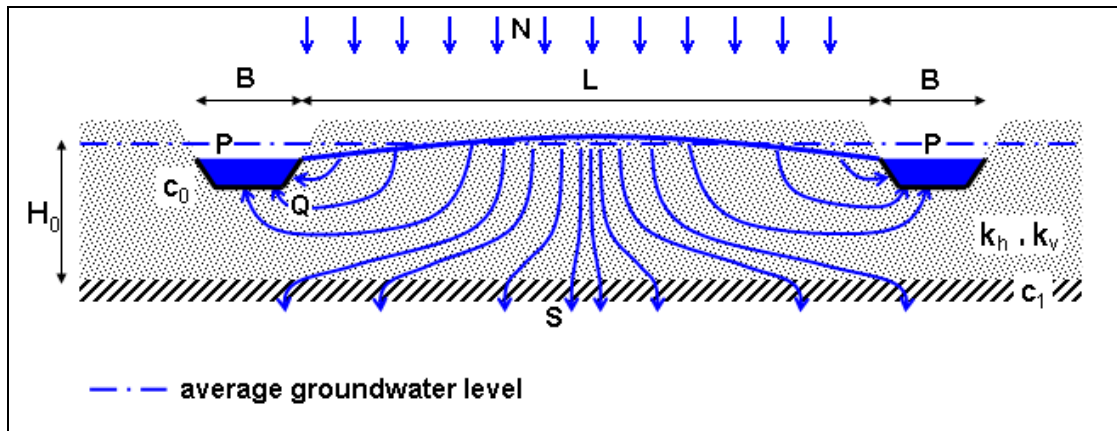
### 2.3 Gehanteerde formules voor weerstand berekening per cel

Hoewel binnen het NHI vijf verschillende drainage systemen worden onderscheiden wordt de freatische lekweerstand en de bijbehorende opschaling voor maximaal drie samenwerkende oppervlakte water systemen toegepast. De overige twee systemen nl. buisdrainage en maaiveldsdrainage zijn reeds oppervlakte gespreide systemen. In onderstaande beschrijving van de gehanteerde formules zijn daarom slechts drie gevallen te onderscheiden, namelijk die met een, twee of drie systemen werkend.

De nummering van de formules in dit hoofdstuk vertoont sprongen omdat elke formule overeen komt met eenzelfde in de meer uitgebreide beschrijving in de hoofdstukken 3 en 4. De huidige werkwijze in fase 1+ loopt achter bij de staat van onderzoek.

#### 2.3.1 Berekening weerstand bij alleen het primaire systeem

Voor de verschaling van 2-dimensionale stroming in een 1-dimensionale randvoorwaarde zijn op basis van Figuur 3 in de afgelopen 40 jaar diverse formules afgeleid. Binnen NHI wordt op basis van de voorafgaande synthese binnen de zogeheten consensus groep grondwater gekozen voor de onderstaande benadering.



**Figuur 13 Drainage van grondwater naar een enkelvoudig drainagesysteem**

Als eerder vermeld is binnen NHI fase 1+ gekozen om bij de bepaling van de freatische lekweerstand uit te gaan van de formule van De Lange (Stromingen, 1997a). Oorspronkelijk werd de formule voor het gebied tussen de sloten gehanteerd. Later is dit aangevuld met een correctie voor het traject onder de slootbodem. (Stromingen, Groenendijk et al, 2002).

De bepaling van de freatische lekweerstand gebeurt met de formules (2.1) t/m (2.6), dwz. in een omgewerkte vorm van de formules van De Lange (Groenendijk et al 2002).

$$c_{f-lek} = \frac{c_L^* \cdot \left( c_0 + c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right) \cdot (B_{cor} + L_{tot})}{B_{cor} \cdot c_L^* + L_{tot} \cdot \left( c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right)} + \frac{L_{tot}}{\pi \sqrt{k_{0,x} \cdot k_v}} \cdot \ln \left( \frac{4H_0}{\pi B_{cor}} \right) - \left( c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right) \quad (2.1)$$

waarin:

$$c_L^* = \left( c_0 + c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right) \cdot F_L + \left( c_0 \cdot \frac{L_{tot}}{B_{cor}} \right) \cdot F_B \quad (2.2)$$

en:

$$F_L = \frac{L_{tot}}{2\lambda_L} \cdot \operatorname{ctnh} \left( \frac{L_{tot}}{2\lambda_L} \right) \quad (2.3) \quad \text{met:} \quad \lambda_L = \sqrt{\left( c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right) \cdot k_{0,x} \cdot H_0} \quad (24)$$

$$F_B = \frac{B_{cor}}{2\lambda_B} \cdot \operatorname{ctnh} \left( \frac{B_{cor}}{2\lambda_B} \right) \quad (2.5) \quad \text{met:} \quad \lambda_B = \sqrt{\frac{k_{0,x} \cdot H_0 \cdot \left( c_1 + \frac{H_0}{k_v} \right) \cdot c_0}{c_1 + \frac{H_0}{k_v} + c_0}} \quad (2.6)$$

hierin is:

$C_{f-tek}$	freatische lekweerstand van het drainagesysteem [d]
$C_L^*$	voedingsweerstand voor het landoppervlak deel van de doorsnede [d]
$C_0$	weerstand van de slootbodem [d]
$C_1$	weerstand van de scheidende laag (onder het topsysteem) [d]
$H_0$	representatieve dikte van het watervoerend pakket in het topsysteem [m]
$k_v$	verticale doorlatendheid van het watervoerend pakket in het topsysteem [m/d]
$k_{0,x}$	horizontale doorlatendheid van het watervoerend pakket in het topsysteem [m/d]
$L_{tot}$	representatieve slootafstand [m]
$B_{cor}$	(eventueel gecorrigeerde) breedte van de sloten [m]
$\lambda_L$	spreidingslengte behorend bij $0 \leq x \leq L/2$ [m]
$\lambda_B$	spreidingslengte behorend bij $-B_{cor}/2 \leq x \leq 0$ [m]

Bovenstaand formule laat zien dat de freatische lekweerstand wordt afgeleid door van de voedingsweerstand de verticale weerstand in en onder het toppakket (de laatste term in de vergelijking) van de voedingsweerstand af te trekken. De resterende twee termen aan de rechterzijde vormen de voedingsweerstand. De tweede term in de rechterzijde is een toevoeging voor de radiale weerstand naar voorbeeld van Ernst (1961). De eerste term aan der rechterzijde beschrijft de omrekening van de voedingsweerstand "voor het landoppervlak" naar die voor het totale oppervlak (dus inclusief de sloten).

### 2.3.2 Berekening weerstand bij twee systemen

Hiervoor worden de volgende stappen doorlopen:

1. Bepaal voor beide stelsels afzonderlijk de freatische lekweerstand met de formules 2.1 t/m 2.6. Ga er daarbij steeds vanuit dat het andere stelsel niet aanwezig is. Deze weerstanden noemen we  $W_{solo_P}$  voor het primaire stelsel en  $W_{solo_S}$  voor het secundaire stelsel.
2. Bepaal op basis van de freatische lekweerstanden die gevonden zijn bij stap 1 de intrekgebieden van beide stelsels, volgens:

$$I_p = \frac{W_{tot_s}}{W_{tot_p} + W_{tot_s}} \cdot I_{tot} \quad (2.7)$$

$$I_s = \frac{W_{tot_p}}{W_{tot_p} + W_{tot_s}} \cdot I_{tot} \quad (2.8)$$

3. Bepaal de representatieve slootafstand van het samenwerkende stelsel ( $L_{tot}$ ). Dit is de gemiddelde afstand tussen de slootranden, in de veronderstelling dat alle sloten parallel en even ver uit elkaar liggen.
4. Bepaal voor  $L_{tot}$  de freatische lekweerstand van het primaire stelsel met de formules 2.1 t/m 2.6. Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de primaire sloten. Deze weerstand noemen we  $W_{tot_P}$ .
5. Bepaal voor  $L_{tot}$  de freatische lekweerstand van het secundaire stelsel met de formules 2.1 t/m 2.6. Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de secundaire sloten. Deze weerstand noemen we  $W_{tot_S}$ .
6. Bepaal voor het samenwerkende drainagesysteem de freatische lekweerstanden van het primaire deel en van het secundaire deel. De freatische lekweerstand van het totale stelsel volgt daar weer uit:



$$W_P = \frac{I_P \cdot W_{tot\_P} + I_S \cdot W_{tot\_S}}{I_P} \quad (2.9)$$

$$W_S = \frac{I_P \cdot W_{tot\_P} + I_S \cdot W_{tot\_S}}{I_S} \quad (2.10)$$

$$W = \frac{1}{\frac{1}{W_P} + \frac{1}{W_S}} \quad (2.11)$$

In bovenstaande formules (2.7 t/m 2.11) is:

$W_{solo\_P}$	freatische lekweerstand [d] als alleen het primaire slotenstelsel aanwezig is
$W_{solo\_S}$	freatische lekweerstand [d] als alleen het secundaire slotenstelsel aanwezig is
$I_{tot}$	totale intrekgebied (de celbreedte) [m]
$I_P$	intrekgebied van het primaire deel van het slotenstelsel [m], rekening houdend met aanwezigheid secundaire stelsel
$I_S$	intrekgebied van het secundaire deel van het slotenstelsel [m], rekening houdend met aanwezigheid primaire stelsel
$W_{tot\_P}$	freatische lekweerstand [d] als alle sloten van het slotenstelsel primaire sloten zouden zijn
$W_{tot\_S}$	freatische lekweerstand [d] als alle sloten van het slotenstelsel secundaire sloten zouden zijn
$W_P$	freatische lekweerstand van het primaire deel van het slotenstelsel [d]
$W_S$	freatische lekweerstand van het secundaire deel van het slotenstelsel [d]
$W$	freatische lekweerstand van het totale slotenstelsel [d]

Onderscheid maken in primaire en secundaire delen van het totale slotenstelsel kan zinvol zijn voor onderzoek naar de waterkwaliteit.

### 2.3.3 Berekening weerstand bij drie systemen

Hiervoor wordt een vergelijkbare werkwijze gevolgd als voor de bijschakeling van het secundaire systeem (zie paragraaf 2.3.2). Daarbij wordt de werking van de primaire en secundaire drainagesystemen gecombineerd tot een enkel drainagesysteem. Vervolgens wordt het tertiaire drainagesysteem bijgeschakeld.

**Stap 1 t/m 5** zijn hetzelfde als voor een systeem met twee drainagesystemen. Aansluitend worden de volgende zes stappen doorlopen:

7. Bepaal, net als in stap 1 uit par 2.3.2, de nieuwe slootafstand van het samenwerkende systeem (= afstand tussen de slootranden). Ga er daarbij weer vanuit dat alle sloten op identieke afstand van elkaar liggen.
8. Bepaal voor deze slootafstand de freatische lekweerstand van het primaire systeem volgens methode uit paragraaf 2.3.1 (formules 2.1 t/m 2.6). Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de primaire sloten. Deze weerstand noemen we  $W_{tot\_P}$ .
9. Bepaal voor deze slootafstand de freatische lekweerstand van het secundaire systeem volgens methode uit paragraaf 2.3.1 (formules 2.1 t/m 2.6). Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de secundaire sloten. Deze weerstand noemen we  $W_{tot\_S}$ .

10. Bepaal voor deze slootafstand de freatische lekweerstand van het tertiaire systeem volgens methode uit paragraaf 2.3.1 (formules 2.1 t/m 2.6). Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de tertiaire sloten. Deze weerstand noemen we  $W_{tot\_T}$ .
11. Bepaal op basis van de freatische lekweerstanden die gevonden zijn bij stappen 7, 8 en 9 de intrekgebieden. Als alle drainagesystemen in werking zijn, is de verhouding tussen de grootte van beide freatische lekweerstanden,  $W_{tot\_P}$ ,  $W_{tot\_S}$  en  $W_{tot\_T}$ , omgekeerd evenredig met de verhouding tussen de intrekgebieden.

$$I_P = \frac{\frac{1}{W_{tot\_P}}}{\frac{1}{W_{tot\_P}} + \frac{1}{W_{tot\_S}} + \frac{1}{W_{tot\_T}}} \cdot I_{tot} \quad (2.12)$$

$$I_S = \frac{\frac{1}{W_{tot\_S}}}{\frac{1}{W_{tot\_P}} + \frac{1}{W_{tot\_S}} + \frac{1}{W_{tot\_T}}} \cdot I_{tot} \quad (2.13)$$

$$I_T = \frac{\frac{1}{W_{tot\_T}}}{\frac{1}{W_{tot\_P}} + \frac{1}{W_{tot\_S}} + \frac{1}{W_{tot\_T}}} \cdot I_{tot} \quad (2.14)$$

12. Bepaal voor het samenwerkende drainagesysteem de freatische lekweerstanden van het primaire deel, van het secundaire deel, en van het tertiaire deel. De freatische lekweerstand van het totale stelsel volgt daar weer uit.

