

GRONDWATERSTROMINGS- STELSELS IN NEDERLAND

G.B. Engelen
J.M.J. Gieske
S.O. Los

Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij



35/786(2)

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

GRONDWATERSTROMINGS- STELSELS IN NEDERLAND

G.B. Engelen
J.M.J. Gieske
S.O. Los



0000 0363 1625

Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij
Staatsbosbeheer
SDU uitgeverij, 's-Gravenhage 1989

+ 1 krt

26 JAN. 1990

JSN 266 857 *

Foto omslag: Duinen en binnenduinrand tussen Egmond en Castricum.
Vanuit de duinen vindt kwel plaats naar de binnenduinrand en de polders
die verder landinwaarts liggen.

© Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij, 's-Gravenhage, 1989

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16b Auteurswet 1912 j[®] het Besluit van 20 juni 1974, stb. 351, zoals gewijzigd bij Besluit van 23 augustus 1985, stb. 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (Postbus 882, 1180 AW Amstelveen). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) dient u zich te richten tot: N.V. SDU, Postbus 20014, 2500 EA 's-Gravenhage.

ISBN 9012 060 92 3

Inhoud

Voorwoord	9
Inleiding	11
1 Hydrologische systeemanalyse: een inleiding	13
1.1 De methodiek	13
1.1.1 Gegevens voor de hydrologische systeemanalyse	17
1.2 Schaal, homogeniteit, betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de onderzoeksresultaten	18
1.2.1 Schaal	18
1.2.2 Homogeniteit	19
1.2.3 Betrouwbaarheid en nauwkeurigheid	19
1.2.4 Invoergegevens	21
2 Een overzicht van de belangrijkste typen van grondwaterstromingsstelsels in hun volgorde van ontstaan	23
2.1 Het thermo-minerale systeem uit het Carboon	23
2.2 Stromingssystemen vanuit de mesozoïsche en tertiaire omranding van het Noordzeebekken	27
2.3 Stromingssystemen vanuit de pleistocene terreinopwelvingen	29
2.4 Stromingssystemen vanuit de holocene terreinopwelvingen	31
2.5 Kunstmatige, door bemaling in stand gehouden, oudere stromingssystemen naar droogmakerijen en polders	31
2.6 Kunstmatige, door bemaling in stand gehouden, jongere stromingssystemen naar de IJsselmeerpolders en in het zuidwestelijke Deltagebied	34
2.7 Kunstmatige, door grondwaterwinningen in stand gehouden, jonge stromingssystemen	37
2.8 Ondiepe, kunstmatige, door landbouwkundige drainage in stand gehouden, jonge stromingssystemen	39
3 Grondwaterstromingsstelsels in Friesland, Groningen, Drenthe en de kop van Overijssel	41
3.1 Systemen gevoed vanuit pleistocene afzettingen	41
3.1.1 Het Glaciale Plateau Systeem	41
3.1.2 Het Oostgroningse Dekzandsysteem	42
3.1.3 De stuwalsystemen	42
3.1.4 Het Ommerveld Systeem	42
3.2 Grondwaterstelsels gevoed vanuit holocene afzettingen	42
3.2.1 Het Complex van Kwelderwallen- en Poldersystemen	42
3.2.2 Het Noordelijke en Zuidelijke Groningse Poldersysteem	43
3.2.3 Het Waddenzee Systeem	43
3.2.4 Het Friese Boezemcomplex	43
3.2.5 Het Systeem van de Weerribben	44
3.2.6 Het IJsselmeer Systeem	44
3.2.7 Het Randmeren Systeem	44
3.3 Profielen	44
3.3.1 Profiel Assen-Steenwijk-Urk	44
3.3.2 Profiel Assen-Sneek-IJsselmeer	45
3.3.3 Profiel Assen-Hoogkerk-Winsum-Waddenzee	46
3.3.4 Profiel Emmen-Stadskanaal-Delfzijl	47

4	Grondwaterstromingsstelsels op de Waddeneilanden	49
4.1	De Friese Waddeneilanden	49
4.2	Texel	49
5	Grondwaterstromingsstelsels in Overijssel, Gelderland, Utrecht en Flevoland	51
5.1	Grondwaterstelsels gevoed vanuit het Carboon	51
5.2	Grondwaterstelsels gevoed vanuit tertiaire afzettingen	51
5.3	Grondwaterstelsels gevoed vanuit pleistocene afzettingen	51
5.3.1	Grondwatersystemen in de regio Twente	52
5.3.2	Het Systeem van de Twentse stuwwallen	52
5.3.3	Het Systeem van de stuwwal van Sibculo	52
5.3.4	Het Systeem van Geesteren-Delden	53
5.3.5	Het Systeem van Vroomshoop-Hooge Hexel	53
5.3.6	Het Systeem van de Sallandse stuwwallen	53
5.3.7	Het Systeem van de Veluwe	53
5.3.8	Het Systeem van de Utrechtse Heuvelrug	55
5.3.9	Het Complex van Systemen van de Achterhoek	55
5.3.10	Het Systeem van de stuwwal van het Montferland	56
5.3.11	Het Systeem van de stuwwal van Nijmegen	56
5.4	Grondwaterstelsels gevoed door laatpleistocene afzettingen	57
5.4.1	Het Systeem van Bergharen-Wijchen	57
5.4.2	De Dekzand- en Duinrugsystemen	57
5.5	Grondwaterstelsels gevoed door holocene infiltratiegebieden	57
5.5.1	Het Systeem van de Overijsselse Vecht	57
5.5.2	Het Systeem van de IJssel	57
5.5.3	De Systemen van de Rijn en de Waal	58
5.5.4	Het Systeem van de Vecht en het Amsterdam-Rijnkanaal	58
5.5.5	Het Systeem van de Vinkeveense Plassen (VI)	58
5.5.6	Het Systeem van de Randmeren	58
5.6	Profielen	58
5.6.1	Profielen door Twente en Salland	59
5.6.2	Profielen door Twente, Salland en de Oostelijke Veluwe	62
5.6.3	Profiel noordwestelijke Veluwe-Randmeer-IJsselmeer	62
5.6.4	Profiel Winterswijk-Veluwe-Utrechtse Heuvelrug-Polder Mijdrecht	62
5.6.5	Profiel Veluwe-Montferland	64
5.6.6	Profiel Arnhem-Betuwe-Nijmegen	66
6	Grondwaterstromingsstelsels in Noord-Holland	67
6.1	Pleistocene Systemen	67
6.1.1	Het Stuwwalsysteem van Wieringen	67
6.2	Natuurlijke holocene systemen	67
6.2.1	Het Duinsysteem van Castricum	67
6.2.2	Het Duinsysteem van Zandvoort	67
6.2.3	De Duinsystemen van Petten en Den Helder	67
6.2.4	Het Systeem van Westfriesland	67
6.2.5	Het Noordzee Systeem	67
6.2.6	Het IJsselmeer Systeem	68
6.3	Kunstmatige holocene systemen	68
6.3.1	Het Systeem van de Polder Geestmerambacht	68
6.3.2	Het Eilandspolder Systeem	68
6.3.3	Het Complex van Systemen van Amsterdam	68
6.4	Profielen	68
6.4.1	Profiel Wieringermeer-Beemster-Amsterdam-Westeinderplassen	68
6.4.2	Profiel Noordzee-Beemster-IJsselmeer	69

7	Grondwaterstromingsstelsels in Zuid-Holland	71
7.1	Systemen gevoed vanuit het Pleistoceen	71
7.2	Systemen gevoed vanuit het Holoceen	72
7.2.1	Het Haagse Duinsysteem	72
7.2.2	Het Zandvoortse Duinsysteem	72
7.2.3	Het Oude Rijn Systeem	72
7.2.4	Het Braassemer-Westeinder Systeem	72
7.2.5	Het Zoetermeer Systeem	72
7.2.6	Het Hollandse IJssel Systeem	72
7.2.7	Het Systeem van de Rijn	73
7.2.8	Het Systeem van de Waal	73
7.2.9	Het Maas Systeem	73
7.3	Profielen	73
7.3.1	Profiel Wassenaarse Duinen-Kagerplassen-Braassemermeer-Uithoorn	75
7.3.2	Profiel Goeree-Oostvoorne-Delft-Woerden	75
7.3.3	Profiel Overflakkee-Hoekse Waard-Alblasserwaard-Beneden Betuwe	76
7.3.4	Profiel door de Hollandse duinen	77
8	Grondwaterstromingsstelsels in het zuidwestelijke Deltagebied	81
8.1	Zeeuws-Vlaanderen	81
8.2	Walcheren, Noord- en Zuid-Beveland	81
8.2.1	Walcheren	82
8.2.2	Noord-Beveland	82
8.2.3	Zuid-Beveland	82
8.3	Schouwen-Duiveland	83
8.4	Tholen	83
8.5	St. Philipsland	83
8.6	Goeree-Overflakkee	83
8.7	Tiengemetten	84
8.8	Voorne-Putten en de Hoekse Waard	84
9	Grondwaterstromingsstelsels in Noord-Brabant	85
9.1	Grondwaterstelsels gevoed vanuit het Tertiair	85
9.1.1	Het Systeem van de microcuesta van de Kempen	85
9.1.2	Het Systeem van het Plateau van de Kempen	85
9.2	Grondwaterstelsels gevoed vanuit het Pleistoceen	86
9.2.1	Het Drunense Duinen Systeem	86
9.2.2	Het Midbrabantse rug Systeem	86
9.2.3	Het Weert Systeem	86
9.2.4	Het Complex van Peelschol Systemen	86
9.3	Profielen	87
9.3.1	Profiel Westmalle (België)-Hollands Diep-Dordrecht	87
9.3.2	Profiel Kempisch Plateau-Drunense Duinen-Maas	87
9.3.3	Profiel Midden-Limburg-Weert-'s-Hertogenbosch	88
10	Grondwaterstromingsstelsels in Zuid-Limburg	91
10.1	Het Carboon Systeem	91
10.2	Systemen gevoed vanuit het Krijt	91
10.2.1	Het St. Pietersberg Systeem	91
10.2.2	Het Systeem van het Plateau van Margraten	91
10.2.3	Het Heyerath Systeem	92
10.2.4	Het Vijlenerbosch Systeem	92
10.2.5	Het Bochholzerheide Systeem	92
10.2.6	Het Systeem van Ubachsberg	92
10.2.7	Het Systeem van het Plateau van Schimmert	92
10.2.8	Het Systeem van Kasen-Bunde-Elsloo	93
10.2.9	Het Limbricht Systeem	93

10.2.10	Het Heerlen-Brunssummerheide Systeem	93
10.2.11	Het Systeem van Selfkant-Susteren	93
10.2.12	Het Koningsbosch Systeem	93
10.2.13	Het Geulmonding Systeem	93
10.2.14	Het Maas Systeem (Zuidlimburgse deel)	94
10.2.15	De Dekzand- en Duinsystemen op de oostelijke Maasoever	94
10.2.16	Het Systeem van het Plateau van de Kempen (Zuid-Limburgse deel)	94
10.3	Profiel	94
10.3.1	Profiel Plateau van Schimmert-Maas	94
11 Telescopische of 'inzoombenadering' met behulp van het hiërarchische opbouw van de hydrologie		97
12 Kwetsbaarheid van natuurgebieden in relatie tot vervuiling en verdroging van grondwaterstelsels		99
12.1	Kwetsbaarheid van grondwaterstelsels voor vervuiling	99
12.2	Gevolgen voor grondwaterkwaliteit door overbesteding	101
12.3	De invloed van onttrekkingen op systemen	103
Literatuur		105
Samenvatting		113
Summary		115
Appendix A		117
Appendix B		123
Appendix C		127

Voorwoord

Ontwikkelingen in de laatste jaren op het gebied van de ecohydrologie hebben het inzicht in het belang van de hydrologie voor de natuur in Nederland sterk vergroot: Voor grondwaterafhankelijke ecosystemen blijkt niet alleen de kwantiteit, maar ook de kwaliteit van het grondwater van groot belang te zijn.

Parallel daaraan zien we ook in diverse beleidskaders, in het bijzonder ten aanzien van het natuurbeleid een toenemend besef van de betekenis van het abiotisch milieu als randvoorwaarde voor de instandhouding en ontwikkeling van levende natuur. In het bijzonder geldt dit voor de onderkenning van het belang van de ruimtelijke relaties via het grond- en oppervlaktewater daarbij. Ook voor het op te stellen Natuurbeleidsplan zal deze materie een van de belangrijkste pijlers vormen.

In het kader daarvan heeft de Directie Natuur-, Milieu- en Faunabeheer van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij opdracht gegeven een gestandaardiseerde globale gebiedsindeling van Nederland op basis van grondwaterprocessen te vervaardigen.

De studie is uitgevoerd op basis van literatuurgegevens en gegevens van lopend onderzoek. In het onderhavige rapport wordt hiervan verslag gedaan.

De studie is uitgevoerd door Staatsbosbeheer en het Instituut van Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit. De sectie Kartografie van Staatsbosbeheer heeft het tekenwerk verzorgd.

Op verzoek van de opdrachtgever is een begeleidingscommissie samengesteld. Deze begeleidingscommissie had een drietal taken, te weten: het toezien op de kwaliteit van het eindrapport, het inbrengen van kennis en informatie van de instanties, die de leden van de commissie vertegenwoordigen en het aangeven van de gebruikswaarde van de indeling, vooral met betrekking tot het milieu en natuurbeschermingsbeleid. In de begeleidingscommissie waren diverse disciplines en instellingen vertegenwoordigd.

De samenstelling van de begeleidingscommissie was als volgt:

ing. F. Aelmans (TNO-DGV)

dr. T.W.M. Bakker (SBB)

ir. C. Buddingh (NMF)

drs. F.A.M. Claessen (RWS-DBW/RIZA) vanaf 1 maart 1988

drs. F. Hoekstra (SBB)

dr. J.A. Klijn (Stiboka)

ir. P.J. Kusse (LD)

ir. C.R. Meinardi (RIVM)

ir. G. Verbrugh (RWS) tot 1 maart 1988

dr. J.G. Vermeer (SBB)

drs. G. van Wirdum (RIN)

ing. K.A. Wit (ICW)

dr. ir. F.J. van Zadelhoff (NMF)

ir. W.P.C. Zeeman (voorzitter, SBB)

Als voorzitter van de begeleidingscommissie ben ik de leden ervan zeer erkentelijk voor de inzet en constructieve wijze waarop zij hun bijdrage hebben geleverd. Daarnaast is nog een speciaal dankwoord verschuldigd aan drs. A.C. Garritsen (IvM-VU), drs. R.J. Stuurman, drs. A. Biesheuvel, drs. J.L. van der Mey, drs. J.C. de Ruiter (TNO-DGV) en drs. P.C. Schipper

(SBB) voor het verstrekken van informatie, aan de heren C. Snel en A. Pul voor het tekenwerk en aan drs. C. Plug (NMF) die de tekst heeft geredigeerd en verantwoordelijk was voor de produktie, lay-out en het ontwerp van de omslag.

ir. W.P.C. Zeeman
voorzitter begeleidingscommissie

Inleiding

Deze inventariserende studie van de grondwatersystemen van Nederland werd uitgevoerd in opdracht van de Directie Natuur-, Milieu- en Faunabeheer van het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij door Staatsbosbeheer in samenwerking met de Vrije Universiteit. Het doel van de studie was om in korte tijd een referentiekader van hydrologische systemen te verschaffen, dat gebruikt kon worden bij de uitwerking van het Natuurbeleidsplan.

Gelet op de beperkte tijd en middelen en de grootte van het te bestrijken gebied – geheel Nederland –, moeten de resultaten dan ook als inventariserend en deels als voorlopig worden beschouwd.

Een beschrijving van de opzet zal duidelijk maken, hoe is getracht om de eisen van overzicht en gebiedsdekking van Nederland zoveel mogelijk te combineren met gedetailleerde informatie op regionale en subregionale schaal.

Eerst wordt een kort overzicht gegeven van de theorie en de begrippen zoals die worden gebruikt in de regionale hydrologische systeemanalyse, gebaseerd op de basistheorie van de hiërarchisch geneste stromingsstelsels volgens Tóth (1963) en verder voor Nederland onder andere uitgewerkt door Engelen en medewerkers (Engelen en Jones, 1986).

Vervolgens zijn de in Nederland voorkomende grondwaterstromingsstelsels ingedeeld in een achttal hoofdgroepen, waarbij de leeftijd van de afzettingen waardoor het systeem wordt gevoed of de aandrijving van een systeem van oud naar jong gaat. De groepen worden kort toegelicht en de gebieden waar ze voorkomen worden op overzichtskaartjes van Nederland aangegeven. Op deze wijze is een systematische inleiding ontstaan voor het lezen van de complexe overzichtskaart van de grondwaterstromingsstelsels van Nederland (bijlage 1).

Per grotere regio zijn vervolgens de aanwezige stromingsstelsels besproken in volgorde van globale ouderdom. De informatie in de horizontale doorsnede van het kaartbeeld is per regio aangevuld met een aantal gemodelleerde verticale doorsneden, waarin de hydrogeologische opbouw, de topografie, de grondwaterspiegel en het stroomlijnenverloop zijn aangegeven. De representatieve doorsneden geven veel meer details van de stromingsstelsels dan in het kaartbeeld op de gekozen schaal mogelijk is. Ze bieden in combinatie met de systemenkaart een driedimensionaal beeld van de belangrijkste grondwaterstromingsstelsels. In die profielen is via stroomlijnen globaal de samenhang zichtbaar tussen de gebieden waar grondwatervoeding plaats vindt via infiltratie of wegzijging uit oppervlaktewater en de gebieden met uittredend grondwater via bronnen, kwel en directe uitstroming in oppervlaktewater (zie 1.2.3 voor een discussie over de betrouwbaarheid van de profielen).

1 Hydrologische systeem-analyse: een inleiding

1.1 De methodiek

Regionale hydrologische systeemanalyse: oude wijn in nieuwe zakken of een stapje hoger op de kennisladder?

Hydrologisch en waterhuishoudkundig onderzoek hebben in verschillende vormen en onder verschillende namen een geschiedenis die terug gaat tot de oude beschavingen van het Midden- en Verre-Oosten, ver voor het begin van de jaartelling. In deze eeuw, en met name in de laatste decennia, is dit onderzoek in een stroomversnelling gekomen door de omvang, diepgang en complexiteit van de vraagstukken op het gebied van waterbeleid en waterbeheer.

Grondwaterstudies bestrijken een steeds breder veld en de raakvlakken met tal van maatschappelijke vraagstukken worden steeds groter. Een aantal algemene ontwikkelingen en verschuivingen op dit gebied kunnen samengevat worden in de volgende begrippenparen (Engelen en Jones, 1986, p. 354): van ondiep naar diep; van klein naar groot; van lokaal naar (supra)regionaal; van statisch naar dynamisch; van beschrijving naar berekening; van analytisch naar numeriek; van kwantiteit naar kwaliteit; van schoon naar vervuild; van individueel naar groepswerk; van nationaal naar internationaal; van monodisciplinair naar multidisciplinair; van eenvoudig naar complex; van analyse naar synthese; van component naar systeem.

De toenemende complexiteit en de daaruit voortkomende behoefte aan een samenvattende (holistische) visie op het geheel leiden tot het gebruik van systeemconcepten. Zo zien we een historische ontwikkeling in de grondwaterstudies: stroming naar putten, stroming in aquifers, stroming in aquifersystemen, grondwaterstromingsstelsels als zelfstandige eenheden en tenslotte grondwaterstromingsstelsels als componenten van regionale watersystemen in brede zin.

Systeemanalyse als methode is een waardevol gereedschap om complexiteit hanteerbaar te maken in vele takken van wetenschap, beleid en beheer. Tot dusver heeft men binnen het ruime terrein van de (grondwater)hydrologie de systeemanalyse vooral toegepast op vereenvoudigde, geïdealiseerde, vaak homogene en ruimtelijk samengenomen, vooral op hoeveelheden betrekking hebbende situaties. Een andere mogelijke benaderingswijze in de systeemanalyse gaat meer uit van complexe gegevens uit het veld, van heterogene spreiding in tijd en ruimte, van praktijkgevallen op regionale en lokale schaal, van waterkwaliteit als integraal onderdeel.

Het concept van de analyse van regionale watersystemen sluit op deze meer holistische en regionale systeembenadering aan. Hierin word een hiërarchisch samenhangende en onderling afhankelijke reeks van deelwatersystemen op grond van stromingseenheden onderscheiden. De beschrijving en modellering van grondwater en oppervlaktewater, kwantiteit en kwaliteit kunnen zo idealiter in een onlosmakelijk en inzichtelijk kader met elkaar verbonden worden op ruimtelijke basis. Zo ontstaat een totaalkader als leidraad bij waterbeleid en waterbeheer.

Hydrologische systeemanalyse vanuit de hierboven geschetste invalshoek

is een methode om watersystemen te onderscheiden naar soort, schaal, onderlinge samenhang, ruimtelijke verbreiding en gedrag in de tijd. Het kan hier zowel natuurlijke als kunstmatige systemen en mengvormen daarvan betreffen. De schaal waarop de systemen nog kunnen en moeten worden onderscheiden, is afhankelijk van de doelstellingen en problemen die aan het onderzoek ten grondslag liggen. Die schaal kan sterk variëren: stroomgebieden van grote rivieren als de Rijn, administratieve eenheden als provincies, landschappelijke eenheden, beheereenheden als waterschappen, natuurterreinen en landbouwkavels.

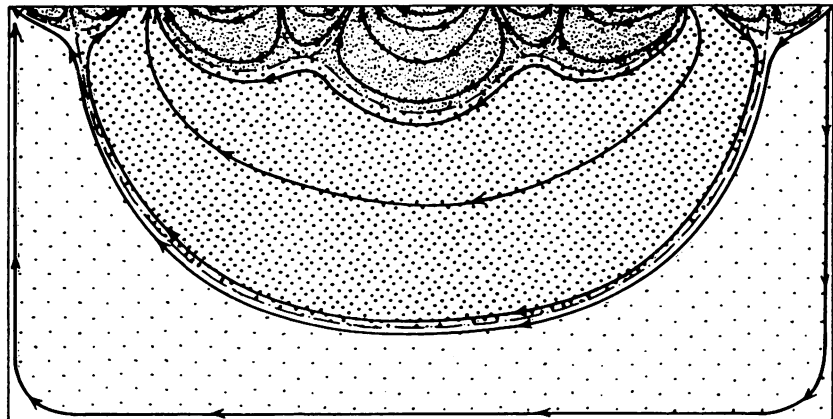
Een mogelijke definitie van een watersysteem is de omschrijving zoals gebruikt door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat in 'Omgaan met water, naar een integraal waterbeleid':

'Een watersysteem is een samenhangend geheel van oppervlaktewater, grondwater, onderwaterbodembodem, oevers en technische infrastructuur, met inbegrip van de daarin voorkomende levensgemeenschappen en alle bijbehorende fysische, chemische en biologische kenmerken en processen. De grenzen van een dergelijk watersysteem worden in de eerste plaats bepaald op grond van morfologische, ecologische en functionele samenhang' (definitie gewijzigd naar aanleiding van Witmer et al., 1987).

Een watersysteem in de ruime zin van het woord is opgebouwd uit een aantal gekoppelde systeemcomponenten, die ieder als kleinere, meer specifieke watersystemen beschouwd kunnen worden en aangeduid worden met voorvoegsels als atmosferisch, oppervlakte, bodem, natuurlijk, kunstmatig, of landbouwkundig.

Een grondwatersysteem of grondwaterstromingsstelsel is een driedimensionaal, dynamisch samenhangend stromingslichaam van grondwater dat zich in tijd en ruimte kan wijzigigen onder invloed van veranderingen in patroon en grootte van in- en uitvoer en van veranderingen in de doorlatendheid van het doorstroomde medium.

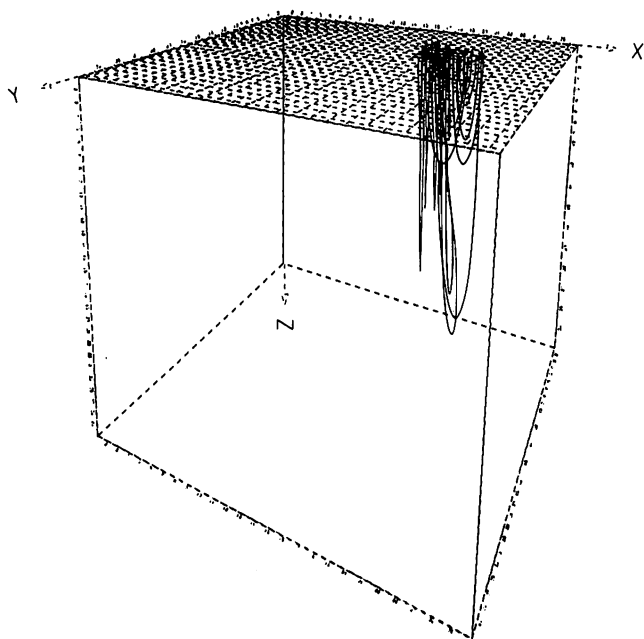
In- en uitvoerzones van het stromingsstelsel kunnen natuurlijk en/of kunstmatig zijn. De infiltratie- en kwelgebieden van een natuurlijk systeem zijn door stroomlijnen verbonden. Langs de stroomlijnen kan een stelselmatige verandering in grondwaterkwaliteit optreden. Dikwijls hebben verschillende grondwaterstromingsstelsels een verschillende ruimtelijke waterkwaliteitsopbouw, als gevolg van verschillen in historie, voeding, hydrochemische processen en aard van het doorstroomde medium.



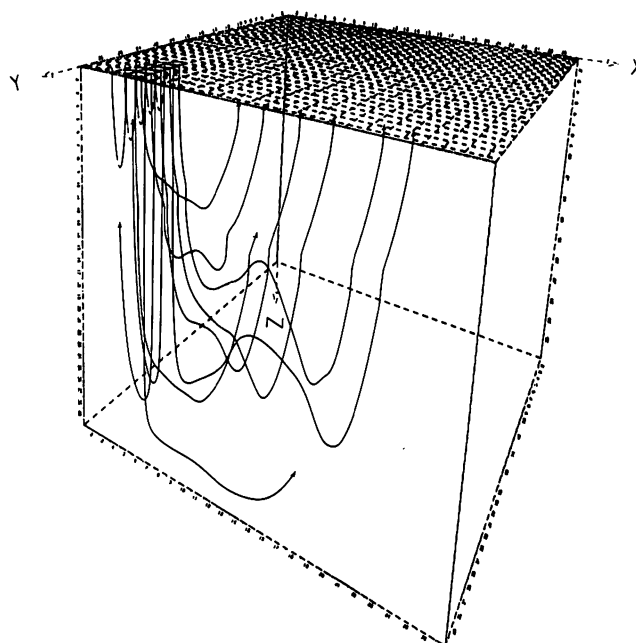
Figuur 1: Lokale, intermediaire en regionale systemen voor een isotroop homogeen pakket. Het landschap heeft een helling waarop een golvende topografie is gesuperponeerd.

