

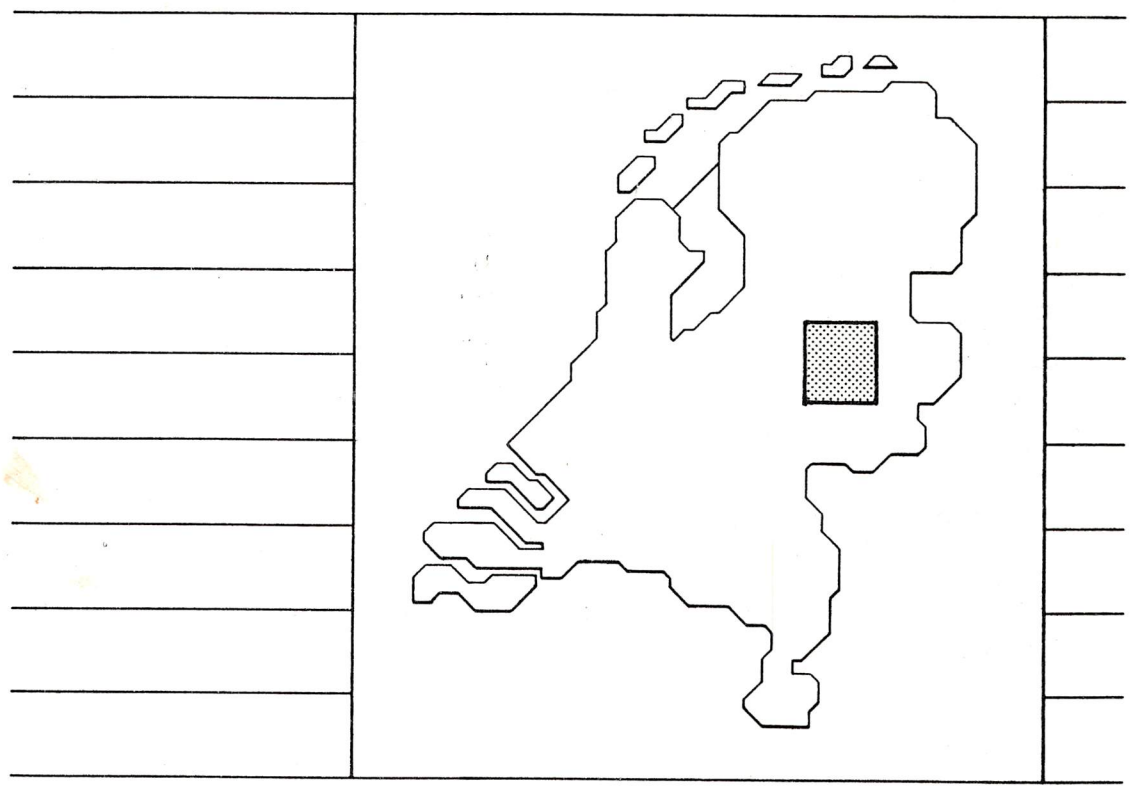
+ 1 kaart

Geohydrologisch modelonderzoek

IJsselvallei

dienst grondwaterverkenning

TNO-DGV



Rapportnr.: OS 87~46





Bibliotheek

GEOHYDROLOGISCH MODELONDERZOEK IJSSELVALLEI

Auteur : J.H. Spaans

Rapport nr: OS 87-46

Datum : december 1987

DIENST GRONDWATERVERKENNING TNO  
Delft/Oosterwolde



INHOUD

	blz.
LIJST MET BIJLAGEN	II
LIJST VAN FIGUREN	III
LIJST VAN TABELLEN	IV
1. INLEIDING	1
2. FLOSA	2
2.1. Inleiding	2
2.2. Theoretische achtergronden	2
2.3. Programmabeschrijving	3
2.4. Aanwijzingen voor het gebruik	4
3. BESCHRIJVING STUDIEGEBIED	7
3.1. Inleiding	7
3.2. Geologie en ontstaansgeschiedenis	7
3.3. Hydrologie en hydrogeologie	9
4. REGIONALE SYSTEMEN	13
4.1. Inleiding	13
4.2. Modelschematisatie	13
4.3. Modelberekeningen	17
4.3.1. Massabalans	17
4.3.2. Kwel en infiltratie	17
4.3.3. Begrenzing systemen	21
4.3.4. Klei van Tegelen	25
4.3.5. Ligging zoet-zout grensvlak	27
4.3.6. Onttrekkingen	29
5. LOCAAL VERSUS (SUB)REGIONAAL SYSTEEM	34
5.1. Inleiding	34
5.2. Modelschematisatie	35
5.3. Modelberekeningen	37
6. CONCLUSIES EN SAMENVATTING	39
LITERATUUR	43

LIJST VAN BIJLAGEN

DGV nr.

Bijlage 1. Geohydrologisch modelonderzoek IJsselvallei

2811

LIJST VAN FIGUREN

- Figuur 1.1. Stromingssystemen: Regionale, subregionale en lokale stroming
- Figuur 3.1. Stratigrafische tabel van het Tertiair en het Kwartair
- Figuur 3.2. Geologisch dwarsprofiel van het studiegebied
- Figuur 4.1. West-oost dwarsprofielen studiegebied. Ligging op de lijn Y=7 en Y=14 (zie bijlage 1)
- Figuur 4.2. Ysohyps en freatisch grondwater 28/08/1978
- Figuur 4.3. Ligging belangrijkste infiltratie en kwelgebieden
- Figuur 4.4. Locatie stroomgebieden ten opzichte van infiltratie- en kwelgebieden
- Figuur 4.5. Grondwatersystemen in het studiegebied, onderverdeeld naar diepte
- Figuur 4.6. Grondwatersystemen in het studiegebied, onderverdeeld naar verblijftijd in jaren
- Figuur 4.7. De afname in doorstroomd debiet in geval van aansluiting Tegelen klei en Drente-klei
- Figuur 4.8. Stroomlijnen van westelijk deel van het studiegebied, bij aansluiting van de Tegelen klei aan de Drente-klei (a), en indien geen sprake is van aansluiting (b)
- Figuur 4.9. Opwelling in het zoet-zout grensvlak door transport of massacompensatie
- Figuur 4.10. De diepte van het zoet-zout grensvlak en de ligging van de scheiding tussen de regionale systemen volgens FLOSA
- Figuur 4.11. Isohypsbeeld bij onttrekking van grondwater, horizontale doorsnede aan onderzijde watervoerend pakket bij een onttrekking van  $3,3 \text{ milj. m}^3$  per jaar
- Figuur 4.12. Isohypsbeeld bij onttrekking van grondwater, verticale doorsnede
- Figuur 5.1. Grondwaterstand in dekzandrug, zomer- en wintersituatie, en de regionale stromingsrichting

LIJST VAN TABELLEN

- Tabel 4.1. Aangepaste k-waarden na ijking
- Tabel 4.2. Gemeten en berekende afvoeren van een vijftal stroomgebieden. Hierin is NN de nuttige neerslag (mm/dag),  $I$  is infiltratie en  $k$  is kwel (mm/dag)
- Tabel 5.1. De gemodelleerde doorlatendheden in het detail-onderzoekgebied
- Tabel 5.2. Modelberekening: Het totaal doorstroomde debiet  $m^3/d$  door het dekzandrugsysteem

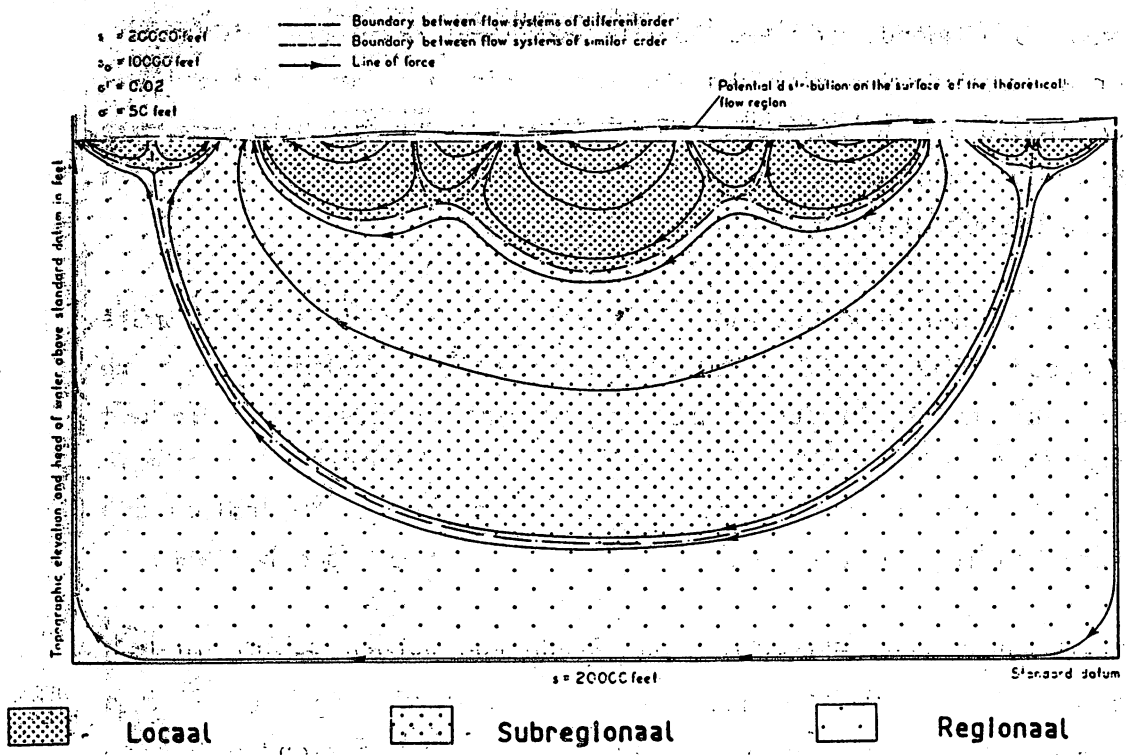


## 1. INLEIDING

Het voor U liggende verslag is het resultaat van een drie-maands doctoraal onderzoek, verricht in het kader van een afstudeerwerk hydrogeologie aan de Landbouw - Universiteit te Wageningen, vakgroep bodemkunde en geologie. De studie is verricht voor en bij DGV/TNO in Delft en Oosterwolde.

Het doel van het onderzoek was, met behulp van de driedimensionale computercode FLOSA (FLOW System Analysis) een modelstudie uit te voeren naar de ligging en begrenzing van stromingssystemen in het studiegebied IJsselvallei. Hiermee vormt dit onderzoek een aanvulling op de door DGV/TNO eerder uitgevoerde studie "Hydrologische systeemkartering Salland/O-Veluwe" (Brouwer en Hoogendoorn, 1986).

De ontwikkeling van de computercode FLOSA kan worden gezien in het licht van de toenemende vraag naar kennis over de weg die door het grondwater wordt afgelegd, vooral als gevolg van toenemend onderzoek naar de waterkwaliteit. Ook de ontwikkeling van de methodiek van de hydrologische systeemkartering kan in dit kader worden gezien. Deze aanpak gaat er van uit dat het grondwaterlichaam uit een aantal systemen bestaat. Hierbij wordt onder systeem verstaan een "hiërarchische bundeling van aanliggende stroombanen in de ondergrond, geldend voor een nader te specificeren tijdschaal" (Brouwer en Hoogendoorn, 1986). De grondlegger van deze theorie, Tóth, beschreef kwalitatief en kwantitatief het hiërarchische karakter van de grondwaterstroming. Hij onderscheidde daarbij regionale systemen, subregionale systemen en lokale systemen (Tóth, 1963) (Figuur 1.1). Bij de systeemkartering zoals nu toegepast, maakt men gebruik van een groot aantal basisgegevens, die veelal zijn weergegeven op kaartmateriaal, bijvoorbeeld bodem- en hoogtekarten, geologische en geomorfologische karten en hydrochemische karten (Engelen, 1984). Een belangrijke aanvulling op de systeemkartering kan het gebruik van een hydrologische numerieke computercode zijn, gebaseerd op een regionaal conceptueel model. Juist voor dergelijke stromingsproblemen is de computercode FLOSA ontwikkeld.



FIGUUR 1.1: STROMINGSSYSTEMEN : REGIONALE, SUBREGIONALE EN LOCALE STROMING (naar Toth, 1963).

## 2. FLOSA-FD

### 2.1. Inleiding

FLOSA-FD is een bij DGV/TNO ontwikkelde computercode gebaseerd op het conceptuele grondwaterstromingsmodel dat ontwikkeld is door Tóth (1963). De code beschrijft driedimensionale grondwaterstroming in de verzadigde zône. Hiertoe wordt het modelgebied geschematiseerd tot een rechthoekig blok, bestaande uit  $N_x * N_y * N_z$  knooppunten, waarbinnen de bodemlagen worden weergegeven als eenheden met een constante waarde voor de doorlatendheid en de porositeit.

Aan de randen van het model kunnen een willekeurige potentiaalverdeling, een willekeurige snelheidsverdeling of een constante snelheid worden opgegeven. Met de randvoorwaarde  $v = 0$  m/dag kan bijvoorbeeld een ondoorlatende rand worden gesimuleerd ( $k = 0$  m/dag is niet toegestaan). De nuttige neerslag kan ruimtelijk variabel worden gemodelleerd. Als potentiaal aan het bovenvlak wordt veelal de grondwaterstand van het freatische water opgegeven.

Het model (= code + invoer) geeft, na berekening van de stroomsnelheden, de stroomlijnen en de potentiaalverdeling. De gewenste gegevens kunnen zowel in getallen per knooppunt als door middel van een visuele presentatie van het modelgebied worden weergegeven. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van een veelheid aan grafische opties.

### 2.2. Theoretische achtergronden

Grondwaterstromingsprogramma's zijn gebaseerd op de Wet van Darcy en de continuïteitsvergelijking. In conventionele programma's wordt uit het numeriek berekende potentiaalveld door numeriek differentiëren het snelheidsveld bepaald. Zijl (1984, 1986) toonde aan dat, indien gebruik gemaakt wordt van numerieke benaderingsmethoden, het de voorkeur geniet het snelheidsveld direct af te leiden. In deze TVR-aanpak (Transport Velocity Representation) wordt de snelheidscomponent beschouwd als primaire variabele, waaruit de potentiaal eventueel wordt afgeleid. Indien de doorlatendheid slechts in één richting (in FLOSA de z-richting) varieert resulteert de TVR-aanpak in drie afzonderlijke Laplace-type vergelijkingen met gemengde Dirichlet- en Neuman-randvoorwaarden voor de snelheidscomponenten.



Deze vergelijkingen kunnen worden opgelost door toepassing van één van de standaard oplosmethoden. Hiervoor wordt in FLOSA-FD de eindige verschillen methode toegepast. De resulterende positief definitie stelsels lineaire vergelijkingen worden met behulp van de gepreconditioneerde geconjugeerde gradiëntenmethode opgelost. De preconditionering vindt plaats door middel van de Incomplete Cholesky Decompositie. Voor voldoende 'gladde' variaties in x- en y-richting van de doorlatendheid zijn ook oplossingen van de in dat geval resulterende vergelijkingen mogelijk. Voor meer details zie Zijl en Waardenburg (1987).

### 2.3. Programmabeschrijving

FLOSA-FD bestaat uit een pakket Fortran-77 programma's en CCL (Cyber Control Language) procedures (Waardenburg, 1987). Bij FLOSA maakt men gebruik van drie hoofdprogramma's, de preprocessor, de processor en de postprocessor.

#### Preprocessor

Met behulp van de preprocessor kunnen de invoergegevens worden verwerkt. De preprocessor is gebruiksvriendelijk en volledig menu-gestuurd. Een in te voeren dataset bestaat uit:

- algemene gegevens: dimensies van het stroomgebied, discretisatie
- rekengegevens: gegevens over het iteratieproces, keuze van de gewenste uitvoer
- randvoorwaarden: variabele of constante snelheid, potentiaal
- horizontale permeabiliteit en porositeit per knooppunt.

#### Processor

Het rekenwerk kan worden verricht interactief of in batch, op de VAX 750 of op de Cyber 180/830, beide computers van DGV/TNO.