De afzonderlijke freatische lekweerstanden van het samenwerkende drainagesysteem kunnen worden bepaald uit:

$$W_P = \frac{I_P \cdot W_{tot\_P} + I_S \cdot W_{tot\_S} + I_T \cdot W_{tot\_T}}{I_P} \quad (2.15)$$

$$W_S = \frac{I_P \cdot W_{tot\_P} + I_S \cdot W_{tot\_S} + I_T \cdot W_{tot\_T}}{I_S} \quad (2.16)$$

$$W_T = \frac{I_P \cdot W_{tot\_P} + I_S \cdot W_{tot\_S} + I_T \cdot W_{tot\_T}}{I_T} \quad (2.17)$$

$$W = \frac{1}{\frac{1}{W_P} + \frac{1}{W_S} + \frac{1}{W_T}} \quad (2.18)$$

Hierin is:

$W_{tot\_P}$	freatische lekweerstand als alle sloten van het drainagesysteem primaire sloten zijn (uit stap 7) [d]
$W_{tot\_S}$	freatische lekweerstand als alle sloten van het drainagesysteem secundaire sloten zijn (uit stap 8) [d]
$W_{tot\_T}$	freatische lekweerstand als alle sloten van het drainagesysteem tertiaire sloten zijn (uit stap 9) [d]
$I_{tot}$	totale intrekgebied [m]
$I_P$	intrekgebied van het primaire deel van het drainagesysteem [m], rekening houdend met aanwezigheid secundaire systeem
$I_S$	intrekgebied van het secundaire deel van het drainagesysteem [m], rekening houdend met aanwezigheid primaire systeem
$W_P$	freatische lekweerstand van het primaire deel van het drainagesysteem [d]
$W_S$	freatische lekweerstand van het secundaire deel van het drainagesysteem [d]
$W_T$	freatische lekweerstand van het tertiaire deel van het drainagesysteem [d]
$W$	freatische lekweerstand van het totale drainagesysteem [d]

## 2.4 Toepassingsbereik methode NHI 1+, aanbevelingen en conclusies

### 2.4.1 Toepassingsbereik

Omtrent het toepassingsbereik van de huidige schematisatie heeft nog geen uitgebreide analyse plaatsgevonden. Op basis van beschouwingen over een eerdere versie van NHI en STONE kunnen de volgende opmerkingen, conclusies en aanbevelingen worden gegeven:

- Voor de minimale gebiedsgrootte waarop maatregelen mogen worden beoordeeld geldt de algemene regel dat deze tenminste 3 bij 3 cellen bedraagt. Afrondend en meer realistisch moet de schaal van beoordeling / gebruik voor scenario's niet kleiner zijn dan een vierkante kilometer.
- Hoewel er nog steeds op onderdelen van het rekensysteem relevante verbetering mogelijk en noodzakelijk is, beschouwd het team de huidige situatie als zeer bruikbaar voor kwantitatieve berekeningen en zonder principiële fouten met grote impact. Echter in een dergelijk complex systeem blijken programmeer fouten en onjuistheden in databewerking pas bij uitgebreid gebruik. Verwacht wordt dan ook dat gedurende de komende tijd waarin het systeem feitelijk gaat worden gebruikt de nodige verbeteringen zullen moeten worden geïmplementeerd.
- Voor berekening voor grondwater kwaliteit is nu de tijd gekomen om zowel onderzoek als implementatie te richten. Daarbij geldt dat vooral het topsysteem van doorslaggevend belang is voor veel beleidsvragen op het gebied van grondwater kwaliteit.

### 2.4.2 Plausibiliteit

Aan een externe partij is gevraagd om het NHI te beoordelen op bruikbaarheid. Er is toen gekeken is naar een eerder stadium van NHI (versie maart 2008). Uit deze rapportage halen we de volgende opmerkingen aan uit evaluatie Emke en Zaadnoordijk (d.d. 31 maart 2008, Royal Haskoning, Deltares, ref BGS 08-10.100/avs):

- De korte beoordeling die is uitgevoerd leidt tot het oordeel dat de huidige schematisatie plausibel is voor het diepere grondwater. Voor het freatisch grondwater en de daaraan gekoppelde interactie met het oppervlaktewater is de gehanteerde (grove) vergridding minder geschikt.
- Het expliciet beschrijven van het freatisch grondwater schept echter ook verwachtingen over de berekende waarden. Deze kunnen bij een vergridding op cellen van 250m x 250m niet goed

## NHI

waargemaakt worden. Veel cellen bevatten gebieden met significante verschillen in het topsysteem qua type (peilbeheerst of freatisch) of parameterwaarden (polderpeilen, slootafstanden, drainage-intensiteit). De overgangen zijn vaak scherp maar worden diffuus in het model door de vergridding. Probleem hierbij is niet zozeer de berekende grondwaterstand, maar de irreële kwel- en infiltratie fluxen bij deze overgangen. Dit kan wellicht verbeterd worden door een definitie op basis van vectorbestanden in plaats van grids. Bij de praktische uitwerking hiervan is te overwegen om de laterale modelresolutie (bijv. in x,y richting) variabel te maken in het model. Modelcellen kunnen naar boven toe onderverdeeld worden en naar onder samengevoegd. Dit sluit aan bij het vereiste detail niveau en de beschikbare kennis en informatie.

### 2.4.3 Conclusies

Met fase 1+ is het NHI gebracht op het kennis niveau van de gezamenlijke instituten.

Er zijn nog enkele "schoonheidsfoutjes" weg te werken in de zin van programmeerfoutjes in parameter overdracht tussen modellen. Het doen van checks op basisdata en tussen uitkomsten heeft pas in een laat stadium kunnen plaatsvinden en heeft geleid tot aanbevelingen voor eenvoudige recht-door-zee verbeteringen.

### 3 AANVULLEND ONDERZOEK: GEVOELIGHEIDSANALYSE

*In dit hoofdstuk wordt aanvullend onderzoek naar de gevoeligheid van de freatische lekweerstand behandeld.*

De freatische lekweerstand, bepaald volgens de formules van De Lange (vergelijkingen 1 t/m 6), is afhankelijk van een zevental parameters. De gevoeligheid van de freatische lekweerstand voor deze zeven parameters is voor een tweetal typisch Nederlandse situaties onderzocht:

- een gebied waar de bovengrond bestaat uit een holocene deklaag;
- een gebied waar de bovengrond bestaat uit pleistoceen zand.

Figuur 94 geeft de resultaten van deze gevoeligheidsanalyse voor een gebied waar een holocene deklaag aanwezig is. Figuur 5 geeft de resultaten voor een pleistoceen gebied.

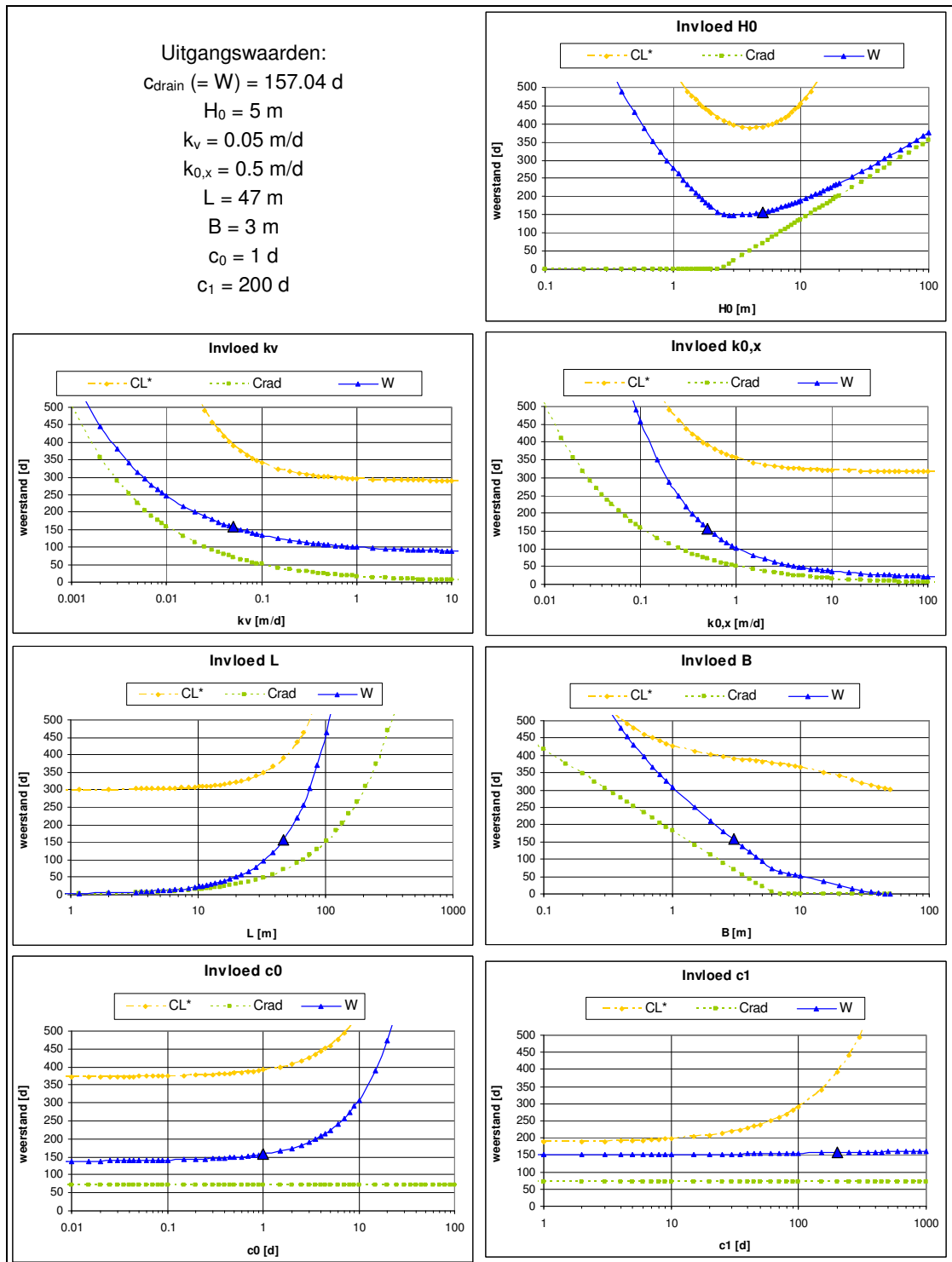
De freatische lekweerstand is in deze figuren aangeduid met de letter W. De lijn bestaande uit blauwe driehoeken geeft de freatische lekweerstand. De dikke blauwe driehoek met de zwarte rand geeft steeds de uitgangswaarde van de freatische lekweerstand aan. Daarnaast zijn ook de radiale weerstand en de voedingsweerstand voor het landoppervlakte deel van de doorsnede in de figuren opgenomen.

Er is in beide situaties uitgegaan van 3 meter brede sloten die h.o.h. 50 meter uit elkaar liggen. De keuze van de uitgangsparemeters beïnvloedt de uitkomsten. In dit geval is gekozen voor een sterk gelaagd, slechtdoorlatend topsysteem met een onderliggende laag die relatief weinig weerstand biedt. Dit komt bijvoorbeeld voor in de Hollandse veengebieden, bij een zogeheten holocene deklaag.

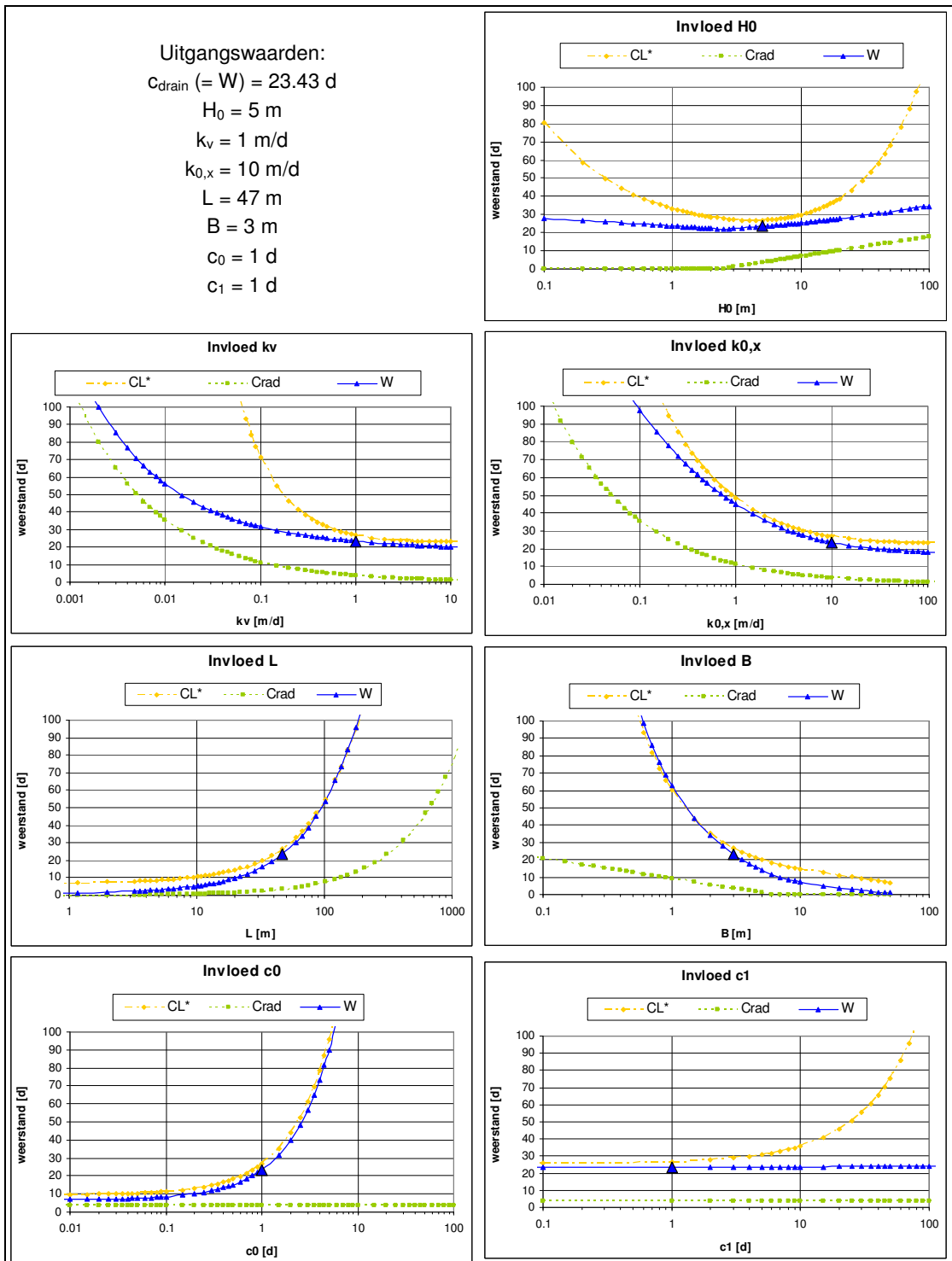
In een gebied met holocene deklaag (Figuur 94) is de freatische lekweerstand in afnemende mate gevoelig voor:

1. de slootafstand ( $L$ );
2. de horizontale doorlatendheid van de drainerende laag ( $k_{0,x}$ );
3. de slootbreedte ( $B$ );
4. de bodemweerstand van de sloot ( $c_0$ ), vooral bij hogere weerstanden;
5. de verticale doorlatendheid van de drainerende laag ( $k_v$ ).

De freatische lekweerstand blijkt in het geval van holocene deklaag nagenoeg ongevoelig voor de verticale weerstand onder de drainerende laag ( $c_1$ ), en voor de dikte van de drainerende laag ( $H_0$ ). Deze laatste wordt pas relevant als de drainerende laag dunner dan 2 meter wordt.