Onder invloed van reliëfverschillen kunnen zich in de ondergrond talrijke, hiërarchisch gerangschikte, aangrenzende maar afzonderlijke grondwaterstromingstelsels vormen. Ze vormen een vaak ingewikkelde ruimtelijke stapeling en verstrengeling. De onderlinge hiërarchische rangschikking in orden is enigszins te vergelijken met een stapeling van schalen van verschillende grootte op en in elkaar. De grondlegger van deze hiërarchische stromingscellentheorie is Tóth (1963). Hij leidde een analytische formule af voor stroming in een homogeen isotroop watervoerend pakket onder een golvend, aflopend topografisch vlak (figuur 1). Numerieke oplossingen voor dit type stromingsproblemen kwamen onder andere van Freeze en Witherspoon (1966, 1967).

Een zeer belangrijke bijdrage aan de numerieke driedimensionale modellering van dergelijke grondwaterstromingstelsels is geleverd in de tachtiger jaren binnen de Dienst Grondwaterverkenning van TNO door Zijl (1986, 1988) en Nawalany (1986a, 1986b). De figuren 2 en 3 geven enige voorbeelden van de uitvoer uit het driedimensionale programma FLOSA-FD. De theorie van geneste grondwaterstromingstelsels is voor Nederland toegetst en verder uitgewerkt in een systeem van regionale hydrologische systeemanalyse door Engelen en medewerkers (Engelen, 1984; Engelen en Jones, 1986) in samenwerking met TNO-DGV.

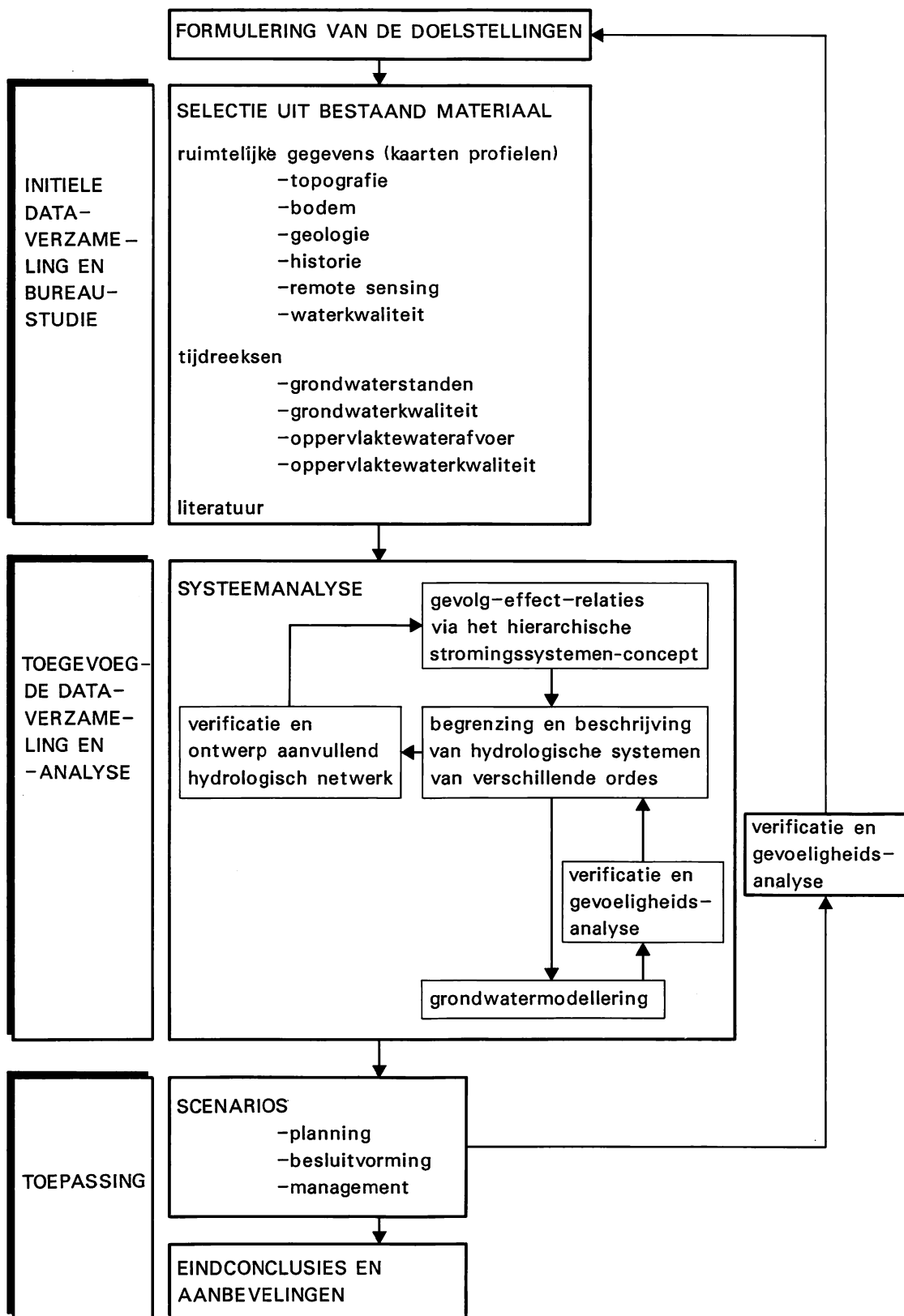


Figuur 2: Voorbeeld van een driedimensionale berekening van stroomlijnen met het programma FLOSA-FD voor een situatie in Zuid-Holland (Promes, 1989). Weergegeven is de infiltratie vanuit het Braassemermeer.



Figuur 3: Voorbeeld van een driedimensionale berekening van stroomlijnen met het programma FLOSA-FD voor een situatie in Zuid-Holland, (Promes, 1989). Weergegeven is de infiltratie vanuit de Haagse Duinen.

De hydrologische systeemanalyse is zo uitgegroeid tot een totaalpakket van samenhangende onderzoeksmethoden voor regionale (grondwater)hydrologie, steunend op de basistheorie van Tóth. Kwantitatief en kwalitatief onderzoek worden hierin geïntegreerd, evenals veld-, laboratorium- en wiskundig modelonderzoek. Terwijl de klassieke grondwateronderzoeken nog sterk uitgingen van een hydrogeologische schematisatie in watervoe-



Figuur 4: De werkwijze bij toegepaste hydrologische systeemanalyse (naar Stuurman et al., 1988).

rende pakketten, gescheiden door slecht doorlatende lagen, ligt bij de analyse van de grondwatersystemen de aandacht primair op het stromingslichaam zelf en daarna pas op het stromingsmedium. Hierdoor wordt het ook mogelijk en zinvol een groot aantal gegevens van niet direct hydrologische aard altijd en systematisch in de regionale analyses te betrekken en te integreren. Denk hierbij aan topografie, bodems, verkavelingspatronen, historische ontwikkelingen, vegetatiepatronen, het voorkomen van ijzeroer, inpolderings- en geologische geschiedenis, waterkwaliteitspatronen of landgebruiksvormen. Op die wijze kan dikwijls worden beschikt over een uitgebreid vlaksgewijs aanvullend databestand, dat hydrologisch geïnterpreteerd kan worden in samenhang met het veel ijlere net van puntwaarnemingen van bijvoorbeeld grondwaterstanden en boorlocaties. Luchtfoto's en satellietopnamen leveren voor vele van dit soort gegevens gedetailleerde patronen.

Een hydrologische systeemkartering kan in fasen en op verschillende schalen uitgevoerd worden, afhankelijk van de probeemstelling en beschikbare middelen. Een eerste inventariserende kartering kan zich bijvoorbeeld beperken tot bestudering van bestaande gegevens en rangschikking daarvan in een stromingssysteemkader, al dan niet met gebruikmaking van alle bestaande hydrochemische informatie. Dit kan bij verdere verfijning ondersteund worden met een twee- of driedimensionale modellering van de grondwatersystemen. Zo nodig kan aanvullend veldwerk verricht worden voor verdere verfijning. Een voorbeeld van de werkwijze bij toegepaste hydrologische systeemanalyse is gegeven in figuur 4 (Stuurman et al., 1988).

1.1.1 Gegevens voor de hydrologische systeemanalyse

De gegevens, die bij de regionale hydrologische systeemanalyse worden gebruikt zijn zeer uiteenlopend van aard en vallen uiteen in een aantal soorten:

- **De ruimtelijke gegevens** zijn meestal aanwezig in de vorm van verschillende typen kaarten en profielen of zijn samen te stellen uit tabellarische reeksen puntgegevens.
- **De tijdreeksen** geven in het algemeen een veel minder dicht ruimtelijk spreidingspatroon van de waarnemingspunten en variëren sterk in meetfrequentie. Ze zijn zeer nuttig om optredende processen te analyseren naar aard en tijdschaal en verschuivingen in ruimtelijke patronen te signaleren bij niet-evenwichtssituaties.

De topografische kaarten vormen de belangrijkste informatiebron voor de verdeling van een gebied in een hiërarchie van hogere en lagere gedeelten. Hieruit volgt reeds een eerste zeer voorlopige indruk van de verspreiding van kwel- en infiltratiegebieden en hun onderlinge ruimtelijke verband. Het landgebruikstype is vooral op oudere topografische kaarten nog nauw gebonden aan de natuurlijke hydrologische situaties en een goed hulpmiddel om de topografische eenheden snel te herkennen en nauwkeuriger af te bakenen. Het landgebruikstype heeft via de waterbalans een grote invloed op de sterkte van de grondwatervoeding vanuit de neerslag. De bodemkaarten op verschillende schalen leveren via de soorten bodems, en de daarin optredende processen van bijvoorbeeld uitloging, gleyverschijnselen en veenvorming, verdere aanknopingspunten voor de verdeling van het terrein in hydrologisch vergelijkbare eenheden. De grondwatertrappenclassificatie van de bodemkaart is een zeer waardevol hulpmiddel bij de verdere indeling. In vele gebieden is echter door waterhuishoudkundige ingrepen het oorspronkelijke natuurlijke grondwatertrappenpatroon verstoord, meestal door ontwatering. Voorzichtigheid bij de interpretatie naar de huidige situatie is dan ook noodzakelijk. Anderzijds geven afwijkingen een beeld van de invloed van latere ingrepen.

De geologische kaarten van Nederland zijn nog maar ten dele herzien, zodat een combinatie van oude en nieuwe kaartseries gebruikt moet worden. De geomorfologische kaart van Nederland is ook pas gedeeltelijk uitgebracht. Historische kaarten zijn vooral van belang in verband met de waterstaats- en ontginningsgeschiedenis en de veranderingen in grondgebruik. Deze weerspiegelen zich weer in gewijzigde randvoorwaarden voor de grondwaterstromingsstelsels binnen de regionale hydrologie.

De waterstaatskaart is een belangrijke informatiebron voor de verdeling in waterstaatkundige eenheden en voor de koppeling van oppervlaktewater-systemen en grondwaterstelsels. Deze kaarten zijn niet altijd voldoende recent en gedetailleerd, zodat dan aanvullende informatie van provinciale waterstaten en waterschappen nodig is.

De grondwaterkaart van Nederland is een onmisbaar basisdocument bij de regionale systeemanalyse. De kaartbladen ervan zijn echter van zeer uiteenlopende ouderdom, zodat de mate van detail vrij sterk kan wisselen en continuïteit op de overgangen van kaartbladen niet steeds gegeven is. De informatie uit luchtfoto's en satellietbeelden kan zeer bruikbaar zijn voor de begrenzingen van allerlei terreineenheden, maar is in deze overzichtsstudie niet gebruikt. In een aantal meer gedetailleerde hydrologische systeemstudies, die in dit overzicht zijn verwerkt, is dat al wel het geval (zie bijvoorbeeld appendix A). Op dit gebied mag echter in de toekomst nog een duidelijke verdieping van het onderzoek verwacht worden, vooral met betrekking tot remote sensing.

Waterkwaliteitspatronen vormen een zeer belangrijk hulpmiddel bij de systeemanalyse. Veel grondwaterstromingsstelsels hebben specifieke condities in hun infiltratiegebieden, wat zich uit in een verschillende uitgangskwaliteit van het infiltrerende water. Het type systeem (onder andere via de verblijftijd in de ondergrond) en de samenstelling van de ondergrond bepalen dan de verdere veranderingen in waterchemie langs de stroomlijnen. Met behulp van een veelzijdige moderne classificatie van watertypen, zoals ontwikkeld door Stuyfzand, is het mogelijk de veelheid van hydrochemische gegevens te schematiseren tot overzichtelijke watertypen en die verbreidingspatronen vervolgens af te beelden en te analyseren.

Grondwaterstandgegevens vormen zowel belangrijke invoergegevens bij de modellering als controlemogelijkheden voor de juistheid van de modelleringen. Doorlatendheidsgegevens van de diverse lagen in de ondergrond worden ontleend aan pompproeven, metingen aan boorkernen, korrelgrootte-analyses van boormonsters en waterbalansstudies. De grote variatie in opbouw van de ondergrond en de beschikbare onderzoeksmethoden maken dat de doorlatendheidswaarden vaak tussen ruime grenzen variëren of slechts per groep van lagen bekend zijn. Ze kunnen ruimtelijk sterk variëren over korte afstanden. In deze studie zijn de doorlatendheidswaarden uit de literatuur als eerste uitgangspunt genomen en vervolgens bij de modelleringen binnen redelijke grenzen aangepast als andere onafhankelijke informatie, uit bijvoorbeeld waterchemie of stijghoogtegegevens, daartoe aanleiding gaf. De gebruikte waarden zijn in appendix B gegeven.

1.2 Schaal, homogeniteit, betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de onderzoeksresultaten

1.2.1 Schaal

Het begrip schaal is van groot belang binnen de hydrologische systeemanalyse, zoals direct voortvloeit uit het hiërarchisch karakter van de geneste grondwaterstromingsstelsels. Deze stelsels zijn te rangschikken naar grootte en fluxintensiteit, naar ouderdom en naar stapeling en positie in de ruimte naast en op elkaar. Bij beleids- en beheervraagstukken op het gebied van integraal waterbeheer is eveneens steeds sprake van een

getrapte opbouw van problemen en mogelijke oplossingen. Door nu deze beide hiërarchieën met elkaar te verbinden ontstaat de mogelijkheid om systematisch, stapsgewijs, doelgericht en efficiënt hydrologische informatie in beleid en beheer te verwerken.

De methode van de regionale hydrologische systeemanalyse is op iedere schaal toepasbaar, beginnend met de zeer grote supraregionale en regionale systemen en vervolgens steeds verder in detail gaand tot op de schaal van stromingsstelsels van regenwaterlenzen met een dikte variërend van decimeters tot meters en een doorsnede van enkele tientallen meters. De geneste hiërarchie van stromingsstelsels houdt in, dat de stelsels naarmate ze kleiner worden ze ook talrijker en gemiddeld ondieper worden. In deze studie zijn echter uitsluitend de grote en middelgrote stromingsstelsels weergegeven.

Waarschuwing: De ruimtelijke stapeling van kleinere systemen binnen en op grotere, houdt tevens in dat als we de grotere systemen duidelijk op een kaart willen weergeven, het noodzakelijk is de kleinere systemen, zo we die al in detail kennen, uit het kaartbeeld weg te laten. Als dus op een overzichtskaart is aangegeven dat ergens een groot systeem aanwezig is, hoeft dat nog niet te betekenen dat het zich daar overal en vlakdekkend aan het oppervlak bevindt. Het kan bijvoorbeeld in een aantal kwelvensters van beperkte omvang door de bovenliggende systemen naar het oppervlak omhoog komen. Ook voor de dwarsdoorsneden geldt, dat als gevolg van de schematisatie en de schaal kleine systemen niet zichtbaar zijn. Een speciale waarschuwing betreft de profielen. Deze waarschuwing geldt het verschil in horizontale en verticale schaal in de doorsneden. Het is noodzakelijk de hoogteschaal sterk te overdrijven om de verschijnselen goed zichtbaar weer te geven, dikwijls met een honderdvoudige overdrijvingsfactor. De gemodelleerde stromingsstelsels zijn dus in werkelijkheid veel meer samengedrukt en platter, dan ze in de profielen lijken.

1.2.2 Homogeniteit

Het hydrologisch systeemonderzoek heeft in de laatste jaren grote vorderingen gemaakt dankzij een aantal gedetailleerde karteringen en modelstudies op verschillende schalen in uiteenlopende delen van Nederland. De gebieden waar deze systeemstudies hebben plaats gevonden, zijn aangegeven op de kaart van Nederland door de ligging van de profiellijnen (bijlage 2).

Er zijn echter zeer grote delen van Nederland waar dergelijke studies tot dusver nog niet zijn verricht. Bij het samenstellen van een gebiedsdekkend beeld van Nederland moesten dus in korte tijd grote gaten opgevuld worden. Dat heeft tot gevolg dat de kennis van de hydrologische systemen in dit stadium nog onevenwichtig is. Dit betekent dat de nauwkeurigheid van gebied tot gebied niet gelijk kon zijn en mede afhankelijk is van de verschillen in complexiteit per gebied en van de soort en hoeveelheid van reeds beschikbare systeemstudies.

Gebruikers van deze studie met zijn systemenkaart en profielen moeten er zich dan ook van bewust zijn, dat detailproblemen niet zonder meer met behulp van deze studie mogen worden opgelost of benaderd. Men zal dan zeker het basismateriaal dat in deze studie is verwerkt opnieuw in de beschouwingen moeten betrekken en in veel gevallen zal aanvullend gedetailleerder onderzoek noodzakelijk zijn. Het onderzoek is dan wel vanaf het begin in een groter kader met bekende randvoorwaarden te plaatsen en doelgericht en doelmatig te verfijnen met dezelfde methodiek.

1.2.3 Betrouwbaarheid en nauwkeurigheid

In het algemeen geldt dat hoe intensiever het onderzoek is geweest, des te

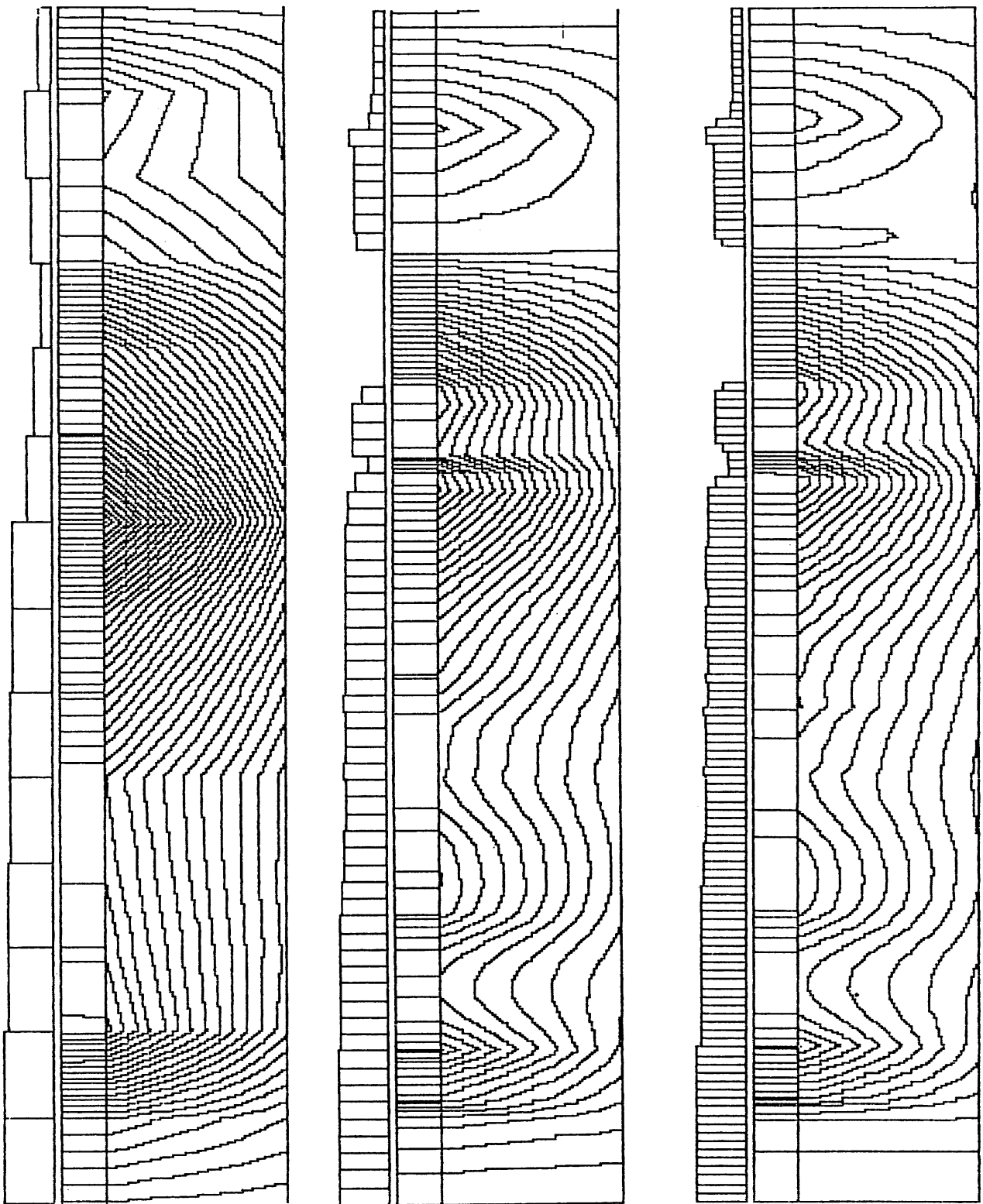
betrouwbaarder en nauwkeuriger zijn de onderzoeksresultaten. Dit geldt ook voor de ligging van systeemgrenzen en de stromingspatronen in de dwarsdoorsneden.

De stromings- en verblijftijdmodellering, zoals toegepast in deze studie, kent een aantal beperkingen, die we ons dienen te realiseren om de betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van de resultaten van geval tot geval goed te kunnen inschatten.

De stroomlijnen in de profielen en de verblijftijden van het water zijn berekend met het computerprogramma FLOWNET (van Elburg en Engelen, 1986). Dit is een tweedimensionaal, stationair, eindige verschillen programma voor gebruik op een personal computer. Bij de berekeningswijze wordt geen rekening gehouden met dichtheidsstroming. Dit betekent onder meer het volgende:

- Het tweedimensionale karakter van het model betekent dat in zones met een meer radiale dan parallelle stroming de stroming door de modellering niet goed of slechts zeer benaderend kan worden verkregen. In de praktijk is dat bezwaar zoveel mogelijk op te vangen door een geschikte ligging van de profiellijnen te kiezen. Sterk van elkaar verschillende stromingsrichtingen op verschillende diepten in het profiel, als gevolg van een ruimtelijke stapeling van meerdere stelsels met verschillende oriëntatie boven elkaar, zijn evenmin juist weer te geven.
In een aantal gevallen zijn reeds goede resultaten bereikt met het driedimensionale model FLOSA van TNO-DGV (Zijl, 1988) op een mainframe computer. Dit model ondervangt de genoemde bezwaren, maar is arbeidsintensiever en kostbaarder in het gebruik en moet als een geschikte vervolgmmodellering na een eerste inventariserende onderzoeksfase met het model FLOWNET worden beschouwd. In combinatie vormen beide modellen elkaar aanvullende, krachtige hulpmiddelen bij een hydrologische systeemanalyse.
- Het stationaire karakter van het model FLOWNET betekent dat tijdsafhankelijke veranderingen in de stromingspatronen slechts via de omweg van afzonderlijke modelleringen voor verschillende condities kunnen worden verkregen en dan onderling vergeleken. We kunnen bijvoorbeeld de stroming in een winter- en in een zomersituatie simuleren en vergelijken. Dit kan met name voor kleinere ondiepe systemen tot aanzienlijke verschillen in stromingsbeeld voeren, omdat dergelijke systemen in de zomer vaak sterk inkrimpen of zelfs tijdelijk geheel kunnen verdwijnen. Grotere ingrepen in het landschap (inpolde- ringen) en veranderingen in watergebruik (grondwaterwinningen) kunnen aanleiding geven tot grote veranderingen in de grenzen tussen systemen en stromingspatronen op sterk uiteenlopende tijd- en ruimteschalen.
- Het feit dat in de modellering met FLOWNET geen rekening gehouden kan worden met het optreden van dichtheidsstromingen vormt een beperking voor die gebieden waar veel brak of zout water in de ondergrond voorkomt. Desondanks is het verrassend en verheugend te kunnen constateren dat de grote lijnen van de systeemopbouw in een dergelijk gebied (bijvoorbeeld Noord-Holland, zie bijlage B, en Zuid-Hol- land, Promes, 1988) goed benaderd kunnen worden met het model, zoals onder andere uit een vergelijking met zoet-zout grenzen, water- kwaliteitspatronen en andere onafhankelijke informatiebronnen blijkt. Dit wijst erop dat het verloop van topografie en freatisch vlak en de doorlatendheden in het ondiepere deel van de profielen de doorslag geven voor de vorming en uitbreiding van stromingsstelsels.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de modellering met FLOWNET een snelle, goedkope en inzichtelijke mogelijkheid vormt om de regionale systeemopbouw te modelleren. In een aantal gevallen zijn de



Figuur 5: Invloed van discretisatie van de modelinvoer op het stroomlijnenpatroon. Bij de keuze van een relatief grote discretisatieafstand worden de stroomlijnen van de lokale systemen niet berekend (Promes, 1988).

resultaten direct kwantitatief bruikbaar. In andere (bij beperkende omstandigheden) zijn ze semi-kwantitatief. In de meeste gevallen leveren deze modelleringen bij een verstandige keuze van de profiellicgingen redelijke ordes van grootte van kwel en wegzijging, verblijftijden, stroomlijnpatronen en dergelijke.

1.2.4 Invoergegevens

Een modelleringsresultaat is nooit beter, dan het type model en de kwaliteit van de invoergegevens toestaan. De beperkingen van het model zijn hiervoor al aangeduid. Tot de invoergegevens behoren achtereenvolgens:

– **De keuze van ligging en aard van de modelgrenzen:**

De ligging en aard van de modelranden wordt in de eerste fase van de regionale systeemanalyse, die voorafgaat aan de modellering, bepaald met behulp van zeer uiteenlopende gegevens van topografie, bodem en bodemgebruik, geologische bouw, isohypsenkaarten, waterkwaliteitspatronen en dergelijke. Deze uitvoerige voorafgaande analyse maakt dat de randvoorwaarden voor de modellering vrij nauwkeurig bepaald kunnen worden.