#### Postprocessor

Met de postprocessor kunnen de uitvoergegevens zodanig worden verwerkt dat van een drietal plot-opties gebruik kan worden gemaakt:

- twee-dimensionale vector/rasterplot van het snelheidsveld (V2D) in elke gewenste dwarsdoorsnede (XY, XZ of YZ),

- drie-dimensionale vectorplot,
- drie-dimensionale stroomlijnenplot. In deze plots worden infiltratiegebieden berekend, van waaruit stroomlijnen worden berekend. Uit elk willekeurig subblok kunnen stroomlijnen worden bepaald en getekend. Per stroomlijn kan worden berekend wat de gemiddelde snelheid is langs de stroomlijn, de verblijftijd en de maximaal bereikte diepte.

#### 2.4. Aanwijzingen voor het gebruik

Met FLOSA wordt de ondergrond gemodelleerd als een aantal eenheden met elk een specifieke waarde voor de doorlatendheid en de porositeit.

De nauwkeurigheid van de berekeningsresultaten kan snel en eenvoudig worden gecontroleerd aan de hand van de massabalans. Worden aan de randen stijghoogten gedefinieerd, dan vormt, in tegenstelling tot conventionele modellen, de nauwkeurigheid in de massabalans een onafhankelijke toetsing van de nauwkeurigheid van de numerieke benadering.

Bij het invoeren van laterale variaties in doorlatendheid zijn de volgende overwegingen van belang:

- Sprongen in de laterale doorlatendheid moeten zo vloeiend mogelijk verlopen. Een vuistregel is dat het laterale  $k$ -waarde contrast tussen twee knooppunten niet groter mag zijn dan een factor tien. Is de massabalans onacceptabel groot, dan dient het gebied fijner gediscrètiseerd te worden, of moet genoeg genomen worden met een kleiner contrast.
- Wordt aan het bovenzvlak de stijghoogte van het grondwater als randvoorwaarde ingevoerd, dan geldt een overeenkomstige regel.

Sprongen in potentiaal kunnen, afhankelijk van de geometrie en de overige randvoorwaarden, in sommige gevallen er toe leiden dat niet meer voldoende nauwkeurig aan de continuïteitswet kan worden voldaan, waardoor de modeluitkomsten minder nauwkeurig zijn. Ook met betrekking tot de potentiaal geldt dat te grote sprongen dienen te worden vermeden.

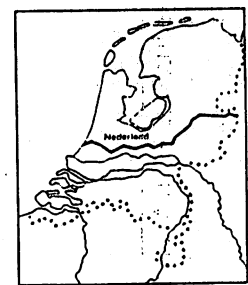
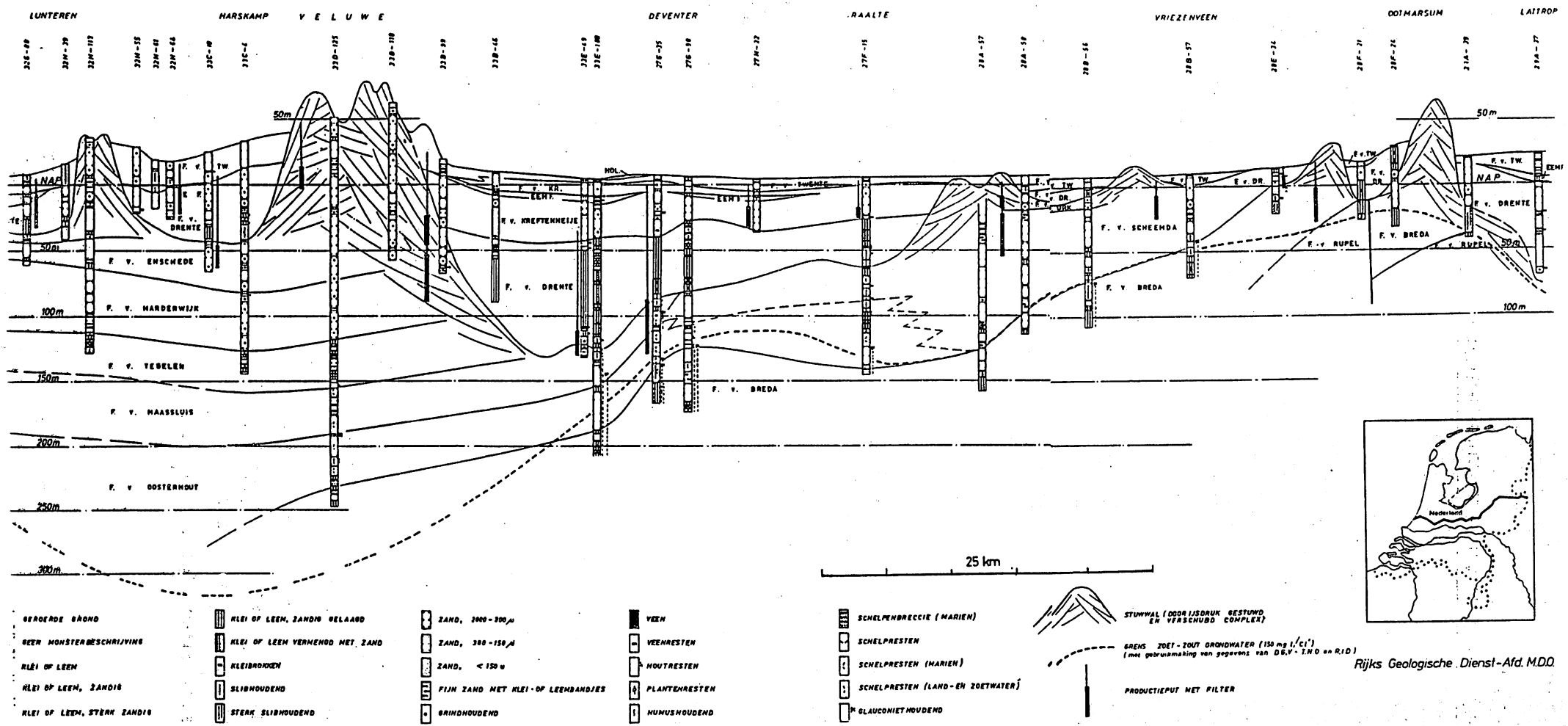
CHRONOSTRATIGRAFIE			Afzettingen in verband met Landijs		Afzettingen van lokale herkomst		Afzettingen van grote rivieren		Afzettingen in zee en bij de kust	
			N	Z	N	Z	N	Z	N	Z
KWARTAIR	HOLOCEEN					Form. v. Kootwijk E Form. v. Singraven B Form. v. Griendtsveen V	Betuwe Formatie R + M		Westland Formatie	
		Boven	WEICHSELIEIEN*			Form. v. Twente E + V + P + B	Formatie van Kreflenheye R + N			
	EEMIEIEN				Form. v. Asten V			Eem Formatie		
	Midden	SAALIEN*	E v. Drenke							
		HOLSTEINIEN			Form. v. Eindhoven E + P + B + V		Form. v. Urk R	Form. v. Veghel M	...	
		ELSTERIEN*	F v. Peelo						...	
		CROMERIEN COMPLEX**								
		MENAPIEN*								
		WAALIEN								
	Onder	EBURONIEN*			Form. v. Kedicchem (ten dele) B + P + V	Form. v. Enschede O	Form. v. Sterksel R + M	Form. v. Kedicchem R + M		
		TIGLIEN			Form. v. Harderwijk O					
		PRAETIGLIEN*				Form. v. Tegelen R + M			Form. van Maastluis (Marin)	
	PLIOCEEN	BOVEN (Reuverien)								
ONDER (Brunssumien)						Form. v. Scheemda O	Form. v. Kiezeloöliet R + M	Form. van Oosterhout (Marin)		
MIOCEEN	BOVEN									
	MIDDEN					Form. v. Heksenberg		Form. van Breda (ten dele) (Marin)		
	ONDER									

E = Eolische afzettingen  
P = Periglaciale afzettingen  
B = Beekafzettingen  
V = Veen

R = Rijn  
M = Maas  
O = Oostelijke noord-duitse rivieren en voortlopers

\* Koude tijd  
\*\* Complexe eenheid bestaande uit tenminste 4 warme en 3 koude tijden  
... Nog onbenaemd, voortloper bij Formatie van Urk

FIGUUR 3.1: STRATIGRAFISCHE TABEL VAN HET TERTIAIR (gedeeltelijk) EN HET KWARTAIR (naar RGD, 1975).



Rijks Geologische Dienst-Afd. M.D.O.

FIGUUR 3.2: GEOLOGISCH DWARSPROFIEL VAN HET STUDIEGEBIED (RGD, 1975)



### 3. BESCHRIJVING VAN HET STUDIEGEBIED

#### 3.1. Inleiding

Onderwerp van de modelstudie is het IJsseldal. Het modelgebied heeft een oppervlakte van  $40 * 44 \text{ km}^2$ , en maakt deel uit van een gebied dat in de Hydrologische Systeemkartering Salland/O-Veluwe onderwerp was van studie (Brouwer en Hoogendoorn, 1986).

Het modelgebied strekt zich in zuid-noord richting uit van Zutphen tot het Overijssels kanaal. De westelijke begrenzing wordt gevormd door de stuwwal van de Veluwe en de oostzijde wordt gevormd door de stuwwal van de Overijsselse heuvelrug.

Binnen het modelgebied is een detailstudie uitgevoerd. Onderwerp hiervan is een van de zuidoost-noordwest gerichte dekzandruggen. De totale oppervlakte hiervan is  $1,875 * 2 \text{ km}^2$ .

#### 3.2. Geologie en ontstaansgeschiedenis

De ontstaansgeschiedenis en de geologie van het studiegebied zullen worden toegelicht aan de hand van de stratigrafische tabel, figuur 3.1 en het geologisch dwarsprofiel, figuur 3.2.

Het studiegebied maakt deel uit van een gebied dat vanaf het begin van het Tertiair daalt. De tertiaire en oud-pleistocene afzettingen hellen zodoende van oost naar west, globaal met een helling van 3 m/km.

De mariene sedimenten uit het Mioceen worden beschouwd als de geohydrologische basis in het studiegebied (Houtman en Haak, 1985). Deze afzettingen bestaan uit zanden, zandige klei en klei.

Door regressie verplaatste de kustlijn zich naar het westen en het studiegebied kwam onder kustnabije en fluviatiele invloed. In het westen van het studiegebied worden mariene fijne zanden en kleiige zanden afgezet (Formatie van Oosterhout). In het oosten van het studiegebied komen kustnabije, deels fluviatiele afzettingen voor (Formatie van Scheemda). Deze formatie bestaat uit een complex sedimenten van wisselende samenstelling, zoals fijne en grove zanden, kleiige zanden met veenafzettingen of klei.

Tijdens het Onder-Pleistoceen zet de regressie van de zee zich voort. In het westen van het studiegebied worden eerst nog mariene sedimenten afgezet, bestaande uit grove en fijne zanden met zandige

kleilagen (Formatie van Maassluis), maar tijdens het Onder en Midden-Pleistoceen wordt in het gehele studiegebied fluviaal materiaal afgezet.

Tijdens het Onder-Pleistoceen worden door rivieren van oostelijke herkomst de Formaties van Harderwijk en Enschede afgezet en door de Rijn en de Maas de Formatie van Tegelen. Tijdens het Midden-Pleistoceen wordt door de Rijn de Formatie van Urk afgezet. De Formaties van Harderwijk en Enschede en Urk, bestaan uit overwegend grove zanden met grind.

De Formatie van Tegelen bestaat uit grove en fijne schelphoudende zanden, met meestal zandige kleilagen of kleilagen.

Het Saalien is voor het studiegebied van grote invloed geweest. In het reeds bestaande noord-zuid lopende Rijndal drong een ijstong binnen en drukte de Boven- en Midden-Pleistocene sedimenten op tot stuwwallen. Na het smelten van het ijs aan het einde van het Saalien, werd het glaciële bekken opgevuld met smeltwaterafzettingen, bestaande uit fluvioglaciële kleien en zanden (Formatie van Drente). In oostelijke richting wigt de kleilaag langzaam uit.

Boven de fluvioglaciële klei is tijdens het Eemien en het Weichselien door de Rijn en de Maas een pakket grove zanden afgezet, de Formaties van Kreftenheye en Urk. Dit pakket heeft een dikte van ongeveer dertig meter in het oostelijk deel van het studiegebied en veertig meter in het westen. In dit pakket komen plaatselijk op een diepte van ongeveer tien meter klei-veen afzettingen voor. Deze zijn ontstaan tijdens het Eemien. De dikte hiervan varieert sterk en bedraagt maximaal 10 m.

De Formaties van Kreftenheye en Urk worden afgedekt door de Formatie van Twente. Onder periglaciële omstandigheden worden er fijnere zanden en soms venige lemen afgezet.

In het Holoceen ontstaan lokaal veenafzettingen, beekdalafzettingen en stuifzanden. Nabij de IJssel wordt klei afgezet, de Betuwe Formatie.

#### Geomorfologie van het dekzandlandschap

In een groot deel van het studiegebied komen de dekzanden van het Weichselien aan de oppervlakte. Geomorfologisch wordt het gekarakteriseerd als het dekzandlandschap. De dekzanden hebben een dikte van

maximaal zes meter. Op de dekzandruggen, de hogere meer reliëfrijke gedeelten, zijn de zanden fijn en leemarm tot lemig. De lagere gedeelten, de beekdalen, bestaan uit lemig fijn zand of uit moerig materiaal. De dekzandruggen en de beekdalen hebben een zuidoost-noordwestelijke oriëntatie.

### 3.3. Hydrologie en geohydrologie

Het studiegebied is uit geohydrologisch oogpunt lateraal onder te verdelen in het glaciale bekken van het IJssedal en de stuwwallen van de oostelijke Veluwe en de Overijsselse Heuvelrug. Het glaciale bekken bestaat uit twee watervoerende pakketten, gescheiden door een slecht doorlatende laag.

#### Het glaciale bekken

Geohydrologische basis:

Als geohydrologische basis wordt algemeen beschouwd de Formatie van Breda. Deze formatie helt van oost naar west. In het westen van het studiegebied bevindt deze zich op een diepte van ongeveer driehonderd meter, naar het oosten toe neemt de diepteligging af tot een diepte van ongeveer 50 meter.

Het tweede watervoerend pakket:

Het tweede watervoerend pakket bestaat voornamelijk uit grove zanden en grinden behorende tot de Formaties van Oosterhout, Scheemda, Maassluis, Tegelen, Harderwijk, Enschede en Urk. De dikte van het pakket bedraagt ongeveer zestig meter in het oosten van het studiegebied tot meer dan honderdvijftig meter in het westen. De doorlatendheid is gemiddeld vrij groot. Uit pompproeven en uit schattingen aan de hand van boorbeschrijvingen zijn  $kD$ -waarden bepaald die variëren tussen de 500 en 1500  $m^2$  per dag (o.a. WMO, 1980, 1982; Haak, 1985; Senden, 1982). Bij een dikte die varieert tussen de zestig en honderdvijftig meter is een globale  $k$ -waarde af te leiden van minimaal 10 tot maximaal 100 meter per dag.

De scheidende laag (Formatie van Drente):

Tussen het eerste en het tweede watervoerend pakket bevindt zich de

Drente-klei. Deze klei kan zeer zandig ontwikkeld zijn of versneden voorkomen (Haak, 1985) over de hydrologische scheidende werking van de klei zijn weinig gegevens bekend. Algemeen echter wordt aangenomen dat de doorlatendheid slecht is. Schattingen van de c-waarde variëren tussen de 20.000 en 45.000 dagen (Senden, 1982).

Langs de westrand van de glaciële klei komt de slecht doorlatende Formatie van Tegelen voor. Over de aansluiting van de klei van Tegelen en de Drente-klei bestaat onzekerheid. Algemeen wordt echter aangenomen dat deze formatie in het zuiden van het studiegebied aansluit op de Drente-klei en deel uitmaakt van de eerste scheidende laag (Houtman en Haak, 1985; Senden, 1982).