Figuur 94 Gevoeligheid van freatische lekweerstand in Holoceen gebied



Figuur 15 Gevoeligheid van freatische lekweerstand in Pleistoceen gebied

In een pleistoceen zandgebied (Figuur 5) is de freatische lekweerstand in afnemende mate gevoelig voor:

1. de slootbreedte ( $B$ );
2. de bodemweerstand van de sloot ( $c_0$ );
3. de slootafstand ( $L$ );
4. de horizontale doorlatendheid van de drainerende laag ( $k_{0,x}$ );
5. de verticale doorlatendheid van de drainerende laag ( $k_v$ ).

De freatische lekweerstand is ook in deze situatie met een pleistocene deklaag nagenoeg ongevoelig voor de verticale weerstand onder de drainerende laag ( $c_1$ ), en slechts licht gevoelig voor de dikte van de drainerende laag ( $H_0$ ).

De volgende kanttekening is te maken ten aanzien van de bodemweerstand van de sloot. Bij drainerende sloten, die regelmatig geschoond worden is een waarde van 1 dag of minder niet ondenkbaar. Naarmate er meer bagger op de slootbodem ligt, zal deze weerstand flink kunnen toenemen. Bij continu infiltrerende sloten zal deze weerstand flink kunnen oplopen door fysische en / of chemische dichtslibbing van de slootbodem. Ook in zandgebieden dient daar rekening mee worden gehouden. In die situatie leidt een hogere bodemweerstand voor een verder identiek systeem automatisch tot een hogere weerstand tegen infiltratie, dan tegen drainage. Hoewel deze kennis reeds lang bestaat, is dit om redenen van eenvoud en schaal van werken nog niet in NHI 1+ en haar voorgangers geïmplementeerd.

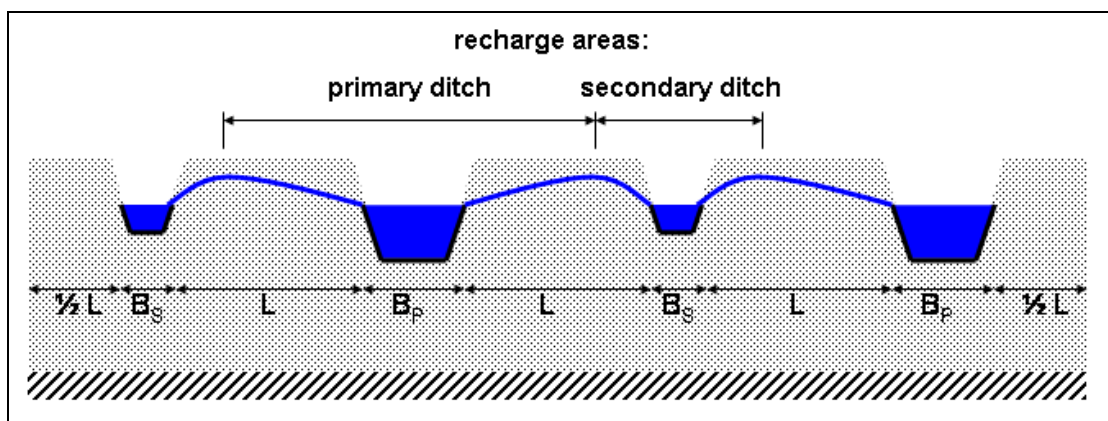
Samenvattend kan worden geconcludeerd dat de doorlatendheid van de deklaag (dominant in holocene gebieden) en de bodemweerstand van de sloot (dominant in pleistocene gebieden) de belangrijkste onbekenden zijn bij de bepaling van de freatische lekweerstand. De slootafstand en de slootbreedte zijn op zich sterk bepalend voor de waarde van de freatische lekweerstand, maar deze zijn veel beter vast te stellen. De weerstand van de scheidende laag onder het topsysteem is – zoals te verwachten was – nauwelijks of niet van invloed op de grootte van de freatische lekweerstand.



#### 4 NIEUW ONDERZOEK: WEERSTANDEN VOOR EEN MEERVOUDIG DRAINAGESYSTEEM

*In dit hoofdstuk wordt het recente onderzoek naar de werking van meervoudige drainagesystemen behandeld. Voorlopig zit deze kennis nog niet in het NHI.*

De bepaling van de freatische lekweerstanden van twee of drie samenwerkende drainagesystemen gebeurt op basis van de intrekgebieden van de afzonderlijke systemen. Daarbij wordt uitgegaan van identieke afstanden tussen parallel liggende drainerende elementen (sloten). Figuur 6 geeft het principe van deze benadering weer.



**Figuur 16 Drainage van grondwater naar een tweevoudig drainagesysteem**

Als beide drainagesystemen in werking zijn, is de verhouding tussen de grootte van beide freatische lekweerstanden omgekeerd evenredig met de verhouding tussen beide intrekgebieden.

Voor meervoudige drainagesystemen is bij deze benadering uitgegaan van maximaal drie samenwerkende drainagesystemen. Het principe is uitbreidbaar naar vier en meer samenwerkende drainagesystemen. De complexiteit neemt daarbij echter exponentieel toe. Bij maximaal drie samenwerkende drainagesystemen zijn de volgende drie gevallen onderscheiden:

1. Werking van alleen het primaire systeem
2. Bijschakeling van het secundaire systeem
3. Bijschakeling van het tertiaire systeem

#### 4.1 Werking van alleen het primaire systeem

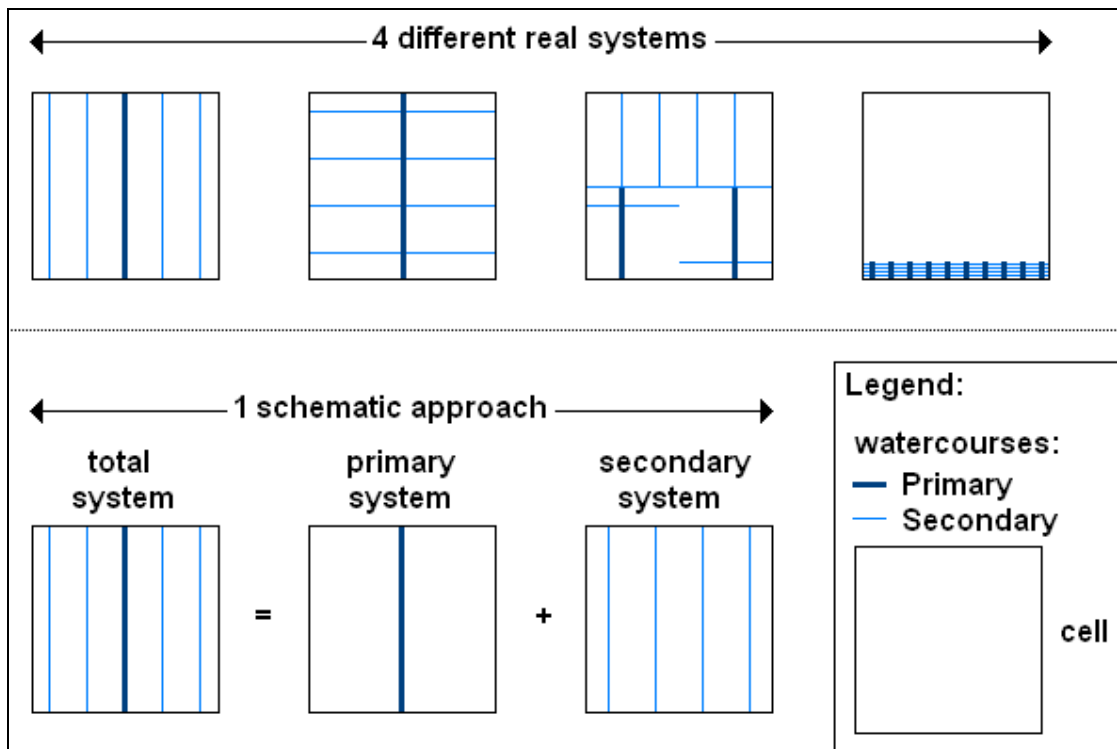
De bepaling van de freatische lekweerstand gebeurt met de vergelijkingen (1) t/m (6) uit paragraaf 2.2.1.

#### 4.2 Bijschakeling van het secundaire systeem

Bepaal verdeling van drainage fluxen aan de hand van evenredigheid van de oppervlakten van de intrekgebieden per drainagesysteem en van daaruit de freatische lekweerstand per systeem.

Daarvoor worden de volgende zes stappen doorlopen:

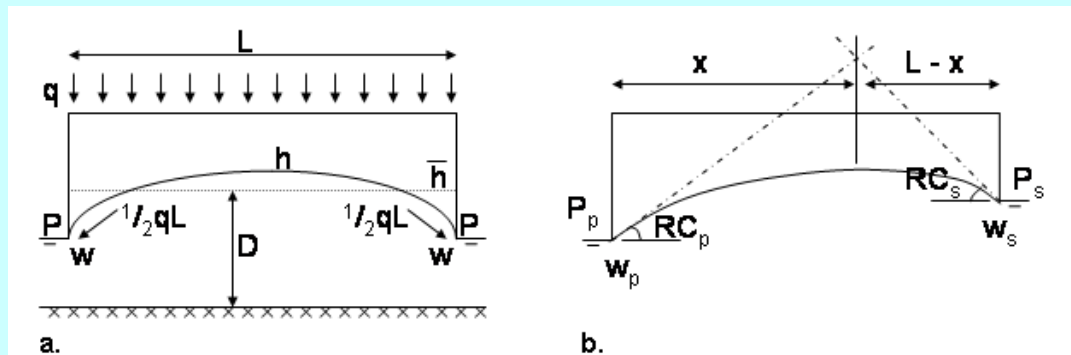
1. Bepaal de nieuwe slootafstand van het samenwerkende systeem (= afstand tussen de slootranden). Ga er daarbij vanuit dat alle sloten op identieke afstand van elkaar liggen (zie Figuur 7, total system).



**Figuur 17** Mogelijke verschillende situaties die identiek worden behandeld

2. Bepaal voor deze slootafstand de freatische lekweerstand van het primaire systeem volgens methode uit paragraaf 2.2.1 (formules 2.1 t/m 2.6). Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de primaire sloten. Deze weerstand noemen we  $W_{tot\_P}$ .
3. Bepaal voor deze slootafstand de freatische lekweerstand van het secundaire systeem volgens methode uit paragraaf 2.2.1 (formules 2.1 t/m 2.6). Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de secundaire sloten. Deze weerstand noemen we  $W_{tot\_S}$ .
4. Bepaal op basis van de freatische lekweerstanden die gevonden zijn bij stappen 2 en 3 de waterscheiding tussen een primaire en een secundaire sloot. Daarvoor kan de volgende methode worden gebruikt:

### Beschrijving methode bepaling waterscheiding



Figuur 18 Bepaling van de waterscheiding tussen twee sloten

Voor de waterscheiding tussen twee sloten zijn de richtingscoëfficiënten aan beide slootkanten bepalend. De vorm van de opbolling tussen de sloten doet minder ter zake. In deze benadering gaan we uit van een parabolische opbolling tussen de sloten. Allereerst worden de richtingscoëfficiënten van beide systemen afgeleid uit de resultaten van stappen 2 en 3 volgens onderstaande vergelijkingen (zie ook Figuur 8):

$$\bar{h} - P = \frac{q \cdot L \cdot w}{D} \quad (7) \quad \text{en:} \quad h_{\max} - P = \frac{3}{2}(\bar{h} - P) \quad (4.1)$$

$$RC = \frac{2 \cdot (h_{\max} - P)}{\frac{1}{2}L} = \frac{4 \cdot (h_{\max} - P)}{L} = \frac{6 \cdot (\bar{h} - P)}{L} = \frac{6 \cdot q \cdot w}{D} \quad (4.2)$$

hierin is:

- $\bar{h}$  gemiddelde grondwaterstand [m]
- $P$  slootpeil [m]
- $q$  grondwateraanvulling [m/d]
- $L$  slootafstand [m]
- $w$  freatische lekweerstand [d]
- $D$  dikte van de gedraineerde laag [m]
- $h_{\max}$  maximale grondwaterstand [m]
- $RC$  richtingscoëfficiënt van de opbolling direct naast de sloot [-]

Voor de bepaling van de richtingcoëfficiënt van het primaire stelsel wordt in vergelijking (4.2)  $W_{tot,P}$  ingevuld voor  $w$ . Voor het secundaire stelsel wordt  $W_{tot,S}$  gebruikt. Voor  $q$  en  $D$  wordt in beide gevallen gelijke waarden aangehouden. Verschillen in  $D$  tussen beide systemen worden daarmee verwaarloosd.