– **De stijghoogteverdelingen op de modelranden:**

De stijghoogteverdeling aan het bovensvlak van het model is zeer belangrijk voor het modelleringsresultaat en kan met behulp van grondwaterstandswaarnemingen, verloop van de topografie, grondwatertrappen en polderpeilen vrij nauwkeurig worden ingevoerd. Figuur 5 toont de invloed van de verfijning van het stijghoogteverloop aan het bovensvlak van een FLOWNET-modellering (Promes, 1988) op het stroomlijnenpatroon. Vergelijking van de figuren 5a, 5b en 5c toont bijvoorbeeld dat in dit geval pas bij een discretisatieafstand (= kolom-breedte van het model) van 100 meter de westelijke tak vanuit de uitloper van de Kagerplassen naar de Haarlemmermeer zichtbaar wordt. Gegevens over de stijghoogte van het diepere grondwater zijn schaarser, maar gelukkig ook ruimtelijk minder gedifferentieerd dan bij het ondiepere grondwater. De gevoeligheid daarvoor is in de modellering dan ook veel minder.

In de poldergebieden zijn in deze studie de (lagere) winterpeilen gebruikt bij de benadering van het freatisch vlak. In de vrij afwaterende gebieden is eveneens uitgegaan van de situatie in de winter met daar juist de grootste opbolling van de grondwaterspiegel onder de topografie. Bij een dergelijke keuze van randvoorwaarden zijn de grondwatergradiënten het grootst en komen de stromingsstelsels het best tot uiting.

– **De ingevoerde patronen en waarden van doorlatendheid en porositeit:**

De ingevoerde patronen en waarden van de horizontale en verticale doorlatendheid en de porositeit zijn sterk afhankelijk van de kennis van de geologie van de ondergrond. De hydrogeologische bouw is vaak sterk heterogeen en slechts op enkele punten, of samengenomen voor meerdere pakketten, bekend uit pompproeven, bemonsteringen en boorgatonderzoek. Gevoeligheidsanalyses met het model geven aan dat variaties in de doorlatendheden in de nabijheid van het terreinoppervlak een veel grotere invloed op de stromingspatronen hebben dan die op grotere diepte. Dit is opnieuw een gelukkige omstandigheid bij de modellering, omdat de ondiepere geologie in het algemeen beter bekend is en goedkoper is te onderzoeken dan de diepere geologische opbouw. Zie voor een voorbeeld van een gevoeligheidsanalyse voor doorlatendheid figuur 40 in appendix B

De uitkomsten die FLOWNET geeft, zoals stroomlijnen, equipotentiaalijnen, verblijftijden en debieten, kunnen aan de hand van waterkwaliteitspatronen, stijghoogtegegevens, isotopenonderzoek en kwel- en infiltratiegegevens worden gecontroleerd.

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de meest gevoelige invoergegevens bij de modellering in het algemeen het beste bekend zijn.



Figuur 6: Gebieden met natuurlijke thermominerale anomalieën van het grondwater, waarschijnlijk veroorzaakt door voeding vanuit het Carboon. De letters verwijzen naar locaties die in de tekst worden genoemd.

2 Een overzicht van de belangrijkste typen van grondwaterstromingsstelsels in hun volgorde van ontstaan

Het totale beeld van de grondwaterstromingsstelsels van Nederland is zeer complex, zowel ruimtelijk als in volgorde van ontstaan. Een overzicht ontstaat als eerst de ontwikkeling in hoofdlijnen wordt beschreven aan de hand van een aantal overzichtskaartjes. De verschillende groepen van stromingsstelsels zijn ontstaan door natuurlijke of door de mens gevormde situaties.

Achtereenvolgens worden de volgende groepen stromingsstelsels kort toegelicht:

1. natuurlijke, zeer oude, thermo-minerale, langs breuken in de ondergrond opstijgende stromingsstelsels, gevoed vanuit het Carboon (2.1);
2. natuurlijke, door zwaartekracht aangedreven, diepgaande stromingsstelsels, gevoed vanuit de hogere mesozoïsche en tertiaire randen van het Noordzeebekken, met voedingsgebieden die deels in Duitsland en België liggen (2.2);
3. natuurlijke, door zwaartekracht aangedreven stromingsstelsels, gevoed vanuit hogere pleistocene terreinopwellingen, zoals het Glaciale Plateau van Drenthe, stuwwallen en dekzandculminaties (2.3);
4. natuurlijke, door zwaartekracht aangedreven stromingsstelsels, gevoed vanuit hogere holocene terreinopwellingen, zoals rivieren met oeverwallen en kommen, land- en kustduinen, kwelderwallen en dergelijke (2.4);
5. kunstmatige, oudere, door bemaling in stand gehouden stromingsstelsels naar droogmakerijen en polders in West- en Noord-Nederland en in het rivierengebied (2.5);
6. kunstmatige, jonge, door bemaling in stand gehouden stromingsstelsels naar grote polders in het IJsselmeergebied en het zuidwestelijke Deltagebied (2.6);
7. kunstmatige, jonge, door grondwaterwinning in stand gehouden stromingsstelsels (2.7);
8. kunstmatige, jonge, ondiepe, door landbouwkundige drainage in stand gehouden, zeer talrijke stromingsstelsels (2.8).

De figuren waar naar verwezen wordt in paragraaf 2.1 en verder (figuur 6-11, 15 en 16) geven zeer globaal de ligging van de gebieden weer, waarin zich de voeding of de oorzaak van het systeem bevindt.

2.1 Het thermo-minerale systeem uit het Carboon (figuur 6)

Het geologische massief van Brabant vormt aan de zuidzijde de oude paleozoïsche omraming van het Noordzeebekken en komt in Zuid-Limburg nog net aan de oppervlakte. De oude gesteenten, met onder andere de steenkool bevattende formaties van het Carboon, zijn overdekt met jongere mesozoïsche gesteenten (onder andere het Krijt van Zuid-Limburg) en de nog jongere tertiaire gesteenten. Door de opheffing van de oudere gesteenten aan de rand en de daling van het Noordzeebekken bestaat er geologisch reeds zeer lang een hooggelegen infiltratiegebied in het Brabants massief.

Het paleozoïsche grondgebergte met zijn bedekking van mesozoïcum, tertiair en kwartair duikt naar het noordwesten weg in het Noordzeebekken. Deze afhelling en de bedekkende formaties worden echter doorsneden



Figuur 7: Gebieden met mesozoïsche en tertiaire afzettingen die de randen van het Noordzeebekken vormen. Vanuit deze gebieden worden natuurlijke gravitatieve stromingsstelsels gevoed. De horizontale arcering geeft aan waar jongere stelsels boven deze systemen liggen.

door een uitgebreid systeem van ongeveer noordwest-zuidoost verlopende breuken, die het gebied verdelen in opgeheven en gedaalde schollen (horsten en slenken). Deze breuken hebben de gelijktijdig doorgaande sedimentatie sterk beïnvloed en zijn ten dele ook recent nog werkzaam. In de voormalige kolenmijnen in Zuid-Limburg kwam warm, mineraal- en gasrijk zout water langs deze breuken omhoog. In het verlengde van deze breuksystemen, naar het noordwesten, blijken op meerdere plaatsen in de ondergrond lokale steile kegels en opwelvingen in het zoet-zout grensvlak voor te komen, vaak vergezeld van thermische en chemische anomalieën (Engelen, 1963; Van Dalen, 1981, 1982, 1983). Een recent ongepubliceerd systematisch onderzoek (Engelen, in voorbereiding), van de gegevens van de geo-electrische kartering en de grondwaterkaart van Nederland van TNO-DGV, wijst op het voorkomen van een aantal van dergelijke culminaties in het zoet-zout grensvlak, vaak buiten het bereik van de holocene mariene transgressies. De nauwkeurige kartering en bestudering van dergelijke 'schoorstenen' van opstijgend warm gasrijk mineraal water vanuit het carboon via lekkende breuken in de bovenliggende formaties moet echter nog grotendeels beginnen.

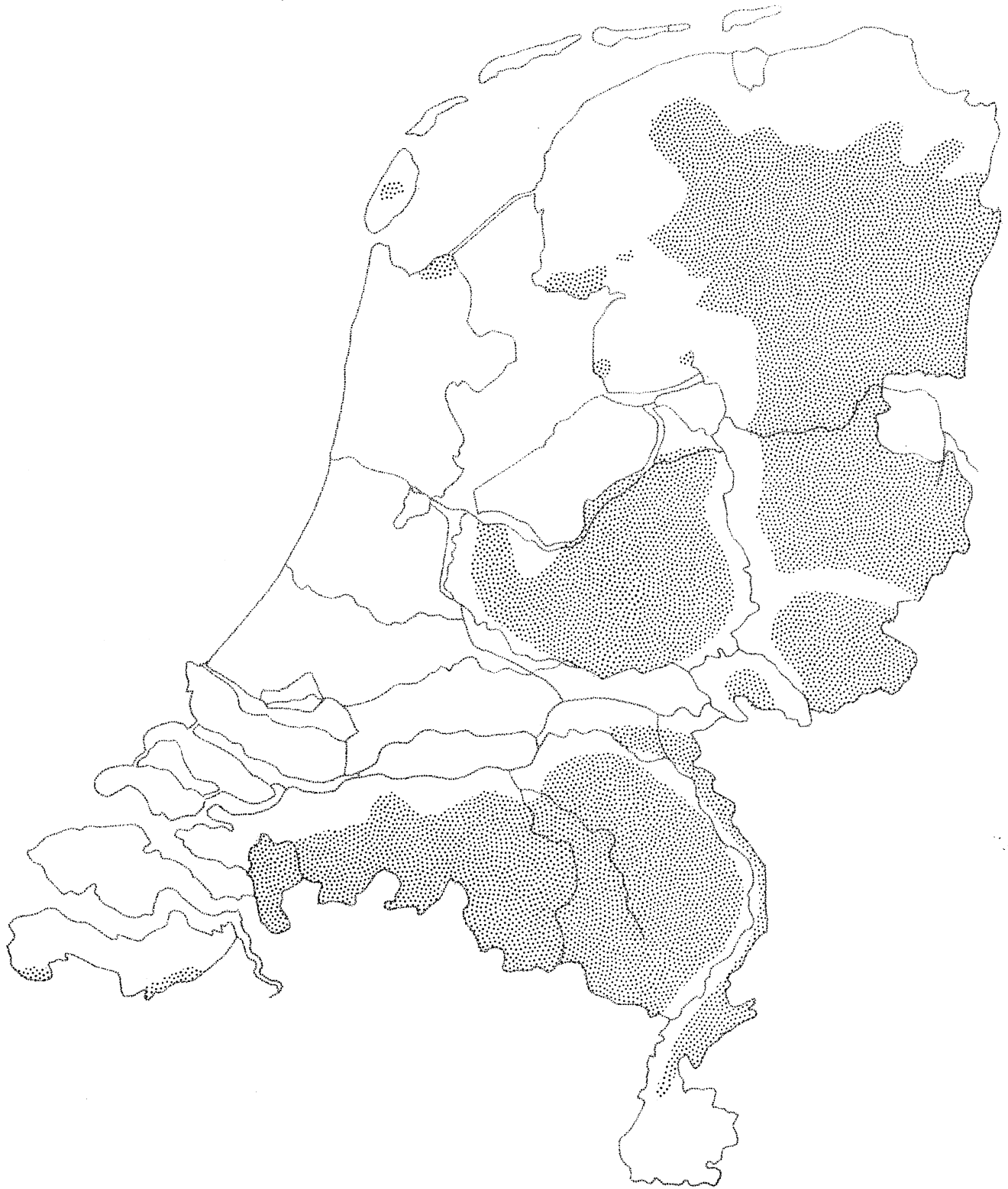
Een voorlopige inventarisatie van plaatsen waar dit thermo-minerale systeem waarschijnlijk in de ondergrond aanwezig is, omvat de volgende locaties of zones (de letters verwijzen naar de locaties in figuur 6):

- a. drie zoutwaterkegels langs het noordwestelijke systeem van randbreuken van de Centrale Slenk, respectievelijk in het centrum van de Alblasterwaard, bij Gantelwijk en bij Almkerk;
- b. een groep van thermo-minerale bronnen in zuidoostelijke deel van de Centrale Slenk in het voormalige mijnbouwgebied van Zuid-Limburg;
- c. twee zoutwaterkegels op een waarschijnlijke breuklijn evenwijdig aan de westelijke hoofdbreuk van de Centrale Slenk bij Klundert-Zevenbergen en Etten-Leur en een ondiepe zoutanomalie aan de voet van de Brabantse wal bij Bergen op Zoom, zeer waarschijnlijk op een breuklijn in samenhang met een tectonische aanleg van deze terreinsprong;
- d. een zoutwaterculminatie bij Bruchem op de overgang van de Centrale Slenk naar de Peelhorst en een thermische anomalie bij Zoelen iets noordelijker in dezelfde tectonische positie;
- e. een belangrijke zone met kegels en gebieden met relatief ondiep zout water en thermische anomalieën op de rand van de Peelhorst en de Venloslenk lopend van Midden-Limburg tot aan de voet van de Utrechtse Heuvelrug bij Groenekan;
- f. een zone met ondiep zout water en een thermische anomalie in de Boven-Betuwe bij Tiel en Driel op de noordelijke voortzetting van de oostelijke begrenzing van de Venloslenk.

Deze thermo-minerale systemen moeten als de oudste van de bestaande grondwaterstromingsstelsels in Nederland worden beschouwd. Ze zijn waarschijnlijk in aanleg reeds vele miljoenen jaren aanwezig, ongeveer vanaf het begin van het Tertiair, toen een sterke breukwerking begon. Ze dringen van onderaf in de bovenliggende, door zwaartekracht aangedreven systemen door en worden er door omspoeld en verdund, zodat ze behoudens enkele mogelijke uitzonderingsgevallen (West-Brabant?) niet aan de oppervlakte komen.

2.2 Stromingssystemen vanuit de mesozoïsche en tertiaire omranding van het Noordzeebekken (figuur 7)

De mesozoïsche Krijtafzettingen van Zuid-Limburg vormen twee afzonderlijke infiltratiegebieden, die ieder een eigen stromingsstelsel voeden: het Plateau van Margraten en het Plateau van Schimmert. Het Plateau van Margraten watert ondergronds af. Een deel van het water wordt afgevoerd via de Geul en haar zijtakken en via bronnen op de



Figuur 8: Pleistocene voedingsgebieden van natuurlijke gravitatieve stromingsstelsels.

hellingen van het plateau. Een ander deel stroomt naar grondwaterwinnings in het Maasdal of direct ondergronds in de Maas. Het Plateau van Schimmert voedt in het centrale deel via de overliggende tertiaire afzettingen de onderliggende Krijtformaties. Een deel van het water stroomt in noordwestelijke richting af in de richting van de Maas en wordt daar door grondwaterwinnings onderschept. Een ander deel kwelt in de Maas op en stroomt wellicht voor een gedeelte onder de Maas door de Centrale Slenk in, waar het op grotere diepte afstroomt naar het noordwesten in de richting van Helmond en 's-Hertogenbosch.

De hogergelegen tertiaire afzettingen komen voor in de kern van de Twentse stuwwallen, in de omgeving van Winterswijk, in Zuid-Limburg en in de Belgische Kempen.

Het Twentse gebied wordt vooral door glaciale werking bepaald en zal bij de pleistocene stelsels worden besproken. In de Achterhoek rond Winterswijk bepalen de jongere pleistocene en holocene reliëfvormen voor een groot deel de grondwaterstroming.

In Zuid-Limburg vormen de bedekking met löss en de Maasafzettingen op het slecht doorlatend Tertiair van het Plateau van Schimmert een stelsel dat gedeeltelijk via contactbronnen afwatert op de omliggende beken.

Het gebied van de Belgische Kempen vormt twee grote grensoverschrijdende grondwaterstromingsstelsels:

- a. in het oosten het zeer grote en belangrijke Systeem van het Kempisch Plateau dat naar het oosten en noordoosten direct naar de Maas en naar het noorden via de Centrale Slenk afstroomt;
- b. in het westen aansluitend het Systeem van de microcuesta van de Kempen, dat onder jongere systemen van West-Brabant door in beekdalen en aan de noordrand van het pleistocene gebied opkwelt.

2.3 Stromingssystemen vanuit de pleistocene terreinopwelvingen (figuur 8)

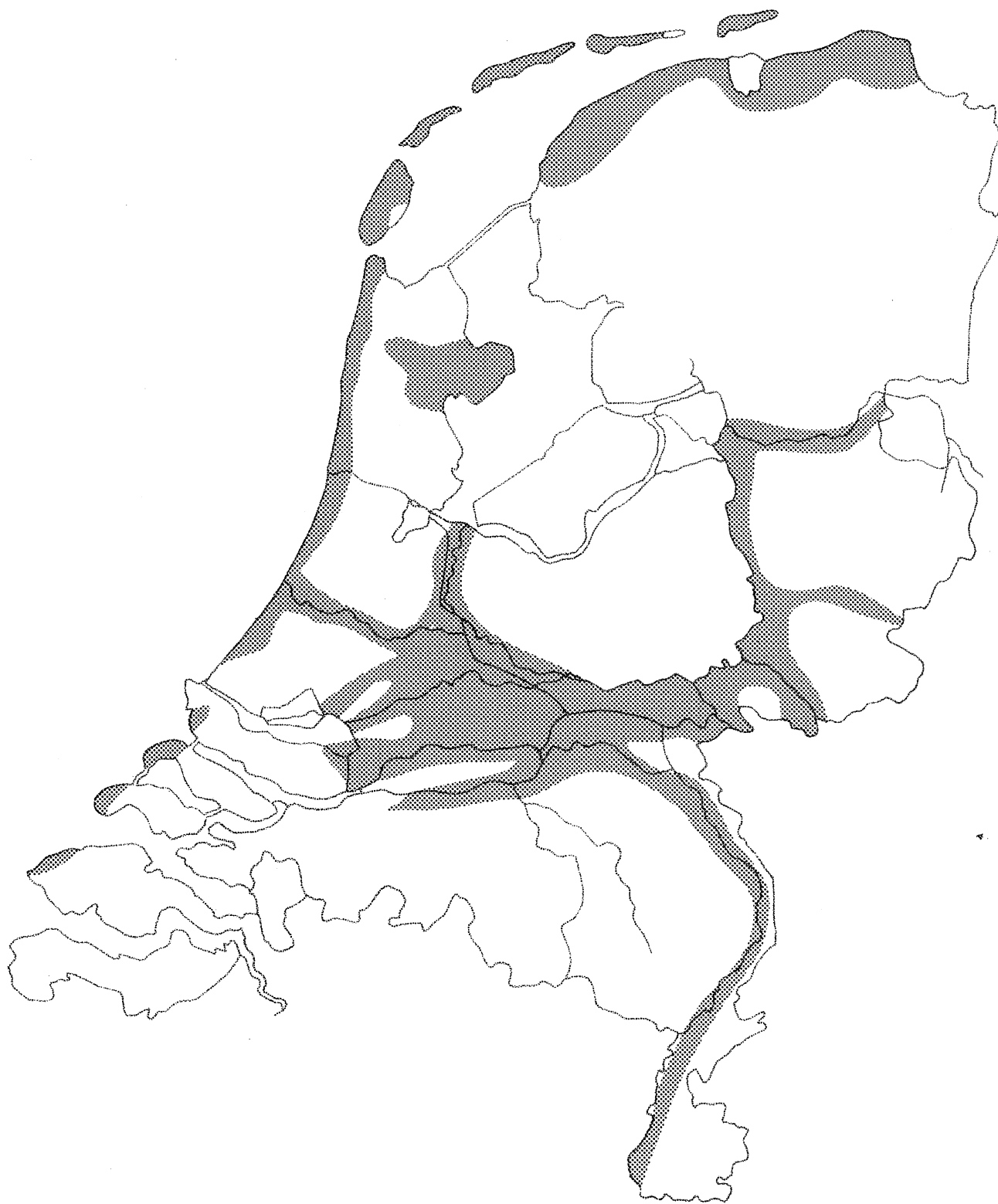
De stromingsstelsels, gevoed vanuit de pleistocene terreinopwelvingen zijn achtereenvolgens: het grote Systeem van het Glaciale Plateau van Drenthe, een serie grote en kleinere systemen vanuit afzonderlijke stuwwalcomplexen en een groot aantal middelgrote en kleinere systemen vanuit opwelvingen en ruggen van dekzanden (zie bijlage 1).

Het diep doordringende Systeem van het Glaciale Plateau heeft een min of meer radiale afstroming naar de Drentse beekdalen en de omringende lagere holocene gebieden waar kwelstromen omhoog komen. Een aantal uitgangen van het stelsel liggen in de aangrenzende delen van de omliggende provincies Groningen, Friesland en Overijssel.

De grootste stuwwalcomplexen, de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug, voeden belangrijke zoete grondwaterstromingen in de richting van de omringende lagere gebieden: Rijndal, IJsseldal, Eemdal, het Vechtplassen-gebied en de Flevopolders.

Kleinere systemen worden gevoed vanuit de Sallandse en Twentse stuwwallen, het Montferland, de stuwwal van Nijmegen, het Gaasterland, de stuwwal van Steenwijk en kleinere gestuwde gebieden op Texel, bij Urk, in Zuid-Drenthe, bij de Lochemerberg en bij Groenlo. Met uitzondering van de Twentse stuwwallen met hun kern van slecht doorlatende tertiaire afzettingen zijn de meeste stuwwallen in grote lijnen redelijk, tot goed doorlatend en vormen zo belangrijke infiltratiegebieden.

De dekzanden vormen in het algemeen een veel kleinschaliger reliëf waar ze geen mantel rond de stuwwallen vormen. Enkele van de grotere culminaties in het dekzandrelief vormen bijvoorbeeld de Midbrabantse



Figuur 9: Hogere holocene voedingsgebieden van grondwaterstromingsstelsels.

dekzandrug bij Eindhoven, de dekzandplateaus aan de noordzijde van het Montferland, het Systeem van Sallandse dekzandruggen en de met dekzand bedekte stuwrug tussen de Lochemerberg en het Montferland. Vele kleinere versnipperde hogere terreindelen met dekzand in Oost-Groningen, Overijssel, Gelderland en Noord-Brabant zijn op de schaal van een overzichtskaart niet aan te geven. Deze systemen dringen in het algemeen minder diep in de ondergrond door, als gevolg van de geringere topografische hoogteverschillen met de omgeving en de geringere doorlatendheid.

2.4 Stromingssystemen vanuit de holocene terreinopwelvingen (figuur 9)

Onder invloed van het natuurlijke holocene reliëf ontstonden in aanleg enkele groepen stromingsstelsels, die voor een deel later door menselijke ingrepen beïnvloed zijn. Dit is overigens ook vaak het geval met de natuurlijke systemen uit 2.1, 2.2 en 2.3.

De kustduinen, op de koppen van de Zeeuwse en Zuidhollandse eilanden, langs de kust van Zuid- en Noord-Holland en op de Waddeneilanden, vormen een snoer van deels afzonderlijke, deels aaneengegroeide stromingsstelsels in de vorm van dynamische zoetwaterzakken in een zoute omgeving. Zij zijn in de loop van het Holoceen sterk van vorm en grootte veranderd door kustafslag en aangroei, verbreding en verhoging van de duincomplexen, inpolderingen aan de landzijde en waterwinning en kunstmatige infiltratie.

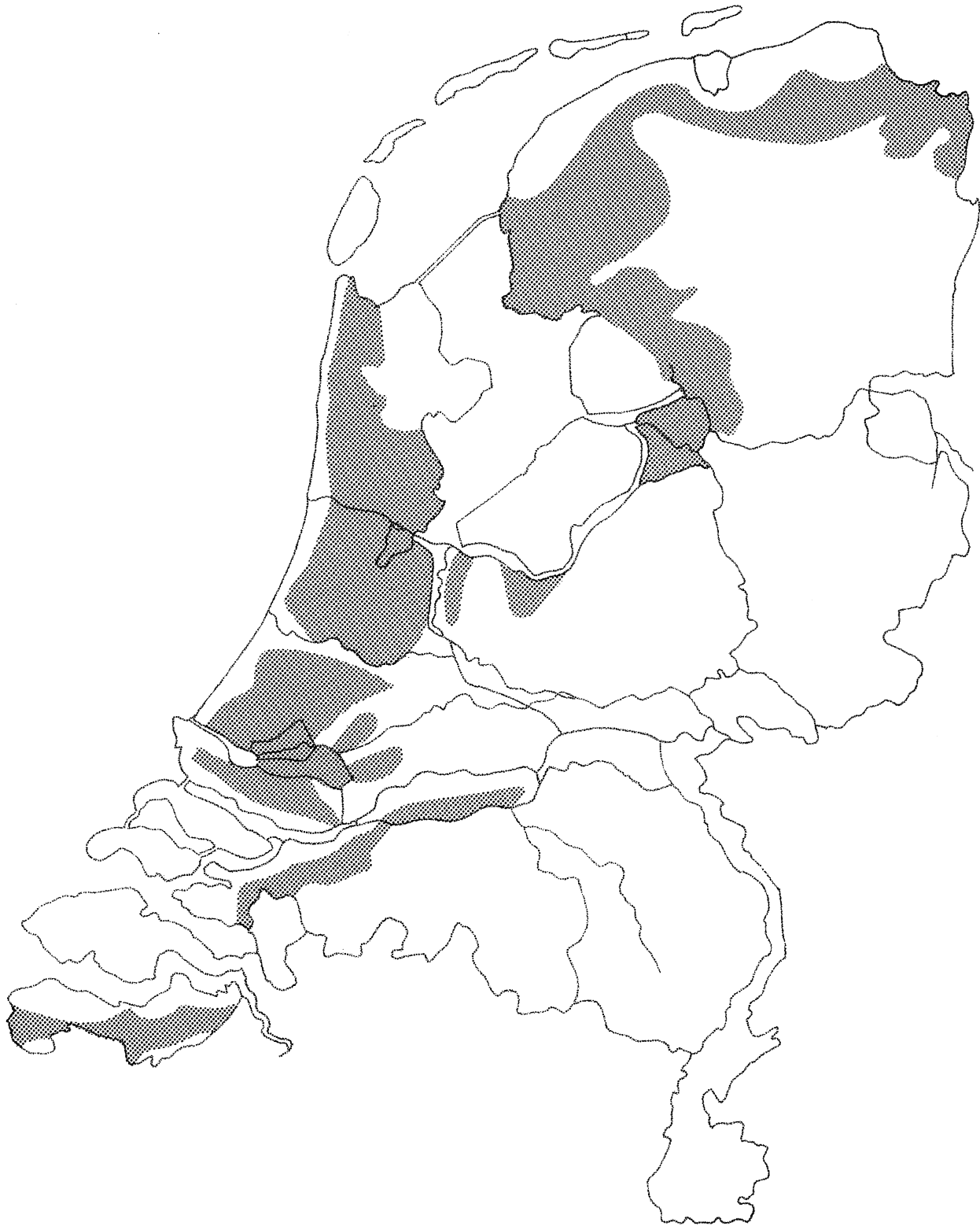
De afzonderlijke complexen van landduinen buiten de stuwwallen voeden eveneens grondwaterstromingsstelsels. De belangrijkste van deze categorie zijn de Drunense Duinen en de rij van rivierduinen langs de Oude IJssel, de Overijsselse Vecht en de Maas.