Het eerste watervoerend pakket:

Het eerste watervoerend pakket bestaat uit matig (Formatie van Twente) tot goed doorlatende grove grindhoudende zanden (Formatie van Kreftenheye). De doorlatendheid van dit pakket varieert tussen de 10 en 40 meter per dag (Houtman en Haak, 1985; Senden, 1982).

Grondwaterstroming:

Uit het isohypsenbeeld (Houtman en Haak, 1985) blijkt een subregionale stroming boven de Drente-klei in het eerste watervoerend pakket, in zuidoost-noordwestelijke richting. Door Hoogendoorn (1983) werd door interpretatie van chemische analyses aannemelijk gemaakt dat deze stroming van lokale oorsprong moet zijn en niet afkomstig uit de Overijsselse Heuvelrug. Brouwer en Hoogendoorn (1986) veronderstellen dat de subregionale stroming boven de scheidende laag vooral in de zomer voorkomt. In de wintersituatie is in de dekzandrug de opbolling zo geprononceerd, dat de hierdoor optredende lokale systemen het regionale systeem kunnen beïnvloeden.

#### De stuwwallen

De stuwwallen bestaan voornamelijk uit grove zanden en grinden van de Formaties Urk, Enschede en Harderwijk. De doorlatendheid van deze sedimenten is groot. De verschubbing van de lagen echter is er de oorzaak van dat de doorlatendheid in verticale richting sterk kan verschillen met de horizontale doorlatendheid. Deze verticale

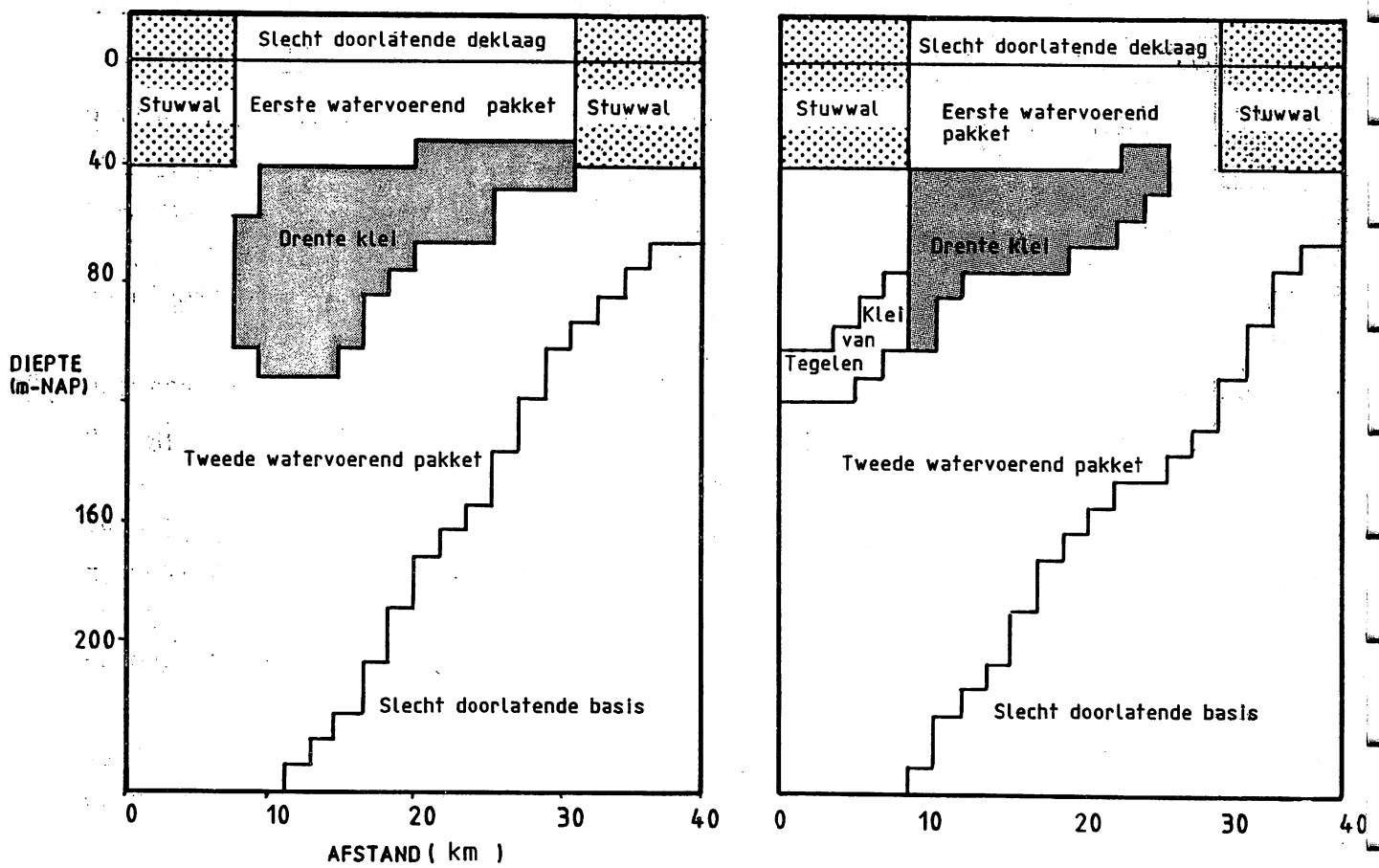
anisotropie is sterk afhankelijk van de schuboriëntatie en is vanwege sterke laterale verschillen zeer moeilijk te bepalen. De doorlatendheid varieert ongeveer tussen de 50 en 100 m/dag.

...  
...  
...  
...  
...

...  
...  
...

...  
...  
...  
...  
...  
...  
...  
...  
...

...  
...  
...  
...  
...



FIGUUR 4.1: WEST-OOST DWARSPROFIELEN STUDIEGEBIED.  
LIGGING OP DE LIJN Y=7 EN Y=14 (zie bijlage 1).

## 4. REGIONALE SYSTEMEN

### 4.1. Inleiding

Als aanvulling op en vergelijking met de stromingsysteemanalyse Salland/O-Veluwe is het IJsseldal gemodelleerd en doorgerekend met FLOSA. Hierbij is in eerste instantie uitgegaan van de meest eenvoudige benadering, waarbij de invloed van onttrekkingen of de aanwezigheid van lokaal weerstandbiedende lagen niet in de berekeningen is meegenomen (par. 4.3.1. t/m 4.3.3.).

In paragraaf 4.3.4. is nagegaan wat van invloed kan zijn van een eventuele aansluiting van de Formatie van Tegelen op de Formatie van Drente. Over deze aansluiting bestaat weinig zekerheid.

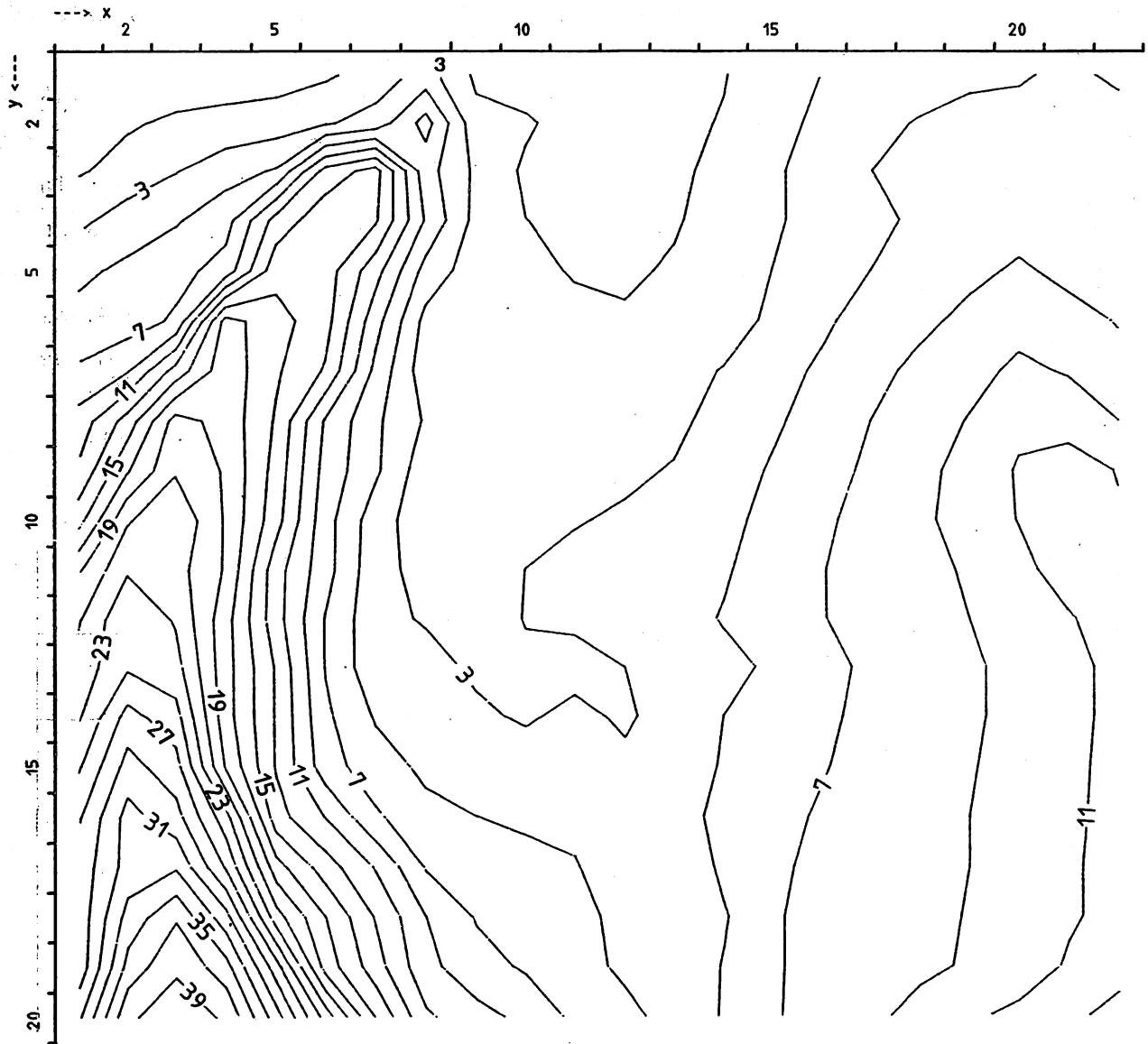
In paragraaf 4.3.5. is nagegaan of de ligging van het zoet-zout grensvlak en vooral de specifieke oriëntatie van een zuidoost-noordwest gerichte opbolling in dit grensvlak overeenkomt met de systeemgrenzen zoals zij bij de systeemkartering of de modelberekeningen zijn onderscheiden.

In 4.3.6. is nagegaan of met FLOSA de in het gebied aanwezige grondwateronttrekkingen kunnen worden gemodelleerd en wat hiervan de invloed is op de grondwatersystemen.

### 4.2. Modelschematisatie

Voor de modellering van het studiegebied is een discretisatie gekozen van een knooppunt per  $4 \text{ km}^2$  in het horizontale vlak (bijlage 1) en een knooppunt per tien meter in verticale richting. Het model bevat zodoende  $20 * 22 * 30 = 13.200$  knooppunten. De geohydrologische eenheden die zijn onderscheiden in paragraaf 3.3. zijn weergegeven als eenheden met een specifieke doorlatendheid en porositeit. Aangezien de doorlatendheid van vooral de diepere lagen in het studiegebied slecht bekend is, is bij de ijking van het model de permeabiliteit als te variëren factor gebruikt. Bij het ijken van het model zijn de volgende criteria gehanteerd:

- Een massabalans van 20 procent of minder is voor het onderzoeksdoel acceptabel.
- Als controle op het verrichte rekenwerk wordt nagegaan of de snelheden voldoende goed aan de continuïteitsvergelijking en de Wet van Darcy voldoen.



IJSSELDAL  
EQUIPOTENTIALIEN (m+NAP)

FIGUUR 4.2: ISOHYPSEN FREATISCH GRONDWATER 28/08/1978



- De gemiddelde instroming door het bovenvlak mag maximaal 1 mm/etmaal bedragen.
- De berekende kwel en infiltratie zijn vergeleken met oppervlakte-water-afvoergegevens.
- De berekende potentialen in het tweede watervoerend pakket zijn geverifieerd aan gemeten stijghoogten.

De twee eerst genoemde criteria bepalen de numerieke nauwkeurigheid van het model, de erop volgende drie criteria hebben betrekking op de geohydrologische nauwkeurigheid van het model.

Door de ijking van het model zijn de oorspronkelijke invoergegevens aangepast, en zijn overgangswaarden voor laterale sprongen in de doorlatendheid ingevoerd.

De volgende hydrogeologische eenheden zijn hiervan het resultaat:

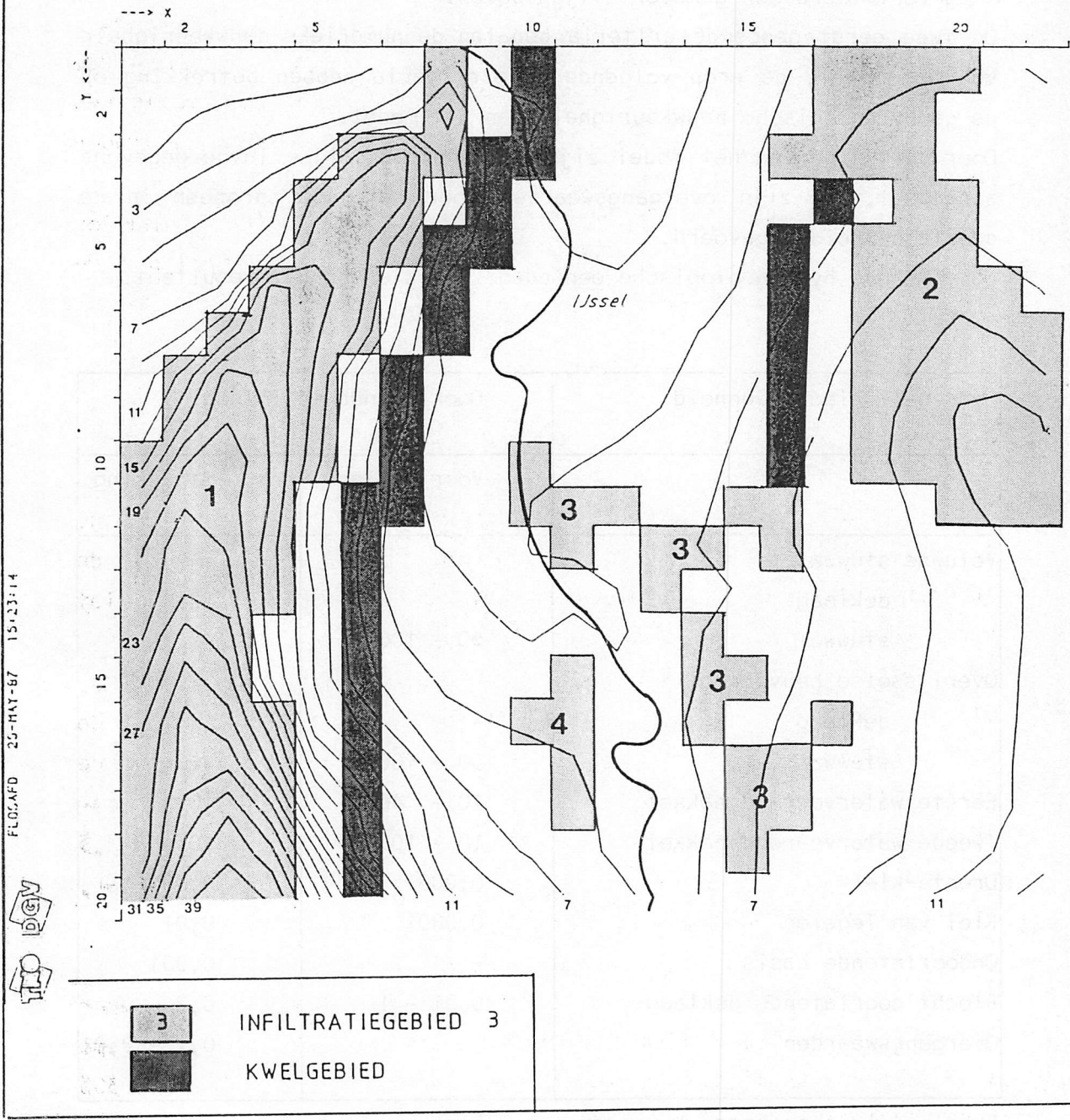
Hydrogeologische eenheid	Doorlatendheid (m/dag)	
	Voor ijking	Na ijking
Veluwe stuwwal		
deklaag	-	2
stuwwal	50 - 100	40
Overijsselse heuvelrug		
deklaag	-	2
stuwwal	50 - 100	40
Eerste watervoerend pakket	10 - 40	10
Tweede watervoerend pakket	10 - 100	10
Drente-klei	0,0001	0,001
Klei van Tegelen	0,0001	0,01
Ondoorlatende basis	-	0,001
Slecht doorlatende deklaag	0,01 - 1	0,2
Overgangswaarden		0,1 - 0,01

Tabel 4.1: Aangepaste k-waarden na ijking.