Vervolgens wordt de waterscheiding tussen een primaire en een secundaire sloot bepaald op basis van de verhoudingen van beide richtingscoëfficiënten. Voor sloten met verschillende peilen geldt dan algemeen:

$$P_p + RC_p \cdot x = P_s + RC_s \cdot (L - x) \quad (4.3)$$

Uit vergelijking (10) volgt:

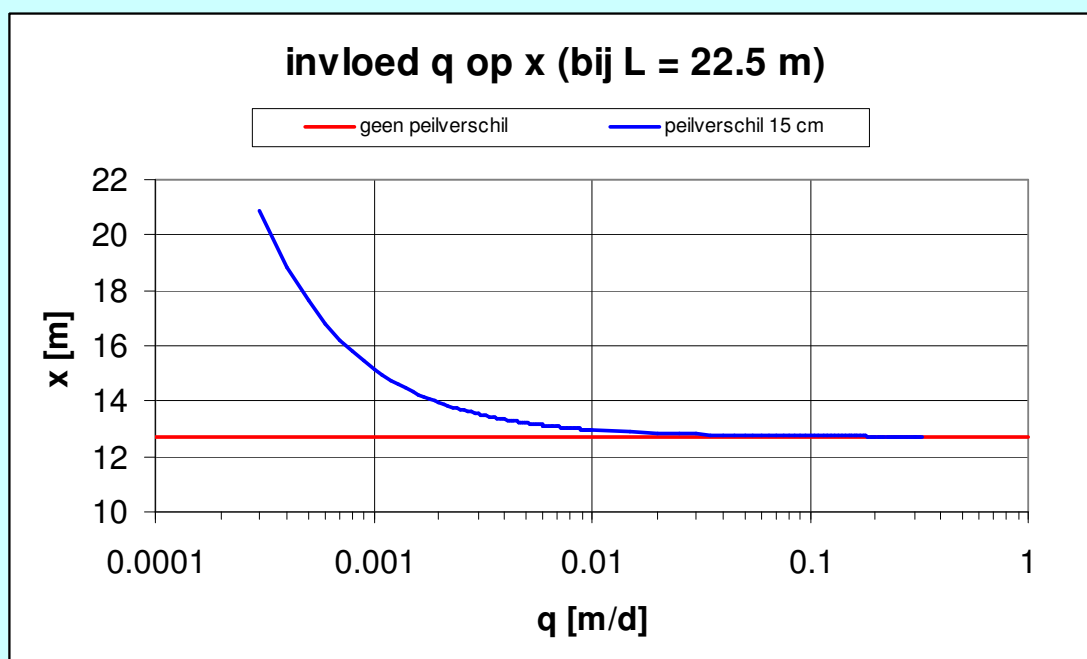
$$x = \frac{RC_s \cdot L + P_s - P_p}{RC_s + RC_p} \quad (4.4)$$

hierin is:

- $x$  afstand van de waterscheiding tot de primaire sloot [m]
- $RC_P$  richtingscoëfficiënt voor de primaire sloot (bepaald uit vergelijking 9) [-]
- $RC_S$  richtingscoëfficiënt voor de secundaire sloot (bepaald uit vergelijking 9) [-]
- $P_P$  waterpeil in de primaire sloot [m]
- $P_S$  waterpeil in de secundaire sloot [m]
- $gL$  slootafstand [m]

#### **Invloed van peilverschil op waterscheiding**

Het komt in de Nederlandse praktijk regelmatig voor dat het drainageniveau van de secundaire sloten wat hoger ligt dan het drainageniveau van de primaire sloten. De secundaire sloten beginnen pas echt goed te draineren in perioden met veel neerslag. In dergelijke perioden nadert de waarde van  $x$  uit vergelijking (4.4) de waarde die  $x$  zou hebben bij gelijke waterpeilen. Figuur 9 laat hiervan een voorbeeld zien voor een primaire watergang en een secundaire watergang met een 15 cm hoger peil.



**Figuur 19** Voorbeeld van effect van grondwateraanvulling op de waterscheiding

In bovenstaand voorbeeld liggen de watergangen 22.5 meter uit elkaar. Duidelijk is te zien dat bij toenemende grondwateraanvulling de ligging van de waterscheiding (de blauwe lijn) nadert naar de plek die de waterscheiding heeft bij gelijke peilen (de rode lijn). Naarmate de grondwateraanvulling kleiner wordt, lopen de waarden van  $x$  sterker op. Dat betekent dat de primaire sloot een steeds groter aandeel van de drainage opeist. Bij een grondwateraanvulling die kleiner is 0.3 mm/dag wordt de berekende  $x$  groter dan  $L$ . In die gevallen is de secundaire watergang gestopt met draineren.

5. Bepaal op basis van stappen 2, 3 en 4 en de aantallen primaire en secundaire sloten in de cel de totale intrekgebieden van beide stelsels. Daarbij zijn twee mogelijke situaties te onderscheiden.

Situatie 1: het aantal primaire watergangen is kleiner of gelijk aan het aantal secundaire watergangen ( $\#_P \leq \#_S$ ):

$$I_P = \#_P \cdot 2 \cdot x + \#_P \cdot B_P \quad (4.5)$$

$$I_S = \#_P \cdot 2 \cdot (L - x) + (\#_S - \#_P) \cdot L + \#_S \cdot B_S \quad (4.6)$$

Situatie 2: het aantal primaire watergangen is groter dan het aantal secundaire watergangen ( $\#_P > \#_S$ ):

$$I_P = \#_S \cdot 2 \cdot x + (\#_P - \#_S) \cdot L + \#_P \cdot B_P \quad (4.7)$$

$$I_S = \#_S \cdot 2 \cdot (L - x) + \#_S \cdot B_S \quad (4.8)$$

Hierin is:

- $L$  slootafstand van het samenwerkende drainagesysteem [m]
- $B_P$  breedte van de primaire sloot [m]
- $B_S$  breedte van de secundaire sloot [m]
- $x$  afstand van de waterscheiding tot de primaire sloot (uit vergelijking 4.4) [m]
- $\#_P$  aantal primaire sloten in de cel [-]
- $\#_S$  aantal secundaire sloten in de cel [-]
- $I_P$  intrekgebied van het primaire deel van het drainagesysteem [m]
- $I_S$  intrekgebied van het secundaire deel van het drainagesysteem [m]

6. Bepaal voor het samenwerkende drainagesysteem de freatische lekweerstand van het primaire deel, en van het secundaire deel. De freatische lekweerstand van het totale stelsel volgt daar weer uit.

De afzonderlijke freatische lekweerstand van het samenwerkende drainagesysteem kunnen worden bepaald uit:

$$W_P = \frac{I_P \cdot W_{tot\_P} + I_S \cdot W_{tot\_S}}{I_P} \quad (4.9)$$

$$W_S = \frac{I_P \cdot W_{tot\_P} + I_S \cdot W_{tot\_S}}{I_S} \quad (4.10)$$

$$W = \frac{1}{\frac{1}{W_P} + \frac{1}{W_S}} \quad (4.11)$$

Hierin is:

- $W_{tot\_P}$  freatische lekweerstand als alle sloten van het drainagesysteem primaire sloten zijn (uit stap 2) [d]
- $W_{tot\_S}$  freatische lekweerstand als alle sloten van het drainagesysteem secundaire sloten zijn (uit stap 3) [d]
- $I_P$  intrekgebied van het primaire deel van het drainagesysteem (uit vergelijking 4.5 of 4.7) [m]
- $I_S$  intrekgebied van het secundaire deel van het drainagesysteem (uit vergelijking 4.6 of 4.8) [m]

$W_P$	freatische lekweerstand van het primaire deel van het drainagesysteem [d]
$W_S$	freatische lekweerstand van het secundaire deel van het drainagesysteem [d]
$W$	freatische lekweerstand van het totale drainagesysteem [d]

Onderscheid maken in primaire en secundaire delen van het totale drainagesysteem kan zinvol zijn voor onderzoek naar de waterkwaliteit.

### 4.3 Bijschakeling van het tertiaire systeem

Hiervoor wordt een vergelijkbare werkwijze gevolgd als voor de bijschakeling van het secundaire systeem (zie par. 4.2). Daarbij wordt de werking van de primaire en secundaire drainagesystemen gecombineerd tot een enkel drainagesysteem. Vervolgens wordt het tertiaire drainagesysteem bijgeschakeld.

**Stap 1 t/m 6** zijn hetzelfde als voor een systeem met twee drainagesystemen. Aansluitend worden de volgende zeven stappen doorlopen:

7. Bepaal, net als in stap 1 uit par 4.2, de nieuwe slootafstand van het samenwerkende systeem (= afstand tussen de slootranden). Ga er daarbij weer vanuit dat alle sloten op identieke afstand van elkaar liggen.
8. Bepaal voor deze slootafstand de freatische lekweerstand van het primaire systeem volgens methode uit paragraaf 2.2.1 ((formules 2.1 t/m 2.6). Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de primaire sloten. Deze weerstand noemen we  $W_{tot\_P}$ .
9. Bepaal voor deze slootafstand de freatische lekweerstand van het secundaire systeem volgens methode uit paragraaf 2.2.1 (formules 2.1 t/m 2.6). Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de secundaire sloten. Deze weerstand noemen we  $W_{tot\_S}$ .
10. Bepaal voor deze slootafstand de freatische lekweerstand van het tertiaire systeem volgens methode uit paragraaf 2.2.1 ((formules 2.1 t/m 2.6). Hanteer daarbij voor alle sloten de parameters van de tertiaire sloten. Deze weerstand noemen we  $W_{tot\_T}$ .
11. Bepaal op basis van de freatische lekweerstanden die gevonden zijn bij stappen 8, 9 en 10 de waterscheidingen tussen een primaire en een secundaire sloot, tussen een primaire en een tertiaire sloot en tussen een secundaire en een tertiaire sloot.

Allereerst worden met vergelijkingen (4.1) en (4.2) volgens het principe van Figuur 8 de richtingscoëfficiënten van de drie systemen bepaald met de waarden  $W_{tot\_P}$ ,  $W_{tot\_S}$  en  $W_{tot\_T}$  die in stap 8, 9 en 10 gevonden zijn.

Vervolgens wordt de waterscheiding tussen een primaire en een secundaire sloot, tussen een primaire en een tertiaire sloot, en tussen een secundaire en een tertiaire sloot bepaald op basis van de verhoudingen van de drie richtingscoëfficiënten.

$$x = \frac{RC_S \cdot L + P_S - P_P}{RC_S + RC_P} \quad \text{identiek aan vergelijking (4.4)} \quad (4.12)$$

$$y = \frac{RC_T \cdot L + P_T - P_P}{RC_P + RC_T} \quad (4.13)$$

$$z = \frac{RC_T \cdot L + P_T - P_S}{RC_S + RC_T} \quad (4.14)$$

hierin is:

- $x$  tussen primaire en secundaire sloot: afstand van de waterscheiding tot de primaire sloot [m]
- $y$  tussen primaire en tertiaire sloot: afstand van de waterscheiding tot de primaire sloot [m]
- $z$  tussen secundaire en tertiaire sloot: afstand van de waterscheiding tot de secundaire sloot [m]
- $RC_P$  richtingscoëfficiënt voor de primaire sloot (bepaald uit vergelijking 4.2) [-]
- $RC_S$  richtingscoëfficiënt voor de secundaire sloot (bepaald uit vergelijking 4.2) [-]
- $RC_T$  richtingscoëfficiënt voor de tertiaire sloot (bepaald uit vergelijking 4.2) [-]
- $P_P$  waterpeil in de primaire sloot [m]
- $P_S$  waterpeil in de secundaire sloot [m]
- $P_T$  waterpeil in de tertiaire sloot [m]
- $L$  slootafstand [m]

12. Bepaal op basis van stappen 8, 9, 10 en 11 en de aantallen primaire, secundaire en tertiaire sloten in de cel de totale intrekgebieden van de drie stelsels. Daarbij zijn zes mogelijke situaties te onderscheiden.

Situatie 1: het aantal primaire watergangen is kleiner of gelijk aan het aantal secundaire watergangen, en het aantal secundaire watergangen is kleiner of gelijk aan het aantal tertiaire watergangen ( $\#_P \leq \#_S \leq \#_T$ ):

$$I_P = \#_P \cdot 2x \cdot \frac{\#_S}{\#_S + \#_T} + \#_P \cdot 2y \cdot \frac{\#_T}{\#_S + \#_T} + \#_P \cdot B_P \quad (4.15)$$

$$I_S = \#_P \cdot 2(L-x) \cdot \frac{\#_S}{\#_S + \#_T} + \left( \#_S - \#_P \cdot \frac{\#_S}{\#_S + \#_T} \right) \cdot 2z + \#_S \cdot B_S \quad (4.16)$$

$$I_T = \#_P \cdot 2(L-y) \cdot \frac{\#_T}{\#_S + \#_T} + \left( \#_S - \#_P \cdot \frac{\#_S}{\#_S + \#_T} \right) \cdot 2(L-z) + \left[ \#_T - \#_P \cdot \frac{\#_T}{\#_S + \#_T} - \left( \#_S - \#_P \cdot \frac{\#_S}{\#_S + \#_T} \right) \right] \cdot L + \#_T \cdot B_T \quad (4.17)$$

Situatie 2: het aantal primaire watergangen is kleiner of gelijk aan het aantal tertiaire watergangen, en het aantal tertiaire watergangen is kleiner dan het aantal secundaire watergangen ( $\#_P \leq \#_T < \#_S$ ):

$$I_P = \#_P \cdot 2x \cdot \frac{\#_S}{\#_S + \#_T} + \#_P \cdot 2y \cdot \frac{\#_T}{\#_S + \#_T} + \#_P \cdot B_P \quad (4.18)$$

$$I_S = \#_P \cdot 2(L-x) \cdot \frac{\#_S}{\#_S + \#_T} + \left( \#_T - \#_P \cdot \frac{\#_T}{\#_S + \#_T} \right) \cdot 2z + \left[ \#_S - \#_P \cdot \frac{\#_S}{\#_S + \#_T} - \left( \#_T - \#_P \cdot \frac{\#_T}{\#_S + \#_T} \right) \right] \cdot L + \#_S \cdot B_S \quad (4.19)$$

$$I_T = \#_P \cdot 2(L-y) \cdot \frac{\#_T}{\#_S + \#_T} + \left( \#_T - \#_P \cdot \frac{\#_T}{\#_S + \#_T} \right) \cdot 2(L-z) + \#_T \cdot B_T \quad (4.20)$$

Situatie 3: het aantal tertiaire watergangen is kleiner dan het aantal primaire watergangen, en het aantal primaire watergangen is kleiner of gelijk aan het aantal secundaire watergangen ( $\#_T < \#_P \leq \#_S$ ):

$$I_P = \left( \#_P - \#_T \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_S} \right) \cdot 2x + \#_T \cdot 2y \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_S} + \#_P \cdot B_P \quad (4.21)$$

$$I_S = \left( \#_P - \#_T \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_S} \right) \cdot 2(L-x) + \#_T \cdot 2z \cdot \frac{\#_S}{\#_P + \#_S} + \left[ \#_S - \left( \#_P - \#_T \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_S} \right) - \#_T \cdot \frac{\#_S}{\#_P + \#_S} \right] \cdot L + \#_S \cdot B_S \quad (4.22)$$

$$I_T = \#_T \cdot 2(L-y) \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_S} + \#_T \cdot 2(L-z) \cdot \frac{\#_S}{\#_P + \#_S} + \#_T \cdot B_T \quad (4.23)$$