De grotere rivieren hebben eveneens stromingsstelsels ontwikkeld als gevolg van reliëfverschillen tussen oeverwallen en komgebieden in samenhang met sterk wisselende rivierpeilen. Deze stelsels vormen lange, zich verbredende en vernauwende stroken langs de rivieren. Hun werking is sterk geïntensiveerd door de bedijkingen van de rivieren en de bemaling van de lager gelegen poldergebieden tussen de riviertakken.

Langs die gedeelten van de kust waar zich geen duinen ontwikkelden maar van nature kwelderwallen ontstonden (een proces dat later door de mens kunstmatig is versterkt ten behoeve van inpoldering), zoals in het noorden van Friesland en Groningen en Westfriesland werd eveneens een natuurlijk (hoger) reliëf gevormd dat tot infiltratie leidde. De geringe hoogteverschillen met de lagere omgeving en de lage doorlatendheid van de kwelderafzettingen en kreekinvertieruggen (Westfriesland) veroorzaakten dat de hier ontstane systemen slechts een geringe diepgang en uitbreiding hebben.

2.5 Kunstmatige, door bemaling in stand gehouden oudere stromingssystemen naar droogmakerijen en polders (figuur 10)

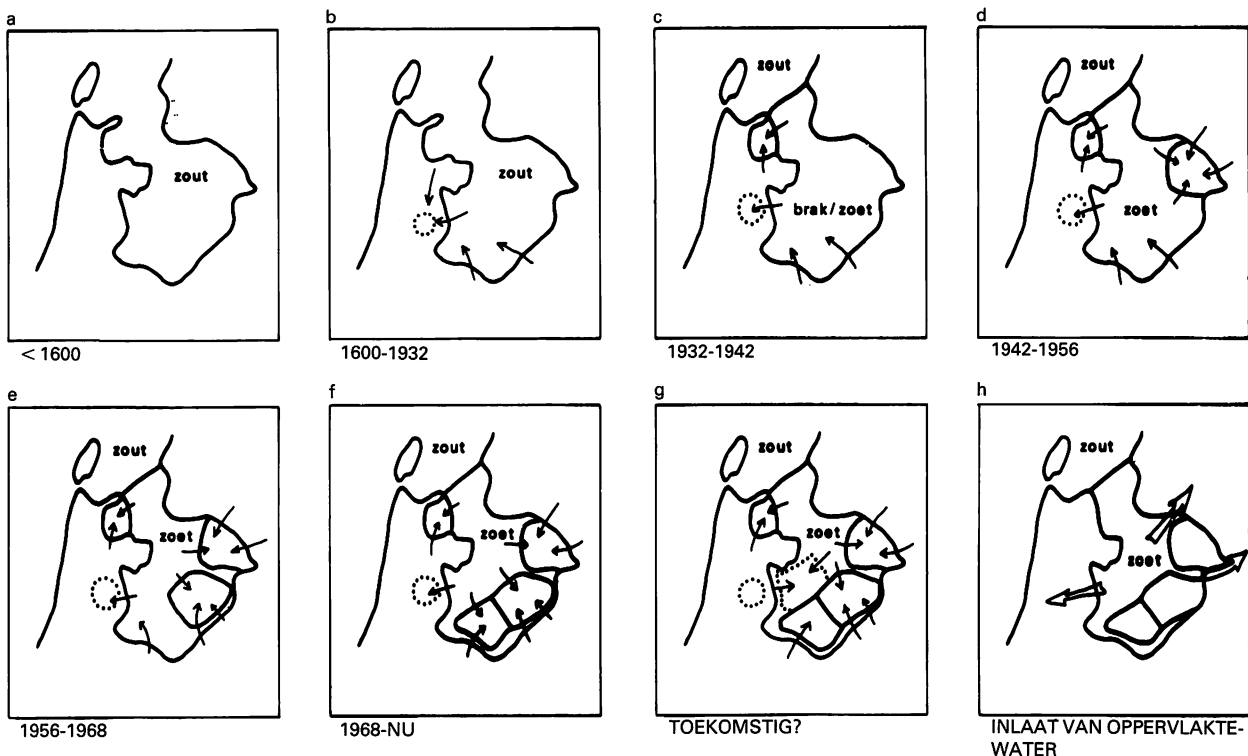
Vanaf de vijftiende eeuw is in West-Nederland begonnen met het droogleggen van deels uitgeveende meren. De grote droogmakerijen zijn gevormd vanaf de zeventiende eeuw (Beemster, Purmer, Schermer, Horstermeer, Bethunepolder, Haarlemmermeer en dergelijke) en vormen thans door de polderbemaling in stand gehouden grote kunstmatige pompputten. Gedeeltelijk vanuit de omliggende hogere polders en boezemwateren gevoed, zijn in de laatste eeuwen nieuwe stromingsstelsels ontstaan onder invloed van het kunstmatig geschapen reliëf en de daarbij behorende verschillende waterpeilen. Een interessante ontwikkeling was de uitstulping



Figuur 10: Gebieden in West- en Noord-Nederland en in het rivierengebied, waarin de uitgangen voorkomen van oudere door bemaling in stand gehouden stromingsstelsels.

van zoetwatertongen onder de slecht doorlatende bodem van de vroegere Zuiderzee en het IJsselmeer vanaf de hoge infiltratiegebieden van de stuwwalcomplexen van het Gooi en de Veluwe in de richting van de diepe droogmakerijen in Noord-Holland (figuur 11). De uitbreiding van deze zoetwatertongen in noordwestelijke richting over enkele tientallen kilometers werd afgebroken toen in de vijftiger en zestiger jaren het stijghoogteverloop in die omgeving drastisch veranderde door de aanleg van de Flevopolders.

De aanleg van polderbemalingen sinds de Middeleeuwen in de zeelei- en veengebieden in het zuidwesten, westen en noorden van Nederland en in het rivierengebied en de waterbeheersing via stelsels van boezemwateren en rivierbedijkingen had soms reliëfomkering tot gevolg of versterkte natuurlijke processen in die richting. Bestaande natuurlijke grondwaterstromingsstelsels werden versterkt, of kunstmatige stelsels van allerlei vorm en grootte ontstonden waarbij vaak de stroming van richting veranderde.



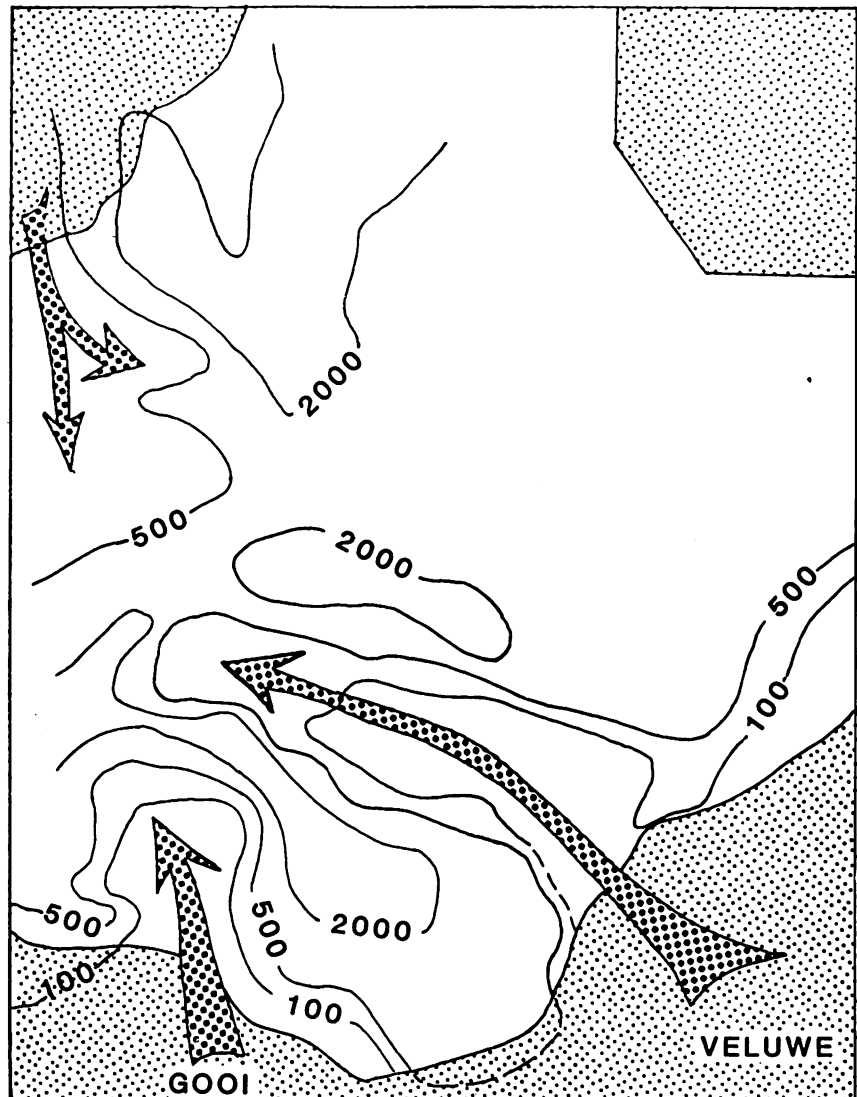
Figuur 11: Schematische weergave van de geschiedenis van het huidige IJsselmeergebied.

- Open Zuiderzee met brak/zout water.
- Stroming naar diepe droogmakerijen in Noord-Holland vanuit Westfriesland, het Gooi en de Veluwe (zoet) en vanuit de Zuiderzee (zout).
- Aanleg van de Wieringermeerpolder, afsluiting van de Zuiderzee, verzoeting van het IJsselmeer. Afstroming naar de Wieringermeer vanaf Westfriesland en instroom van zout grondwater uit de Zuiderzee-ondergrond, gevolgd door het brak/zoet front uit de IJsselmeerfase naar Wieringermeer.
- Inpoldering Noordoostpolder, zoete instroom uit en verdroging van randgebied, uitstromen van zout, gevolgd door brak/zoet grondwaterfront uit IJsselmeer.
- Inpoldering Flevoland. Afbuiging van zoete grondwaterstromen uit het Gooi en de Veluwe. Instroom vanuit de Veluwe en de Randmeren.
- Ontstaan van een stromingsstelsel bij eventuele inpoldering van de Markerwaard met repercussies op de grondwaterstromingsstelsels in Noord-Holland.
- Inlaat van oppervlaktewater uit het IJsselmeer ten behoeve van aanvullende watervoorziening van Noord-Holland, Groningen, Friesland en Drenthe.

Dikwijls hebben deze zoete infiltrerende systemen ook grote invloed op de samenstelling van de oppervlaktewatersystemen, door het het uitpersen en opkwellen van brak en zout water uit de ondergrond naar en in de laagste polders.

2.6 Kunstmatige, door bemaling in stand gehouden, jongere stromingssystemen naar de IJsselmeerpolders en in het zuidwestelijke Deltagebied (figuur 13)

Het vroegere Zuiderzeegebied biedt duidelijke voorbeelden van de diepgaande invloed, die de mens kan hebben op het beïnvloeden van natuurlijke en het scheppen van nieuwe grote grondwaterstromingsstelsels (figuur 11).



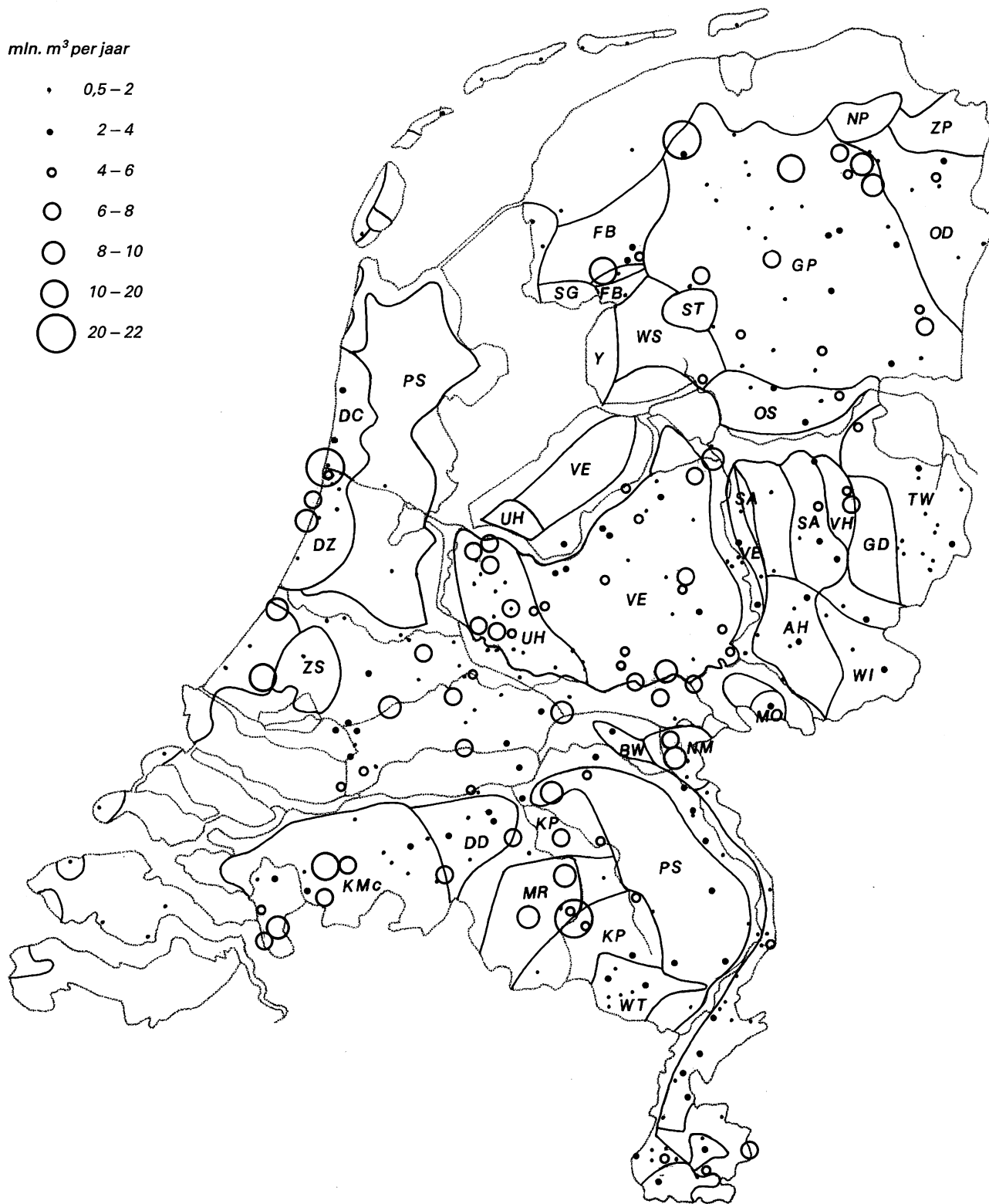
Figuur 12: Verloop van lijnen van gelijk chloridegehalte in de ondergrond van het IJsselmeergebied. De pijlen geven de mogelijke stromingsrichting van het zoete water aan.



Figuur 13: Gebieden waarin de uitgang ligt van oudere en jongere kunstmatige, door bemaling in IJsselmeer-, Delta- en Lauwersmeergebied in stand gehouden stromingsstelsels.

mln. m³ per jaar

- 0,5 – 2
- 2 – 4
- 4 – 6
- 6 – 8
- 8 – 10
- 10 – 20
- 20 – 22



Figuur 14: Locaties en ordes van grootte van de belangrijkste grondwaterwinningen in Nederland (naar gegevens van Garritsen in het lopend verdrogingsonderzoek van Nederland).

Tot aan de afsluiting van de Zuiderzee in 1932 vormde de zoute tot brakke Zuiderzee het infiltratiegebied voor een stromingsstelsel naar de diepe droogmakerijen in Noord-Holland en de in 1930 bedijkte Wieringermeer. Via een korte overgangsfase van brak water werd het door afsluiting ontstane IJsselmeer vervolgens zoet en werd de wegzijging van brak en zout water naar de omliggende diepere gebieden opgevolgd door een opdringend zoetwaterfront in de verschillende takken van dit stromingssysteem.

Gelet op de nog relatief korte duur van deze veranderingen en de geringe snelheid van de grondwaterstroming, zijn de waterkwaliteitspatronen nog niet ver opgeschoven binnen de gewijzigde stromingsstelsels. Het stromingspatroon als zodanig past zich weliswaar snel aan de gewijzigde randvoorwaarden aan; het transport van de watermassa's (en daarmee van hun fronten) verloopt door de geringe stroomsnelheden echter veel langzamer.

In 1942 werd de Noordoostpolder droog gelegd en onstond een tak van het IJsselmeer Systeem naar het centrum van de polder. De randzone met het oude land begon te verdrogen door op gang gebrachte stroming vanuit het oude land naar de nieuwe polder. In het zuiden van Friesland werd de oorspronkelijk landinwaarts gerichte stroming naar de polders vanuit de Zuiderzee (IJsselmeer) volledig omgedraaid. Vanuit het Tjeukemeer en omgeving begon wegzijging naar de Noordoostpolder op te treden. Bij de aanleg van de oostelijke en de westelijke Flevopolders, respectievelijk drooggelegd in 1956 en 1968, is door het inschakelen van randmeren tussen het oude land en de polders de verdroging in het oude land beperkt. Toch trekken beide polders nu onder de randmeren door stroomtakken van de Stuwwalssystemen van de Veluwe en het Gooi aan. De oorspronkelijk naar de Noordhollandse droogmakerijen gerichte zoetwater-tongen (figuur 12) zullen nu geleidelijk omgebogen worden in de richting van de laagste delen van de beide Flevopolders en daar na verloop van tijd op gaan kwellen. De tijd waarover de nieuwe stromingscondities van kracht zijn, is echter zo kort dat de oude waterkwaliteitspatronen nog niet aan de nieuwe situatie zijn aangepast.

Indien de Markerwaard alsnog zou worden aangelegd zou ook dat weer een wijziging in de grondwaterstroming in het aangrenzende deel van Noord-Holland tot gevolg hebben. Om effecten op Noord-Holland te beperken is hydrologisch onderzoek verricht naar maatregelen, die de effecten tegengaan (aanleggen van een randmeer, injectieputten, geulen).

2.7 Kunstmatige, door grondwaterwinningen in stand gehouden, jonge stromingssystemen (figuur 14)

Rond iedere grondwaterwinning ontstaat een eigen grondwaterstromingsstelsel. De grotere winningen of groepen van winningen komen ook op een landelijke overzichtsschaal in grondwaterstijghoogtekaarten nog tot uiting. Voorbeelden hiervan zijn onder andere de kegelvormige verlaging van het grondwater in het grondwaterstromingsstelsel van het Glaciaal Plateau rond Emmen en de depressies in de diepere grondwaterstijghoogten rond Delft en bij IJmuiden.

In de grondwaterwinplaatsen in de kustduinen zijn niet alleen afzonderlijke stromingsstelsels ontstaan door onttrekkingen, maar ook stelsels die een combinatie vormen van onttrekkingen en kunstmatige infiltratie. Waterwinplaatsen langs de rivieren deden afzonderlijke grondwaterstromingsstelsels ontstaan met gedeeltelijke voeding door wegzijging vanuit het oppervlaktewaterstelsel (oeverfiltratie).



Figuur 15: Gebieden waar het door buizen gedraineerde aandeel van landbouwgronden groter is dan 20%. Grenzen zijn schematisch getrokken op grond van bekende gegevens per gemeente in 1977 (Ton en Lourens, 1978).

2.8 Ondiepe, kunstmatige, door landbouwkundige drainage in stand gehouden, jonge stromingssystemen (figuur 15)

De ontwatering van landbouwgronden door ondiepe systemen van draineerbuizen heeft in de loop van deze eeuw in zeer grote arealen landbouwgrond in Nederland zeer talrijke kleine ondiepe stromingssystemen doen ontstaan. Deze systemen zijn dikwijls niet permanent aanwezig, maar ontstaan steeds opnieuw in perioden met een neerslagoverschot en verdwijnen vaak in drogere perioden. Hetzelfde gebeurt dikwijls met kleine ondiepe natuurlijke systemen.

3 Grondwaterstromingsstelsels in Friesland, Groningen, Drenthe en de kop van Overijssel

3.1 Systemen gevoed vanuit pleistocene afzettingen

3.1.1 Het Glaciale Plateau Systeem (GP) *)

Dit systeem beslaat heel Drenthe, het Friese Woudengebied en een groot deel van het Westerkwartier in de provincie Groningen. Het infiltratiegebied wordt gevormd door het hele pleistocene zandareaal binnen de genoemde regio, met uitzondering van de beekdalen. Omdat keileem vrij dicht onder de oppervlakte voorkomt, wordt veel van het neerslagoverschot ondiep afgevoerd naar de vele beekdalen die het plateau in radiale richting ontwateren. In het hele gebied komen dan ook ondiepe systemen voor met infiltratiegebieden tussen de beekdalen en kwelgebieden in de beekdalen. De waterscheiding, die ongeveer vanaf Klazienaveen in het zuidwesten van Drenthe in noordoostelijke richting naar Dokkum loopt, verdeelt het gebied in een deel met een zuidwestelijke tot westelijke, en een deel met een noordelijke tot noordwestelijke afstromingsrichting.

Het neerslagoverschot dat in het gebied rond de waterscheiding infiltreert, zal veelal deel uit gaan maken van het diepere regionale stromingssysteem en opkwellen langs de randen van het Glaciale Plateau. De begrenzing van het regionale kwelgebied wordt in het Friese en Groningse poldergebied vooral bepaald door de polderpeilen en de ligging van de diepere polders. Zo treedt in de diepe veenpolders ten noorden van Heerenveen veel regionale kwel op, hoewel hier ook kwel voorkomt afkomstig van de pleistocene uitloper van het Glaciale Plateau ten noorden van de Tjonger en de stuifzandrug langs de rand van het plateau.

In het zuidwesten loopt de systeemgrens langs de noordoostelijke rand van het Steenwijkse Stuwwalstelsel (zie hieronder) en vervolgens zuidelijk van de Havelterberg. Onder de stuwwallen bij Havelte komt namelijk geen opbolling in de freatische grondwaterspiegel meer voor, ten gevolge van de drinkwateronttrekking. Het oorspronkelijke Havelterberg Systeem is hierdoor een verdwijnend systeem geworden en het regionale grondwater kan tot in de polders ten zuidwesten ervan doordringen. In het zuiden wordt het systeem begrensd door de Reest, een landduinensysteem langs de Vecht en het Schoonebeekerdiep. De stuwwallen in dit gebied vormen kleine lokale systemen, waartegen en waartussen het regionale grondwater omhoog kan kwellen.

In het oosten loopt de systeemgrens door het Hunzedal en zet zich in het zuidoosten voort langs de voet van de Hondsrug (van de oostelijke flank van de Hondsrug stroomt hier slechts een geringe hoeveelheid water af).

In het noorden bevinden zich twee kleinere systemen die eveneens tot het Glaciale Plateau Systeem worden gerekend. Een derde soortgelijk systeem ten noorden van Bergum wordt tegenwoordig sterk beïnvloed door de drinkwaterwinning te Bergum. Behalve een flinke verlaging van de grondwaterstand in het gebied, is ook het optreden van kwel langs de randen onwaarschijnlijk geworden.

*) De afkorting van het systeem, zoals opgenomen op bijlage 1 (de kaart).

3.1.2 Het Oostgroningse Dekzandsysteem (OD)

Het gebied tussen de Hondsrug, de Mussel Aa en de Westerwoldse Aa is vroeger een belangrijk hoogveengebied geweest. Na de ontginning is een groot landbouwareaal met een dicht afwateringsstelsel door buisdrainage aangelegd, zodat, mede door de slechte doorlatendheid van het resterende veen in de bodem, in dit gebied een groot deel van het neerslagoverschot ondiep wordt afgevoerd. Het infiltratiegebied van dit systeem strekt zich ongeveer uit tot de lijn Hoogezand-Veendam-Oude Pekela; het kwelgebied tot iets ten zuiden van de lijn Slochteren-Scheemda-Nieuwe Schans. Ter hoogte van de waterwinning ten noorden van Veendam wordt de systeemgrens iets naar het zuiden getrokken. Ook kwelt regionaal water van dit systeem op in de beekdalen van de Mussel-Aa, de Ruiten Aa, de Westerwoldse Aa en gedeeltelijk in het Hunzedal.

Tussen de Mussel-Aa, de Ruiten Aa en ten oosten hiervan komen een aantal landduinen voor die de infiltratiegebieden vormen van lokale ondiepe systemen. Het grondwater van deze systemen kwelt op in de beekdalen.

3.1.3 De stuwwalsystemen (NJ, SF, SG, SM, SO, ST, SW)

Een aantal kleinere systemen wordt gevoed vanuit stuwwallen die als infiltratiegebied fungeren. Hiertoe behoren het Systeem van Gaasterland (SG) en het St. Nicolaasga-Joure Systeem (NJ) in Zuidwest-Friesland, de lage stuwwallen van Schildwolde (SW), Finsterwolde (SF) en Midwolda (SM) in het diepe poldergebied van Oost-Groningen, de stuwwal van Onstwedde (SO), de stuwwallen in Zuid-Drenthe, het Stuwwalsysteem van Steenwijk (ST) en de stuwwallen van Urk (alleen aangegeven in figuur 16) en Vollenhove (alleen infiltratiegebied aangegeven).

3.1.4 Het Ommerveld Systeem (OM)

Tussen de Reest en de Vecht bevindt zich, in het oerstroombdal van de Vecht, het Ommerveld Systeem. Het systeem wordt in het noorden begrensd door de Reest en lokaal door enkele landduinsystemen langs de Reest en in het oosten en zuiden door de landduinsystemen langs de Vecht. Het diepere grondwater van dit systeem kwelt voornamelijk op in de polders ten oosten van Rouveen.

3.2 Grondwaterstelsels gevoed vanuit holocene afzettingen

3.2.1 Het Complex van Kwelderwallen- en Poldersystemen (KP)

In het noordelijke zeekleigebied bevindt zich een complex van poldersystemen waarbij grondwater stroomt vanuit de polders met hogere peilen naar aangrenzende polders met lagere peilen. Het bleek binnen de beschikbare tijd niet mogelijk nauwkeurig de begrenzingen en de meest recente peilen te bepalen, zodat gekozen werd voor het schematisch afleiden van een aantal peilklassen uit de waterstaatskaarten. Hierbij is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van winterpeilen. Lokaal kunnen reliëfverschillen, bijvoorbeeld veroorzaakt door kwelderwallen of inversieruggen, aanleiding geven tot ondiepe natuurlijke systemen. Deze systemen liggen gesuperponeerd op het Waddenzee Systeem.