De gemodelleerde opbouw van het studiegebied is in een tweetal dwarsprofielen in figuur 4.1 geïllustreerd.

1977/78

ijsseldal  
AREAL SECTION - X-Y, K = 1  
EQUI-POTENTIAL LINES



FIGUUR 4.3: LIGGING BELANGRIJKSTE INFILTRATIE EN KWELGEBIEDEN

### Randvoorwaarden:

Voor de basis van het modelgebied en de oost- en westrand is een Darcy snelheid  $v_z = 0$  opgegeven. Deze benadering is gekozen aangezien de basis van het systeem wordt gevormd door de ondoorlatend veronderstelde Formatie van Breda. De oostelijke en westelijke begrenzing vallen ten dele samen met de topografische waterscheidingen van de stuwwallen van de Veluwe en de Overijsselse heuvelrug. Voor de noordelijke en zuidelijke rand van het studiegebied is een potentiaal opgegeven, die constant is met de diepte, waardoor debieten in en uit het studiegebied kunnen worden bepaald.

Voor het bovenvlak is de potentiaal van het freatische vlak op 28/08/1978 opgegeven (figuur 4.2). De gegevens hiervoor zijn ontleend aan Houtman en Haak (1985).

## 4.3. Modelberekeningen

### 4.3.1. Massabalans

Van de totale berekende instroming, ongeveer 1,5 milj. m<sup>3</sup> per dag, infiltreert 93 procent door het bovenvlak en 7 procent door de zuidrand. Ongeveer 5 procent van het totale doorstroomde debiet verlaat het studiegebied in noordelijke richting.

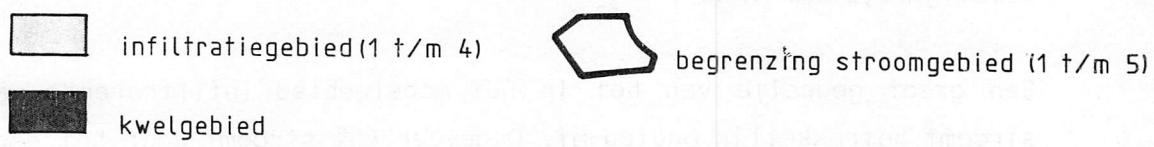
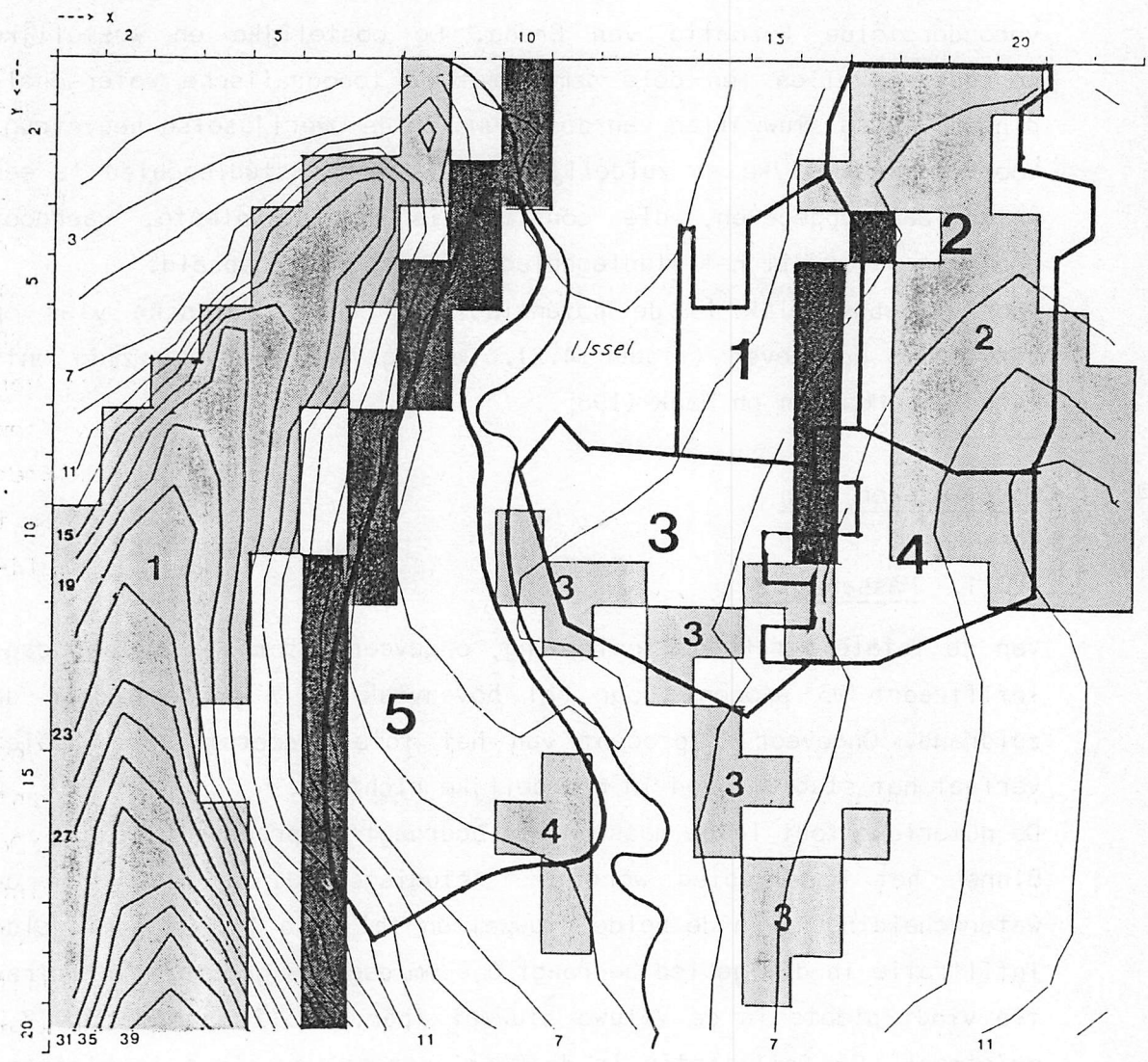
De numerieke fout in de massabalans bedraagt 17 procent.

Binnen het modelgebied wordt het studiegebied begrensd door de waterscheidingen van de beide stuwwallen (bijlage 1). De gemiddelde infiltratie in dit gebied bedraagt 0,6 mm/dag. De grootste infiltratie vindt plaats in de Veluwe stuwwal (par. 4.3.2.), namelijk 2,3 mm/etmaal. De infiltratie in de Overijsselse Heuvelrug is kleiner, namelijk 0,5 mm/etmaal.

Een groot gedeelte van het in het modelgebied infiltrerende water stroomt betrekkelijk ondiep af. Ongeveer 60% stroomt door het eerste watervoerend pakket tot 50 m-NAP, dus boven de klei van Drente, 30% stroomt dieper dan 100 meter en 15% dieper dan 200 meter.

### 4.3.2. Kwel en infiltratie

De ligging van de belangrijkste voedings- en kwelgebieden zoals berekend met FLOSA zijn weergegeven in figuur 4.3. Er zijn een



FIGUUR 4.4 : LOCATIE STROOMGEBIEDEN TEN OPZICHTE VAN INFILTRATIE- EN KWELGEBIEDEN

viertal belangrijke infiltratiegebieden te onderscheiden.

Gebied 1: De Veluwe stuwwal

Vanuit de Veluwe zijgt het grondwater diep weg, tot in het tweede watervoerend pakket. Een zeer klein gedeelte stroomt in het tweede watervoerend pakket weg in noord-oostelijke richting onder de Drente-klei. Hiervan stroomt een zeer geringe hoeveelheid in opwaartse richting.

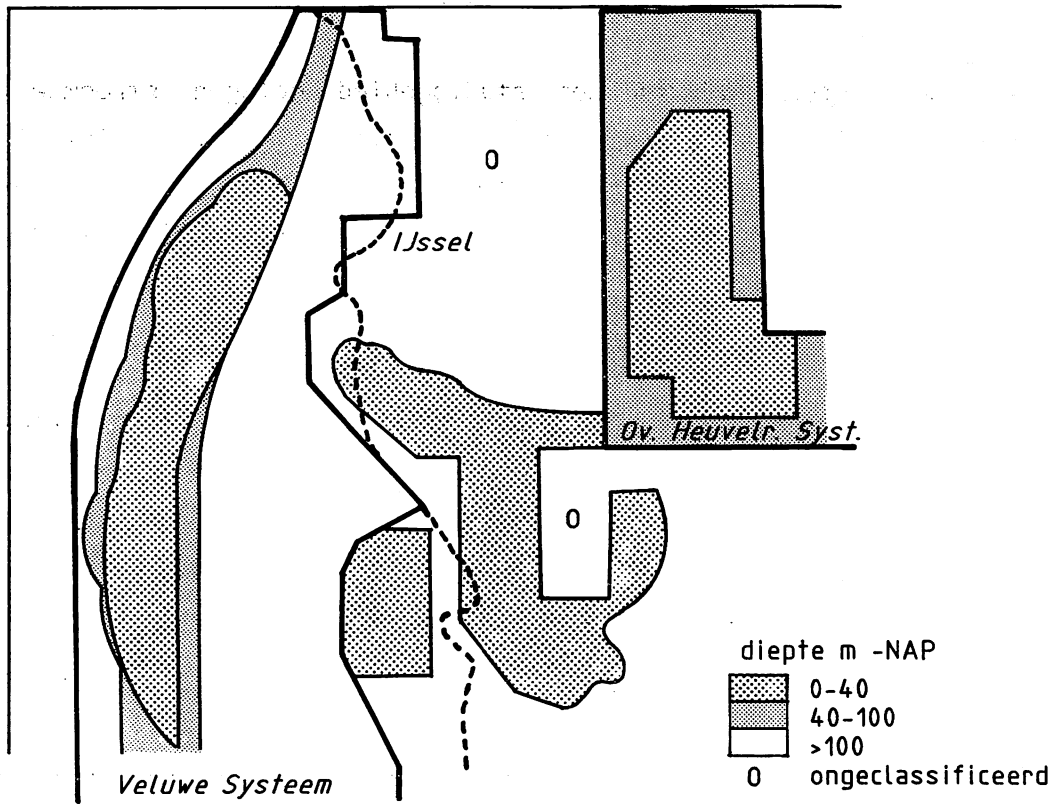
Drijvende kracht achter dit mechanisme is het grote potentiaalverschil over de bekkenklei. Het water onder de klei is artesisch en heeft een overdruk van maximaal zes meter (zie par. 4.3.4.). Het overgrote deel van het water kwelt echter op in een lange zône op de flank van de stuwwal, ter hoogte van de westelijke begrenzing van de bekkenklei. De ligging van deze kwelzône komt nagenoeg overeen met ligging van een strook gronden waar in de zomer en de winter ondiep grondwater voorkomt (grondwatertrap II), ten oosten van het Apeldoorns kanaal. De kwel neemt af in noordelijke richting. Gemiddeld bedraagt deze 5 mm/etmaal.

Gebied 2: De Overijsselse heuvelrug

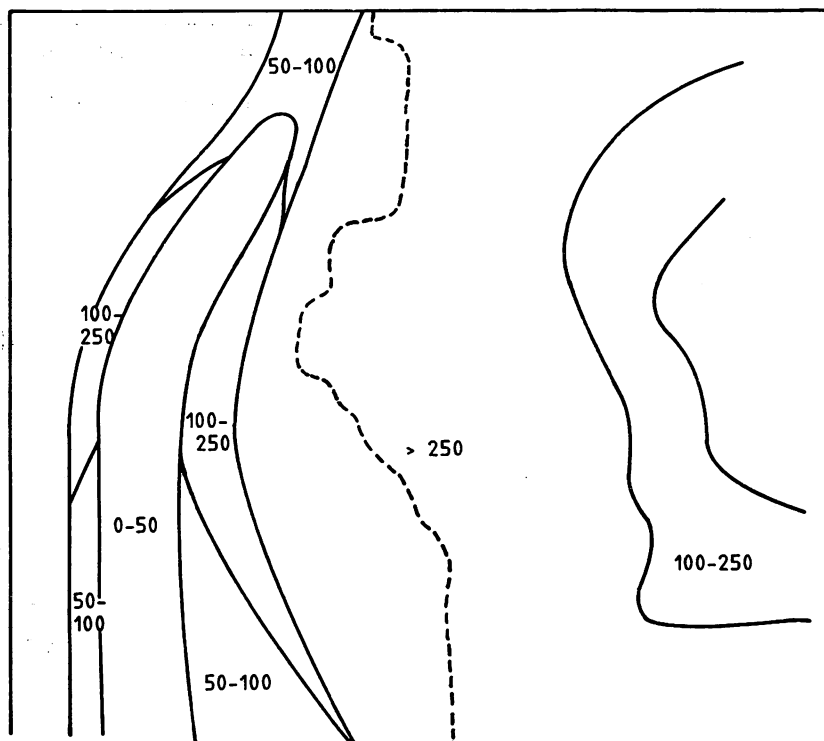
Het grondwater stroomt hier aanzienlijk minder diep dan bij de Veluwe stuwwal, tengevolge van een veel geringere potentiaalgradiënt in combinatie met de ondiepe ligging van de ondoorlatende basis. De stroming vanuit de stuwwal vindt globaal in noordwestelijke richting plaats. Ter hoogte van de oostelijke begrenzing van de bekkenklei kwelt een belangrijk gedeelte weer op. De gemiddelde kwel bedraagt hier 1,5 mm/etmaal. De ligging van een dergelijke kwelzône blijkt ook uit de grondwatertrappenkaart.

R 401 Infiltratiegebied 3 en 4: Midden IJsseldal

Aan weerszijden van de IJssel bevinden zich een aantal kleinere infiltratiegebieden. De inzijging is hier gering (0 - 1 mm/etmaal) evenals de stromingsdiepte. Deze is minder dan 40 m-NAP, waarmee de stroming boven de Drente-klei blijft. De infiltratiegebieden behoren tot een strook die zich op de grondwatertrappenkaart kenmerkt door een grote oppervlakte met grondwatertrap vijf en zes. De afwatering vindt plaats naar de IJssel.



FIGUUR 4.5 : GRONDWATERSYSTEMEN IN HET STUDIEGEBIED, ONDERVERDEELD NAAR DIEPTE



FIGUUR 4.6 : GRONDWATERSYSTEMEN IN HET STUDIEGEBIED, ONDERVERDEELD NAAR VERBLIJFTIJD IN JAREN

Van een vijftal binnen het studiegebied gelegen stroomgebieden (figuur 4.4) is nagegaan of er overwegend kwel of infiltratie optreedt. Hiervoor is per stroomgebied de nuttige neerslag geschat en vergeleken met de gemeten afvoer. Deze gegevens zijn ontleend aan IWACO (1984). Is de nuttige neerslag minus de afvoer positief, dan is sprake van een infiltratiegebied. Is deze waarde negatief, dan is er sprake van een kwelgebied.

In tabel 4.2 zijn de berekeningsresultaten weergegeven. Hierin is ook vermeld de door FLOSA berekende kwel en infiltratie.