Situatie 4: het aantal secundaire watergangen is kleiner dan het aantal primaire watergangen, en het aantal primaire watergangen is kleiner of gelijk aan het aantal tertiaire watergangen ( $\#_S < \#_P \leq \#_T$ ):

$$I_P = \#_S \cdot 2x \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_T} + \left( \#_P - \#_S \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_T} \right) \cdot 2y + \#_P \cdot B_P \quad (4.24)$$

$$I_S = \#_S \cdot 2(L-x) \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_T} + \#_S \cdot 2z \cdot \frac{\#_T}{\#_P + \#_T} + \#_S \cdot B_S \quad (4.25)$$

$$I_T = \left( \#_P - \#_S \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_T} \right) \cdot 2(L-y) + \#_S \cdot 2(L-z) \cdot \frac{\#_T}{\#_P + \#_T} + \left[ \#_T - \left( \#_P - \#_S \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_T} \right) - \#_S \cdot \frac{\#_T}{\#_P + \#_T} \right] \cdot L + \#_T \cdot B_T \quad (4.26)$$

Situatie 5: het aantal secundaire watergangen is kleiner of gelijk aan het aantal tertiaire watergangen, en het aantal tertiaire watergangen is kleiner dan het aantal primaire watergangen ( $\#_S \leq \#_T < \#_P$ ):

$$I_P = \#_S \cdot 2x \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_T} + \left( \#_T - \#_S \cdot \frac{\#_T}{\#_P + \#_T} \right) \cdot 2y + \left[ \#_P - \#_S \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_T} - \left( \#_T - \#_S \cdot \frac{\#_T}{\#_P + \#_T} \right) \right] \cdot L + \#_P \cdot B_P \quad (4.27)$$

$$I_S = \#_S \cdot 2(L-x) \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_T} + \#_S \cdot 2z \cdot \frac{\#_T}{\#_P + \#_T} + \#_S \cdot B_S \quad (4.28)$$

$$I_T = \left( \#_T - \#_S \cdot \frac{\#_T}{\#_P + \#_T} \right) \cdot 2(L-y) + \#_S \cdot 2(L-z) \cdot \frac{\#_T}{\#_P + \#_T} + \#_T \cdot B_T \quad (4.29)$$

Situatie 6: het aantal tertiaire watergangen is kleiner dan het aantal secundaire watergangen, en het aantal secundaire watergangen is kleiner of gelijk aan het aantal primaire watergangen ( $\#_T < \#_S < \#_P$ ):

$$I_P = \left( \#_S - \#_T \cdot \frac{\#_S}{\#_P + \#_S} \right) \cdot 2x + \#_T \cdot 2y \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_S} + \left[ \#_P - \left( \#_S - \#_T \cdot \frac{\#_S}{\#_P + \#_S} \right) - \#_T \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_S} \right] \cdot L + \#_P \cdot B_P \quad (4.30)$$

$$I_S = \left( \#_S - \#_T \cdot \frac{\#_S}{\#_P + \#_S} \right) \cdot 2(L-x) + \#_T \cdot 2z \cdot \frac{\#_S}{\#_P + \#_S} + \#_S \cdot B_S \quad (4.31)$$

$$I_T = \#_T \cdot 2(L-y) \cdot \frac{\#_P}{\#_P + \#_S} + \#_T \cdot 2(L-z) \cdot \frac{\#_S}{\#_P + \#_S} + \#_T \cdot B_T \quad (4.32)$$

Hierin is:

- $L$  slootafstand van het samenwerkende drainagesysteem[m]
- $B_P$  breedte van de primaire sloot [m]
- $B_S$  breedte van de secundaire sloot [m]
- $B_T$  breedte van de tertiaire sloot [m]
- $x$  tussen primaire en secundaire sloot: afstand van de waterscheiding tot de primaire sloot (uit vergelijking 4.12) [m]
- $y$  tussen primaire en tertiaire sloot: afstand van de waterscheiding tot de primaire sloot (uit vergelijking 4.13) [m]
- $z$  tussen secundaire en tertiaire sloot: afstand van de waterscheiding tot de secundaire sloot (uit vergelijking 4.14) [m]
- $\#_P$  aantal primaire sloten in de cel [-]
- $\#_S$  aantal secundaire sloten in de cel [-]
- $\#_T$  aantal tertiaire sloten in de cel [-]
- $l_P$  intrekegebied van het primaire deel van het drainagesysteem [m]
- $l_S$  intrekegebied van het secundaire deel van het drainagesysteem [m]
- $l_T$  intrekegebied van het tertiaire deel van het drainagesysteem [m]



13. Bepaal voor het samenwerkende drainagesysteem de freatische lekweerstand van het primaire deel, van het secundaire deel, en van het tertiaire deel. De freatische lekweerstand van het totale stelsel volgt daar weer uit.

De afzonderlijke freatische lekweerstand van het samenwerkende drainagesysteem kunnen worden bepaald uit:

$$W_P = \frac{I_P \cdot W_{tot\_P} + I_S \cdot W_{tot\_S} + I_T \cdot W_{tot\_T}}{I_P} \quad (4.33)$$

$$W_S = \frac{I_P \cdot W_{tot\_P} + I_S \cdot W_{tot\_S} + I_T \cdot W_{tot\_T}}{I_S} \quad (4.34)$$

$$W_T = \frac{I_P \cdot W_{tot\_P} + I_S \cdot W_{tot\_S} + I_T \cdot W_{tot\_T}}{I_T} \quad (4.35)$$

$$W = \frac{1}{\frac{1}{W_P} + \frac{1}{W_S} + \frac{1}{W_T}} \quad (4.36)$$

Hierin is:

- $W_{tot\_P}$  freatische lekweerstand als alle sloten van het drainagesysteem primaire sloten zijn (uit stap 8) [d]
- $W_{tot\_S}$  freatische lekweerstand als alle sloten van het drainagesysteem secundaire sloten zijn (uit stap 9) [d]
- $W_{tot\_T}$  freatische lekweerstand als alle sloten van het drainagesysteem tertiaire sloten zijn (uit stap 10) [d]
- $I_P$  intrekgebied van het primaire deel van het drainagesysteem (uit vergelijking 4.15, 4.18, 4.21, 4.24, 4.27 of 4.30) [m]
- $I_S$  intrekgebied van het secundaire deel van het drainagesysteem (uit vergelijking 4.16, 4.19, 4.22, 4.25, 4.28 of 4.31) [m]
- $I_T$  intrekgebied van het tertiaire deel van het drainagesysteem (uit vergelijking 4.17, 4.20, 4.23, 4.26, 4.29 of 4.32) [m]
- $W_P$  freatische lekweerstand van het primaire deel van het drainagesysteem [d]
- $W_S$  freatische lekweerstand van het secundaire deel van het drainagesysteem [d]
- $W_T$  freatische lekweerstand van het tertiaire deel van het drainagesysteem [d]
- $W$  freatische lekweerstand van het totale drainagesysteem [d]

## 4.4 Plausibiliteit

De methode om de freatische lekweerstanden te bepalen, die is beschreven in paragrafen 4.1-4.3 is onderworpen aan een aantal tests.

### **Test 1: Afname freatische lekweerstand bij bijschakeling systemen**

Als het secundaire drainagesysteem in werking treedt neemt de freatische lekweerstand van het primaire systeem af. Ook de freatische lekweerstand van het samenwerkende systeem wordt dan kleiner. Na bijschakeling van het tertiaire systeem worden alle weerstanden opnieuw kleiner.

Dit is getest aan de hand van tientallen berekeningen met een spreadsheet, waarbij ook de meest wilde combinaties van drainagesystemen zijn gebruikt. De tests wezen allen uit dat de gehanteerde methode hieraan voldoet.

### **Test 2: Freatische lekweerstand bij identieke drainagesystemen is gelijk aan enkelvoudig systeem**

Als de primaire, secundaire en tertiaire drainagesystemen uit respectievelijk  $\#_P$ ,  $\#_S$  en  $\#_T$  identieke sloten bestaan, dan moet de freatische lekweerstand van het samenwerkende systeem identiek zijn aan de freatische lekweerstand van een enkelvoudig drainagesysteem dat uit een  $\#_P + \#_S + \#_T$  sloten bestaat. Wederom logisch, maar ook hier moet de methode wel aan voldoen.

Ook dit is getest aan de hand van tientallen berekeningen met een spreadsheet, waarbij ook de meest uiteenlopende aantallen sloten zijn gebruikt. De tests wezen allen uit dat de gehanteerde methode hieraan voldoet.

### **Test 3: Vergelijking met numeriek model**

Met een eenvoudig numeriek model is een aantal tests uitgevoerd om lijnvormige drainage-elementen naar een vlakdekkend drainagesysteem te vertalen. Hiervoor is gebruik gemaakt van twee drainagesystemen, waarbij onderscheid is gemaakt tussen situaties met gelijke peilen in de twee drainage systemen, en situaties waarbij het secundaire stelsel een hoger peil heeft als het primaire stelsel.

### 4.4.1 Beschrijving gebruikt model

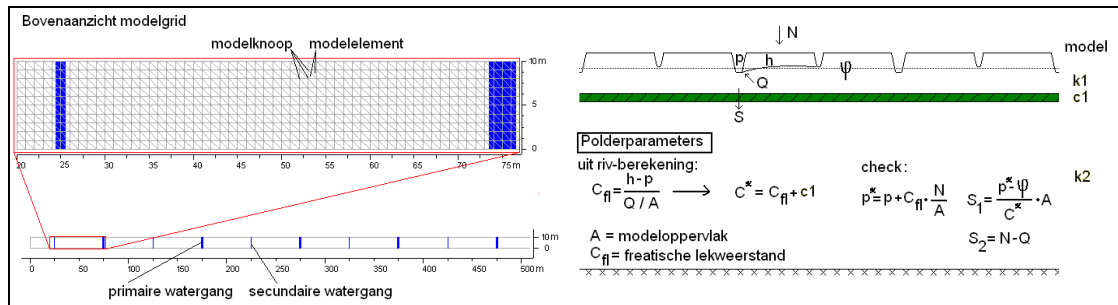
Regelmatig eindige elementen model met een knoopafstand van 1 m (zie 20).

Afmetingen: 10 bij 2000 m.

Watergangen om de 50 meter:

- Primaire watergangen op: 75, 175, 275, 375, ..., 1875 en 1975 m.
- Secundaire watergangen op: 25, 125, 225, 325, ..., 1825 en 1925 m.

De primaire watergangen beslaan 3 rijen knopen, de secundaire watergangen 1 rij knopen. Zo bestaat de primaire watergang op 75 m feitelijk uit 3 watergangen op resp. 74, 75 en 76 m.



Figuur 20 Overzicht van de gebruikte numerieke modelschematisatie

#### 4.4.2 Aannames

- Eventuele verschillen in dikte en weerstand van de aanwezige resterende deklaag (C1 in Tabel 2) onder primaire en secundaire watergangen zijn verwaarloosd.
- Eventuele verschillen in bodemweerstand van primaire en secundaire watergangen (CD in Tabel 2) zijn verwaarloosd.

#### 4.4.3 Beschrijving basis berekeningen

Er zijn allereerst berekeningen uitgevoerd met een zgn. basismodel. Daarbij is gewerkt met discrete sloten (lijnelementen) en een stationair neerslagoverschot aan de bovenrand. Verder is gebruik gemaakt van de volgende parameters.

Tabel 2 Parameterwaarden basis model

Parameter	Omschrijving	waarde
N [mm/d]	Neerslagoverschot	1
$k_1$ [m/d]	Doorlatendheid bovenlaag (1 <sup>e</sup> WVP)	1
Top <sub>1</sub> [m +NAP]	Top bovenlaag (maaiveld)	1,2
Basis <sub>1</sub> [m +NAP]	Basis bovenlaag (1 <sup>e</sup> WVP)	-4,9
C <sub>1</sub> [d]	Verticale weerstand bovenlaag	200
$kD_2$ [m <sup>2</sup> /d]	Doorlaatvermogen onderlaag (2 <sup>e</sup> WVP) (*)	$10^{20}$
p <sub>p</sub> [m +NAP]	Slootpeil primaire watergangen	0,0
p <sub>s</sub> [m +NAP]	Slootpeil secundaire watergangen (**) rekenserie 1: gelijke peilen rekenserie 2: verschillende peilen	0,00 0,15
BQ <sub>1</sub> [m/d]	Flux randvoorwaarde bovenlaag alle zijden (2 <sup>e</sup> WVP)	0
BQ <sub>2</sub> [m/d]	Flux randvoorwaarde onderlaag lange zijden (2 <sup>e</sup> WVP)	0
BH <sub>2</sub> [m +NAP]	Stijghoogte randvoorwaarde onderlaag korte zijden (2 <sup>e</sup> WVP)	0,0
RW <sub>p</sub> [m]	Natte omtrek primaire watergangen (3 keer 1 m)	3
RW <sub>s</sub> [m]	Natte omtrek secundaire watergangen	1
CD <sub>p</sub> [d]	Bodemweerstand tegen drainage primaire watergangen	1
CD <sub>s</sub> [d]	Bodemweerstand tegen drainage secundaire watergangen	1

(\*) Hierdoor ontstaat een vaste stijghoogte in dit watervoerend pakket, gelijk aan het randpeil (= NAP)

(\*\*) De secundaire watergangen kunnen alleen draineren

#### 4.4.4 Invloed van het neerslagoverschot op de freatische lekweerstand

Met dit model zijn voor drie situaties berekeningen uitgevoerd bij verschillende waarden van het neerslagoverschot:

1. Alleen de primaire sloten werken.
2. Alleen de secundaire sloten werken
3. Primaire en secundaire sloten werken.

Dit is gedaan voor een stelsel met gelijke peilen en een stelsel met verschillende peilen in de primaire en secundaire sloten.

Tabel 3 geeft een overzicht van de resultaten van deze berekeningen.