In het Friese deel van het complex zijn de polderpeilen niet zo diep, ca. 0,70 tot 1,25 m -NAP. Alleen de Polder van Oost- en Westdongeradeel, ten westen van het Lauwersmeer is, met een winterpeil van 1,70 m -NAP, wat dieper. Omdat in het gebied veel kleine polders voorkomen worden veel kleine poldersystemen aangetroffen. Naast infiltratie uit hogere polders vindt infiltratie plaats vanuit de boezemwateren, zoals het Van Harinxmaka-

naal. Het Waddenzee Systeem dagzoomt in enkele gebieden die beneden NAP liggen.

In Groningen komen op de kwelderwallen, die hier wat hoger zijn ontwikkeld dan in Friesland, polders voor met peilen van enige centimeters tot ca. 1,00 m -NAP. Vanuit deze polders, en vanuit de vrij afwaterende gebieden ten zuiden ervan stroomt grondwater af naar het gebied met lage polderpeilen (ca. 2,50 m -NAP) rond Bedum, naar de diepe polders (1,50-2,50 m -NAP) langs de rand van het Glaciale Plateau en naar de diepe polders (2,00-2,60 m -NAP) ten noorden van het Eemskanaal. Terreinvellingen veroorzaken lokaal kleine natuurlijke stromingsstelsels, waarvan de grootte sterk afhankelijk is van seizoensfluctuaties in het neerslagoverschot. In het diepe poldergebied rond Bedum bevindt zich een kwelvenster van het Waddenzee Systeem.

3.2.2 Het Noordelijke en Zuidelijke Groningse Poldersysteem (NP, ZP)

In het gebied tussen Groningen, Hoogezand en Delfzijl, en in het gebied ten noorden van Winschoten liggen de diepste polders van de provincie, met peilen tussen 3,00 en 4,00 m -NAP. Tussen deze diepe polders en ten zuiden ervan, in het voormalige zeeboezemgebied van de Dollard, ligt een strook met hogere polders.

Globaal zijn twee grote poldersystemen onderscheiden: het Noordelijke en het Zuidelijke Poldersysteem. In het Noordelijke Poldersysteem vindt vooral stroming plaats vanuit de randen naar het centrum van het systeem. In het Zuidelijke Poldersysteem vindt infiltratie plaats in de bovengenoemde strook met hogere polderpeilen. De grondwaterstroming is vanuit deze strook deels gericht naar het centrum van het diepe poldergebied ten noorden van Winschoten en deels noordelijk naar de diepe polders ten zuiden van Delfzijl.

In het centrum van het Zuidelijke Poldersysteem, gesuperponeerd op het kwelgebied hiervan, bevinden zich de Stuwwalssystemen van Midwolda en Finsterwolde. Tevens bevindt zich in dit gebied een kwelvenster van het Waddenzee Systeem. In het noordelijke poldersysteem ligt het Stuwwal-systeem van Schildwolde.

3.2.3 Het Waddenzee Systeem (WZ)

Het Waddenzee Systeem dagzoomt slechts op enkele plaatsen in het noordelijke zeekleigebied, daar het grotendeels is afgedekt met de poldersystemen van het Complex van Kwelderwallen- en Poldersystemen. Het komt in Friesland onder andere voor in enkele lange smalle stroken ten noorden van Harlingen, in enkele kleine gebieden bij Dokkum en in de Polder van Oost- en Westdongeradeel. In Groningen komen twee grote kwelvensters van dit systeem voor in de diepe poldergebieden rond Bedum en ten zuiden van Delfzijl. Een klein kwelvenster komt voor in het zuidelijke Groningse poldergebied. Buiten deze gebieden wordt water van dit systeem uitsluitend in sloten en greppels aangetroffen.

3.2.4 Het Friese Boezemcomplex (FB)

In het zuidwestelijk deel van Friesland is een complex van stromingssysteemen onderscheiden, waarbij de meren, met hun boezempeilen van 0,50 m -NAP, de infiltratiegebieden vormen voor de grondwaterstroming naar de omringende diepere polders (zie voor een gedetailleerde systeemanalyse Broers, 1987, 1988). Vooral rondom de Fluessen, het Oudegaasterbrekken en ten noorden van het Sneekermeer komen diepere polders voor, met peilen tussen 1,50 en 2,00 m -NAP. De peilen van de overige polders binnen het complex liggen tussen ca. 0,80 en 1,30 m -NAP. In dit gebied komen eveneens ondiepe poldersystemen voor die worden veroorzaakt door de

peilverschillen tussen de polders. Verder treedt infiltratie op vanuit de kanalen, waarin een hoog boezempeil wordt gehandhaafd. Voor het noordelijk deel van dit complex geldt dat de exacte ligging van de grenzen tussen de systemen binnen de beschikbare tijd niet kon worden bepaald.

3.2.5 Het Systeem van de Weerribben (WR)

In de kop van Overijssel komen langs de grens met de Noordoostpolder een aantal zeer natte gebieden voor, waarin de peilen kunstmatig hoog worden gehouden. Dit zijn onder andere de Rottige Meenthe, de Weerribben en de Wieden. Deze gebieden en de omliggende relatief hoge polders, vormen infiltratiegebieden van waaruit grondwater naar de Noordoostpolder stroomt.

3.2.6 Het IJsselmeer Systeem (YM)

In de Noordoostpolder treedt kwel op vanuit het IJsselmeer, waar een peil wordt gehandhaafd van 0,40 m -NAP. Verder dagzoomt dit systeem in Friesland uitsluitend daar waar, behalve een lager polderpeil, een maaiveldhoogte beneden ca. 0,50 m -NAP voorkomt. Dit is onder andere het geval in een klein gebied ten oosten van Lemmer en langs de IJsselmeerkust van westelijk Friesland.

3.2.7 Het Randmeren Systeem (RM)

Vanuit de randmeren, met een winterpeil van 0,40 m -NAP, treedt stroming op naar de Noordoostpolder en de lager gelegen delen van het vasteland.

3.3 Profielen

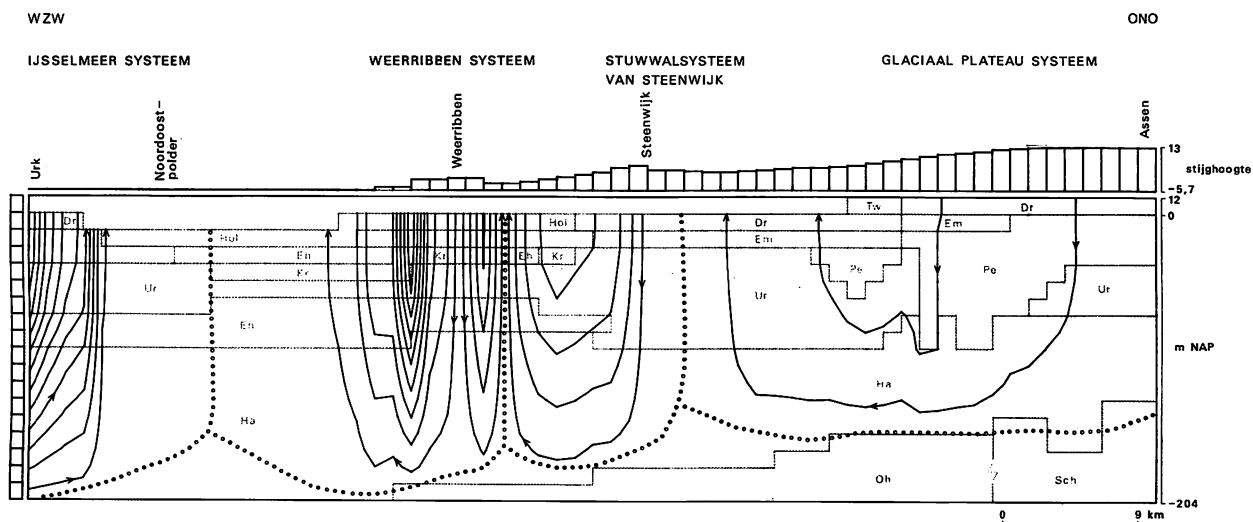
3.3.1 Profiel Assen-Steenwijk-Urk (figuur 16)

Dit profiel loopt van Assen in zuidwestelijke richting langs Appelscha en Steenwijk door de Noordoostpolder naar Urk. Het profiel is 75 km lang en 216 m diep. In het profiel zijn vier systemen te onderscheiden:

Het Glaciale Plateau Systeem: Het infiltratiegebied van dit systeem wordt gevormd door het Glaciale Plateau. Het diepe water van dit systeem kwelt in dit profiel op net ten noordoosten van het Stuwwalstelsel van Steenwijk. In werkelijkheid zal dit water iets afbuigen naar aangrenzende de beekdalen en zal slechts een geringe hoeveelheid regionaal water in het gebied ten noordoosten van de stuwwal opkwellen. De infiltratie is ca. 0,1-0,2 mm/dag, hetgeen betekent dat ongeveer 80% van het neerslagoverschot oppervlakkig of zeer ondiep wordt afgevoerd. De verblijftijd van het regionale water is enkele duizenden jaren.

Het Systeem van de stuwwal van Steenwijk: Het infiltratiegebied van dit systeem wordt gevormd door de stuwwal van Steenwijk. Een deel van het boven op de stuwwal geïnfiltreerde water kwelt iets ten noordoosten van de stuwwal op, voornamelijk in de aangrenzende beekdalen. Hierin komt ook water omhoog dat is geïnfiltreerd op de flanken van de stuwwal. Een ander, eveneens groot deel van het geïnfiltreerde water kwelt op in de diepe polder (peil 2,80 m -NAP) ten zuiden van de stuwwal. De maximale verblijftijd van het grondwater is ongeveer 800 jaar.

Het Weerribben Systeem: Vanuit de Weerribben met een peil van ca. 0,50 m -NAP en de hogere polders langs de rand van de Noordoostpolder (1,20 m -NAP) stroomt grondwater naar de Noordoostpolder, waar het polderpeil 5,70 m -NAP bedraagt. De verblijftijd van het water bedraagt maximaal 500 jaar. Omdat de inrichting van de polders veel recenter is,



Figuur 16: Schematische weergave van de stijghoogte, de geologische opbouw en de stroomlijnen in de sectie Assen-Urk. Stroomlijnen van kleine systemen zijn niet afgebeeld.

betekent dit, dat het in de hoge polders geïnfilterde water nog niet in de diepe polders opkwelt. Uit chemische informatie blijkt dat het front van het geïnfilterde water zich op enige tientallen meters diepte bevindt.

Het IJsselmeer Systeem: Vanuit het IJsselmeer treedt kwel op in de Noordoostpolder.

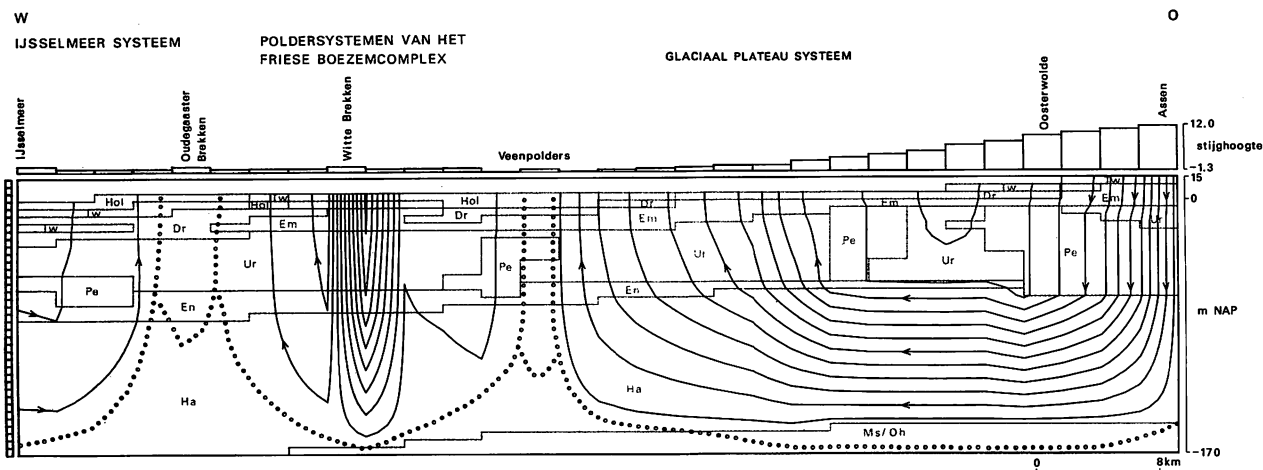
3.3.2 Profiel Assen-Sneek-IJsselmeer (figuur 17)

Dit profiel loopt vanaf enkele kilometers ten westen van Assen in westelijke richting langs Sneek naar het IJsselmeer. Het is 75 km lang en 185 m diep. De volgende systemen zijn zichtbaar in het profiel:

Het Glaciale Plateau Systeem: Het infiltratiegebied van dit systeem ligt op het Glaciale Plateau. Het regionale water van dit systeem kwelt gedeeltelijk direct in het poldergebied op, gedeeltelijk reikt het verder tot in het centrum van het veenpoldergebied. Aan de rand van het Glaciale Plateau bevindt zich een lokaal systeem, waarvan het infiltratiegebied gevormd wordt door de stuifzandrug die langs een groot deel van de westelijke rand van het plateau is afgezet. De infiltratie op het Glaciale Plateau bedraagt 0,2 tot 0,3 mm/dag. De verblijftijd van de kortere regionale tak is ca. 1500 tot 2000 jaar, van de langere tak ca. 2000 tot 3000 jaar.

Het Friese Boezemcomplex: Ten westen van het Glaciale Plateau Systeem bevindt zich een poldersysteem, waarbij grondwater stroomt van polders met een hoog peil (1,10 tot 1,20 m -NAP) naar de diepe veenpolders (2,30 m -NAP). Ook in het veenpoldergebied komt een klein poldersysteem voor. Verder zijn twee stromingssystemen zichtbaar, waarbij grondwater vanuit de meren met hun hoge boezempeil naar de omliggende polders stroomt. Die omliggende polders hebben een winterpeil van ca. 1,30 m -NAP. De verblijftijd van deze systemen is sterk afhankelijk van de verdeling van de doorlatendheden in de ondergrond en varieert van enkele tientallen tot enkele honderden jaren.

Het IJsselmeer Systeem: Vanuit het IJsselmeer kwelt water op in de polders langs de IJsselmeerkust.

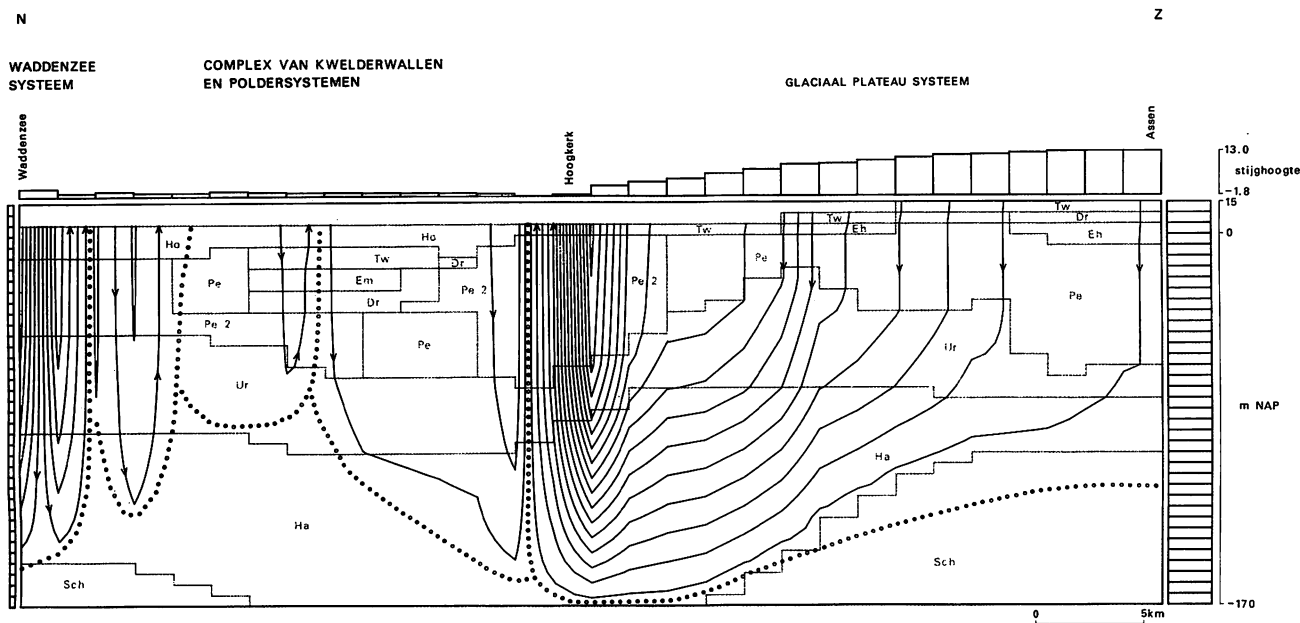


Figuur 17: Schematische weergave van de stijgheoghte, de geologische opbouw en de stroomlijnen in de sectie Assen-Sneek-IJsselmeer. Stroomlijnen van kleine systemen zijn niet afgebeeld.

3.3.3 Profiel Assen-Hoogkerk-Winsum-Waddenzee (figuur 18)

Dit profiel loopt vanaf enkele kilometers ten westen van Assen in noordelijke richting over Hoogkerk en Winsum naar de Waddenzee. Het is 52,5 km lang en 185 m diep. De volgende systemen kunnen worden onderscheiden:

Het Glaciale Plateau System: Het infiltratiegebied van dit systeem bevindt zich op het Glaciale Plateau. Het diepere grondwater kwelt op langs de rand van het plateau in de diepe polder bij Hoogkerk. De maximale verblijftijd bedraagt ongeveer 1500 jaar.



Figuur 18: Schematische weergave van de stijgheoghte, de geologische opbouw en de stroomlijnen in de sectie Assen-Hoogkerk-Waddenzee. Stroomlijnen van kleine systemen zijn niet afgebeeld. Er is niet gecorrigeerd voor dichtheidsverschillen.

Het Complex van Kwelderwallen- en Poldersystemen: In het profiel zijn enkele poldersystemen weergegeven. Het infiltratiegebied van een van de grotere ligt op de inversierug van het Reitdiep. Hieruit treedt stroming op naar de diepe polders nabij Hoogkerk.

Het Waddensee Systeem: In het profiel zijn stroomlijnen getekend die kwel vanuit de Waddensee weergeven. Het maaiveld in dit gebied is echter steeds boven NAP gelegen, zodat dit systeem alleen lokaal in diepe poldersloten kan uit treden.

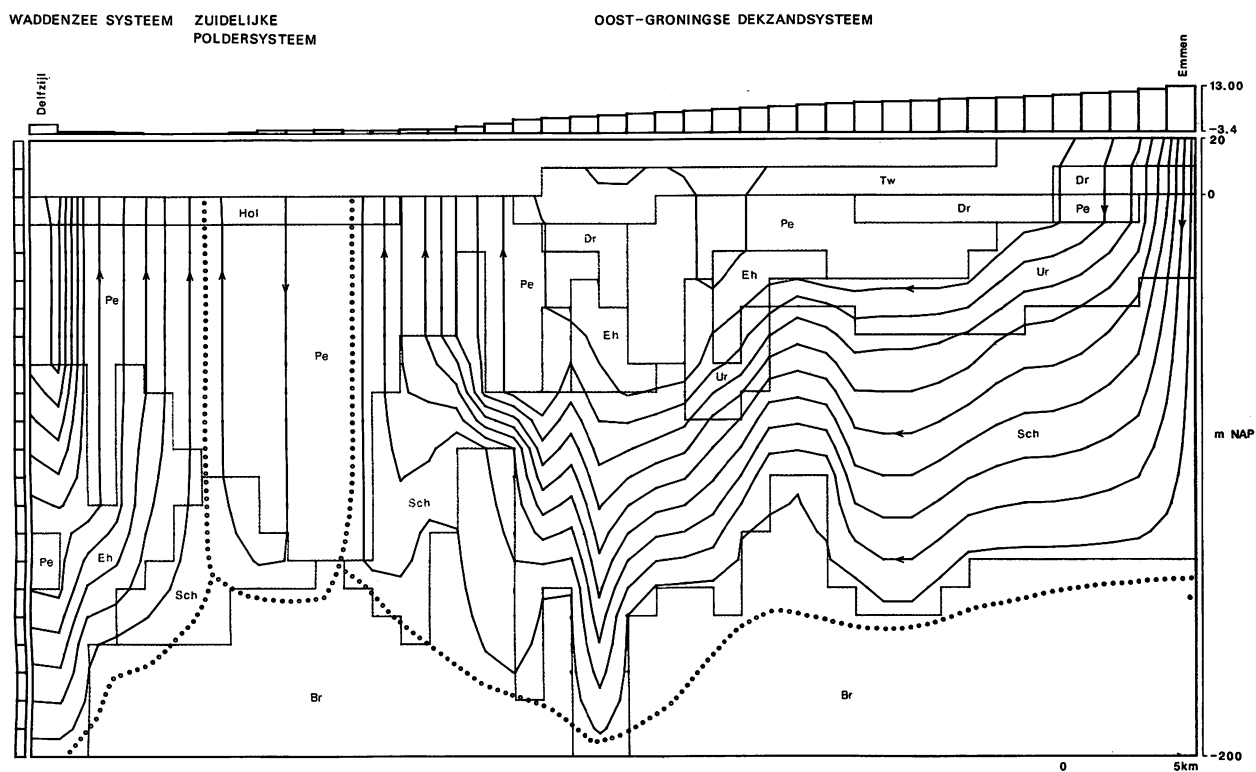
3.3.4 Profiel Emmen-Stadskanaal-Delfzijl (figuur 19)

Dit profiel loopt vanaf enige kilometers ten noorden van Emmen in noordelijke richting langs Stadskanaal naar Delfzijl. Het profiel is 50 km lang en 200 m diep. De volgende systemen kunnen worden onderscheiden:

Het Oostgroningse Dekzandsysteem: Het infiltratiegebied van dit systeem ligt in het voormalige hoogveengebied, waar door afgraving van het veen de pleistocene dekzanden tevoorschijn kwamen. Regionale kwel treedt op in de polders tussen Veendam en Winschoten. De verblijftijd van het diepe grondwater varieert van 2000 tot maximaal 6000 jaar. Een enkel lokaal systeem is in het profiel weergegeven.

Het Zuidelijke Groningse Poldersysteem: Het profiel snijdt het Zuidelijke Groningse Poldersysteem aan. Vanuit de strook met hogere polderpeilen stroomt water in noordelijke richting af.

Het Waddensee Systeem: In het profiel zijn stroomlijnen vanuit de Waddensee naar het diepe poldergebied ten zuiden van Delfzijl weergegeven



Figuur 19: Schematische weergave van de stijghoogte, de geologische opbouw en de stroomlijnen in de sectie Emmen-Delfzijl. Stroomlijnen van kleine systemen zijn niet afgebeeld. Er is niet gecorrigeerd voor dichtheidsverschillen.

4 Grondwaterstromingsstelsels op de Waddeneilanden

4.1 De Friese Waddeneilanden

Op de Friese Waddeneilanden komen voornamelijk natuurlijke holocene systemen voor. Op alle eilanden komen duinsystemen voor, waarbij vanuit de duinen water stroomt naar de lagere gebieden langs de randen van de eilanden en naar de duinvalleien. Op Vlieland is het Duinsysteem van Vlieland (VD) een dergelijk stelsel, op Schiermonnikoog het Duinsysteem van Schiermonnikoog (DS), op Terschelling zijn dit de Duinsystemen van West-Terschelling (WT) en Oost-Terschelling (OT). Op Ameland komt naast twee grote duinsystemen, het Ballumer Duinsysteem (BA) en het Buurder Duinsysteem (BU), een ander duinsysteem voor, dat van de Oerderduinen (OE) op de oostpunt van het eiland.

Verder komen op Terschelling, Ameland en Schiermonnikoog kweldersystemen voor. Onder de wat hogere, opgestoven delen van de kwelders liggen zoetwaterlenzen. De invloed van de Waddenzee is groot door instroming via kreken (WZ).

Op Terschelling is het Systeem van de Boschplaat (BP) onderscheiden. Lokaal kan de diepte van de zoetwaterlenzen onder stuifduintjes ca. 10 m -NAP bedragen. Op Ameland is het Kweldersysteem van Zoute Weide weergegeven (ZW). Dit systeem ligt tussen het duinsysteem van Ameland en het Systeem van de Oerderduinen. Op Schiermonnikoog bevindt zich het Kweldersysteem van Oost-Schiermonnikoog (OS).

4.2 Texel

Op Texel bevindt zich een pleistoceen systeem, namelijk dat van de stuwwal van Den Burg (SB). Dit systeem heeft een diepte van ca. 60 m -NAP. Het water van dit systeem kwelt op in de omringende polders. Tot voor kort vond in dit systeem tevens kunstmatige infiltratie en terugwinning plaats van ontzilt zeewater uit de inmiddels voor de productie gesloten ontziltingsfabriek van het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland.

De duinrand langs de westzijde van het eiland vormt het infiltratiegebied van twee natuurlijke holocene systemen, het Westerdunen Systeem (WD) en het Eierlandse Duinen Systeem (ED). Het water van deze systemen kwelt grotendeels op in de polders langs de duinen. Een tak van het Noordzee Systeem (NZ) loopt onder het duinsysteem door en loopt via de Slufter naar de Polder Waal en Burg en het westelijke deel van de Polder Eijerland.

Het Waddenzee Systeem (WZ) dringt binnen in het oostelijke deel van de Polder Eijerland en de Polder het Noorden. Verder komt dit systeem voor in het gebied tussen Oosterend en Oudeschild en in de Prins Hendrikpolder. Gesuperponeerd op het Waddenzee Systeem liggen kleine lokale poldersystemen. Eén van de grotere is het Poldersysteem van Oosterend (OO). Tussen Oosterend en De Waal komen op een gestuwde rug polders voor met een relatief hoog peil. Het water dat hier infiltreert stroomt voornamelijk in noordelijke richting af. De zoetwaterzak van dit systeem is lokaal ca. 10 m diep.