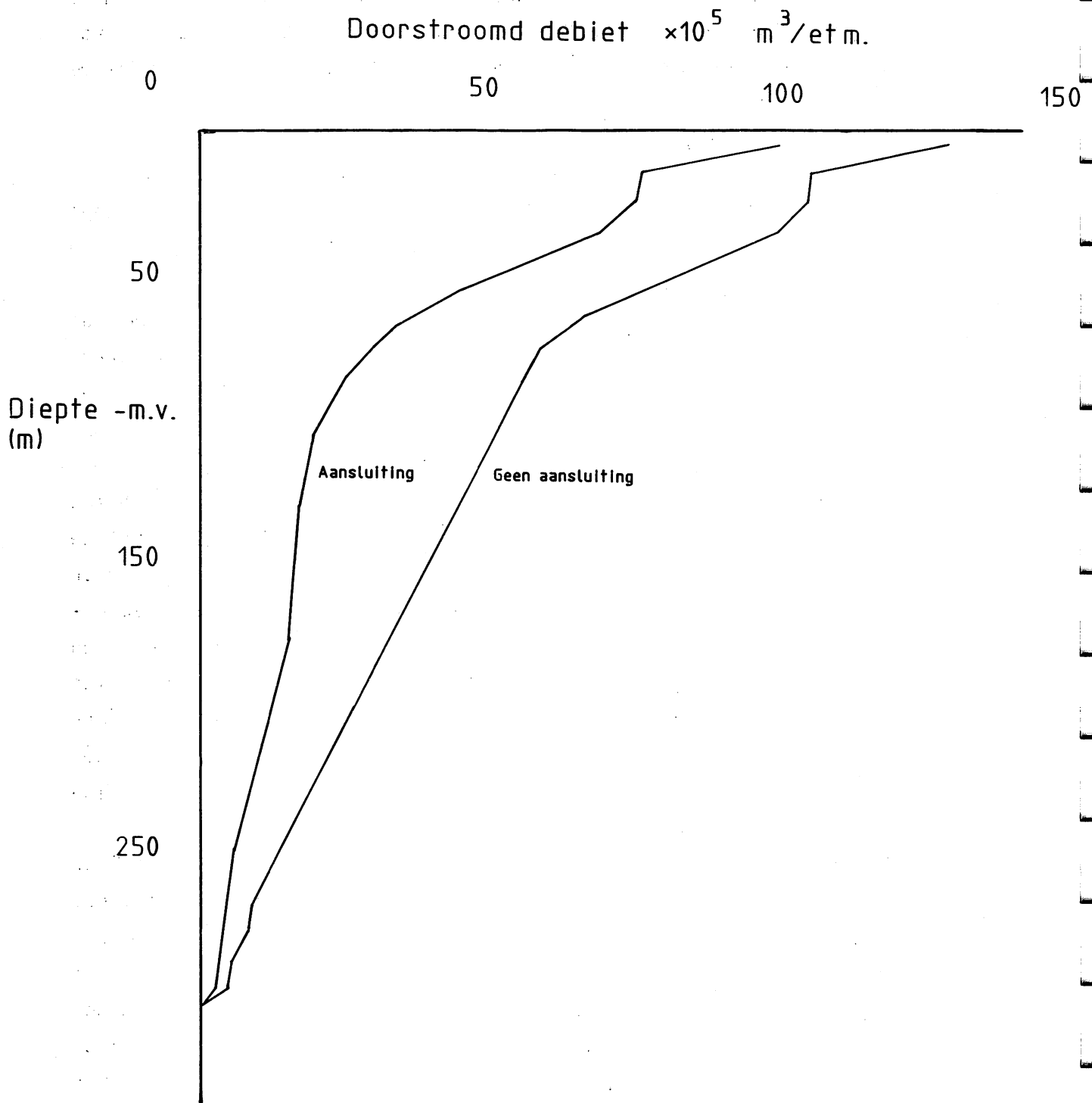
Str.geb.	Gemeten		Berekend		FLOSA	
	Afvoer	NN	NN-Afv	I	K	I+K
1	1,05	0,80	-0,25	-0,49	0	-0,49
2	0,60	0,71	+0,11	-0,04	0,12	+0,08
3	0,70	0,62	-0,07	-0,03	0	-0,03
4	0,44	0,64	+0,20	-0,16	0,05	-0,11
5	1,25	0,71	-0,54	-1,04	0	-1,04

Tabel 4.2: Gemeten en berekende afvoeren van een vijftal stroomgebieden. Hierin is NN de nuttige neerslag (mm/dag), I is infiltratie en K is kwel (mm/dag).

Uit tabel 4.2 blijkt dat de beide berekeningsmethoden een zekere overeenkomst vertonen. Drie van de vijf stroomgebieden worden als kwelgebieden aangemerkt en één gebied als infiltratiegebied. Alleen wat betreft stroomgebied 4 komen de berekeningen niet overeen.

#### 4.3.3. Systeme begrenzingen

In dit onderzoek zijn de regionale systemen van de Veluwe en de Overijsselse Heuvelrug en de lokale systemen die voorkomen boven de Drente-klei, onderverdeeld naar maximale stromingsdiepte en naar stroomsnelheid.



FIGUUR 4.7 : DE AFNAME IN DOORSTROOMD DEBIET IN GEVAL VAN AANSLUITING TEGELEN KLEI EN DRENTE KLEI

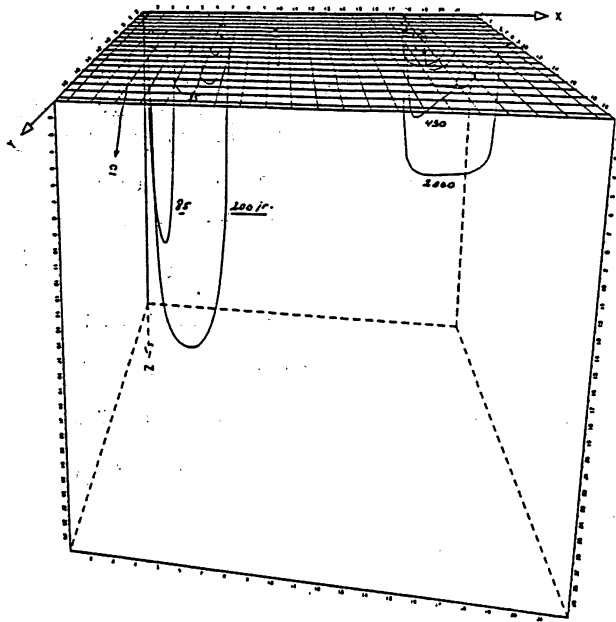


In figuur 4.5 is de maximale stromingsdiepte weergegeven. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in ondiepe systemen (diepte tot 40 m-NAP, de bovenzijde van de Drente-klei), middeldiepe systemen (diepte van 40 tot 100 m-NAP, tot het tweede watervoerend pakket) en diepe systemen (diepte meer dan 100 meter).

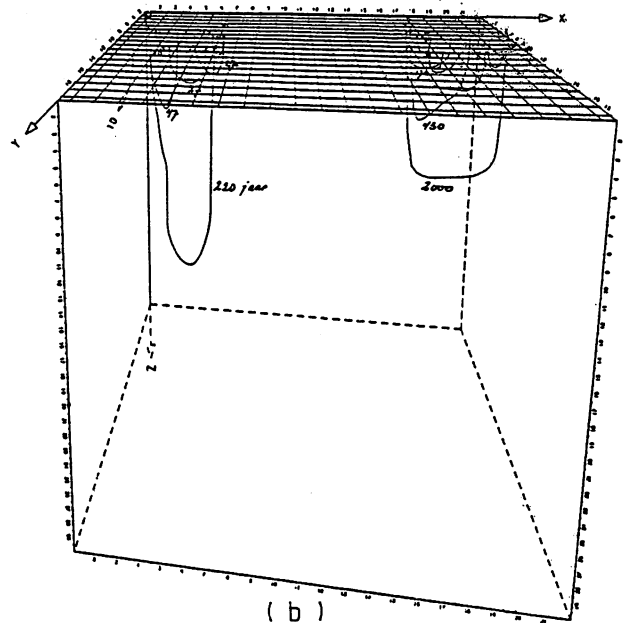
In figuur 4.6 is de verblijftijd van het grondwater weergegeven. Er wordt hierbij onderscheiden een relatief korte verblijftijd (tot 50 jaar), een middellange verblijftijd (50 - 100 jaar), een lange verblijftijd (100 - 250 jaar) en een zeer lange verblijftijd (> 250 jaar).

In een zeer groot gedeelte van de Veluwe stuwwal is volgens de berekeningen de grondwaterstroming betrekkelijk ondiep. Ook lateraal vindt de stroming over korte afstand plaats. Direct op de flanken van de stuwwal kwelt het grondwater voor een groot gedeelte weer op. In een betrekkelijk smalle zône infiltreert het grondwater dat een veel grotere diepte bereikt (40 - 100 m). Ook dit water kwelt op een betrekkelijk geringe afstand weer op. Het grondwater dat nabij de grondwaterscheiding op de stuwwal infiltreert, wordt gekenmerkt door de grootste verplaatsing zowel vertikaal als lateraal. Het kwelgebied van dit grondwater strekt zich uit tot aan de IJssel. Een gedeelte van deze kwel doorstroomt de Drente-klei en een deel buigt langs de westelijke begrenzing van de klei in het eerste watervoerend pakket af naar het noorden. De hier optredende stroomsnelheden zijn echter bijzonder gering, waardoor conclusies met voorzichtigheid moeten worden getrokken.

In de Overijsselse heuvelrug infiltreert het grondwater aanmerkelijk minder diep. Het grootste deel van de heuvelrug kent een ondiepe grondwaterstroming tot 40 meter. Slechts vanuit een smalle zône bij de waterscheiding stroomt het grondwater tot een maximale diepte van 40 - 100 meter. Door de geringere gradiënt is de verblijftijd langer dan bij de Veluwe stuwwal, ondanks de meer ondiepe ligging van de slecht doorlatende basis. De locale systemen boven de klei van Drente bereiken een diepte van veertig meter-NAP. De verblijftijd van het grondwater is aanzienlijk, namelijk meer dan 250 jaar.



( a )



( b )

FIGUUR 4.8 : STROOMLIJNEN VAN WESTELIJK DEEL VAN HET STUDIEGEBIED, BIJ AANSLUITING VAN DE TEGELEEN KLEI AAN DE DRENTE KLEI (a), EN INDIEN GEEN SPRAKE IS VAN AANSLUITING (b)

#### 4.3.4. Klei van Tegelen

Met FLOSA is een situatie doorgerekend waarbij de klei van Tegelen aansluit op de klei van Drente.

De klei van Tegelen is geschematiseerd als een twintig meter dikke kleilaag, die op een diepte van ongeveer 90 m-NAP aansluit op de Drente-klei en naar het westen toe wegduikt met een helling van ongeveer 1/800.

Uit boringen blijkt dat de weerstand van de klei van Tegelen zeer aanzienlijk kan zijn. Uit pompproeven is afgeleid dat de c-waarde tussen 20.000 en 45.000 dagen kan bedragen (Senden, 1982). Bij een dikte van 30 meter zou de doorlatendheid van de klei dan ongeveer 0,0001 m/dag bedragen. In verband met een maximaal mogelijk contrast in laterale k-waarden van een factor 10, is de doorlatendheid van de klei bij de berekeningen gesteld op 0,01 m/dag. De uitkomsten van de exercities zijn vergeleken met de situatie waarbij de klei van Tegelen afwezig werd verondersteld.

#### Waterbalans

De totale hoeveelheid inzijging door het bovenzvlak neemt ten opzichte van de situatie zonder klei van Tegelen af van 1,4 miljoen tot 1,0 miljoen m<sup>3</sup>/dag.

De gemiddelde infiltratie bedraagt daarmee in het totale modelgebied 0,57 mm/dag tegenover 0,80 mm/dag zonder klei. De invloed van de klei blijkt niet alleen uit de verminderde instroming aan het bovenzvlak, maar tevens uit de verandering van de volumestroom in de diepte. Aan het bovenzvlak wordt de instroming gereduceerd tot 70%, terwijl vanuit het eerste watervoerend pakket ter hoogte van de klei van Tegelen (diepte ongeveer 90 m-NAP nog slechts 38% van het oorspronkelijke debiet in verticale richting stroomt (figuur 4.7).

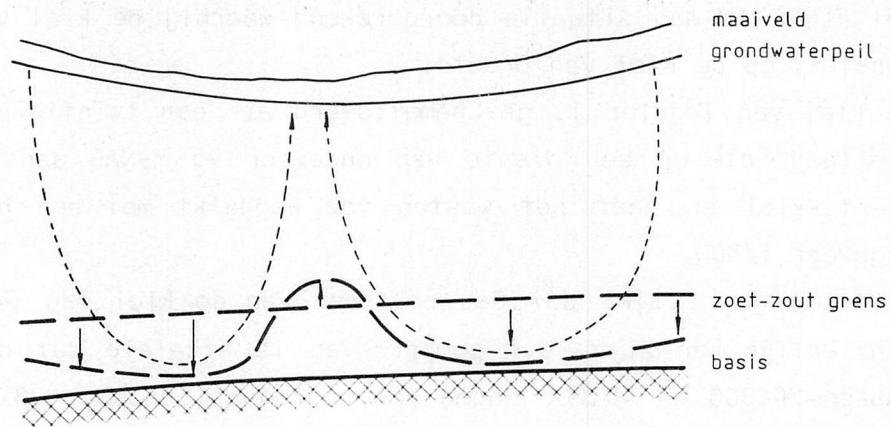
#### Systeemgrenzen

De berekeningen wijzen uit dat in de ligging van kwel en infiltratiegebieden door de klei van Tegelen geen verandering optreedt. Vermoedelijk wordt de stromingsrichting voornamelijk bepaald door de gradient van de stijghoogte aan het bovenzvlak. De invloed van de klei beperkt zich tot een verandering in het debiet, zoals hiervoor beschreven.