**Tabel 3 Resultaten van het lijnenmodel bij verschillende waarden van het neerslagoverschot (\*)**

Neerslag over-schot [mm/dag]	Parameter	Primaire sloten	Secundaire sloten		Primaire + secundaire sloten (**)	
		NAP	NAP	+ 0,15 m	Beide NAP	Prim. NAP Sec. + 0,15
0,1	$h_{gem}$ [m +NAP]	0,00923	0,01214	0,02200	0,00515	0,00923
	$Q$ [m <sup>3</sup> /d]	0,217	0,175	0	0,298	0,217
	$S_2$ [m <sup>3</sup> /d]	0,183	0,225	0,400	0,102	0,183
	$C_{fl}$ [d] (***)	169,91	278,13	oneindig	69,04	169,91
0,5	$h_{gem}$ [m +NAP]	0,04604	0,06063	0,11000	0,02570	0,04604
	$Q$ [m <sup>3</sup> /d]	1,088	0,875	0	1,491	1,088
	$S_2$ [m <sup>3</sup> /d]	0,912	1,125	2,000	0,509	0,912
	$C_{fl}$ [d] (***)	169,32	277,22	oneindig	68,92	169,32
1	$h_{gem}$ [m +NAP]	0,09187	0,12102	0,19513	0,05131	0,09187
	$Q$ [m <sup>3</sup> /d]	2,180	1,753	0,440	2,985	2,186
	$S_2$ [m <sup>3</sup> /d]	1,820	2,247	3,560	1,015	1,814
	$C_{fl}$ [d] (***)	168,59	276,09	409,81	68,77	168,09
2	$h_{gem}$ [m +NAP]	0,18293	0,24114	0,31511	0,10231	0,15023
	$Q$ [m <sup>3</sup> /d]	4,377	3,522	2,212	5,976	5,074
	$S_2$ [m <sup>3</sup> /d]	3,623	4,478	5,788	2,024	2,926
	$C_{fl}$ [d] (***)	167,17	273,89	298,62	68,48	118,44
5	$h_{gem}$ [m +NAP]	0,45143	0,59639	0,66996	0,25344	0,30099
	$Q$ [m <sup>3</sup> /d]	11,069	8,912	7,609	14,988	14,095
	$S_2$ [m <sup>3</sup> /d]	8,931	11,088	12,391	5,012	5,905
	$C_{fl}$ [d] (***)	163,13	267,68	273,34	67,64	85,42
10	$h_{gem}$ [m +NAP]	0,88461	1,17304	1,24630	0,49961	0,54661
	$Q$ [m <sup>3</sup> /d]	22,529	18,153	16,856	30,126	29,247
	$S_2$ [m <sup>3</sup> /d]	17,471	21,847	23,144	9,874	10,753
	$C_{fl}$ [d] (***)	157,06	258,48	260,16	66,34	74,76

(\*) Resultaten voor een strook van 400 meter in het midden van het model

(\*\*) Bij ongelijke peilen:  $C_{fl}$  bepaald op NAP

(\*\*\*) Berekend m.b.v.  $(h_{gem} - P) * A / Q$  met  $P = 0$  en  $A = 4000 \text{ m}^2$

Uit bovenstaande tabel zijn de waarden voor de freatische lekweerstand ( $C_{fl}$ ) gehaald voor de berekeningen met een vlakschematisatie van het afwateringsstelsel.

Voor de situatie met gelijke peilen (en permanent drainerende sloten) geldt dat de berekende freatische lekweerstand ( $C_{f1}$ ) weinig verandert bij toenemende waarden van het neerslagoverschot. Dat geldt zowel voor het primaire, voor het secundaire als voor het gecombineerde stelsel. In een situatie met ongelijke peilen (en niet permanent drainerende sloten) geldt dat de freatische lekweerstand voor het secundaire en het gecombineerde stelsel sterk afneemt bij een toenemende neerslagintensiteit. Dat komt omdat het secundaire stelsel bij lage waarden van het neerslagoverschot nog niet of pas nauwelijks in werking is getreden. De waarden van beide freatische lekweerstand naderen bij een toenemend neerslagoverschot naar de waarden die worden bereikt als de drainage peilen wel gelijk zijn.



De sloten van het secundaire stelsel beginnen pas te draineren als de grondwaterstand ter plekke van deze sloten de slootbodem bereikt. De invloed van deze drainage op de gemiddelde grondwaterstand in het gehele gebied is op dat moment nog erg klein. Deze invloed neemt toe naarmate de neerslagintensiteit toeneemt, en daarmee ook de grondwaterstand hoger komt te liggen.

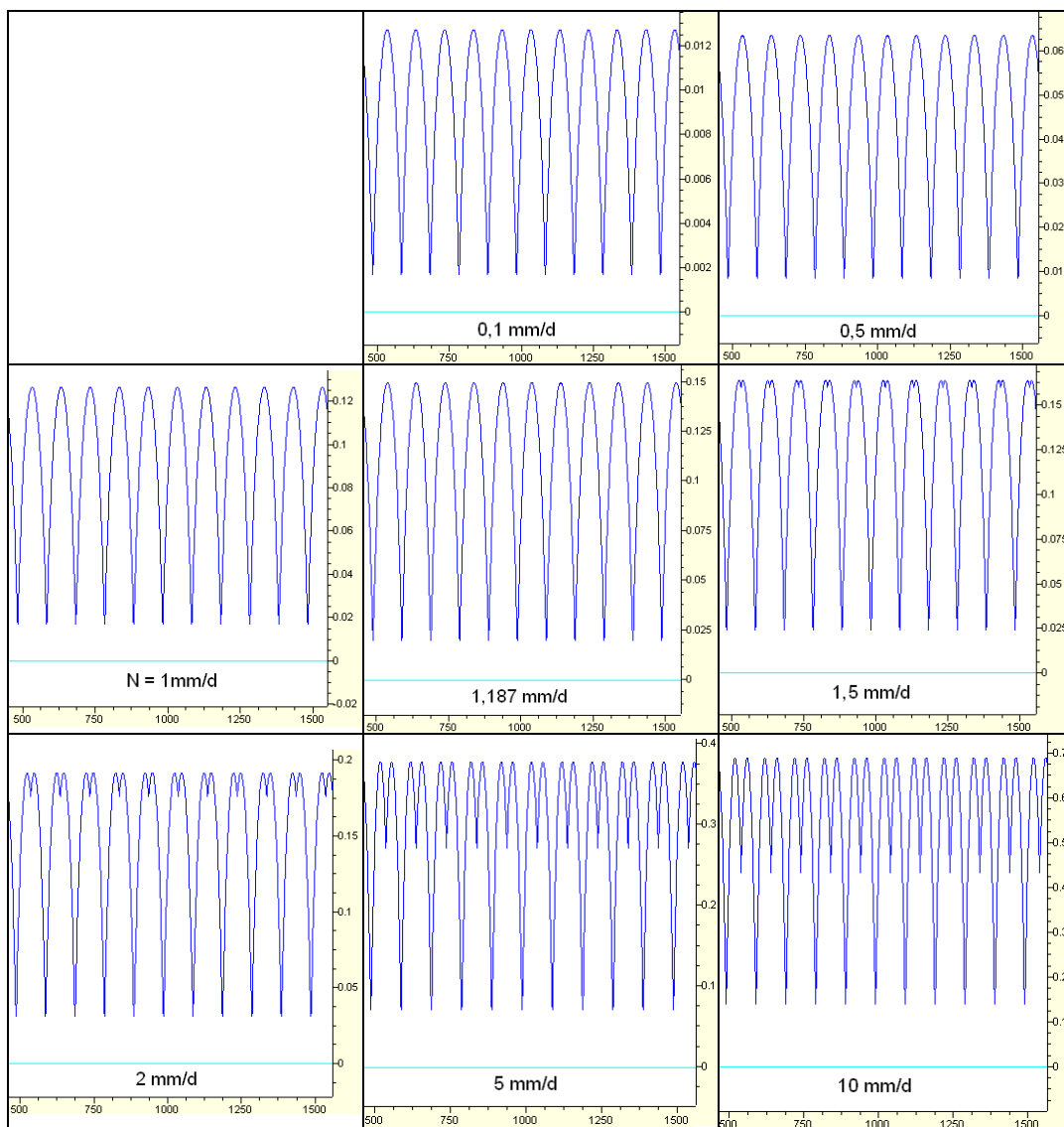
Dat geeft een extra probleem bij de schematisatie van lijnen naar vlakken. De secundaire sloten in dit voorbeeld blijken pas te beginnen met draineren bij een neerslagoverschot van 1,187 mm/dag (zie Figuur ). De daarbij behorende gemiddelde grondwaterstand ligt iets onder NAP + 0,11 m. Dat betekent dat bij een schematisatie in vlakken het drainageniveau van het secundaire stelsel (ruim 4 cm) onder de bodem van dit stelsel zou moeten liggen.

In situaties met hogere drainageniveaus in de secundaire sloten zal in een vlakken-model een representatief drainageniveau voor het secundaire stelsel moeten worden gekozen dat lager ligt dan het feitelijke drainageniveau van de afzonderlijke secundaire sloten. Hoe veel lager dit niveau moet worden gekozen hangt af van de verhouding tussen het aantal primaire en het aantal secundaire sloten in een cel. Bij een gelijk aantal sloten kan (uitgaande van een parabolisch verloop van de grondwaterstand) de waarde van het secundaire drainageniveau op 2/3 van het verschil tussen primair en secundair niveau worden gekozen. Als er relatief meer secundaire sloten zijn, zal het representatieve drainageniveau van het secundaire stelsel hoger komen te liggen. Als er relatief minder secundaire sloten zijn, zal dit niveau omlaag gaan.

## NHI

legend:

-  phreatic groundwater level
-  hydraulic head in aquifer 2
- 0,1 mm/d precipitation excess
- 750 location in model [m]
- 0,01 level [m+MSL]



**Figuur 21** Berekende grondwaterstand voor verschillende waarden van het neerslagoverschot, waarbij primaire peil = NAP en secundaire peil = NAP +0,15 m

### 4.4.5 Vlakdrainage

Voor deze berekeningen zijn de watergangen als lijnelementen uit het model gehaald (inactief gezet), en is een topsysteem toegevoegd dat bestaat uit 1 gecombineerd of uit 2 losse stelsels van watergangen (drainagestelsels), met bijbehorende peilen en freatische lekweerstand. Verder is er gewerkt met hetzelfde twee lagen systeem, als bij de berekeningen hierboven.

In fase 1+ van het NHI is bij deze plausibiliteits-toets alleen gewerkt met gelijke peilen in de verschillende drainagesystemen.

#### 4.4.6 Situatie met gelijke peilen

De berekeningen met primaire en secundaire watergangen zijn vergeleken met berekeningen waarbij de watergangen zijn vervangen door een topsysteem met dezelfde parameterwaarden (zie ook hieronder Tabel 4 en Tabel 5). De berekeningen zijn zowel uitgevoerd voor een constante freatische lekweerstand, als voor de berekende freatische lekweerstand bij een specifiek neerslagoverschot (zie ook Tabel 3).

**Tabel 4 Berekeningsresultaten vlakdrainage primaire stelsel**

Vlak					Lijn		
N [mm/d]	Cfl [d]	GWS-gem [m+NAP]	Qsloot [m <sup>3</sup> /d]	S2 [m <sup>3</sup> /d]	GWS-gem [m+NAP]	Qsloot [m <sup>3</sup> /d]	Cfl [d]
0,1	169,00	0,009135	0,217	0,183	0,009225	0,217	169,91
0,5	169,00	0,045676	1,086	0,914	0,046040	1,088	169,32
1	169,00	0,091351	2,173	1,827	0,091873	2,180	168,59
2	169,00	0,182703	4,346	3,654	0,182929	4,377	167,17
5	169,00	0,456757	10,865	9,135	0,451428	11,069	163,13
10	169,00	0,913514	21,730	18,270	0,884612	22,529	157,06
0,1	169,91	0,009162	0,217	0,183	0,009225	0,217	169,91
0,5	169,32	0,045723	1,086	0,914	0,046040	1,088	169,32
1	168,59	0,091231	2,175	1,825	0,091873	2,180	168,59
2	167,17	0,181623	4,368	3,632	0,182929	4,377	167,17
5	163,13	0,447999	11,040	8,960	0,451428	11,069	163,13
10	157,06	0,877283	22,454	17,546	0,884612	22,529	157,06

**Tabel 5 Berekeningsresultaten vlakdrainage secundaire stelsel (peil: NAP)**

Vlak					Lijn		
N [mm/d]	Cfl [d]	GWS-gem [m+NAP]	Qsloot [m <sup>3</sup> /d]	S2 [m <sup>3</sup> /d]	GWS-gem [m+NAP]	Qsloot [m <sup>3</sup> /d]	Cfl [d]
0,1	276,00	0,011572	0,169	0,231	0,012144	0,175	278,13
0,5	276,00	0,057862	0,843	1,157	0,060626	0,875	277,22
1	276,00	0,115723	1,686	2,314	0,121022	1,753	276,09
2	276,00	0,231447	3,371	4,629	0,241144	3,522	273,89
5	276,00	0,578616	8,428	11,572	0,596387	8,912	267,68
10	276,00	1,157233	16,855	23,145	1,173038	18,153	258,48
0,1	278,13	0,011610	0,168	0,232	0,012144	0,175	278,13
0,5	277,22	0,057969	0,841	1,159	0,060626	0,875	277,22
1	276,09	0,115739	1,685	2,315	0,121022	1,753	276,09
2	273,89	0,230698	3,386	4,614	0,241144	3,522	273,89
5	267,68	0,571136	8,577	11,423	0,596387	8,912	267,68
10	258,48	1,125098	17,498	22,502	1,173038	18,153	258,48

De afwijkingen in gemiddelde grondwaterstand en fluxen t.o.v. de waarden uit Tabel 3 zijn zowel voor de primaire sloten als voor de secundaire sloten verwaarloosbaar klein. Het is zeer waarschijnlijk dat dan ook voor het gecombineerde stelsel geldt.

#### 4.4.7 Afname weerstand van primair stelsel door bijschakelen secundair stelsel.

Met hetzelfde numerieke model zijn de freatische lekweerstanden bepaald voor het primaire deel en voor het secundaire deel van het samenwerkende drainagesysteem. De resulterende drainage fluxen naar beide systemen zijn vergeleken met de drainage fluxen van het model met drainerende lijnelementen. Er is gewerkt met een neerslagoverschot van 1 mm/dag en een gelijk drainagepeil (NAP) in beide slotenstelsels.