5 Grondwaterstromingsstelsels in Overijssel, Gelderland, Utrecht en Flevoland

5.1 Grondwaterstelsels gevoed vanuit het Carboon

De grondwaterstelsels die vanuit het carboon langs breuken in het tertiaire gesteente worden gevoed, komen in Midden-Nederland nergens aan de oppervlakte. Ze bevinden zich in de ondergrond en worden aangetroffen in de Betuwe en aan de oost- en westzijde van de Utrechtse Heuvelrug. De stelsels bestaan uit water met een hoog gehalte aan opgeloste stoffen en een temperatuur die enkele graden hoger ligt dan die van de omgeving. Doordat de chemische samenstelling van het water in belangrijke mate afwijkt van dat van zijn omgeving, is het goed mogelijk het verloop van de grens tussen zoet en hoog gemineraliseerd water te traceren. Het verloop van dit grensvlak geeft een duidelijke indicatie van het krachtenspel dat door bovenliggende (pleistocene) grondwatersystemen wordt uitgeoefend. Op plaatsen waar de bovenliggende systemen sterk zijn (infiltratiegebieden) worden de carboonsystemen meer naar beneden gedrukt. Op plaatsen waar de pleistocene systemen zwak zijn (systeemgrenzen) kunnen de carboonsystemen omhoog komen tot enige tientallen meters onder het maaiveld.

De stelsels zijn niet op de kaart (bijlage 1) weergegeven omdat ze niet aan de oppervlakte komen. Hun invloed blijkt wel uit het verloop van het zoet-zout grensvlak in de ondergrond (figuur 26 en 28).

5.2 Grondwaterstelsels gevoed vanuit tertiaire afzettingen

Tertiaire formaties komen in Midden-Nederland uitsluitend in het oosten aan de oppervlakte. Daar deze afzettingen in het algemeen slecht doorlatend zijn en er weinig neerslag in wegzijgt, worden slechts zeer kleine langzaam stromende grondwaterstelsels gevormd. De oppervlaktewatercomponent in gebieden waar tertiaire afzettingen dicht onder of aan de oppervlakte liggen, speelt een belangrijke rol. Invoer van water uit Duitsland vindt vrijwel geheel via het oppervlaktewaterstelsel plaats. Regionale grondwaterinstroming vanuit Duitsland valt in Midden-Nederland te verwaarlozen.

Het grondwater in de tertiaire formaties heeft een hoog zoutgehalte en stroomt niet of nauwelijks. Op plaatsen waar bovenliggende systemen druk uitoefenen op dit inerte zoute water (infiltratiegebieden), wordt het naar beneden geduwd. Om het weggedrukte volume te compenseren komt het inerte grondwater omhoog op plaatsen waar bovenliggende systemen een opwaartse stromingsrichting hebben (systeemgrenzen). Culminaties die op dergelijke wijze ontstaan, zijn passief en een reactie op de werking van bovenliggende systemen. Hiermee in tegenstelling zijn de carboonsystemen, die een eigen aandrijfmechanisme bezitten door aardwarmte en gaslift. Culminaties in het zoet-zout grensvlak, zoals bovenstaand beschreven, komen voor in de IJsselvallei, benoorden het Montferland en in Twente. Ze geven een goede indicatie voor de ligging van systeemgrenzen.

5.3 Grondwaterstelsels gevoed vanuit pleistocene afzettingen

Het meest bepalend voor de grondwaterstroming in Midden-Nederland is het reliëf van het landschap, dat grotendeels is ontstaan door werking van het landijs tijdens het Pleistoceen (Saale ijstijd). De hoge stuwwallen die door werking van het landijs ontstonden, vormen de infiltratiegebieden van de grote grondwaterstelsels in dit deel van Nederland. Dergelijke gebieden zijn de Veluwe, de Utrechtse Heuvelrug, de Sallandse stuwwal, de Twentse stuwwallen (stuwwal van Enschede en Ootmarsum), de stuwwal van het Montferland en de stuwwal van Nijmegen.

Naast de grote pleistocene systemen die worden gevoed door de hoge stuwwallen, bestaan er kleinere pleistocene systemen waarvan de infiltratiegebieden worden gevormd door bijvoorbeeld (bedekte) stuwwallen, glaciële plateaus en smeltwaterterrassen. Op veel plaatsen liggen dergelijke reliëfvormen aaneengeschakeld en vormen ruggen in het landschap. Dergelijke glaciële complexen komen onder andere voor in Twente (glaciële complex van Geesteren-Delden en het stuwwalcomplex van Vroomshoop-Hooge Hexel).

5.3.1 Grondwatersystemen in de regio Twente

De regio Twente is in hydrologisch opzicht één geheel dat afgescheiden is van de rest van Midden-Nederland. De systemen die er voorkomen zijn voor het merendeel ondiep, hebben een lage voeding uit neerslag en lage stroomsnelheden. Hier worden voor de regio de Systemen van de Twentse stuwwallen, van Geesteren-Delden en van Vroomshoop-Hooge Hexel onderscheiden. De noordelijke begrenzing van het gebied wordt gevormd door het Systeem van de Overijsselse Vecht, de westelijke begrenzing door het Systeem van de Sallandse stuwwallen, de zuidelijke begrenzing door het Systeem van de stuwwallen van Lochhuizen en de oostelijke begrenzing door de waterscheiding over de Twentse stuwwallen. De algemene stromingsrichting in het gebied is van de stuwwallen naar de tussenliggende dalen. In de dalen buigt de stroming af naar het noorden.

5.3.2 Het Systeem van de Twentse stuwwallen (TW)

Het Systeem van de Twentse stuwwallen wordt gevoed vanuit de stuwwal van Enschede in het zuiden en de stuwwal van Ootmarsum in het noorden. Over de stuwwallen loopt een waterscheiding, op de kaart aangegeven als de grens tussen stroomtakken binnen één systeem, die het gebied in tweeën deelt. Water dat oostelijk van de waterscheiding infiltreert, stroomt richting Duitsland naar het stroomgebied van de Dinkel. Het merendeel van dit water komt langs de flanken van de stuwwal omhoog. Water dat westelijk van de waterscheiding infiltreert stroomt in de richting van het Systeem van Geesteren-Delden en komt omhoog in beekdalen. Het Systeem van de Twentse stuwwallen is voor het grootste deel ondiep, doordat dicht onder het oppervlak slecht doorlatende tertiaire afzettingen voorkomen. De oostelijke tak van het Systeem van de stuwwal van Enschede vormt hierop een uitzondering. Doordat op deze plaats in de ondergrond de goed doorlatende Bentheimer zandsteen voorkomt, kan het zoete water tot op vrij grote diepte doordringen (zie verder figuur 21).

5.3.3 Het Systeem van de stuwwal van Sibculo (SI)

In het noordoostelijk deel van Overijssel is op het Twentse stuwwalsysteem het Systeem van de stuwwal van Sibculo gesuperponeerd (Van Brussel, 1987). Zuidelijk van het infiltratiegebied van dit systeem komt in de omgeving van de systeemgrens een grote hoeveelheid water omhoog, waardoor op deze plaats een veengebied is ontstaan. Noordelijk van dit systeem komt een venster van het Systeem van de Twentse stuwwallen voor.

5.3.4 **Het Systeem van Geesteren-Delden (GD)**

Het Systeem van de glaciale rug van Geesteren-Delden ligt westelijk van en evenwijdig aan het Systeem van de Twentse stuwwallen. Het infiltratiegebied van het systeem valt uiteen in een groot aantal kleinere infiltratiegebieden die voor het merendeel bestaan uit eskers en bedekte stuwwallen. Aan al deze infiltratiegebieden ontspringen kleine, ondiepe, traag stromende systemen, die op de kaart samen zijn genomen en als één geheel worden beschouwd.

5.3.5 **Het Systeem van Vroomshoop-Hooge Hexel (VH)**

Het Systeem van de stuwwalrug van Vroomshoop-Hooge Hexel ligt westelijk van het Systeem van Geesteren-Delden. Dit systeem is iets krachtiger dan het laatstgenoemde. Doordat de tertiaire basis hier lager ligt, breidt het zich wat dieper in de ondergrond uit.

5.3.6 **Het Systeem van de Sallandse stuwwallen (SA)**

Het gebied van de Sallandse stuwwallen wordt gekenmerkt door vrij hoge en droge infiltratiegebieden, waartussen dalen liggen, waarin natte condities worden aangetroffen. Deze gebieden waren in het verleden bedekt met veenpakketten, die tegenwoordig voor het grootste deel zijn afgegraven. Hoge ijzergehalten die op sommige plaatsen in het grondwater voorkomen, zijn hier gebonden aan de uitgangen van diepe systemen waar gereduceerd ijzerhoudend water opkwelt.

De begrenzing van het Systeem van de Sallandse stuwwallen wordt gevormd door het Systeem van de Overijsselse Vecht in het noorden en door het Systemencomplex van Twente in het oosten (grens tegen de oostflank van de stuwwalrug Vroomshoop-Hooge Hexel). In het zuiden ligt de grens tussen het Twentekanaal en de Schipbeek en in het westen wordt de begrenzing gevormd door de oostelijke tak van het Veluwe Systeem. Deze laatste begrenzing ligt enkele kilometers ten oosten van de IJssel (zie ook bespreking figuur 24).

Het infiltratiegebied bestaat uit een aaneenschakeling van stuwwallen. Dit zijn de stuwwallen van de Lemelerberg, de Hellendoornse Berg en de Holterberg. Bij een nadere beschouwing van de systemen in dit gebied zal dan ook rekening met verschillende stroomtakken van het systeem moeten worden gehouden.

De grootste hoeveelheid kwel komt omhoog langs de flanken van de stuwwallen. De venige afzettingen en grondwaterstanden nabij het maaiveld duiden op de vochtige situatie die hiervan het gevolg is. Door grondwaterwinningen op de Sallandse stuwwallen is de netto hoeveelheid water, die aan het systeem ten goede komt, de afgelopen decennia afgenomen. Hierdoor is het systeem kleiner geworden en zijn de hoeveelheden kwel afgenomen.

5.3.7 **Het Systeem van de Veluwe (VE)**

Dit systeem dat wordt gevoed door de stuwwal van de Veluwe is het grootste van Midden-Nederland. De noordelijke grens van het systeem ligt in de Flevopolder, de oostelijke grens ten oosten van de IJssel, de zuidelijke grens in de Betuwe (tegen de Linge) en de westelijke grens tegen de oostflank van de Utrechtse Heuvelrug. De begrenzingen van het systeem zijn onder andere terug te vinden in het verloop van opbollingen van het zoet-zout grensvlak (zie voorgaande) en in de vorm van het isohypsenpatroon. Voor de bespreking van het Veluwe Systeem is een verdeling gemaakt in een oostelijke, zuidelijke, westelijke en noordwestelijke stroomtak. De begrenzing tussen de verschillende takken wordt gevormd door de waterscheidingen die op de kaart zijn aangegeven.

De oostelijke tak van het Veluwe Stelsel

De oostelijke tak van het Veluwe Stelsel ligt op het inerte zoute water dat in de tertiäre formaties voorkomt. De grens van de oostelijke tak van het Veluwe Stelsel met het Stelsel van de Sallandse stuwwallen, het Stelsel van de Achterhoek en het Stelsel van de stuwwal van het Montferland ligt oostelijk van de IJssel, en komt in de diepe ondergrond overeen met de ligging van de opbolling van het zoet-zout grensvlak (zie voorgaande). Het verloop van de systeemgrens geeft de verhouding weer tussen de sterkte van het Stelsel van de Veluwe enerzijds en de Stelsels van het Montferland, de Achterhoek en de Sallandse stuwwallen anderzijds.

Het Stelsel van het Montferland was relatief sterk en drukte het Stelsel van de Veluwe tegen de IJssel aan. Het Stelsel van de Achterhoek was zwakker, waardoor het Stelsel van de Veluwe zich verder in noordoostelijke richting kon uitbreiden. Het Stelsel van de Sallandse stuwwallen was wat sterker en duwde, naar het noorden gaand, de oostelijke tak van het Veluwe Stelsel in westelijke richting terug (bijlage 1, figuur 16, 17 en 19).

Het grootste deel van het water dat in de oostelijke Veluwe infiltreert komt omhoog op de oostflank. Dit water wordt ten dele afgetapt door sprengen die in het verleden voor waterwinning en waterkracht zijn aangelegd. In de depressie langs de oostflank zijn een aantal waterlopen gegraven om wateroverlast, die hier in het verleden optrad, tegen te gaan. Een klein deel van het geïnfilteerde water stroomt naar de diepe ondergrond, gaat onder de IJssel door en komt aan de oostzijde ervan omhoog. Daar dit water zich op veel plaatsen vermengt met water uit de dekzanden en uit het bovenliggende waterlopenstelsel (zie beschrijving figuur 27), is het moeilijk dit water aan het oppervlak te traceren. Het voorkomen van vensters van dit water is voorlopig alleen aan de zuidkant van de IJssel bij de zuidoostelijke Veluwe aangetoond (Engelen, 1984).

De zuidelijke tak van het Veluwe Stelsel

De zuidelijke tak van het Veluwe Stelsel ligt boven een systeem dat vanuit het Carboon wordt gevoed. Het systeem strekt zich uit tot in de Betuwe, waar het in de ondergrond de Stelsels van het Montferland en van de stuwwal van Nijmegen afsnijdt. Het merendeel van het water dat in de zuidelijke Veluwe infiltreert komt langs de zuidelijke flanken van de Veluwe omhoog. Een klein deel gaat onder de Rijn door en kwelt op in een venster tegen de Linge (Verkooijen, 1981).

De westelijke tak van het Veluwe Stelsel

De westelijke tak van het Veluwe Stelsel strekt zich uit tot de oostflank van de Utrechtse Heuvelrug. De systeemgrens heeft zich de afgelopen decennia in oostelijke richting verplaatst (zie verder figuur 26). Het meeste water dat in de westelijke Veluwe infiltreert, komt langs de flanken omhoog en voedt de beken in de Gelderse Vallei (bijvoorbeeld de Barneveldse en Lunterse Beek, Vasak, 1979). De rest van het grondwater stroomt verder de diepte in en komt omhoog in depressies in de Gelderse Vallei.

De noordwestelijke tak van het Veluwe Stelsel

De noordwestelijke tak van het Veluwe Stelsel strekt zich uit tot in de Flevopolder. Het systeem wordt begrensd door het IJsselmeer Stelsel in het noorden en het Utrechtse Heuvelrug Stelsel in het westen. Het systeem valt uiteen in twee delen, de eigenlijke noordwestelijke tak van het Veluwe Stelsel en het Stelsel van de stuwwal van Garderen. Deze twee systeemtakken voeden mede de Hierdense Beek (Appelo, 1988).

Het grootste deel van het water dat in de noordwestelijke Veluwe infiltrteert, komt omhoog langs de oever van de randmeren, waar als gevolg van de natte situatie veenvorming is opgetreden. Uit het voorkomen van riet en zegge in deze venen blijkt de invloed van het zoute water uit de voormalige Zuiderzee.

Een klein deel van het geïnfiltrerde water stroomt onder het Systeem van de Randmeren door en komt omhoog in de grote sloten en vaarten van de Flevopolder. Tussen Harderwijk en de Oostvaardersplassen ligt een gebied waarin zoet water omhoog komt. In de rest van de Flevopolder kwelt zout water op, dat door de invloed van de Zuiderzee in de ondergrond is terechtgekomen. Achter dit water zit een front van zoet water, dat het zoute water geleidelijk zal wegdrücken.

5.3.8 Het Systeem van de Utrechtse Heuvelrug (UH)

Het Systeem van de Utrechtse Heuvelrug wordt begrensd door het IJsselmeer Systeem in het noorden, het Veluwe Systeem in het oosten, de systemen van de grote rivieren in het zuiden en het Systeem van de Vecht en het Amsterdam-Rijnkanaal in het westen. Vensters van het Systeem van de Utrechtse Heuvelrug komen voor in de Flevopolder en in het gebied tussen de grote rivieren.

De noordelijke grens van het Utrechtse Heuvelrug Systeem ligt in Zuidelijk Flevoland, waar het aan het IJsselmeer Systeem en het Veluwe Systeem grenst. De grens van het systeem is de afgelopen eeuwen enige malen van plaats veranderd. Dat gebeurde allereerst door droogmakerijen in Noord-Holland, die het water van de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe aantrokken. Hierdoor ontstonden zoetwatertongen onder de Zuiderzee. Na het aanleggen van de Flevopolder werden de zoetwatertongen afgebogen in de richting van de diepste plaatsen in de polder.

Langs de oostrand van de Utrechtse Heuvelrug ligt de grens tussen het Systeem van de Utrechtse Heuvelrug en het Veluwe Systeem. De grens komt ongeveer overeen met de opbolling van het zoet-zout grensvlak. Door inkrimping van het Utrechtse Heuvelrug Systeem (zie figuur 26a en b) heeft de oostelijke grens van dit systeem zich de afgelopen jaren in westelijke richting verplaatst. Tevens is de kwel langs en op de oostflank van de Heuvelrug afgenomen.

Aan de zuidelijke rand van het Utrechtse Heuvelrug Systeem wordt in de ondergrond het Systeem van de Veluwe weggedrukt. Aan het oppervlak komen twee vensters van het systeem voor.

Aan de westrand wordt het Utrechtse Heuvelrug Systeem begrensd door de holocene Systemen van de Vecht en het Amsterdam-Rijnkanaal.

Berekeningen met FLOWNET geven aan dat mogelijk een venster voorkomt van het Utrechtse Heuvelrug Systeem in de Polder Groot Mijdrecht (zie ^{IJsselmeer} profielen). De kwel op de westflank van de Heuvelrug is de afgelopen jaren sterk afgenomen door grondwateronttrekkingen op de Heuvelrug.

5.3.9 Het Complex van Systemen van de Achterhoek (AH)

Evenals het gebied van Twente wordt de hydrologie in de Achterhoek gedomineerd door een aantal in hiërarchie gelijke, ondiepe grondwaterstelsels. Deze grondwaterstelsels worden, doordat de infiltratiecapaciteit van de bodem over het hele gebied vrij laag is, slechts door een relatief klein deel van het neerslagoverschot gevoed. Het grootste deel van het neerslagoverschot wordt oppervlakkig afgevoerd. Het gebied kent derhalve gedurende droge periodes een watertekort, terwijl gedurende natte periodes wateroverlast kan optreden. Om de wateroverlast tegen te gaan is het waterlopenstelsel gekanaliseerd en zijn sloten verbreed en verdiept. Een en ander heeft tot gevolg dat in natte periodes het water beter afgevoerd wordt, maar dat in droge periodes meer water moet worden ingelaten dan voorheen.

Het hydrologisch gedrag van het gebied kan voor een groot deel verklaard worden uit het ondiepe voorkomen van de slecht doorlatende formaties die in het Tertiair zijn afgezet. Dat deze formaties de basis van de daar boven liggende stromingsstelsels vormen, kan worden geconcludeerd uit de overeenkomstige ligging tussen de top van deze formaties en het zoet-zout grensvlak.

De hiërarchie is voor te stellen als een inerte basis, waarboven ondiepe, door pleistocene formaties gevoede stromingsstelsels liggen. Deze systemen zijn (gerekend van oost naar west):

- Het glaciale Complex van Systemen van Winterswijk (WI): De infiltratiegebieden bestaan uit verschillende door het ijs beïnvloede landschapsvormen. Het water stroomt van deze infiltratiegebieden naar een tussenliggende geulafzetting. In de geul stroomt het meeste water af in zuidwestelijke richting.
- De Lochemerberg.
- De dekzandvlakte van Zelhem. Deze vlakte heeft plaatselijk een lage infiltratiecapaciteit, zoals valt op te maken uit het voorkomen van (hoog)veengebieden. Hier bovenop ligt een duinrug waarop enkele steden en dorpen worden aangetroffen.
- De duinrug langs de noordoever van de Oude IJssel.
- De bedekte stuwwallen in de omgeving van Hengelo (Gld).

De begrenzingen van het Complex van Systemen van de Achterhoek worden gevormd door het Systeem van de stuwwal van Lochhuizen (BL, tussen de Buurser Beek en de Berkel) in het noorden, door het Systeem van het Montferland in het zuiden en door het Systeem van de Veluwe in het westen. De oostelijke systeemgrens is niet vastgesteld, omdat deze in Duitsland ligt en er in het onderzoek geen studies uit Duitsland zijn betrokken. Wel kan worden gezegd dat het water uit Duitsland grotendeels oppervlakkig wordt aangevoerd en dat grondwaterstroming vanuit Duitsland een geringe rol zal spelen.

5.3.10 Het Systeem van de stuwwal van het Montferland (MO)

Het Systeem van de stuwwal van het Montferland grenst in het noordoosten aan het Complex van Systemen van de Achterhoek. In het zuiden ligt de grens tegen de Rijn en de IJssel en in het noordwesten wordt het systeem begrensd door de oostelijke tak van het Veluwe Systeem. Op verschillende plaatsen waar het Montferland aan zijn omliggende systemen grenst, komt het zoute water uit de tertiaire formaties omhoog tot enige tientallen meters onder het maaiveld (onder andere bij Beek). Het grootste deel van het water dat in de stuwwal van het Montferland infiltreert, komt langs de flanken van de stuwwal omhoog. Tegenwoordig gaat dit water voor een groot deel naar pompputten waaruit water wordt gewonnen. Een kleiner deel van het water kwelt op in vensters die in de kommen langs de rivieren liggen.

5.3.11 Het Systeem van de stuwwal van Nijmegen (NM)

De grenzen van het Systeem van de stuwwal van Nijmegen liggen in het noorden ter hoogte van de Linge, in het oosten langs de flanken van de stuwwal, in het zuiden langs de Maas en in het westen tegen het Systeem van Bergharen-Wijchen. Het Systeem van Nijmegen vormt in de ondergrond van de Betuwe een tong in westelijke richting, die op grond van de chemische eigenschappen van het water goed is te vervolgen. De tong snijdt aan de oostkant het Systeem van het Montferland af. Aan de westkant wordt het systeem op zijn beurt door het Systeem van de Veluwe afgesneden. Het Systeem van de stuwwal van Nijmegen heeft een klein venster noordelijk van de Waal. Mogelijk komt ook nog een diepe stroomtak van het systeem in de buurt van de Linge omhoog (figuur 28).

5.4 Grondwaterstelsels gevoed door laatpleistocene afzettingen

5.4.1 Het Systeem van Bergharen-Wijchen (BW)

Het Systeem van de terrasafzettingen van Bergharen-Wijchen ligt tegen het Systeem van de stuwwal van Nijmegen aan. Bovenop deze twee systemen ligt het Systeem van de Waal (WL).

5.4.2 De Dekzand- en Duinrugsystemen (dd, DW, DV)

Bovenop de pleistocene systemen kan een niveau worden onderscheiden waarvan de infiltratiegebieden bestaan uit laatpleistocene afzettingen. Deze afzettingen bestaan grotendeels uit dekzanden en duinruggen en komen voor aan weerszijden van de IJssel, in Salland, de Achterhoek, het Montferland en in de Gelderse Vallei. Van deze systemen zijn de Dekzand- en Duinrugsystemen ten oosten van de IJssel (dd), de Systemen van Didam en Wehl (DW) en het Systeem van Deventer (DV) op de kaart aangegeven, omdat zij over een redelijk groot gebied invloed uitoefenen. De dekzandsystemen westelijk van de IJssel en in de Gelderse Vallei zijn te klein en liggen te verspreid om ze bij de gebruikte schaal op kaart te presenteren.

De dekzand- en duinrugsystemen liggen boven de oudere pleistocene systemen en kunnen er één geheel mee vormen of er geheel los van staan. De systemen zijn in het algemeen kleiner dan de oudere pleistocene systemen en reiken minder diep. De grootte van de systemen fluctueert sterk. Gedurende natte perioden dijen ze uit; tijdens droge perioden krimpen ze in. Met name de kleinere systemen kunnen tijdens droge perioden volledig wegvallen.

5.5 Grondwaterstelsels gevoed door holocene infiltratiegebieden

Boven de pleistocene systemen liggen systemen die grotendeels worden gevoed door rivieren (zoals Rijn, Waal, Vecht, IJssel en Overijsselse Vecht) en de oeverwallen en rivierduinrijen daar omheen. In het algemeen draineert de bovenloop van deze rivieren het water uit zijn omgeving en vormt op die manier de begrenzing van grotere of kleinere systemen. De benedenloop van een rivier kan door verschillende oorzaken boven het omringende landschap komen te liggen en zo zelf het infiltratiegebied van een systeem vormen. Een voorbeeld hiervan is het omgekeerde rivierenlandschap in Utrecht.

5.5.1 Het Systeem van de Overijsselse Vecht (OV)

Het Systeem van de Overijsselse Vecht vormt de grens tussen het Systeem van het Ommerveld en de systemen van de regio Twente. Door het hoge peil in de Overijsselse Vecht infiltreert het water uit de rivier in de ondergrond en stroomt naar de gebieden achter de rivierduinen. Het water dat van de omringende systemen afkomstig is, wordt door het water van de Vecht weggedrukt en komt eveneens omhoog in de depressies die ter weerszijden van de Vecht liggen. In de depressies stagneert het water, waardoor in het verleden zeer natte moerassige condities ontstonden. Tegenwoordig wordt het water via een gegraven waterlopenstelsel afgevoerd.

5.5.2 Het Systeem van de IJssel (YS)

Het Systeem van de IJssel ligt vrijwel geheel op de oostelijke tak van het Systeem van de Veluwe en wordt gevoed met Rijnwater. De rivierduinen

die eveneens tot het systeem worden gerekend, worden gedurende natte perioden gevoed door neerslag en gedurende droge perioden door de rivier.

Vanaf Deventer ligt de IJssel boven zijn omgeving. Hierdoor vindt geen drainage van de omgeving plaats, maar juist infiltratie daar naar toe. Om het water ter weerszijden van de IJssel af te voeren, zijn evenwijdig aan de IJssel waterlopen gegraven. De waterlopen staan in verbinding met een uitgebreid stelsel van gekanaliseerde beken, kanalen en weteringen. Dit stelsel wordt gedurende natte perioden door de pleistocene systemen gevoed. Tijdens droge perioden vallen de kleinere (laat)pleistocene systemen droog en komt er een stroming uit de waterlopen naar de dekzanden op gang. Het waterlopenstelsel wordt op zijn beurt vanuit de IJssel kunstmatig voorzien van (Rijn)water. Het systeem van waterlopen in de IJsselvallei is niet op de kaart weergegeven, omdat voor het vervaardigen van de kaart van een natte situatie is uitgegaan. De invloed van IJsselwater, gemengd met het water van dekzanden, is in de IJsselvallei tot op enige diepte te vervolgen (tot de keileemlaag, zie figuur 23).

5.3.3 De Systemen van de Rijn en de Waal (RS, WL)

De Rijn kan, afhankelijk van het peil, infiltreren naar de omgeving of deze draineren. Bovenstrooms van Culemborg is het karakter overwegend drainerend. Benedenstrooms infiltreert de Rijn en breidt het systeem zich sterk uit. In de Betuwe komt af en toe een situatie voor, waarbij de noordoever draineert en de zuidoever infiltreert (Verkooijen, 1981). Het Systeem van de Waal is grotendeels vergelijkbaar met het Systeem van de Rijn.