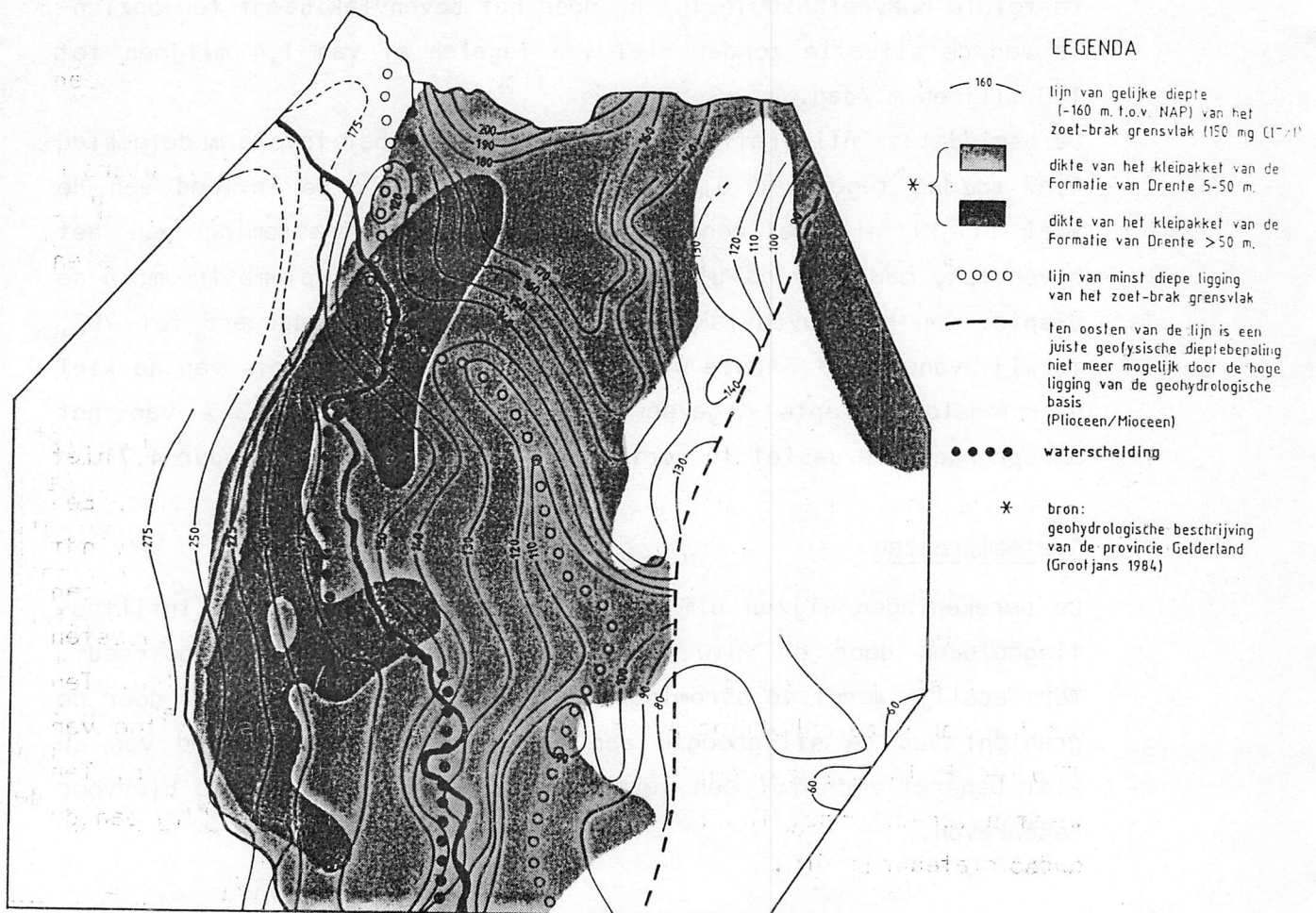
voedingsgebied

kwelgebied

voedingsgebied



FIGUUR 4.9 : OPWELVING IN HET ZOET-ZOUT GRENSVLAK DOOR TRANSPORT OF MASSACOMPENSATIE



FIGUUR 4.10 : DE DIEPTE VAN HET ZOET-ZOUT GRENSVLAK (BROUWER, HOOGENDOORN, 1986), EN DE LIGGING VAN DE SCHEIDING TUSSEN DE REGIONALE SYSTEMEN VOLGENS FLOSA

Wel treedt enige verandering op in de verblijftijd en stromingsdiepte van het grondwater in het Veluwe systeem. De veranderingen zijn echter vrij plaatselijk en leiden nauwelijks tot bijstelling van de grenzen die zijn aangehouden in de figuren 4.5 en 4.6. Een illustratie van de invloed van de klei van Tegelen op de grondwaterstroming geeft figuur 4.8. Hierin zijn van de raaien  $y = 7$  en  $y = 10$  de stroomlijnen gegeven bij aansluiting van de klei van Tegelen en bij afwezigheid daarvan.

#### Grondwaterpotentialen

De hoge weerstand van de klei van Tegelen, in combinatie met de hoge potentiaal in de Veluwe stuwwal heeft tot gevolg dat in verticale richting over de klei van Tegelen een potentiaalsprong ontstaat. Een aanwijzing hiervoor vormen stijghoogte waarnemingen, verricht in de winter 1981 (Senden, 1982). Ten noorden van Apeldoorn werd op waarnemingslocatie 33B-270 op een diepte van 125 m-NAP een stijghoogte gemeten die gelijk was aan de maaiveldshoogte, op 150 m-NAP bedroeg deze 2 m-mv. In put 33B-235 werd op 130 m-NAP een potentiaal gemeten gelijk aan de maaiveldligging, op 150 m-NAP bedroeg deze 1,20 m+mv, en op 175 m-NAP 6,3 m-mv.

De hier door FLOSA berekende potentiaal is op 125 m-NAP gelijk aan het maaiveld, op 150 m-NAP bedraagt deze 2 m-mv.

Gezien de berekeningsresultaten en het gebrek aan gegevens, waaraan de resultaten kunnen worden geijkt, is het niet mogelijk een uitspraak te doen over de eventuele aansluiting van de klei van Tegelen en de Drente-klei.

#### 4.3.5. Ligging zoet-zout grensvlak

In Oost-Nederland ligt het zoet-zout grensvlak veelal in niet-mariene sedimenten. In dat grensvlak komen opbollingen voor. Een van die opbollingen is te vinden in het modelgebied. Deze bevindt zich op een lijn die loopt van Bathmen via Boerhaar en Wijhe tot aan Windesheim op een diepte die varieert van 90 m-NAP in het zuidoosten van het studiegebied tot 130 m-NAP meter in het noordwesten. Ten oosten van deze opbolling neemt de diepte van het grensvlak toe van 100 m-NAP in het zuidoosten tot 150 m-NAP in het noordwesten. Ten westen van de opbolling ligt het grensvlak globaal evenwijdig aan de ondoorlatende basis.

Over het mechanisme van de verzilting en de specifieke ligging van het grensvlak lopen de meningen uiteen (Hoogendoorn, 1985). Mogelijk is de verzilting vanuit de mariene geohydrologische basis het gevolg van dispersie (Meinardi, 1975). Brouwer en Hoogendoorn (1986) onderscheiden een aantal factoren die van invloed zijn op de ligging van het grensvlak in het studiegebied:

In het noordelijk deel van de Veluwe stuwwal is de grondwaterstand lager dan in het centrale deel, de dikte van de klei van Drente neemt af naar het noorden en er is een toenemende competitie met het grondwater afkomstig uit de Overijsselse Heuvelrug. Hierdoor zou de opbolling in het noordelijk deel van het studiegebied afbuigen naar het westen.

Prof. G.B. Engelen (mondelinge mededeling) onderscheidt in dit verband een tweetal oorzaken. De eerste oorzaak ligt in het feit dat het grondwater diep onder de stuwwallen infiltreert en een deel van het zoute grondwater transporteert.

Als tweede oorzaak kan een vorm van hydrostatische compensatie de ligging van de opwelving bepalen. Onder gewijzigde condities, in dit geval de vorming van de stuwwallen, kan zich een situatie voordoen, waarbij de watermassa in de stuwwallen het onderliggende zoute water wegdrukt en er midden tussen de stuwwallen als compensatie een opbolling van het zoute grondwater ontstaat. Een dergelijke situatie kan zich vermoedelijk zeer snel instellen. Is de voeding vanuit de infiltratiegebieden groot, dan is er sprake van een pseudo-evenwichtsituatie. Figuur 4.9 toont het principe van beide bovengenoemde factoren.

Of de voeding van de stuwwallen vanaf het einde van het Saalien voldoende groot is geweest om een soort hydrostatische evenwichtsituatie te verkrijgen valt buiten dit onderzoekskader. Wel kan onderzocht worden of de regionale stroming, onder invloed van de potentiaalgradiënt van het grondwater de oriëntatie van de opbolling verklaart. In figuur 4.10 is daarom de ligging van het zoet-zout grensvlak in het studiegebied weergegeven evenals de regionale systeemscheiding, zoals bepaald met behulp van FLOSA.

Uit figuur 4.10 blijkt dat de systeemscheiding, zoals berekend en de opbolling niet met elkaar overeen komen. Zoals geconstateerd in

paragraaf 4.3.1. volgt de systeemscheiding ongeveer de loop van de IJssel, waar de grondwaterstand het laagst is.

Een andere mogelijke verklaring voor de ligging van de opbolling ligt in het feit dat de slecht doorlatende basis in het zuiden van het studiegebied ondieper voorkomt dan in het noorden. Mogelijk kan hierdoor de grondwaterstroming zich in het noorden tot op grotere diepte voortzetten of met een hogere snelheid. De differentiatie in snelheid is af te leiden uit de verblijftijden. In het midden van het studiegebied lijkt de ligging van de opbolling ongeveer overeen te komen met de door FLOSA berekende 250 jaar verblijftijden-contour. In het zuiden komt de ligging niet geheel overeen. Het is mogelijk dat hier randeffecten een rol gaan spelen. Door de zuidelijke rand van het studiegebied infiltreert namelijk een relatief grote hoeveelheid grondwater.

In het noorden van het studiegebied komt de ligging van de opbolling niet overeen met een verblijftijdencontour. Door FLOSA wordt een zone onderscheiden, waar sprake is van praktisch stagnant water, terwijl de opbolling in het grensvlak afbuigt naar het westen.

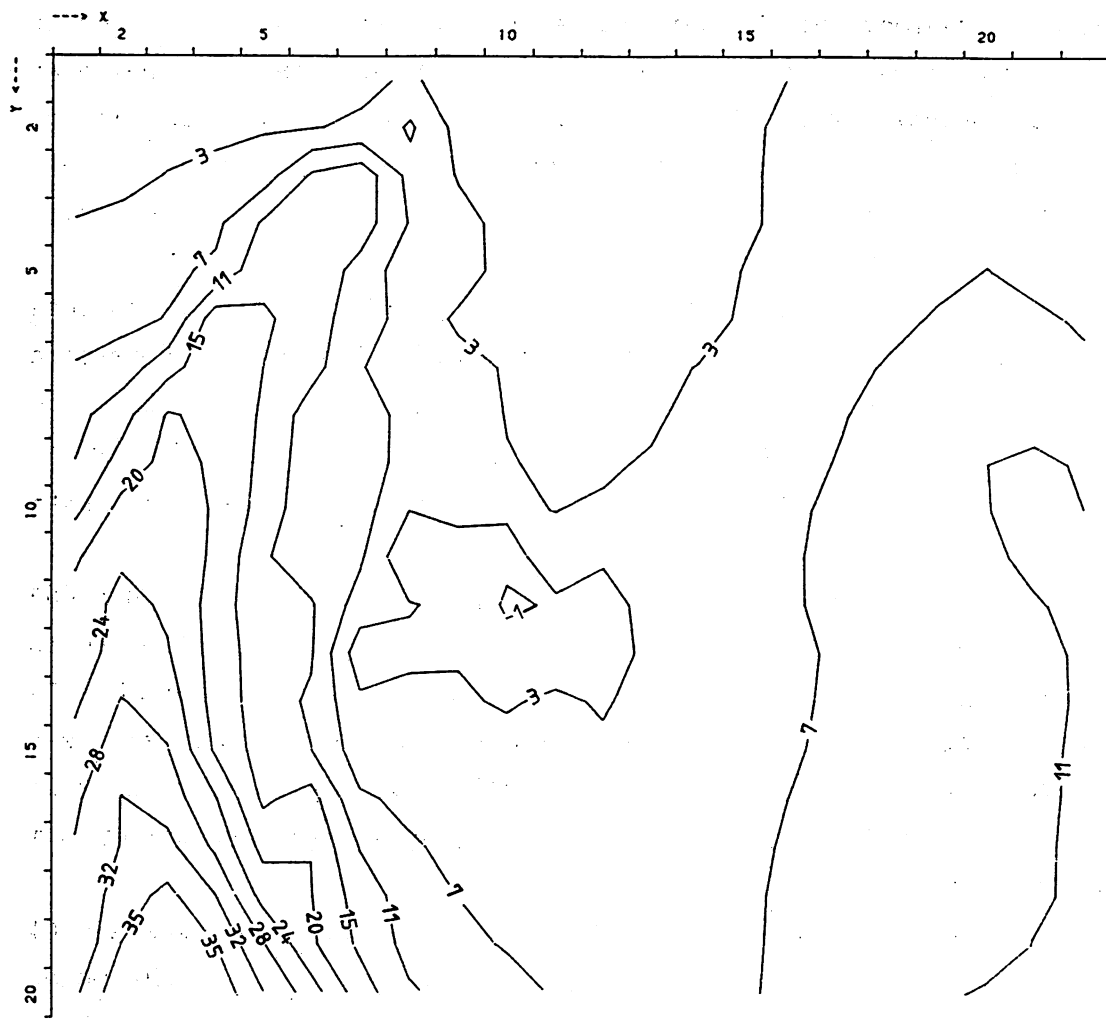
#### 4.3.6. Onttrekkingen

De winningen in het studiegebied ten behoeve van industrie en drinkwatervoorziening vinden plaats zowel in het eerste als in het tweede watervoerend pakket.

De onttrokken hoeveelheid grondwater is vooral de laatste jaren sterk gestegen. Dit heeft duidelijke gevolgen gehad voor de grondwaterpotentiaal in het studiegebied. Oorspronkelijk was het grondwater onder de tweede scheidende laag artesisch en werd bij Deventer een stijghoogte van 1 meter boven het maaiveld (Brouwer en Hoogendoorn, 1986) gemeten. De door FLOSA berekende potentiaalsprong bedraagt, afhankelijk van de locatie enkele meters tot maximaal zes meter.

Vooraf vanaf 1970 is de potentiaal in het tweede watervoerend pakket sterk gedaald. Door een vergroting van de onttrekking door de pompstations te Deventer en Diepenveen van ongeveer 2,1 milj. m<sup>3</sup> per jaar naar 3,3 milj. m<sup>3</sup> per jaar is het grondwaterpeil 1 à 2 meter gedaald (Haak, 1985).

Gegevens over de grondwaterpotentiaal in het tweede watervoerend pakket zijn helaas schaars. Alleen in de nabijheid van de pompsta-



FIGUUR 4.11 : ISOHYPSENBEELD BIJ ONTTREKING VAN GRONDWATER. HORIZONTALE DOORSNEDE AAN ONDERZIJDE WATERVOEREND PAKKET BIJ EEN ONTTREKING VAN 3,3 milj. m PER JAAR



tions zijn enkele waarden bekend. Bij het pompstation Deventer is de grondwaterpotentialiaal in het tweede watervoerend pakket drie meter lager dan in het eerste pakket. Rondom het pompstation Schalkhaar nam de grondwaterpotentialiaal in het tweede pakket voor de winning weer toe. Nabij het pompstation Boerhaar was de potentialiaal in het tweede watervoerend pakket voor de winning 1,7 tot 2,5 meter hoger dan in het eerste pakket.

Het is duidelijk dat het oorspronkelijke min of meer stagnante karakter van het diepere grondwater door de onttrekkingen veranderd is.

Of de onttrekkingen mogelijk van invloed zijn op de ligging en de begrenzing van de grondwatersystemen is met behulp van FLOSA onderzocht.

Het modelleren van onttrekkingen is bij de huidige versie van FLOSA niet als optie mogelijk. Om onttrekkingen toch te modelleren is aanpassing van schematisatie en randvoorwaarden noodzakelijk. De geohydrologische basis dient te worden geschematiseerd als een horizontaal vlak, met een normale snelheidscomponent  $v = 0$ . Voor enkele knooppunten wordt een snelheid opgegeven die overeenkomt met de gewenste onttrekkingen.