**Tabel 6 Effect van samenwerkende drainagesstelsels op de freatische lekweerstanden**

variant	resultaten lijnenmodel	resultaten vlakkenmodel
primair stelsel solo	gws <sub>gem</sub> = 0.091806 m Q <sub>prim</sub> = 2.164 m <sup>3</sup> /d Berekende C <sub>fl_p</sub> = 169.71 d (*)	gws <sub>gem</sub> = 0.091808 m Q <sub>prim</sub> = 2.164 m <sup>3</sup> /d Gebruikte C <sub>fl_p</sub> = 170.56 d (**)
secundair stelsel solo	gws <sub>gem</sub> = 0.110037 m Q <sub>sec</sub> = 1.799 m <sup>3</sup> /d Berekende C <sub>fl_s</sub> = 244.63 d (*)	gws <sub>gem</sub> = 0.110037 m Q <sub>sec</sub> = 1.799 m <sup>3</sup> /d Gebruikte C <sub>fl_s</sub> = 245.85 d (**)
primair en secundair stelsel samen	gws <sub>gem</sub> = 0.051311 m Q <sub>prim</sub> = 1.692 m <sup>3</sup> /d Q <sub>sec</sub> = 1.281 m <sup>3</sup> /d Q <sub>tot</sub> = 2.974 m <sup>3</sup> /d Berekende C <sub>fl_tot</sub> = 69.02 d (*)	gws <sub>gem</sub> = 0.051309 m Q <sub>prim</sub> = 1.692 m <sup>3</sup> /d Q <sub>sec</sub> = 1.281 m <sup>3</sup> /d Q <sub>tot</sub> = 2.974 m <sup>3</sup> /d Gebruikte C <sub>fl_p</sub> = 121.87 d (**) Gebruikte C <sub>fl_s</sub> = 160.97 d (**) Resulterende C <sub>fl_tot</sub> = 69.36 d

(\*) Berekend m.b.v.  $(gws_{gem} - P) * A / Q$  met  $P = 0$  en  $A = 4000 \text{ m}^2$

(\*\*) Gekalibreerde waarde in het vlakkenmodel, waarbij de fluxen gelijk zijn aan die in het lijnenmodel

Dezelfde totale drainageflux kan bereikt worden als de freatische lekweerstand van het primaire stelsel wordt vastgehouden (170,56 d) en de freatische lekweerstand van het secundaire stelsel wordt verlaagd tot 116,91 d. De fluxverdeling is dan echter totaal anders. De berekende drainage fluxen naar de afzonderlijke stelsels zijn dan:

$$Q_{\text{prim}} = 1.209 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_{\text{sec}} = 1.764 \text{ m}^3/\text{d}$$

Er wordt dan 0.483 m<sup>3</sup>/d te veel water naar het secundaire stelsel geleid. Daarnaast is het op zijn minst opmerkelijk dat er nu meer water door het secundaire stelsel zou worden afgevoerd, terwijl het secundaire stelsel solo minder water afvoert dan het primaire stelsel solo.

Op dezelfde manier kan de freatische lekweerstand van het secundaire stelsel worden vastgehouden (245,85 d) en de freatische lekweerstand van het primaire stelsel worden verlaagd tot 96,63 d. Dan worden de berekende drainage naar de afzonderlijke stelsels:

$$Q_{\text{prim}} = 2.135 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$Q_{\text{sec}} = 0.839 \text{ m}^3/\text{d}$$

Ook dit levert een incorrecte fluxverdeling.



De benodigde freatische lekweerstanden om de juiste fluxen te bereiken zijn ook te berekenen uit de fluxverdeling die met het lijnenmodel berekend wordt:

$$\frac{1}{C_{fl\_tot}} = \frac{1}{C_{fl\_p}} + \frac{1}{C_{fl\_s}} \quad (4.37)$$

met

$$C_{fl\_p} = \frac{Q_{sec}}{Q_{prim}} C_{fl\_s} \quad (4.38)$$

Voor een  $C_{fl\_tot}$  van 69.02 d, en een  $Q_{prim}$  van 1.692 m<sup>3</sup>/d  $Q_{sec}$  van 1.281 m<sup>3</sup>/d volgen dan nagenoeg dezelfde waarden voor de freatische lekweerstanden van de afzonderlijke delen van het samenwerkende systeem:

$$C_{fl\_p} = 122,35 \text{ d}$$

$$C_{fl\_s} = 161,60 \text{ d}$$

#### 4.4.8 Situatie met verschillende peilen

Deze situatie wordt nader uitgewerkt in fase 2 van het NHI.

#### 4.4.9 Conclusies

- De representatieve freatische lekweerstanden nemen licht af bij een toenemend neerslagoverschot. De fouten die gemaakt worden door de freatische lekweerstanden als constant te benaderen zijn relatief klein.
- Bij stelsels met een verschillend drainageniveau begint het secundaire stelsel al te werken terwijl de gemiddelde grondwaterstand nog onder het drainageniveau van het secundaire stelsel ligt. Dat betekent dat er een fictief drainageniveau moet worden gehanteerd voor het secundaire stelsel, dat lager ligt dan het drainageniveau van de afzonderlijke secundaire sloten.
- Bij samenwerking van de twee drainagesystemen worden beide freatische lekweerstanden kleiner dan de freatische lekweerstanden van de losse systemen afzonderlijk.

## 4.5 Toepassingsbereik

De methode is uitgewerkt tot drie samenwerkende drainagesystemen. Indien meer systemen worden bijgeschakeld, kan een vergelijkbare benadering worden toegepast. De bepaling van de afzonderlijke intrekgebieden wordt dan echter nog veel gecompliceerder, omdat er zich dan in potentie 24 verschillende situaties voordoen.

De methode is geschikt voor de bepaling van geknikte q-h relaties van afzonderlijke en samenwerkende drainagesystemen. Continue q-h relaties kunnen in principe ook met deze methode bepaald worden, maar vergen een andere manier van modelleren.

De methode is geschikt voor samenwerkende drainagestelsels met gelijke drainageniveaus. De methode kan (met enige voorzichtigheid) ook worden gebruikt voor stelsels met verschillende drainageniveaus. Daarbij wordt bij de bepaling van de freatische lekweerstand uitgegaan van gelijke drainagepeilen. Bij hogere waarden voor het neerslagoverschot, waarvoor de secundaire en tertiaire drainagesystemen vaak zijn aangelegd, zijn de aldus berekende freatische lekweerstand bruikbaar.

De methode gaat voorlopig uit van een constante dikte van de drainerende laag, en is daarom ongeschikt in situaties waar de freatische lekweerstand sterk afhankelijk is van de hoogte van het neerslagoverschot. De methode kan daar ook geschikt voor worden gemaakt, als er een verband gelegd kan worden tussen de dikte van de drainerende laag en het neerslagoverschot.

## 4.6 Aanbevelingen

Er dient nog nader onderzoek te worden gedaan naar:

- Het effect van slootafstanden die groter zijn dan de celbreedte, en (totale) slootlengtes die kleiner zijn dan de celbreedte;
- Continue ipv. geknikte q-h relatie;
- Freatische lekweerstand is afhankelijk van grondwaterstand en van variërende ontwateringsbasis (verandering natte omtrek en bodemweerstand, specifiek op overgangsniveau);
- Postprocessen van fluxen per systeem.

Dit onderzoek zal grotendeels in fase 2 worden uitgevoerd.

In fase 1 is een methode ontwikkeld die kon worden geïmplementeerd in de bestaande RIV-MODFLOW-package. Afhankelijk van het nadere onderzoek kan worden besloten om in fase 2 een eigen ontwateringspackage te ontwikkelen.

## 5 REFERENTIES

**Ernst, L.F., 1961.** Grondwaterstromingen in de verzadigde stroming en hun berekening bij de aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen, Versl Landbouwk onderz., 67.15, Pudoc, Wageningen

**De Lange, W.J. (2001).** Wanneer geldt 'slootafstand = elementbreedte' in de berekening van de topsysteemweerstand voor grondwatermodellering? Stromingen 7-3. p. 13-16.

**De Lange, W.J., 1999.** A Cauchy boundary condition for the lumped interaction between an arbitrary number of surface waters and a regional aquifer, Journal of Hydrology 226 250-261

**De Lange, W.J., 1998,** On the errors involved with the parametrization of the MODFLOW river and drainage packages, in MODFLOW'98 Volume I, ed. J. Poeter, Z. Zheng and M.Hill, 249-256

**De Lange, W.J., 1996,** Groundwater modelling of large domains with analytic elements, proefschrift, Delft University of Technology.

**De Lange, W.J., 1997a.** Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of freatische lekweerstand in de randvoorwaarde van een grondwater model, deel 1: De basis van het modelconcept, in; Stromingen 3(2)

**De Lange, W.J., 1997b.** Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of freatische lekweerstand in de randvoorwaarde van een grondwater model, deel 2: Het gebruik van de randvoorwaarde, in; Stromingen 3(3)

**De Lange, W.J., 1997c.** Nieuwe inzichten in het gebruik van voedingsweerstand of freatische lekweerstand in de randvoorwaarde van een grondwater model, deel 3: De parametrisering van de randvoorwaarde, in; Stromingen 3(4)

**Groenendijk, P, W.J. de Lange en K. Kovar, 2002.** Modelconcepten voor de interactie tussen verzadigd grondwater en oppervlaktewater. Stromingen 8-2. p. 11.28.

**Harbaugh, A.W., E.R. Banta, M.C. Hill en M.G. McDonald, 2000.** MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process; U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 pag.

**Massop H.Th.L., J.W.J. van der Gaast & A.G.M. Hermans, 2007.** Kenmerken van het ontwateringsstelsel in Nederland; Wageningen. Alterra-rapport 1397.

**Massop. H. Th. L, I. Peereboom, W.J. de Lange, M.J.H. Pastoors, P.J.T. van Bakel, J. Hoogewoud en T. Kroon. In prep.** Relatie grondwater- oppervlaktewater.. Landsdekkende parametrisatie vn het topsysteem. Alterra-rapport 1398.

**Van Bakel, P.J.T., W.J. de Lange, M.J.H. Pastoors en P. Groenendijk, 2002.** De parametrisatie van de interactie tussen grondwater en oppervlaktewater voor landelijke en regionale grondwatermodellering. Stromingen 8-2. p.5-9.

**NHI**

**Van der Gaast, J.W.J., H.Th.L. Massop, H.R.J. Vroon & I.G. Staritsky, 2006.** Hydrologie op basis van karteerbare kenmerken. Wageningen, Alterra-rapport 1339.

**Vermulst J.A.P.H. en W.J. De lange, 1999,** An analytical approach for coupling models for unsaturated and saturated groundwater at different scales, *Journal of Hydrology*, 226 243-250

## 6 BIJLAGE: FORTRAN PROGRAMMA VOOR FREATISCHE LEKWEERSTAND

```

!!-----
!! FILE: nhi_drainageweerstand.f90
!!
!! COPYRIGHT: 2008
!!  Alterra Wageningen, The Netherlands.
!!
!!
!!  This program, or parts thereof, may not be reproduced,
!!  modified or transferred to third parties without the
!!  written permission of Alterra.
!!
!! FILE IDENTIFICATION:
!!  $Id$
!!  $Log$
!!
!! DESCRIPTION:
!!  This file contains the source code of program nhi_drainageweerstand
!!
!
!!-----
!! SUBPROGRAM:
!!  nhi_drainageweerstand
!!
!! SYNOPSIS:
!!
!! DESCRIPTION:
!!  Maakt DRN-invoer mbv de formule DeLange-Vergroesen
!!  Basis is de beschrijving van de methode door Toine Vergoesen, inclusief spreadsheet
!!
!! HISTORY:
!!  jul-08  Ab Veldhuizen
!!          kv toegevoegd als apart grid
!!  apr-08  Ab Veldhuizen
!!          direct inlezen van grids ipv via kennistabellen
!!  jan-08  Ab Veldhuizen
!!          prototype
!!
!!-----
!
PROGRAM nhi_drainageweerstand
USE dfport
IMPLICIT NONE
!
CHARACTER  aversion*50
PARAMETER (aversion='Program nhi_drainageweerstand rev 0.8 jul08')
CHARACTER  alterratext*37
PARAMETER (alterratext='developed by Alterra')

```

## NHI

```
!  
INTEGER*4  nread,narg  
!  
INTEGER*4  nxco,nxro  
PARAMETER (nxco=1300,nxro=1300)  
INTEGER*4  nxhy,nxsy,nuhy,nusy,nxsp,nusp  
PARAMETER (nxhy=100,nxsy=3,nxsp=100)  
!  
INTEGER*4  nvarmx  
PARAMETER (nvarmx=30)  
!  
CHARACTER*255 var(nvarmx), logfile, outdir, aanvoer_asc,bodem_asc,fac_csv  
CHARACTER*255  
hooglaag_asc,D1_asc,kd1_asc,kv_asc,kh_asc,c1_asc,len_asc(nxsy),vl_asc,breed_asc(nxsy),peil_asc(nx  
y),bodh_asc(nxsy),c0_asc(nxsy)  
!  
REAL*4    xcmn,ycmn,digr,argr,r_le,mvmn  
INTEGER*4  
nond,nowl,nova,hooglaag(nxco,nxro),bodem(nxco,nxro),hydro(nxco,nxro),aanvoer(nxco,nxro)  
REAL*4  
li(nxco,nxro,nxsy),Bin(nxco,nxro,nxsy),kd1 (nxco,nxro),c0(nxco,nxro,nxsy),c1 (nxco,nxro),mv(nxco,nxro),le(  
nxco,nxro)  
REAL*4  
kh(nxco,nxro),kv(nxco,nxro),H0(nxco,nxro),Peil(nxco,nxro,nxsy),BodHoog(nxco,nxro,nxsy),BH(nxco,nxro,n  
xsy)  
REAL*4    novar4  
REAL*4    lekconductance  
REAL*4  
Insteekbreedte(nxhy,nxsy),Taludhelling(nxhy,nxsy),Bodemdiepte(nxhy,nxsy),Drooglegging(nxhy,nxsy),Wat  
erspiegelbreedte(nxhy,nxsy),Bodem Breedte(nxhy,nxsy),Waterdiepte(nxhy,nxsy)  
REAL*4    factor(nxsp)  
REAL*4    A,CDsub(nxsy),Asub(nxsy),CDsub2(nxsy,nxsy)  
REAL*4    CD(nxco,nxro,nxsy,nxsy)  
INTEGER*4  nmmod  
INTEGER*4  ii,jj,kk,ll,nm,io,ilog  
INTEGER*4  nuro,nuco,nuwl,nund,nutp  
LOGICAL*4  isdata,ex,er,exrz,exmeteo  
CHARACTER*255 chline,nafi,ingrid,outgrid,formaat  
INTEGER*4  tibg,tied  
CHARACTER*8  tiac  
PARAMETER (ilog=10, nm=11, io=12)  
!  
!t  Read Arguments  
!  
WRITE(*,'(a)') aversion  
WRITE(*,'(a)') alterratext  
WRITE(*,*)  
!  
narg=nread(var,nvarmx)  
IF (narg.NE.24) THEN
```

```

        WRITE(*,('Usage:  nhi_drainageweerstand  ", "{nhi_drainageweerstand.log}  {hooglaag.asc}
{aanvoer.asc} {kd1.asc} {kv.asc} {c1.asc} {d1.asc} {l1.asc} {l2.asc} {l3.asc} {vl.asc} {bodh1.asc}
{bodh2.asc} {bodh3.asc} {peil1.asc} {peil2.asc} {peil3.asc} {breed1.asc} {breed2.asc} {breed3.asc}
3*{c0.asc} {outdir}'))
!
        er = .TRUE.
        GOTO 9000
    ENDIF
!
logfile=var(1)
hooglaag_asc=var(2)
aanvoer_asc=var(3)
kd1_asc=var(4)
kv_asc=var(5)
c1_asc=var(6)
d1_asc=var(7)
len_asc(1)=var(8)
len_asc(2)=var(9)
len_asc(3)=var(10)
vl_asc=var(11)
bodh_asc(1)=var(12)
bodh_asc(2)=var(13)
bodh_asc(3)=var(14)
peil_asc(1)=var(15)
peil_asc(2)=var(16)
peil_asc(3)=var(17)
breed_asc(1)=var(18)
breed_asc(2)=var(19)
breed_asc(3)=var(20)
c0_asc(1)=var(21)
c0_asc(2)=var(22)
c0_asc(3)=var(23)
outdir=var(24)
!
    IF (outdir(len_trim(outdir):len_trim(outdir)).NE.'\') THEN
        outdir(len_trim(outdir)+1:len_trim(outdir)+1) = '\'
    ENDIF
!
!t  Open log file
!
nafi = logfile
INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
IF (ex) THEN
    OPEN (UNIT=ilog, FILE=nafi,STATUS='OLD',ACCESS='APPEND')
ELSE
    OPEN (UNIT=ilog,FILE=nafi,STATUS='NEW',CARRIAGECONTROL='LIST')
ENDIF
WRITE (ilog,('Log-file of ",a') aversion
WRITE (ilog,'(a') alterrtext
WRITE (ilog,*)