5.5.4 Het Systeem van de Vecht en het Amsterdam-Rijnkanaal (VA)

De Systemen van de Vecht en het Amsterdam-Rijnkanaal zijn op de kaart als één systeem gepresenteerd. De waterlopen liggen boven het omringende landschap. Deels omdat dit landschap in de afgelopen eeuwen is gedaald door inklinking van de (veen)bodem. Het systeem voedt voor een deel de Vechtplassen en de omliggende polders.

5.5.5 Het Systeem van de Vinkeveense Plassen (VI)

Vanuit de westkant van de Vinkeveense Plassen vindt sterke wegzijging naar de Polder Groot Mijdrecht plaats.

5.5.6 Het Systeem van de Randmeren (RM)

Het Systeem van de Randmeren ligt op het Systeem van de Veluwe en het Systeem van de Utrechtse Heuvelrug. Het systeem wordt onder andere gevoed door grond- en oppervlaktewater van de Veluwe en overtollig water uit de Flevopolder. De exacte ligging van de systeemgrens is nog niet bekend, omdat er door het korte bestaan van het systeem nog geen evenwichtssituatie voor de waterkwaliteitsgrenzen is bereikt.

5.6 Profielen

Aan de hand van de beschrijving van de profielen wordt in het onderstaande de interactie nader uitgewerkt tussen systemen die het hydrologisch karakter van een regio bepalen. Daarnaast komen enkele nog niet genoemde eigenschappen van de systemen aan de orde, zoals verblijftijden en grootte van de voeding. Voor de hydrogeologische opbouw van de profielen wordt naar appendix B verwezen.

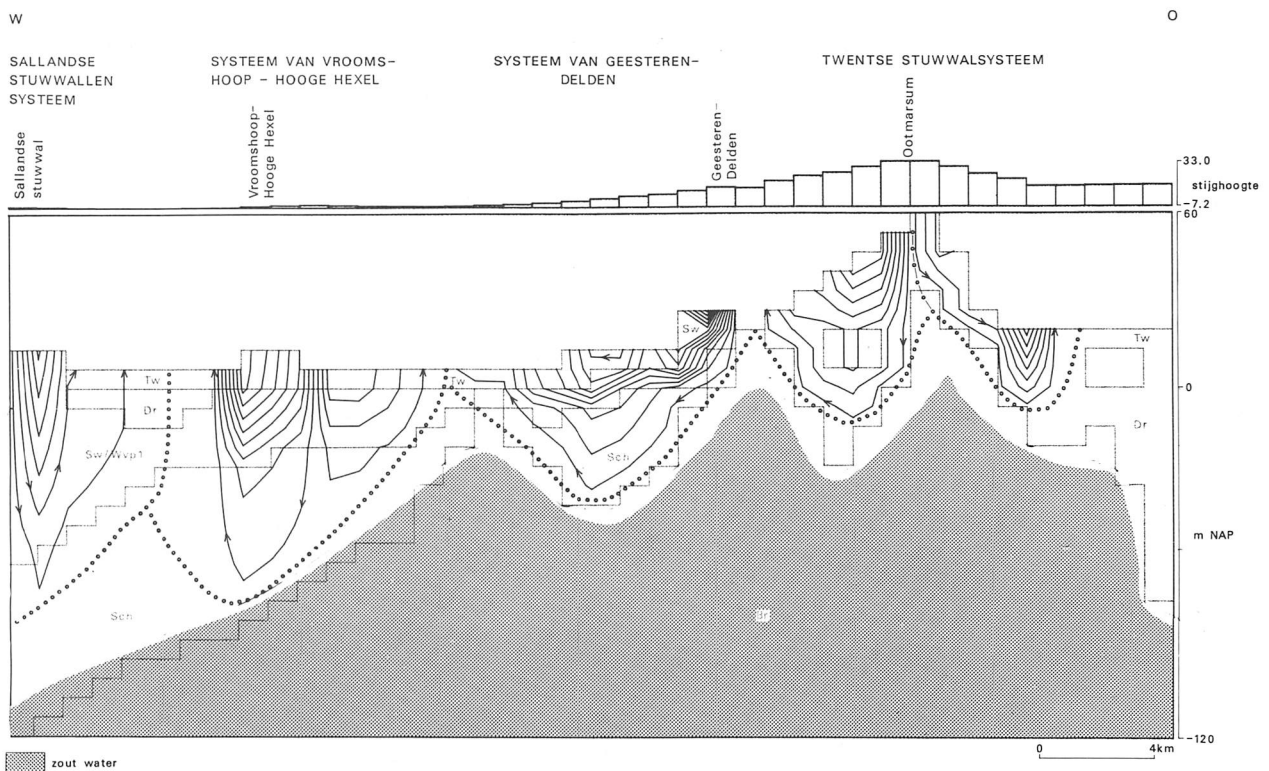
5.6.1 Profielen door Twente en Salland (figuur 20, 21, 22)

De figuren 20, 21, en 22 laten de hydrologische situatie zien in het gebied tussen de Twentse en Sallandse stuwwallen. Uit de profielen komt duidelijk de ondiepe verbreiding van vrijwel alle systemen naar voren. Tevens wordt superpositie van een systeem boven een ander slechts in enkele gevallen in de profielen aangetroffen.

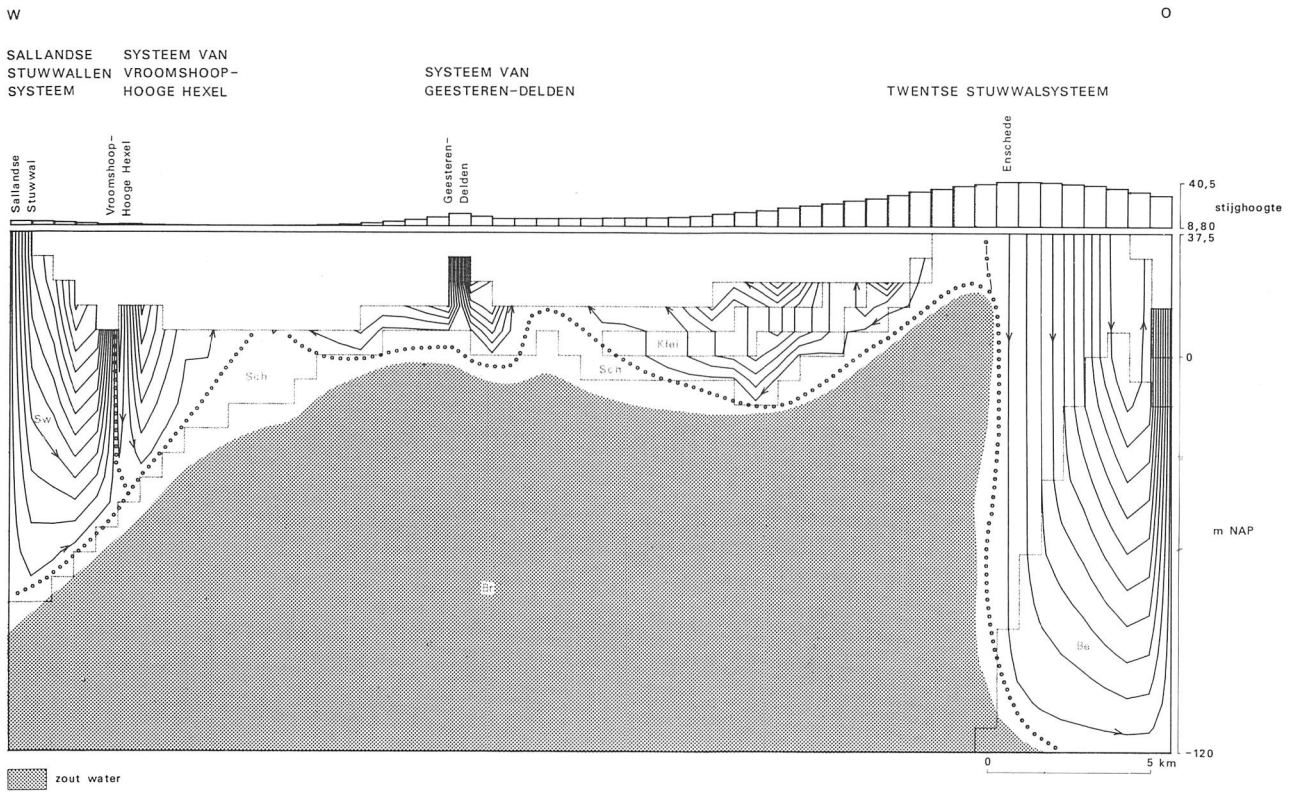
Figuur 20 en 21 geven een oost-west doorsnede door respectievelijk het midden en het zuidelijk deel van de regio Twente. Opvallend is de grotere diepte die de profielen voor het oostelijk Systeem van Enschede ten opzichte van het oostelijk Systeem van Ootmarsum tonen. Deze diepere verbreiding van het Systeem van Enschede hangt samen met het voorkomen van permeabele zandsteen (Bentheimer zandsteen) in de ondergrond. Ook de chemische samenstelling van het water geeft aan dat water vanuit de stuwwal door de slecht doorlatende formaties van het Tertiair naar de Bentheimer zandsteen percoleert (Haak, 1986).

Het grondwater dat in westelijke richting vanaf de stuwwallen stroomt, loopt tegen het Systeem van Geesteren-Delden op. Het water komt hier omhoog of buigt af in de richting van de beekdalen die in de glaciële rug zijn ingesneden. Op sommige plaatsen, waar de glaciële systemen minder sterk zijn ontwikkeld, is wellicht stroming mogelijk onder het glaciële systeem door.

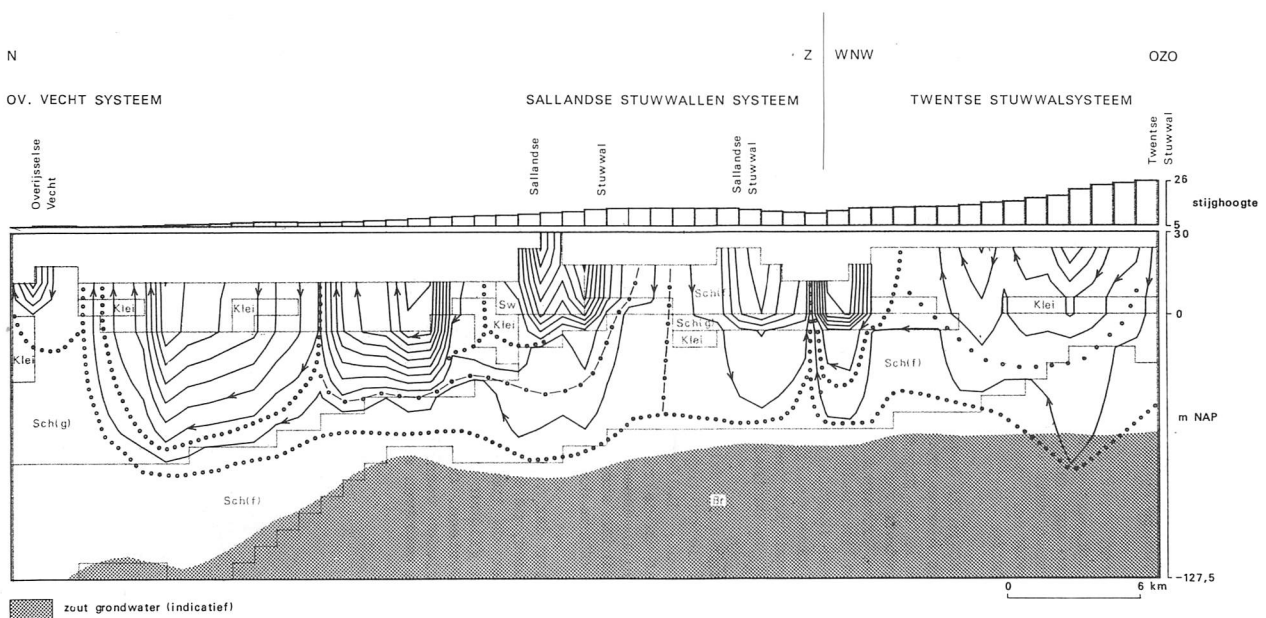
Het water dat van de Systemen van Geesteren-Delden, van Vroomshoop-Hooge Hexel en van de Sallandse stuwwallen naar de tussenliggende dalen stroomt, buigt af naar het noorden (figuur 22) en stroomt omhoog tegen het Overijsselse Vecht Systeem. Doordat het water hier bleef staan, ontstond in het verleden veengroei. Tegenwoordig wordt het overtollige water via graven stelsels afgevoerd.



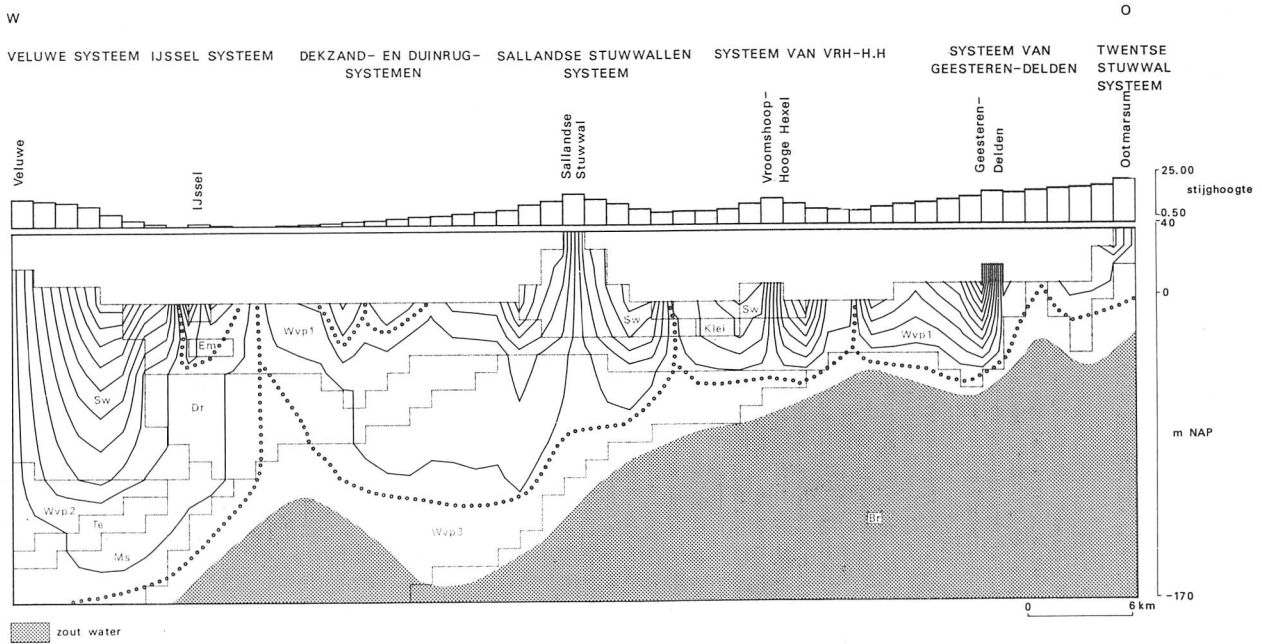
Figuur 20: Schematische weergave van de stijghoogte, de geologische opbouw en de stroomlijnen in een oost-west sectie door het noordelijke deel van Twente.



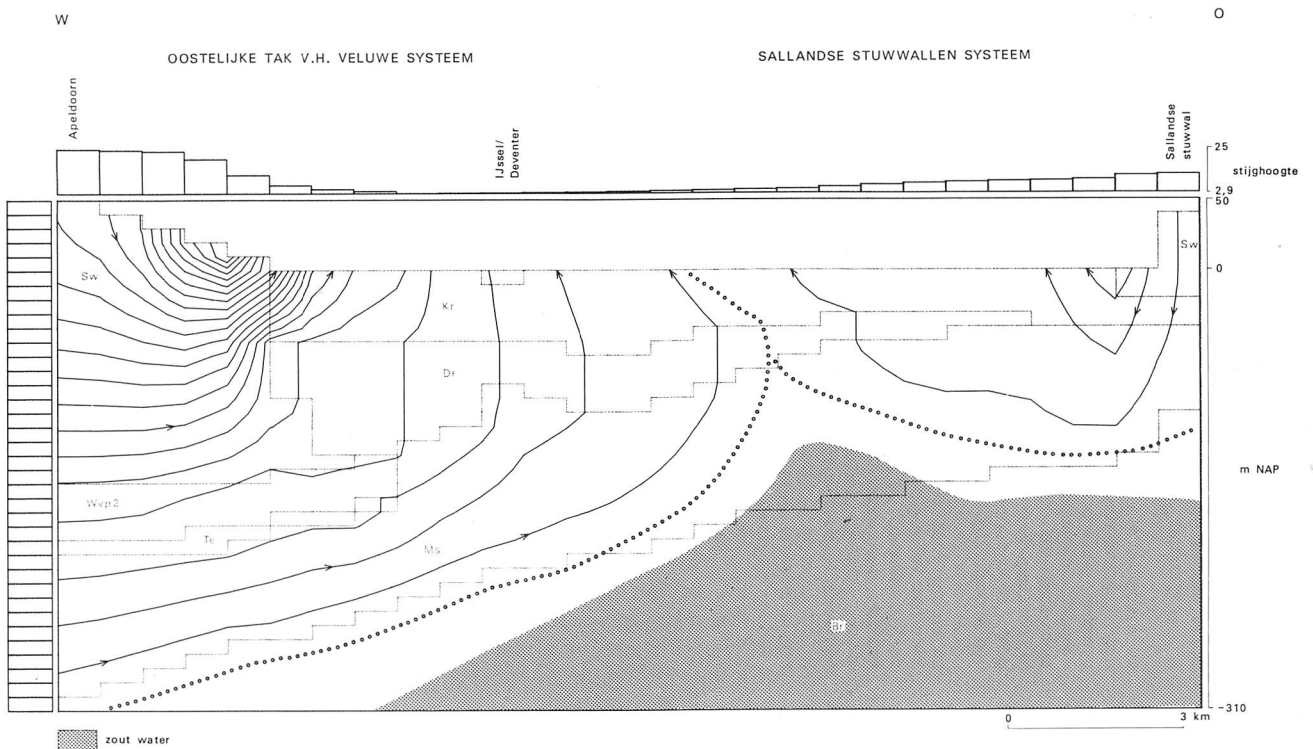
Figuur 21: Schematische weergave van de stijghoogte, de geologische opbouw en de stroomlijnen in een oost-west sectie door het zuidelijke deel van Twente. Opmerkelijk is de veel diepere en krachtiger stroming van het zuidelijk deel van het Systeem van de Twentse stuwwallen ten opzichte van het noordelijke deel.



Figuur 22: Schematische weergave van de stijghoogte, de geologische opbouw en de stroomlijnen in een noord-zuid-westnoordwest-oostzuidoost sectie door Twente.



Figuur 23: Schematische doorsnede door het noordelijke deel van de IJsselvallei.



Figuur 24: Schematische oost-west doorsnede door het midden van de IJsselvallei. Getoond worden het Veluwe Systeem met daarop het IJssel Systeem en daarnaast het Systeem van de Sallandse stuwwallen. Stroomlijnen van gesuperponeerde kleine systemen zijn niet berekend.

5.6.2 Profielen door Twente, Salland en de Oostelijke Veluwe (figuur 23, 24)

De figuren 23 en 24 geven de hydrologische situatie in het IJsseldal weer. De grootste systemen die in het gebied voorkomen, zijn de Systemen van de Veluwe en van de Sallandse stuwwallen. Berekeningen met FLOWNET geven aan dat de verblijftijden van het Systeem van de Sallandse stuwwallen een factor 4 tot 5 hoger liggen dan die van de oostelijke tak van het Veluwe Systeem (respectievelijk 3000-8000 en 600-2000 jaar). De berekende hoeveelheid voeding die uit de ingevoerde stijghoogtes bleek, was lager (respectievelijk 100-150 mm/jaar en 300-350 mm/jaar). Mogelijk kan dit verklaard worden uit de grondwaterwinningen die op de Sallandse stuwwallen plaatsvinden.

Het meest zuidelijke profiel (figuur 24) geeft de veel grotere kracht weer van het Veluwe Systeem ten opzichte van het Sallandse Systeem in vergelijking tot het noordelijke profiel (figuur 23). Dit is zowel aan de stroomlijnen als aan de opbolling in het zoet-zout grensvlak te zien. De open rand in figuur 24 geeft de stroming van water uit zuidwestelijke richting aan.

Boven het Systeem van de Sallandse stuwwallen en het Systeem van de Veluwe liggen kleinere systemen die door dekzanden en duinruggen worden gevoed. In het meest noordelijke profiel is te zien dat de IJssel een systeem voedt dat geheel op het Systeem van de Veluwe drijft. De invloed van dit systeem en van de dekzand- en duinrugsystemen reikt tot de keileemlaag (Drenthe Formatie).

5.6.3 Profiel noordwestelijke Veluwe-Randmeer-IJsselmeer (figuur 25)

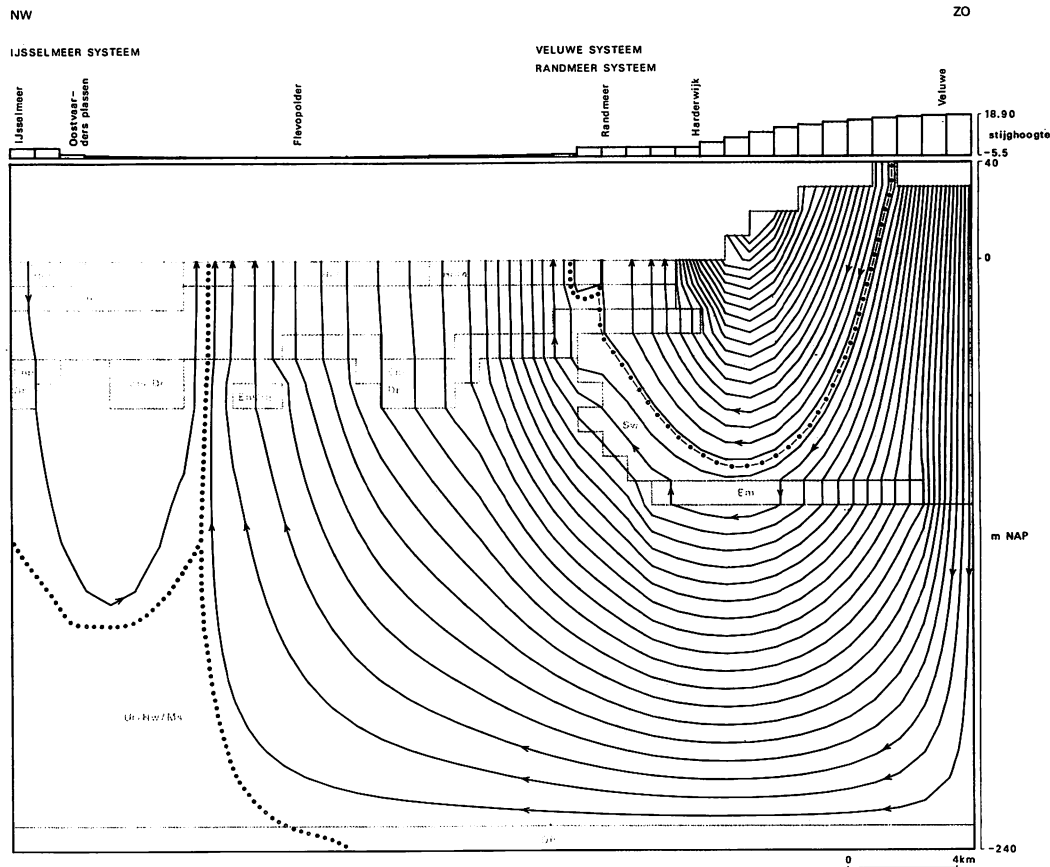
De situatie, die wordt weergegeven in figuur 25, betreft de huidige ligging van systeemgrenzen. Deze systeemgrenzen komen niet overeen met grenzen tussen verschillende waterkwaliteiten, doordat laatstgenoemde het gevolg zijn van steeds wisselende hydrologische omstandigheden (uitbreiding van de Zuiderzee, verzoeting door infiltratie vanuit het IJsselmeer, inpolderingen). De waterkwaliteitsgrenzen zijn nog steeds aan veranderingen onderhevig.

Figuur 25 laat zien, dat de grondwaterstroming wordt aangedreven door het Veluwe Systeem in het oosten en het IJsselmeer Systeem in het westen. Op het Systeem van de Veluwe ligt het Randmeer Systeem gesuperponeerd. Dit systeem wordt gevoed door Veluwewater, oppervlaktewater uit beken en water dat uit de Flevopolder wordt uitgeslagen.

5.6.4 Profiel Winterswijk-Veluwe-Utrechtse Heuvelrug-Polder Mijdrecht (figuur 26a en 26b)

Het profiel geeft globaal de hydrologische situatie in Midden-Nederland weer. Het grootste systeem in het profiel is het Systeem van de Veluwe dat zich uitstrekt van de IJssel tot aan de Utrechtse Heuvelrug. Het systeem heeft invloed tot grote diepte (>300 m). De stroomsnelheden binnen dit systeem zijn relatief hoog. Oostelijk van het Veluwe Systeem liggen verschillende kleine ondiepe systemen. De stroomsnelheden in deze systemen zijn laag en slechts een klein deel van de effectieve neerslag infiltreert in de ondergrond, zodat de voeding van de systemen bescheiden is. De systemen bestaan, van oost naar west gerekend, achtereenvolgens uit het Complex van Systemen van Winterswijk en het Complex van Systemen van de Achterhoek.