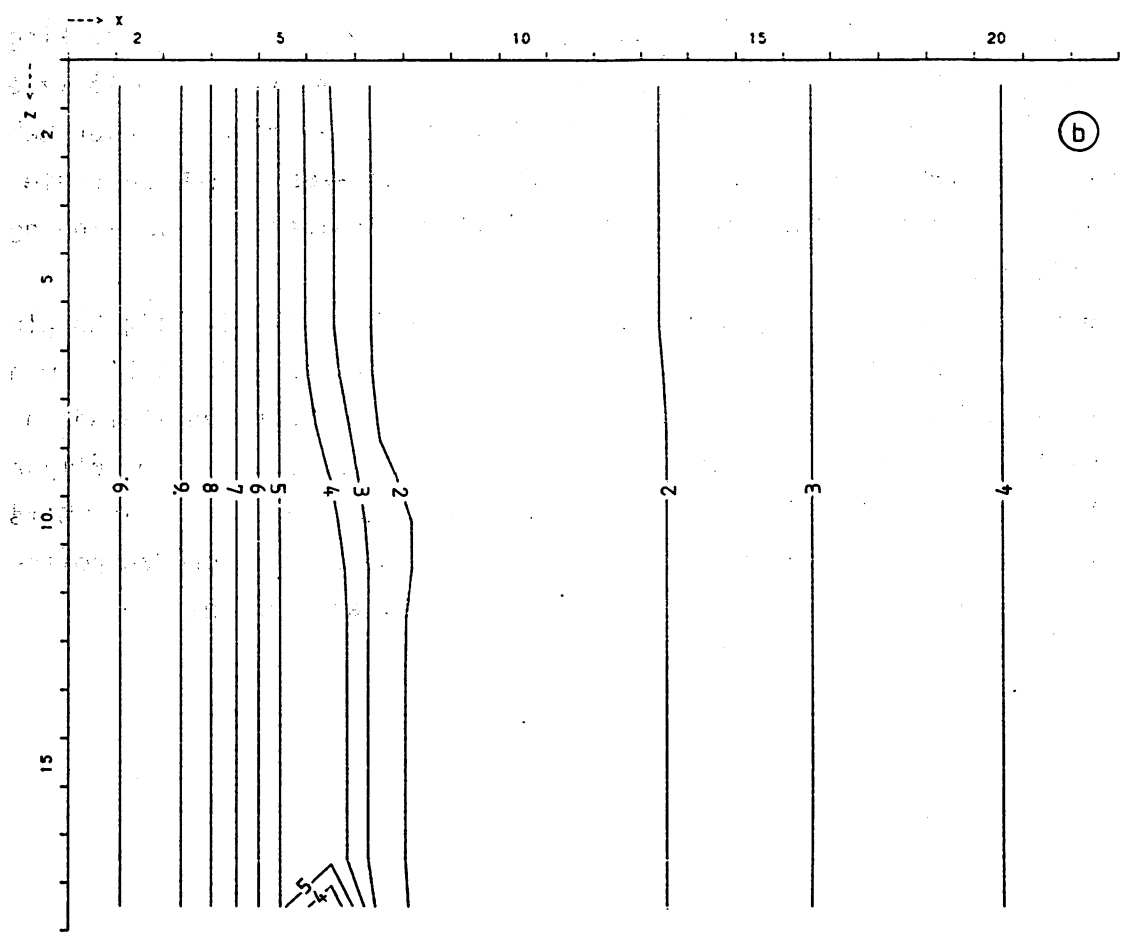
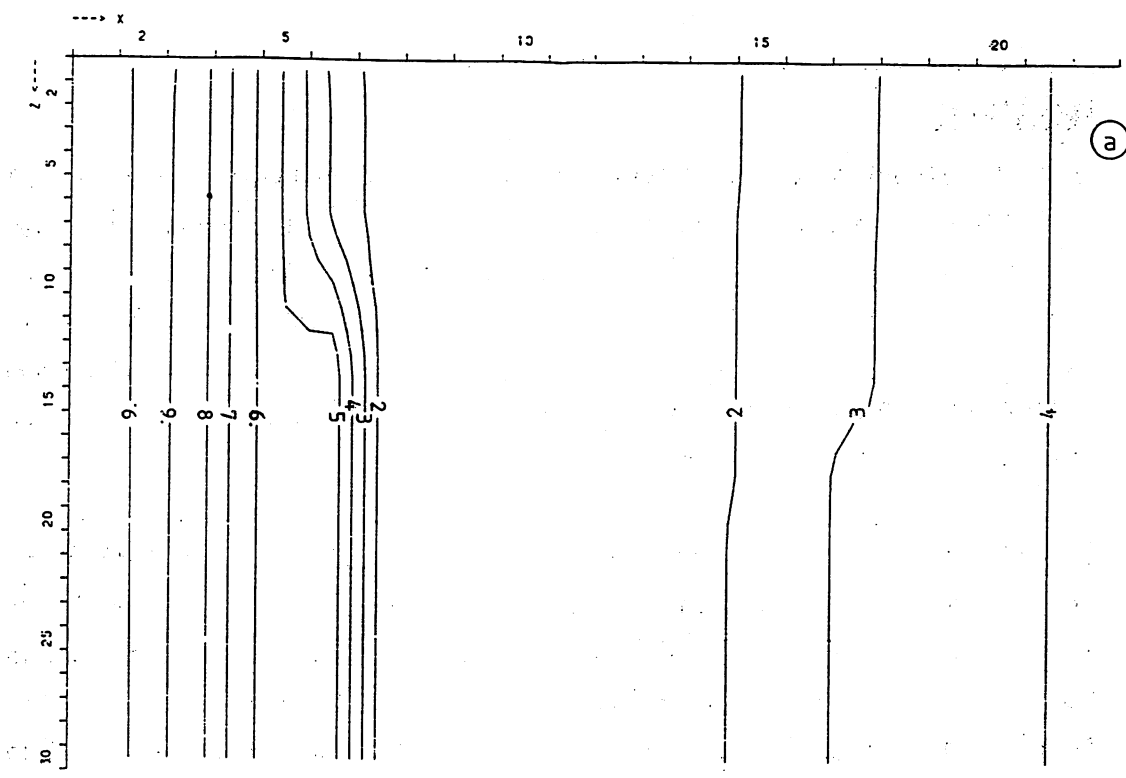
Voor het modelgebied IJsseldal is gekozen voor een ondiepere slecht doorlatende basis en wel op 180 meter in plaats van 300 meter (figuur 4.1). Deze aanpassing lijkt echter redelijk acceptabel: Slechts twintig procent van het totaal doorstroomde debiet bereikt een diepte van 180 meter of meer (par. 4.3.1.).

Met FLOSA zijn een drietal situaties gemodelleerd:

- Situatie zonder onttrekking.
- Onttrekking van 1,5 milj. m<sup>3</sup> per jaar gemiddeld over een viertal knooppunten. Deze knooppunten geven de pompstations Diepenveen, Deventer, Schalkhaar, en Boerhaar weer, voorzover het winningen betreft uit het tweede pakket en ongeveer overeenkomend met de situatie rond 1970.

- Onttrekkingen van 3 milj. m<sup>3</sup> per jaar, overeenkomend met de situatie rond 1980.

BOORSMEDIE AAN  
WILJ DE PER JAAR  
GAAL 839



FIGUUR 4.12 : ISOHYSENBEELD BIJ ONTTREKING VAN GRONDWATER. VERTICALE DOORSNEDEN. HOEVEELHEID SITUATIE a: GEEN ONTTREKING, SITUATIE b: 3.3 m<sup>3</sup>/m PER JAAR

## Resultaten

Door de diepte van het profiel te veranderen, verandert het totaal doorstroomde debiet. Een vergelijking met berekeningen die het gehele profiel tot de werkelijke ondoorlatende basis betreffen (par. 4.3.1.) laat zien dat het totaal doorstroomde debiet afneemt van 14 milj. m<sup>3</sup> naar 10 milj. m<sup>3</sup>. De ligging van de stromingsystemen echter ondergaat weinig verandering. De ligging van de kwel en infiltratiegebieden blijft onveranderd.

De invloed op de kwel en infiltratievolumestromen is relatief zo gering, dat het in dit studiegebied valt binnen de foutenmarge. De invloed op de grondwaterstroming en de potentiaal in het tweede watervoerend pakket daarentegen is vrij aanzienlijk. Figuur 4.11. toont het stijghoogteverloop aan de onderzijde van het tweede watervoerend pakket bij een winning van 3,3 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Figuur 4.12 toont het isohypsenbeeld in het x-z vlak. De onttrekking is gemodelleerd in de knooppunten x = 11 en 12 en y = 12 en 13 (zie ook bijlage 1). De invloed van de winningen strekt zich uit over een afstand van ongeveer acht kilometer, in noord-westelijke en westelijke richting. Naar het oosten blijft de invloed van de winning beperkt.

Een extra onttrekking tot 8000 m<sup>3</sup> per etmaal blijkt de stijghoogte ter plaatse van de winningen weinig te beïnvloeden. Vergelijkt men de situatie voor en na de winningen, dan blijkt de potentiaalsprong over de Drente-klei sterk te zijn gereduceerd. Het oorspronkelijke verschil van drie tot zes meter vermindert tot twee meter of zelfs nihil binnen de invloedssfeer van de winningen. De berekende potentialen sluiten daarmee redelijk aan bij de gemeten potentialen.

## 5. LOCAAL VERSUS (SUB)REGIONAAL SYSTEEM

### 5.1. Inleiding

De mogelijkheden van FLOSA-FD om binnen het regionale modelgebied IJsseldal de ligging en begrenzing van lokale systemen en subregionale systemen te onderzoeken zijn beperkt. Bij een discretisatie van 1 knooppunt per  $4 \text{ km}^2$  kunnen alleen grote regionale en enkele subregionale systemen worden onderscheiden. Hoe kritisch de ligging en de begrenzing van systemen zijn, kan worden aangetoond met een analytisch rekenmodel FLOSA-2D (Brouwer, 1987 in voorbereiding). Door een stijghoogteverandering van enkele centimeters kunnen systemen ontstaan van een andere orde (locaal naar (sub)regionaal). Naar de gevoeligheid van een dergelijk lokaal systeem voor verandering van de stijghoogte en met name de tijdsafhankelijkheid is modelonderzoek verricht. Van een aantal systemen, zoals onderscheiden door Brouwer en Hoogendoorn zijn daartoe in 1985/1986 grondwaterstandsgegevens verzameld. De onderzochte systemen zijn het dekzandrugstelsel, het Vechtsysteem en het IJssel-oeverwalstelsel. Een van deze lokale systemen, namelijk het dekzandrugstelsel, is onderwerp geweest van modelonderzoek met FLOSA.

Het modelonderzoek bestond uit het analyseren van een drietal situaties.

Eerst is nagegaan wat de in- en uitstroming in het modelgebied is, als wordt uitgegaan van grondwaterstandsgegevens uit het isohypsenbeeld 1 : 50.000 (Houtman en Haak, 1985). Het stromingsprobleem wordt dan voor kleinere stroomgebieden gereduceerd tot een eenvoudig tweedimensionaal geval. Het potentiaalverloop is bij benadering lineair, waardoor er alleen in en uitstroming door de zijranden van het modelgebied zal voorkomen. Deze berekening is beschouwd als de weergave van een regionaal stromingssysteem.

Vervolgens is een zomersituatie (28/08/1986) en een wintersituatie (28/01/1986) doorgerekend. Uit het verschil tussen de drie berekeningen is de invloed van lokale systemen op regionale systemen onderzocht en is een schatting gemaakt tot welke diepte deze zich doorzet.

## 5.2. Modelschematisatie

Het onderzoekgebied heeft een omvang van 4000 x 1875 meter. De diepte bedraagt 36 meter. Het lokale grondwaterstromingssysteem van de dekzandrug is gemodelleerd met een discretisatie van 1 knooppunt per 125 meter dwars over de dekzandrug (y-richting), 1 punt per 400 meter in de lengterichting van de rug (x-richting) en 1 punt per 1,5 meter vertikaal.

Na ijking (zie par. 4.2.) is de bodemopbouw als volgt geschematiseerd:

De bovenlaag bestaat uit de matig doorlatende fijne dekzanden van de Formatie van Twente, met een dikte van zes meter. Het eerste watervoerend pakket bestaat uit afwisselend matig grove en grove zanden. De dikte van het eerste watervoerend pakket bedraagt dertig meter. De Drente-klei dient als geohydrologische basis.

De bodemopbouw en de permeabiliteit van de verschillende lagen is in tabel 5.1 weergegeven.

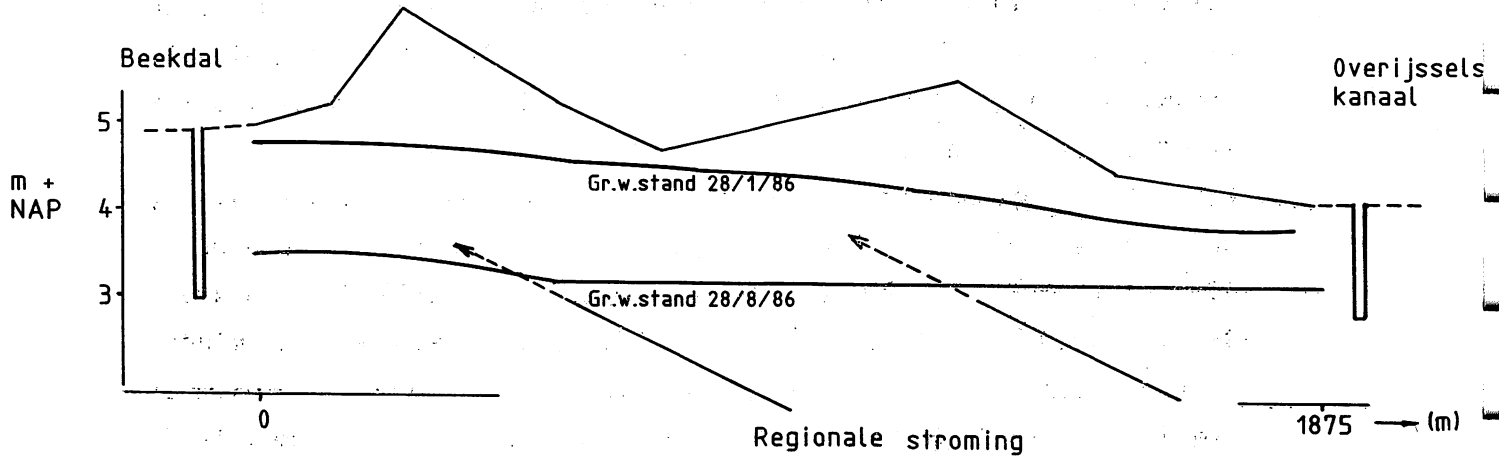
Hydrogeologische eenheid	Doorlatendheid (m/etm)
Formatie van Twente	1
Eerste watervoerend pakket grov zand	10
matig grof zand	5

Tabel 5.1 De gemodelleerde doorlatendheden in het detail-onderzoekgebied.

### Randvoorwaarden

De noord- en zuidzijde en de basis zijn beschouwd als zijnde ondoorlatend. Voor de noord- en zuidzijde kan dat worden aangenomen aangezien de ligging daarvan globaal samenvalt met twee waterlopen, die de topografische stroomgebiedsgrenzen vormen. De onderzijde van het model is ondoorlatend vanwege de aanwezigheid van de Drente-klei. Voor deze drie randen is een snelheid  $v = 0$  voorgeschreven.

De oost- en de westzijde liggen dwars op de (subregionale) stromingsrichting. Aangezien geen slecht doorlatende lagen in het profiel verondersteld worden, is voor deze randen een potentiaal verondersteld die constant is in verticale richting. Deze potentiaal is gelijk aan de potentiaal van het grondwater aan het bovenvlak.



**FIGUUR 5.1 : GRONDWATERSTAND IN DEKZANDRUG, ZOMER- EN WINTERSITUATIE, EN DE REGIONALE STROMINGSRICHTING**

Aan de bovenzijde is de stijghoogte van het grondwater opgegeven. Op de regionale gradiënt, die afgeleid is uit het isohypsenbeeld is de lokale opbolling in de dekzandrug gesuperponeerd. Figuur 5.1 toont de ingevoerde stijghoogten en de regionale stromingsrichting.

### 5.3. Modelberekeningen

Het verschil in het freatisch niveau tussen de winter en de zomer kan oplopen tot 1,5 meter bij de lokale systemen (Haak, 1985). Brouwer en Hoogendoorn (1986) noemen een daling van minimaal 1 à 1,5 meter in de dekzandruggen.

Uit het in 1986 gemeten grondwaterstandsverloop kan worden afgeleid, dat het verschil in freatisch vlak tussen de zomer en de winter in 1986 gemiddeld 1,5 meter bedraagt. Bij de onderzochte dekzandruggen is de opbolling in de wintersituatie echter aanzienlijk minder geprononceerd dan door voornoemde auteurs gevonden. De maximaal gemeten gradiënt is in de wintersituatie 1 m/2000 m. Hiermee is de gradiënt van dezelfde orde als van de regionale stroming, zoals afgeleid uit het isohypsenbeeld.

In de zomer is de gradiënt in de dekzandrug zeer gering, namelijk 1 : 6000. De dekzandrug behoort tot het gebied waar in de zomer water wordt ingelaten vanuit het Overijssels kanaal. De waterinlaat zou een vrijwel vlakke grondwaterspiegel tot gevolg kunnen hebben (Brouwer en Hoogendoorn, 1986).