```

## NHI

```
CALL time (tiac)
WRITE (ilog,'(2a)') 'Start programma om ',tiac
WRITE (ilog,*)
!
!t Lees hooglaag.asc
!
nafi=hooglaag_asc
INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
CALL readgrid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,nova,hooglaag)
IF (.NOT.ex) GOTO 9002
IF (er) GOTO 9003
WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
WRITE (ilog,*)
!
!t Lees aanvoer.asc
!
nafi=aanvoer_asc
INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
CALL readgrid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,nova,aanvoer)
IF (.NOT.ex) GOTO 9002
IF (er) GOTO 9003
WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
WRITE (ilog,*)
!
!t Lees c1.asc
!
nafi=c1_asc
INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
CALL readr4grid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,c1)
IF (.NOT.ex) GOTO 9002
IF (er) GOTO 9003
WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
WRITE (ilog,*)
!
DO ii = 1,nuco
DO jj = 1,nuro
IF (c1(ii,jj).LT.0.1) c1(ii,jj) = 0.1
ENDDO
ENDDO
!
!t Lees d1.asc
!
nafi=d1_asc
INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
```



```

CALL readr4grid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,H0)
IF (.NOT.ex) GOTO 9002
IF (er) GOTO 9003
WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
WRITE (ilog,*)
!
      DO ii = 1,nuco
      DO jj = 1,nuro
        IF (H0(ii,jj).LT.0.1) H0(ii,jj) = 0.1
      ENDDO
    ENDDO
!
!t   Lees kd1.asc
!
nafi=kd1_asc
INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
CALL readr4grid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,kd1)
IF (.NOT.ex) GOTO 9002
IF (er) GOTO 9003
WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
WRITE (ilog,*)
!
      DO ii = 1,nuco
      DO jj = 1,nuro
        IF (kd1(ii,jj).LT.0.01) kd1(ii,jj) = 0.01
          kh(ii,jj) = kd1(ii,jj)/H0(ii,jj)
          kv(ii,jj) = kh(ii,jj)/10.
      ENDDO
    ENDDO
!
!t   Lees kv.asc
!
nafi=kv_asc
INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
  IF (ex) THEN
    CALL readr4grid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,kv)
    IF (.NOT.ex) GOTO 9002
    IF (er) GOTO 9003
    WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
    WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
    WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
    WRITE (ilog,*)
      DO ii = 1,nuco
      DO jj = 1,nuro
        IF (kv(ii,jj).LT.0.0001) kv(ii,jj) = 0.0001
      ENDDO
  
```

NHI

```
                ENDDO

            ENDIF
!
!t    Lees len.asc
!
        DO kk = 1,nxsy
        nafi=len_asc(kk)
        INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
        CALL readr4grid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,le)
        IF (.NOT.ex) GOTO 9002
        IF (er) GOTO 9003
        WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
        WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
        WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
        WRITE (ilog,*)
!
        DO ii = 1,nuco
            DO jj = 1,nuro
                li(ii,jj,kk) = MAX(0.,le(ii,jj))
            ENDDO
        ENDDO
        ENDDO
!
!t    Lees breed.asc
!
        DO kk = 1,nxsy
        nafi=breed_asc(kk)
        INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
        CALL readr4grid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,le)
        IF (.NOT.ex) GOTO 9002
        IF (er) GOTO 9003
        WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
        WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
        WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
        WRITE (ilog,*)
!
        DO ii = 1,nuco
            DO jj = 1,nuro
                Bin(ii,jj,kk) = le(ii,jj)
            ENDDO
        ENDDO
        ENDDO
!
!t    Lees vl.asc, tel op bij l1 als hooglaag<0 (=laag nederland)
!
        nafi=vl_asc
        INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
        CALL readr4grid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,le)
        IF (.NOT.ex) GOTO 9002
```

```

IF (er) GOTO 9003
WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
WRITE (ilog,*)
!
DO ii = 1,nuco
  DO jj = 1,nuro
    IF (hooglaag(ii,jj).LT.1) THEN
!      li(ii,jj,1) = li(ii,jj,1) + le(ii,jj)/(3*Bin(ii,jj,1))
      ENDIF
    ENDDO
  ENDDO
!
!t Lees peil.asc
!
DO kk = 1,nxsy
nafi=peil_asc(kk)
INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
CALL readr4grid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,le)
IF (.NOT.ex) GOTO 9002
IF (er) GOTO 9003
WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
WRITE (ilog,*)
!
DO ii = 1,nuco
  DO jj = 1,nuro
    peil(ii,jj,kk) = le(ii,jj)
  ENDDO
  ENDDO
  ENDDO
!
!t Lees bodh.asc
!
DO kk = 1,nxsy
nafi=bodh_asc(kk)
INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
CALL readr4grid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,le)
IF (.NOT.ex) GOTO 9002
IF (er) GOTO 9003
WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
WRITE (ilog,*)
!
DO ii = 1,nuco
  DO jj = 1,nuro
    bodhoog(ii,jj,kk) = le(ii,jj)

```

NHI

```
        ENDDO
        ENDDO
        ENDDO
!
!t   Lees c0.asc
!
      DO kk = 1,nxsy
      nafi=c0_asc(kk)
      INQUIRE (FILE=nafi,EXIST=ex)
      CALL readr4grid (ex,er,nm,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,le)
      IF (.NOT.ex) GOTO 9002
      IF (er) GOTO 9003
      WRITE (ilog,*) 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' succesvol ingelezen'
      WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal kolommen is ',nuco
      WRITE (ilog,'(a,i5)') 'Het aantal rijen is ',nuro
      WRITE (ilog,*)
!
      DO ii = 1,nuco
        DO jj = 1,nuro
          c0(ii,jj,kk) = MAX(0.5,le(ii,jj))
        ENDDO
      ENDDO
      ENDDO
!
!t   Bereken de conductances
!
      A = digr**2
      DO ii = 1,nuco
        DO jj = 1,nuro
!
!       NB: de juiste werkwijze is het aflopen van de subsystems om zo een opbouw te krijgen
          CDsub = 0.
          CDsub2= 0.
          IF (ii.EQ.55 .AND. jj.EQ.1015) THEN
            kk = 1
          ENDIF
!
!       Bepaal eerst de subcatchments van de individuele systemen obv conductances
          DO kk = 1,nxsy
            CDsub(kk) = Lekconductance (A,H0(ii,jj),kv(ii,jj),kh(ii,jj),c1(ii,jj),li(ii,jj,kk),Bin(ii,jj,kk),c0(ii,jj,kk))
            CALL SubSystemAreas (A,kk,CDsub,ASub)
            DO ll = 1,kk
              IF (ASub(ll).LT.0.001) THEN
                A=A
              ENDIF
              CDsub2(kk,ll)
Lekconductance(ASub(ll),H0(ii,jj),kv(ii,jj),kh(ii,jj),c1(ii,jj),li(ii,jj,ll),Bin(ii,jj,ll),c0(ii,jj,ll))
              IF (kk.EQ.2 .AND. ll.EQ.2.AND.cdsb2(2,2).GT.0.) THEN
                IF (cdsub2(1,1).GE.cdsb2(2,1)) THEN
                  A=A
                ENDIF
              ENDIF
            ENDIF
          ENDIF
        ENDDO
      ENDDO

```

```

                ENDDO
            ENDDO
!           Het gaat om de toename van de conductance per stap, NB cond>=0
            DO kk = nxsy,2,-1
                DO ll = 1,kk-1
                    CDsub2(kk,ll) = CDsub2(kk,ll) - CDsub2(kk-1,ll)
                    CDsub2(kk,ll) = MAX(cdsb2(kk,ll),0.)
                ENDDO
            ENDDO
!           Sla op
            DO kk = 1,nxsy
                DO ll = 1,kk
                    CDsub2(kk,ll) = MAX(cdsb2(kk,ll),0.)
                    CDsub2(kk,ll) = MIN(cdsb2(kk,ll),digr**2/2)
                    CD(ii,jj,kk,ll) = CDsub2(kk,ll)
                ENDDO
            ENDDO

            ENDDO
            ENDDO
!
!t        Schrijf weg
!
            DO kk = 1,nxsy
                DO ll = 1,kk
                    DO ii = 1,nuco
                        DO jj = 1,nuro
                            le(ii,jj) = cd(ii,jj,kk,ll)
                        ENDDO
                    ENDDO
                WRITE (nafi,'(a,2i1,a) 'cd',kk,ll,'.asc'
                CALL writer4grid (er,io,nafi,nxco,nxro,nuco,nuro,xcmn,ycmn,digr,novar4,le)
            ENDDO
            ENDDO
!
9000 WRITE (*,*) 'Log in ',logfile(1:len_trim(logfile))
        CALL time (tiac)
        WRITE (ilog,*)
        WRITE (ilog,'(2a)') 'Einde programma om ',tiac
        WRITE (ilog,*)
        IF (er) THEN
            WRITE (*,*) 'Program failed'
            WRITE (ilog,*) 'Program failed'
        ELSE
            CLOSE (ilog)
            OPEN (ilog, FILE='succes.HIB',STATUS='UNKNOWN')
        ENDIF
        STOP
!
9002 WRITE (ilog,'(4a)') 'Bestand ',nafi(1:len_trim(nafi)), ' bestaat niet'

```

## NHI

```
er = .TRUE.
GOTO 9000
9003 WRITE (iolog,'(4a)') 'Probleem met lezen van bestand ',nafi(1:len_trim(nafi))
er = .TRUE.
GOTO 9000
!
END
!
!
!*****
!-----
REAL*4 FUNCTION Lekconductance (A,H0,kv,kh,c1,li,Bin,c0)
!-----
!* DESCRIPTION:
!* Calculates de lekconductance according to De Lange
!* A = celoppervlak (m2)
!* H0 = doorstroomde dikte (m)
!* kv = verticale doorlotendheid (m/d)
!* kh = horizontale doorlatendheid (m/d)
!* c1 = deklaagweerstand (d)
!* li = lengte van de waterlopen (m)
!* Bin = Bodembreedte (m)
!* c0 = slootbodempweerstand (d)
!* Uitkomst: Lekconductance (m2/d)
!*
!* Conductances are easier to handle than resistances
!*
!* HISTORY:
!* apr-08 Ab Veldhuizen
!* in case of L>SQRT(A), gebruik deel van de cel om de weerstand uit te rekenen
!* jan-08 Ab Veldhuizen
!* prototype
!-----
!
IMPLICIT NONE
!
REAL*4 A,H0,kv,kh,c1,li,Bin,c0
REAL*4 L,Lrad,Bcor,m,labdaL,FL,labdaB,FB,CL,CB,Crad,Wp,Acor,pSI
REAL*4 x,y,ctnh, pi
!
pi = 4.0 * atan(1.0)
!
IF (li.GT.0.001 .AND. Bin .GT. 0.001 .AND. A.GT.0.001) THEN
Acor = A
Bcor = MAX(Bin,0.001)
L = A/li-Bcor
y=c1+H0/kv
labdaL=SQRT(y*kh*H0)
x=0.5*L/labdaL
FL=x*ctnh(x)
```

```

labdaB=SQRT(y*kh*H0*c0/(y+c0))
x=0.5*Bcor/labdaB
FB=x*ctnh(x)
CL=(c0+y)*FL+(c0*L/Bcor)*FB
CB=(c1+c0+H0/kv)/(CL-c0*L/Bcor)*CL
Crad=MAX(0.,L/(pi*SQRT(kv*kh))*log(4*H0/(pi*Bcor)))
pSl=Bcor*li/A
Wp = 1/((1.-pSL)/CL+pSl/CB)+Crad-c1
Lekconductance = A/Wp
ELSE
Lekconductance = 0.
ENDIF
!
END
!
|*****

```

## COLOFON

---

Opdrachtgever	: Deltares
Project	: Nationaal Hydrologisch Instrumentarium - NHI
Omvang rapport	: 62 pagina's
Auteur	: Wim de Lange, Toine Vergroesen, Judtih Snepvangers – Deltares, Rien Pastoors PBG, Jan van Bakel, Harry Massop Alterra
Redactie	: Wijnand Turkensteen - DHV
Datum	: December 2008

---