De FLOSA berekeningen leiden tot het volgende kwantitatieve beeld:

	Regionale stroming		
		zomer	winter
Inflow (top)	0	1690	2040
Outflow (top)	0	700	1865
Inflow (east)	253	294	308
Outflow (east)	0	750	46
Inflow (west)	0	64	37
Outflow (west)	253	247	280
Massabalans %	0	17	7
(maat voor onnauwkeurigheid in berekeningen)			
Dimensies (m)	x y z :	4.000	1.875 36

Tabel 5.2 Modelberekening: Het totaal doorstroomde debiet  $m^3/d$  door het dekzandrugstelsel.

De invloed van het lokale systeem op de regionale stroming door het studiegebied blijkt niet duidelijk in kwantitatieve zin. De volumestroom door het studiegebied van oost naar west is in de zomersituatie gelijk aan het debiet van de uitgangssituatie. Het verschil tussen winter- en zomersituatie is wel duidelijk. De totale volumestroom neemt in de winter aanmerkelijk toe. De doorstroomde diepte blijft nagenoeg gelijk. Zowel in de wintersituatie als in de zomersituatie stroomt ongeveer 40 procent van het infiltrerend grondwater binnen de tien meter onder het maaiveld. Ongeveer 25 procent bereikt een diepte van 25 meter onder maaiveld.

Het belang van lokale grondwaterstroming voor de grondwaterkwaliteit, zoals ook gesteld door Haak (1985) en Hoogendoorn (1983) lijkt hiermee door de FLOSA berekeningen aangetoond.



6. CONCLUSIES EN SAMENVATTING

In dit rapport wordt een geohydrologisch modelonderzoek beschreven van het IJsseldal, een gebied dat globaal begrensd wordt door de stuwwallen van de Veluwe en de Overijsselse heuvelrug, het Overijssels kanaal en het Twente kanaal.

Het modelonderzoek is verricht als aanvulling op de eerder uitgevoerde studie "Hydrologische systeemkartering Salland/O-Veluwe" (Brouwer en Hoogendoorn, 1986). Het doel hiervan is de systeemkarakteristieken zoals in de systeemkartering bepaald, nader te kwantificeren.

Het modelonderzoek is verricht met de computercode FLOSA-FD (Flow System Analysis-Finite Differences). Met deze code kan driedimensionale stroming in de verzadigde zône worden gesimuleerd.

Het modelonderzoek bestaat uit twee onderdelen. Het eerste deel is een onderzoek naar de ligging en begrenzing van systemen op regionale schaal. Hiervoor is het gehele studiegebied gemodelleerd. Op een aantal aspecten is dieper ingegaan, namelijk de invloed van de mogelijke aansluiting van de klei van Tegelen aan de klei van Drente, de ligging van het zoet-zout grensvlak en de invloed van onttrekkingen.

Het tweede deel bestaat uit modelonderzoek van een lokaal systeem. Onderzocht is wat de invloed van een lokaal dekzandrugsysteem kan zijn op regionale stroming. Met name is gekeken naar de tijdsafhankelijkheid van de systemen. Hiervoor is een zomer- en wintersituatie gemodelleerd.

Regionale systemen

Modelschematisatie:

Het studiegebied is geschematiseerd als twee watervoerende pakketten, gescheiden door een slecht doorlatende tussenlaag (Drenteklei). Aan de oostelijke en westelijke rand liggen de goed doorlatende stuwwallen. Subhorizontaal in het gebied bevindt zich de slecht doorlatende basis.

Als randvoorwaarden zijn opgegeven de stijghoogte van het freatisch vlak, aan de oost- en westrand een normale snelheidscomponent van  $v = 0$ , en aan de noord- en zuidrand een constante potentiaal.

### Stromingssystemen:

De voornaamste voedingsgebieden zijn de stuwwallen. Hier infiltrereert het grondwater. Een groot gedeelte hiervan stroomt betrekkelijk ondiep af. Gemiddeld over het modelgebied stroomt 60 procent door het eerste watervoerend pakket boven de Drente-klei en slechts 15 procent bereikt een diepte van 200 m-NAP.

Kwel komt grotendeels voor in twee smalle zônes aan de flanken van de stuwwallen. Deze zônes zijn precies gelegen boven de westelijke en oostelijke begrenzing van de Drente-klei. De ligging daarvan komt nagenoeg overeen met een strook gronden die op de grondwatertrappenkaart zijn gekenmerkt door een grondwatertrap II, een aanwijzing dat er sprake is van kwel.

Boven de Drente-klei komen lokale systemen voor. Het water infiltrereert hier tot aan de kleilaag. Ook uit chemische analyses werd afgeleid dat het grondwater boven de Drente-klei waarschijnlijk van lokale oorsprong is (Haak, 1985; Hoogendoorn, 1983).

Het grondwater onder de Drente-klei is vrijwel stagnerend. Voor het gehele studiegebied is de verblijftijd van het grondwater bepaald. Door de hoge potentiaalgradient op de Veluwe infiltrereert het grondwater hier diep, terwijl de verblijftijd relatief gering is (0 - 100 jaar).

De verblijftijd van het grondwater in de Overijsselse heuvelrug is groter, terwijl de stromingsdiepte geringer is. Door de geringe gradient is de verblijftijd van het grondwater in de lokale systemen, hoewel de stroming niet dieper reikt dan 40 meter, zeer groot.

### Klei van Tegelen:

De invloed van een eventuele aansluiting van de klei van Tegelen aan de Drente-klei blijkt op de onderscheiden systemen van beperkte invloed. Weliswaar vermindert de volumestroomdichtheid, maar de ligging en begrenzing van kwel en infiltratiegebieden blijft ongewijzigd. Over de klei van Tegelen is door FLOSA een potentiaalsprong bepaald van 2 m. Deze waarde komt goed overeen met de gemeten potentiaalsprong in put 33B-270 (Senden, 1982).

### Zoet-zout grensvlak:

In het zoet/zout grensvlak in het studiegebied komt een opbolling voor met een zuidoost - noordwest oriëntatie. Een verklaring voor deze specifieke oriëntatie is niet eenvoudig. De veronderstelling

dat de opbolling de systemscheiding aangeeft (Brouwer en Hoogen-  
doorn, 1986) kan met de FLOSA berekeningen niet worden aangetoond.  
De systemscheiding volgens FLOSA berekeningen volgt nagenoeg de  
loop van de IJssel en komt overeen met de laagste grondwaterstand in  
het studiegebied.

De ligging van het grensvlak komt gedeeltelijk overeen met de 250  
jaar verblijftijdencontouren. Dit is wellicht een aanwijzing voor  
het bestaan van een actief deel van het regionale systeem boven een  
relatief passief deel. Door de actieve stroming zou het zoute water  
nog kunnen worden meegetransporteerd en door het passieve deel niet.  
Engelen (mondelijke mededeling) veronderstelt dat onder snel veran-  
derende condities ook "hydrostatische compensatie" een rol kan  
spelen. Mogelijk is in dat geval de nu aanwezige opbolling de  
fixatie van een grondwatersysteem waarbij de waterscheiding vroeger  
meer naar het oosten heeft gelegen (Brouwer, mondelijke mededeling).

#### Onttrekkingen:

Voor het modelleren van onttrekking is de modelschematisatie in  
vertikale richting aangepast, waardoor het mogelijk was aan de  
ostrand van het model een verticale snelheid in te voeren die  
overeenkomt met de grondwaterwinning uit het tweede watervoerend  
pakket door de pompstations te Deventer en Diepenveen. Ingevoerd  
zijn een tweetal onttrekkingen van respectievelijk 2 (onttrekking  
1970) en 3,3 miljoen m<sup>3</sup> (situatie 1980).

De invloed van de gemodelleerde winningen op de ligging en begren-  
zing van de stromingssystemen is zeer beperkt. Alleen nabij de  
onttrekkingspunten is een verlaging van de grondwaterpotentiaal  
merkbaar. Door de onttrekking te vergroten wordt de potentiaal ter  
plaats van de winning gereduceerd met twee meter, waardoor de  
potentiaal boven de Drente-klei hoger is dan onder de klei. De  
berekende potentialen in deze situatie komen goed overeen met de  
gemeten potentialen uit 1978.

#### Dekzandrugsysteem:

Uit in 1986 gemeten grondwaterstanden kan worden afgeleid, dat het  
verschil in freatisch vlak tussen de zomer en de winter in 1986  
gemiddeld 1,5 meter bedraagt. De gradiënt van de grondwaterstand in  
de winter is groter dan in de zomer, respectievelijk 1 : 2000 en 1 :

6000. Dit heeft tot gevolg dat in de winter aanzienlijk meer water in de dekzandrug infiltreert dan in de zomer. De invloed van deze lokale stroming op de regionale stroming dwars hierop, lijkt vooral van belang voor waterkwaliteitsaspecten. Het grondwater infiltreert vanuit de dekzandrug tot aan de slecht doorlatende Drente-klei. Hoogendoorn (1983) kwam op basis van chemische analyses eveneens tot deze conclusie.

Op het totale volumetransport in de lengterichting van de dekzandruggen heeft deze lokale stroming geen invloed. Zowel in de zomer als in de winter doorstroomt eenzelfde hoeveelheid grondwater de zijranden van het modelgebied.

LITERATUUR

Brouwer, G.K. (1987 in voorbereiding)

Analytische oplossingen voor de verticale stromingscomponent

Brouwer, G.K., J.H. Hoogendoorn (1986)

Hydrologische systeemkartering Salland/O-Veluwe, rapport OS 86-36

Engelen, G.B. (1984)

Hydrological system analysis: A regional case study, rapport OS 84-20

Haak, A.M. (1985)

Inventarisatie grondwatergegevens in de provincie Overijssel, rapport OS 85-06

Hoogendoorn, J.H. (1985)

De zoet/zout verdeling van het grondwater in Nederland, deel 3A, rapport OS 85-33

Hoogendoorn, J.H. (1983)

De ruimtelijke variatie van enkele belangrijke chemische componenten in het grondwater en de implicaties daarvan voor de grondwaterstroming. Jaarverslag Dienst Grondwaterverkenning TNO

Houtman, H., A.M. Haak (1985)

Grondwaterkaart van Nederland, inventarisatierapport Heerde/Almelo, kaartbladen 27 O, 28 W

IWACO (1984)

IJsselvallei onderzoek rapportage 1e projectjaar invloed diepe grondwaterwinning, rapportnr. 30.248

Meinardi, C.R. (1975)

Brackish groundwater bodies as a result of geological history and hydrological conditions, RID-mededeling 75-1

Rijk Instituut voor Drinkwatervoorziening, Leidschendam

RGD (1975)

Toelichting op de geologische overzichtskaarten.

Rijks Geologische Dienst, Haarlem

Senden, W. (1982)

Geohydrologisch onderzoek IJsselvallei, rapport OS 82-03

Toth, J. (1963)

A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, Journal of Geophysical Research, Vol. 68, no. 16 pp. 4795 - 4812

Waardenburg, F.D.E. (1987)

FLOSA users' manual

WMO (1980)

Grondwaterwinning Boerhaar, de invloed op de omgeving

Waterleiding Maatschappij Overijssel NV, Zwolle

WMO (1982)

Grondwaterwinning Boerhaar, de invloed op de omgeving II

Waterleiding Maatschappij Overijssel NV, Zwolle

Zijl, W. (1984)

Finite element methods based on a transport velocity representation for groundwater motion, WRR, 20(1), 137-145.

Zijl, W. (1986)

Numerical simulations based on stream functions and velocities in three dimensional groundwater flow, Journal of Hydrology, 85, 349-365

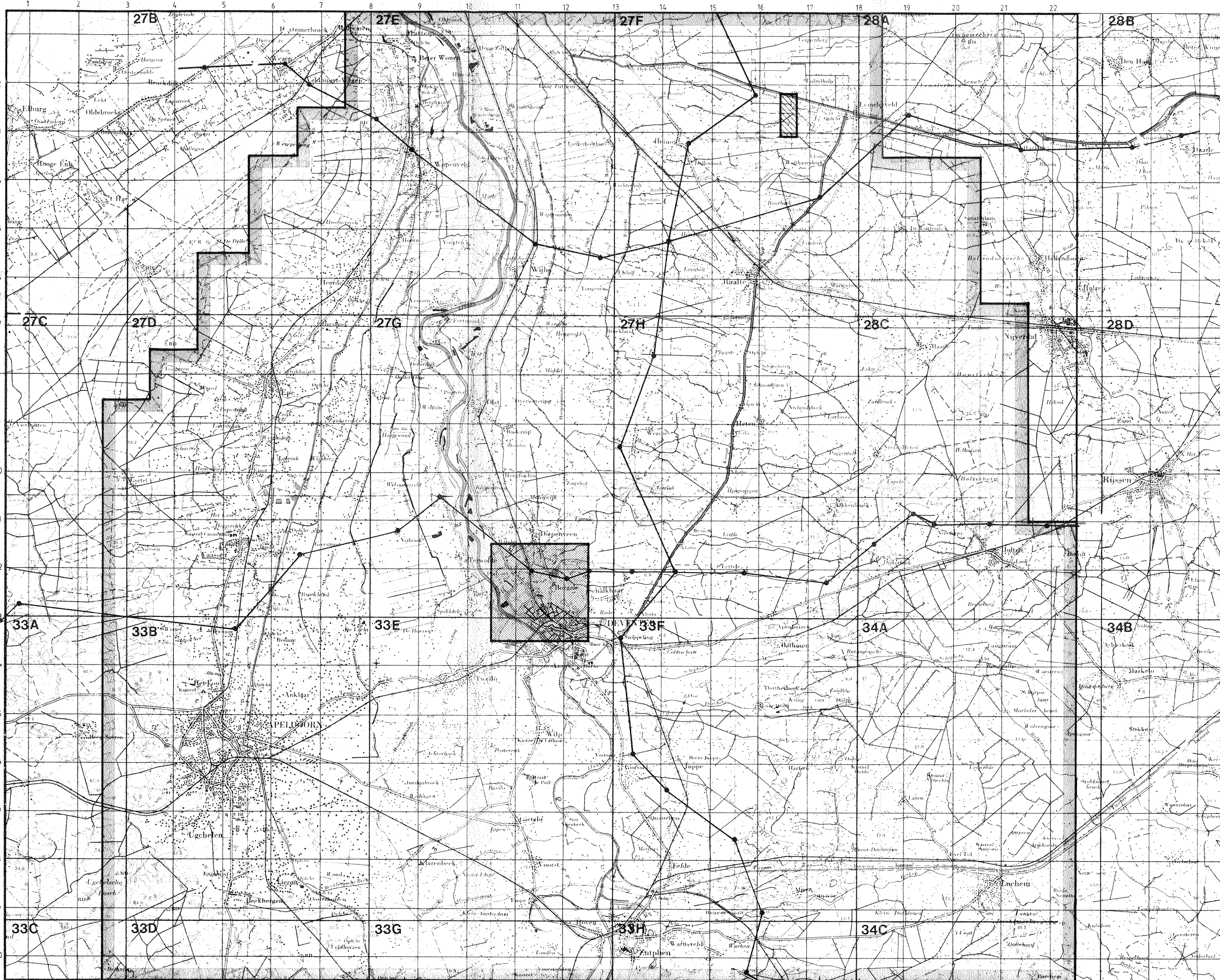
Zijl, W. en F.D.E. Waardenburg (1987)

FLOSA: a code to compute fluxes in potential field problems,


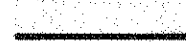
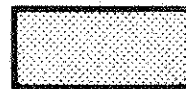
Int. Conference on Reliability and Robustness of Engineering Software, Villa Olmo, Como, Italy, 23-25 sept. 1987.

X

Y



LEGENDA

-  begrenzing modelgebied
-  begrenzing studiegebied
-  gemodelleerde onttrekking

-  detailonderzoek

TNO-DGV  
 dienst grondwaterverkenning *beheert bij MBE 03344*

GEOHYDROLOGISCH MODELONDERZOEK IJSELVALLEI

RAPPORTNR. GS 87-46	KAARTBLAD	SCHAAL 1:100 000	BIJLAGE 1
------------------------	-----------	---------------------	--------------