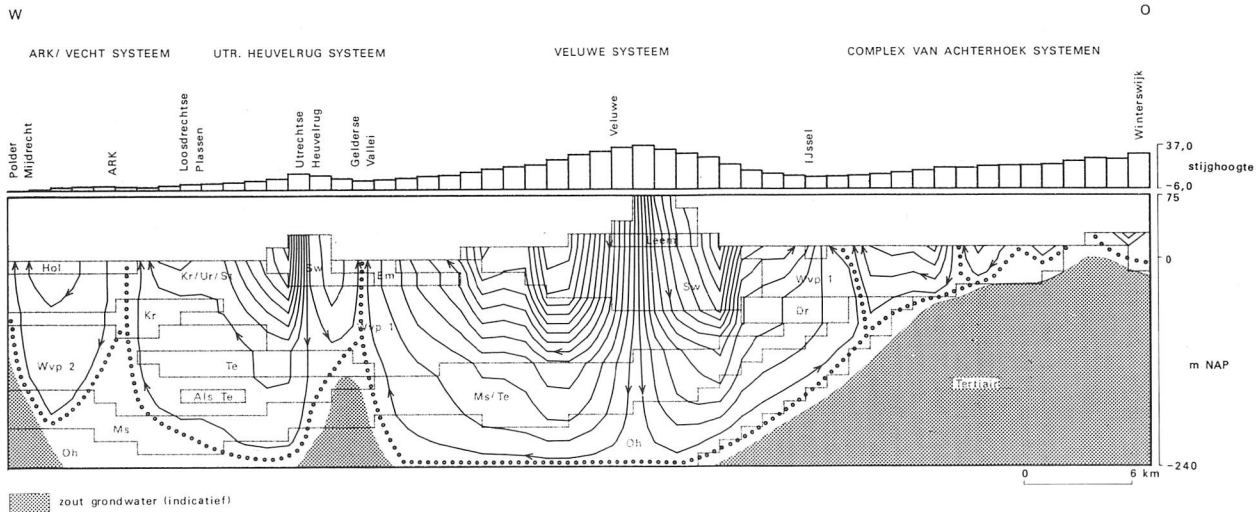
Westelijk van het Systeem van de Veluwe ligt het Systeem van de Utrechtse Heuvelrug. De voeding van dit systeem, zoals die door het model FLOWNET wordt berekend, is klein in vergelijking tot de voeding van de Veluwe (respectievelijk ca. 200 en 300 mm/jaar). Uit andere studies blijkt dat



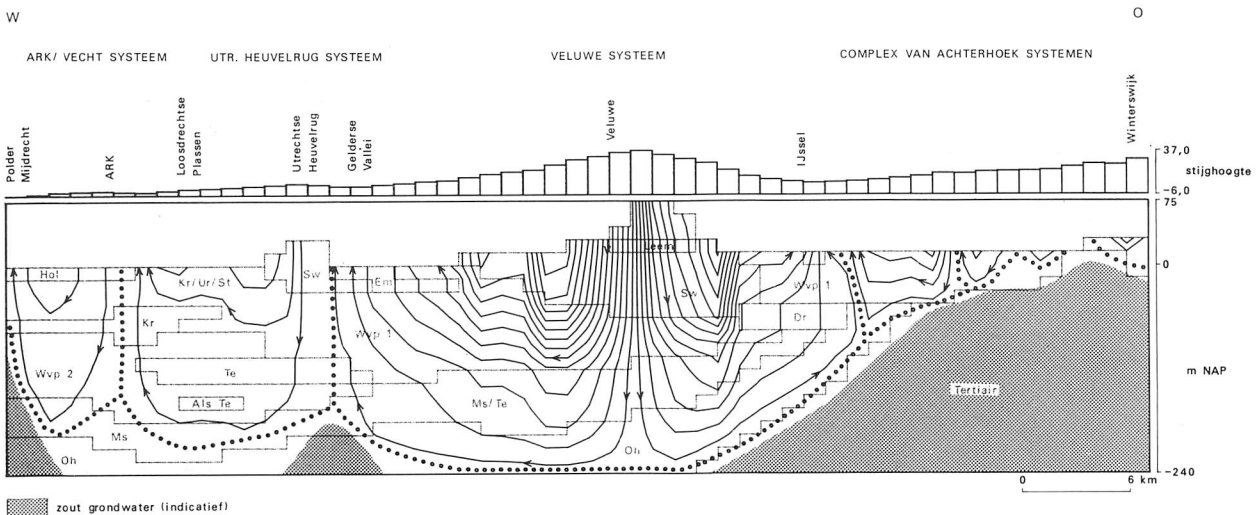
Figuur 25: Schematische oost-west doorsnede door Flevoland. Kleine (polder)systemen zijn weggelaten. De weerstandbiedende lagen zijn op de plaats van het profiel relatief dun.

infiltratie door de huidige effectieve neerslag ongeveer 300 mm/jaar moet bedragen (Van Lanen, 1983). Een verklaring voor de lage waarde kan liggen in het voorkomen van een groot aantal pompstations op de Utrechtse Heuvelrug (zie 12.3) die een groot deel van de voeding aan het systeem onttrekken. Figuur 26b laat de situatie zien, waarbij de stijghoogtes zijn aangepast tot een infiltratie was bereikt van 300 mm/jaar. In de tweede situatie strekt het Utrechtse Heuvelrug Systeem zich verder naar het oosten uit en neemt de kwel op de westflank toe (grotere stroomlijndichtheid).

Het meest westelijke systeem in het profiel is het systeem dat wordt gevoed vanuit waterlopen (Vecht en Amsterdam-Rijnkanaal) die boven het omringende landschap liggen. Natuurlijke waterlopen in dit deel van Nederland zijn boven hun omgeving komen te liggen, doordat het drassige venige gebied inklonk als gevolg van (intensieve) drainage en/of veenaafgraving. In het profiel is eveneens het effect te zien van diepe polders (Bethunepolder en Polder Mijdrecht) op de stroming van het water. De Bethunepolder zuigt water aan uit de Loosdrechtse Plassen, waardoor in het oostelijke deel van dit plassengebied kwel voorkomt (vanuit de Utrechtse Heuvelrug) en wegzijging in het westelijk deel (plaatselijk tot 15 mm/dag). De Polder Mijdrecht trekt, naast het water uit de directe omgeving, water aan van de Vecht en het Amsterdam-Rijnkanaal. Modelberekeningen laten zien dat mogelijk een klein deel van het water wordt aangedreven door het Systeem van de Utrechtse Heuvelrug.



Figuur 26a: Schematische weergave van de doorsnede Winterswijk-Polder Mijdrecht. De situatie die is afgebeeld gaat uit van een voeding van 200 mm/jaar op de Utrechtse Heuvelrug. De grondwaterstand op de Heuvelrug is lager en het systeem kleiner dan bij figuur 26b.

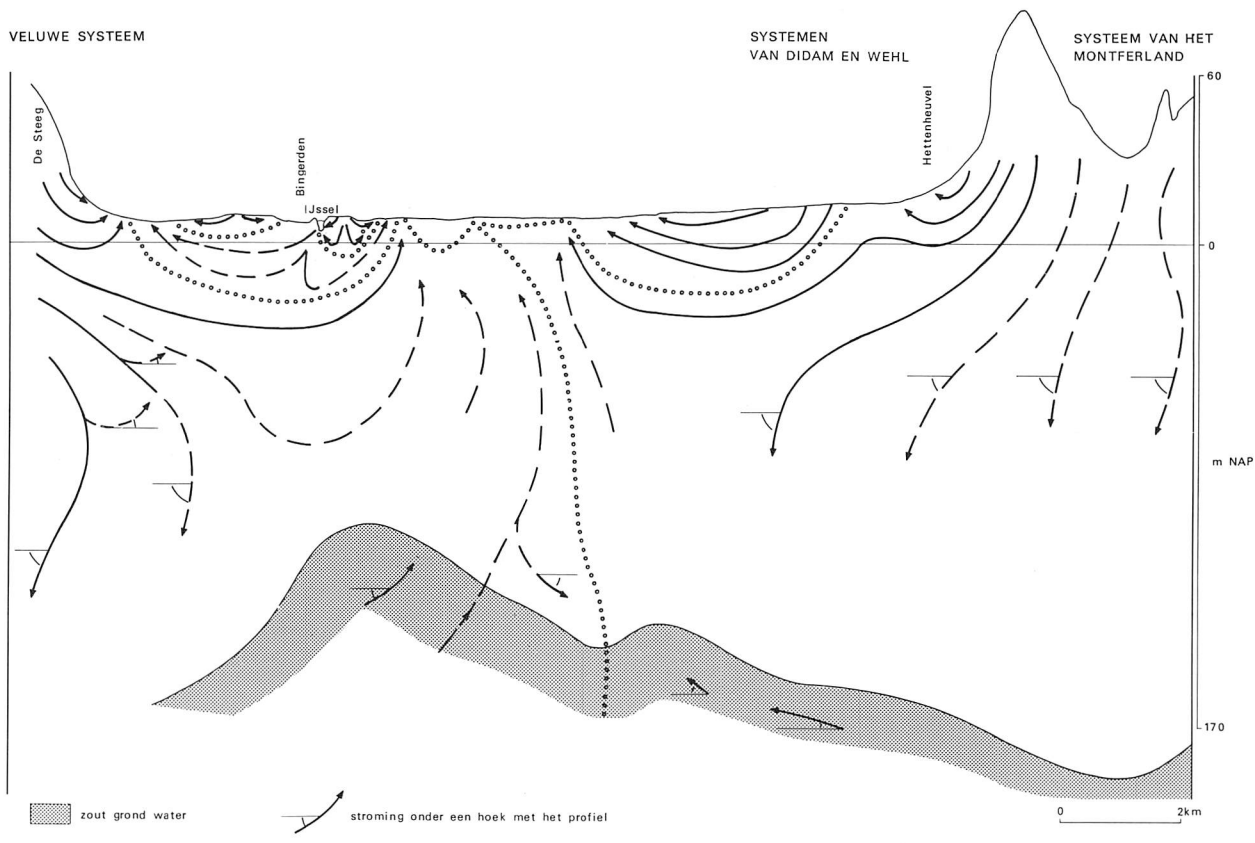


Figuur 26b: Schematische weergave van de doorsnede Winterswijk-Polder Mijdrecht. De situatie die is afgebeeld gaat uit van een voeding van 300 mm/jaar op de Utrechtse Heuvelrug. De grondwaterstand op de Heuvelrug is hoger en het systeem en de fluxen groter dan bij figuur 26a.

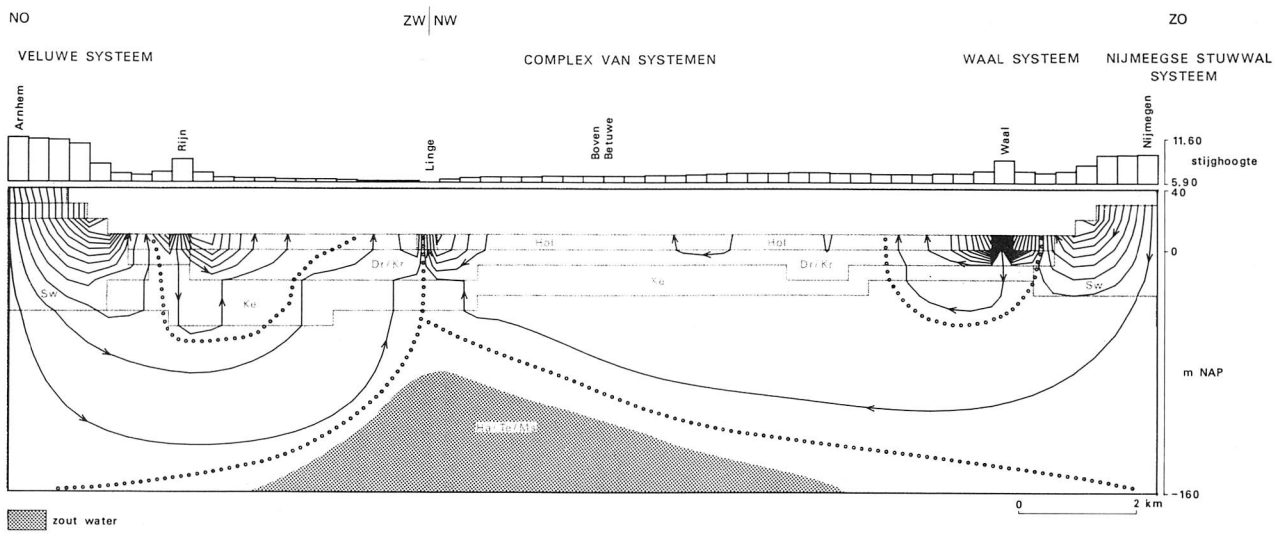
In het profiel is het voorkomen van zout grondwater aangegeven. Het verloop van het zoet-zout grensvlak komt goed overeen met de ligging van de systemen, zoals die uit de modellering is af te leiden.

5.6.5 Profiel Veluwe-Montferland (figuur 27)

Figuur 27 is ontleend aan Engelen (1984). In het profiel zijn de Systemen van de Veluwe en het Montferland de grootste. De invloed van het Veluwe Systeem kan zich plaatselijk tot de oostzijde van de IJssel uitstrekken, waar het grondwater in vensters omhoog kan komen. Boven het Systeem van de Veluwe ligt het Systeem van de IJssel. De IJssel zelf draineert gedurende



Figuur 27: Schematische weergave van de Systemen van de Veluwe en het Montferland. Hierop liggen het IJssel Systeem en de Dekzandsystemen van Didam en Wehl.



Figuur 28: Schematische weergave van de hydrologische situatie in het grote rivierengebied tussen Nijmegen en Arnhem. Het gevonden stromingspatroon wordt ondersteund door chemische karakteristieken van het water (Verkooijen, 1981).

het grootste deel van het jaar het water uit zijn omgeving. Boven het Systeem van het Montferland liggen de dekzandsystemen van Didam en Wehl.

De kwelintensiteiten op de flanken van de stuwwal van het Montferland zijn de laatste decennia sterk afgenomen door waterwinningen.

5.6.6 **Profiel Arnhem-Betuwe-Nijmegen (figuur 28)**

Om de begrenzing van de systeemgrenzen in dit profiel vast te stellen, is naast de modellering met FLOWNET gebruik gemaakt van chemische gegevens van het grondwater (Verkooijen, 1981).

De hydrologische situatie in de doorsnede wordt grotendeels bepaald door de Systemen van de stuwwal van Nijmegen en van de Veluwe. Deze systemen beïnvloeden het diepe grondwater in de Betuwe. Het ondiepe grondwater wordt grotendeels gestuurd door de Systemen van de Waal en de Rijn (in het profiel is de situatie voor hoge waterstanden doorgerekend). Ten noorden van de Linge bevindt zich een kwelvenster van het Veluwe Systeem (Verkooijen, 1981). In het Betuwegebied liggen boven de riviersystemen plaatselijk systemen die vanuit hogere delen worden gevoed (rivierduinen).

6 Grondwaterstromingsstelsels in Noord-Holland

6.1 Pleistocene Systemen

6.1.1 Het Stuwwalsysteem van Wieringen (SW)

Op het vasteland van Noord-Holland bevindt zich één pleistoceen systeem, namelijk dat van de stuwwal van Wieringen. Het infiltratiegebied van dit systeem wordt gevormd door de hoge kopjes langs de Waddenzee-kust; het kwelgebied door de omringende polders.

6.2 Natuurlijke holocene systemen

6.2.1 Het Duinsysteem van Castricum (DC)

Het infiltratiegebied van dit systeem wordt gevormd door de duinen van Noord-Kennemerland. Het water van dit systeem kwelt voornamelijk op in de polders ten oosten van de duinen en gedeeltelijk aan de strandzijde. De grens aan landzijde loopt door de voormalige zeetong bij Petten, door de polders Geestmerambacht en de Beemster, langs het Alkmaardermeer en wordt aan de zuidzijde begrensd door een tong van het Noordzee Systeem die via het Noordzeekanaal binnendringt.

6.2.2 Het Duinsysteem van Zandvoort (DZ)

De duinen tussen IJmuiden en Noordwijk vormen het infiltratiegebied van dit systeem. Het kwelgebied ligt in de polders ten oosten van het duingebied. Het systeem wordt in het noorden begrensd door de binnendringende tong van het Noordzee Systeem. In het oosten loopt de grens door de Haarlemmermeerpolder en in het zuiden wordt het systeem begrensd door het Systeem van de Oude Rijn (OR).

6.2.3 De Duinsystemen van Petten en Den Helder (DP, DH)

De Duinsystemen van Petten en Den Helder zijn twee kleine, van elkaar gescheiden systemen. Ze liggen in de kop van Noord-Holland tegen de Noordzeekust.

6.2.4 Het Systeem van Westfriesland (WF)

Een lange, iets hoger gelegen strook land tussen Hoorn en Schagen vormt het infiltratiegebied van dit systeem. Het is een oude kreekinversierug. Vanuit de hogere polders op deze rug stroomt het water naar de diepere polders ten noorden en ten zuiden ervan. De voor het huidige infiltratiegebied ongewoon grote zoetwatervoorraad van dit systeem bestaat wellicht uit fossiel water. Een zuidelijke uitloper van het systeem reikt tot in de Beemster.

6.2.5 Het Noordzee Systeem (NZ)

Water van het Noordzee Systeem dringt in het noorden van Noord-Holland binnen. De grens loopt door de Zijpe- en Hazepolder, ten oosten van de

Petteerderduinen, en langs de Anna Paulownapolder. Verder loopt waarschijnlijk onder het Castricum Duinsysteem een tak van het Noordzee Systeem door, die zowel in de Schermer als in de Beemster dagzoomt (zie figuur 29).

6.2.6 Het IJsselmeer Systeem (YM)

Water van dit systeem dringt bijna langs de hele IJsselmeerkust Noord-Holland binnen. De grens van dit systeem loopt door de Wieringermeer, door de Polder het Grootslag, door de polders de Beemster en de Purmer en door enkele diepe polders in oostelijk Waterland. Een tong van het IJsselmeer Systeem dringt binnen in het gebied ten noorden van Weesp.

6.3 Kunstmatige holocene systemen

6.3.1 Het Systeem van de Polder Geestmerambacht (GA)

De Polder Geestmerambacht heeft een hoger peil dan de oostelijk ervan gelegen Polder Heerhugowaard. Het water van dit systeem zal dan ook grotendeels in oostelijke richting afstromen. In het westen grenst dit systeem aan het Castricum Duinsysteem. De grens tussen beide systemen is duidelijk herkenbaar aan de opkegeling van zout water tot aan het maaiveld.

6.3.2 Het Eilandspolder Systeem (EP)

De Eilandspolder vormt het infiltratiegebied van dit systeem. Het water van dit vrij ondiepe systeem kwelt op in de diepe polders de Schermer en de Beemster, en in de polders ten zuiden en ten noorden van de Eilandspolder.

6.3.3 Het Complex van Systemen van Amsterdam (AM)

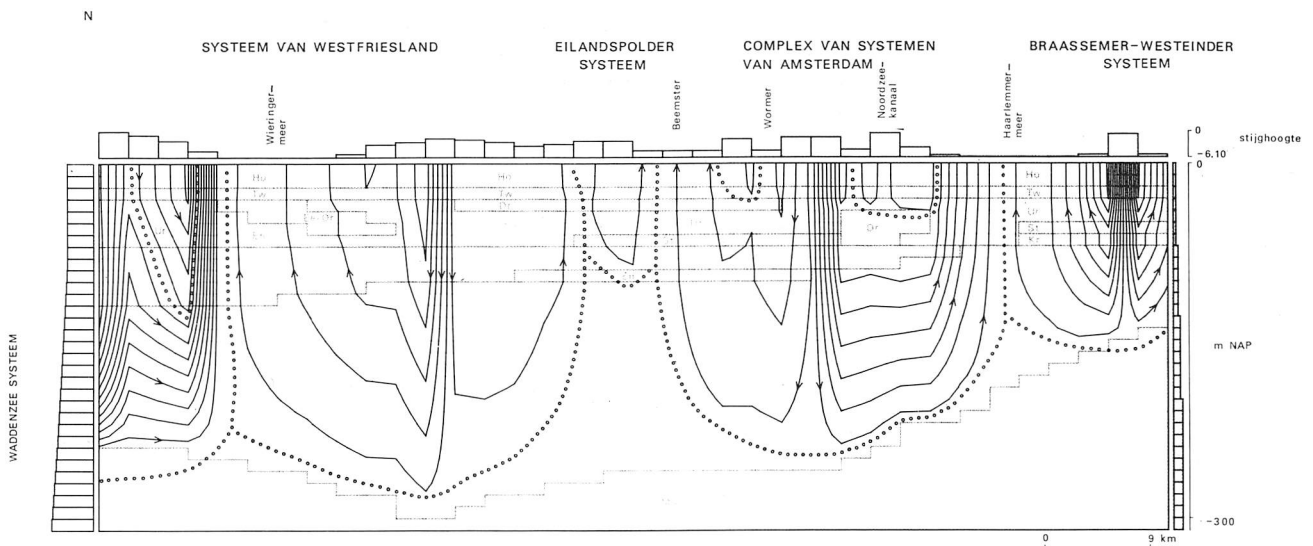
Tot de infiltratiegebieden van dit systeem horen de hogere polders ten noorden van Amsterdam, het Noordzeekanaal, het IJ, de havens, de grachten, de boezemwateren, de plassen Mooie Nel, de Sloterplas, het Nieuwe Meer, de Gaasperplas en de Oudekerkerplas. Vanuit deze wateren stroomt water naar de omringende polders. De diepste polder in het gebied is de Haarlemmermeerpolder, waarin dan ook een grote hoeveelheid water omhoog komt. Verder kwelt water van dit complex op in de Beemster, de Wijde Wormer, en andere diepe polders in het gebied.

6.4 Profielen

6.4.1 Profiel Wieringermeer-Beemster-Amsterdam-Westeinderplassen (figuur 29)

Voor Noord-Holland is een profiel doorgerekend dat vanaf Wieringen in zuidelijke richting via de Wieringermeerpolder, de Eilandspolder en de polders de Beemster en de Wormer naar het havengebied van Amsterdam en de Haarlemmermeerpolder loopt en eindigt in het gebied van de Westeinderplassen. Het profiel is 90 km lang en 310 m diep. De stijghoogten zijn op de randen gecorrigeerd voor dichtheidsverschillen van zout of brak water. In het profiel konden geen dichtheidsverschillen worden ingevoerd. Als gevolg hiervan moet het berekende stroomlijnenpatroon als een benadering van het in werkelijkheid optredende patroon worden beschouwd. In het profiel zijn de volgende systemen zichtbaar:

Het Wieringer Stuwalsysteem: Water van dit systeem infiltreert in het gebied van de Wieringer stuwwal en kwelt op langs de noordelijke rand van de Wieringermeerpolder.



Figuur 29: Schematische weergave van de hydrologie in een noord-zuid doorsnede door Noord-Holland. De stijghoogtes op de randen zijn gecorrigeerd voor de grotere dichtheid van zout water.

Het Waddenzee Systeem: Onder het Wieringer Stuwwalstelsel door loopt een tak van het Waddenzee Systeem naar de noordrand van de Wieringermeerpolder. Daar deze tak een geringe omvang heeft is het kwelvenster van het Waddenzee Systeem niet op de systemenkaart aangegeven.

Het Systeem van Westfriesland: Het water van dit systeem, dat infiltreert in de hogere polders op de kreekinversierug van Westfriesland, stroomt naar de Wieringermeerpolder en naar de diepere polders ten zuiden van het infiltratiegebied. Een tak van het Systeem van Westfriesland kwelt op in de Beemster.

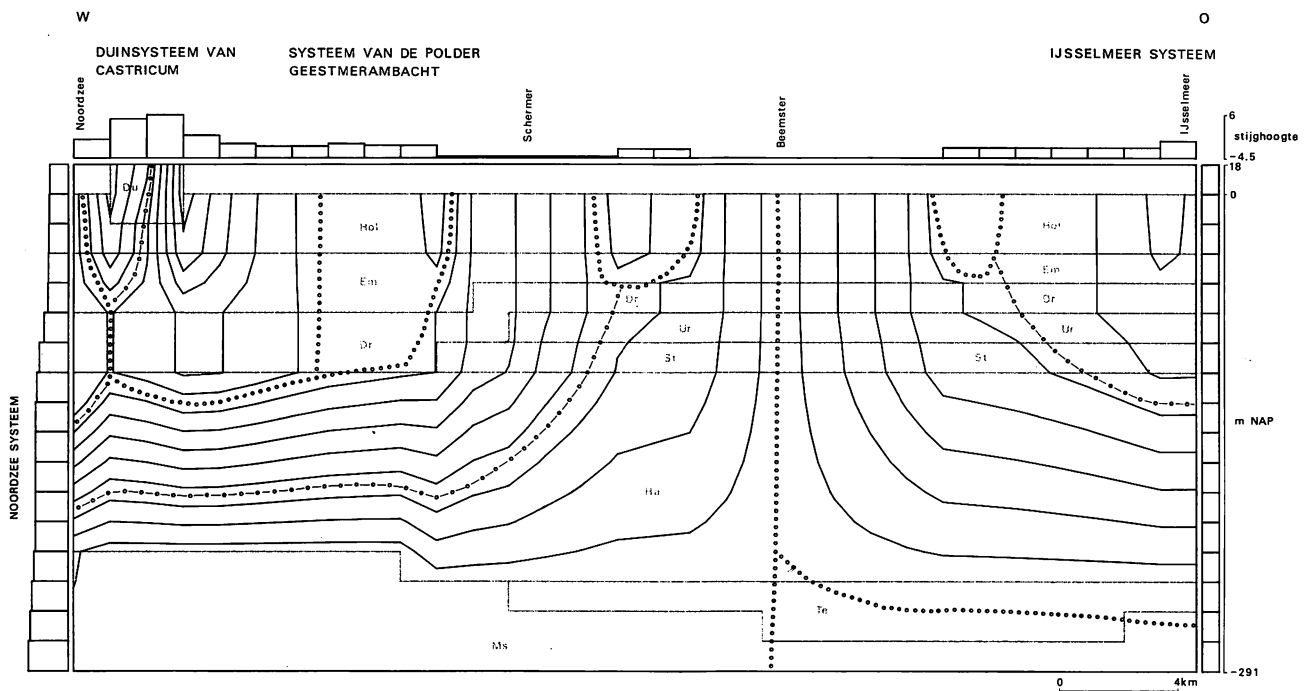
Het Eilandspolder Systeem: Het infiltratiegebied van dit systeem wordt gevormd door de Eilandspolder, vanwaaruit grondwater naar de Beemster en naar de polder ten noorden van de Eilandspolder stroomt. Het systeem is relatief klein en ondiep.

Het Complex van Systemen van Amsterdam: De infiltratiegebieden in het profiel zijn de hogere polders ten noorden van Amsterdam, de hogere polders tussen de Wormer en de Beemster en het Noordzeekanaal met het havengebied van Amsterdam. Kwel vanuit deze gebieden treedt voornamelijk op in de Beemster en de Haarlemmermeerpolder en verder in de polder de Wormer en de diepere polders aan weerszijden van het Noordzeekanaal.

Het Braassemer-Westeinder Systeem: Vanuit de Westeinderplassen treedt grondwaterstroming op naar de Haarlemmermeerpolder en andere omringende polders.

6.4.2 Profiel Noordzee-Beemster-IJsselmeer (figuur 30)

Dit profiel loopt vanaf de Noordzee in oostelijke richting via Alkmaar, de Polder Geestmerambacht, de Schermer en de Beemster naar het IJsselmeer. Het profiel is 37,5 km lang en 310 m diep. Op de westelijke rand van dit profiel zijn de stijghoogten gecorrigeerd voor de dichtheid van zout of



Figuur 30: Schematische weergave van de hydrologische situatie in een oost-west doorsnede door Noord-Holland. De stijghoogten op de westrand (Noordzeekust) zijn gecorrigeerd voor de grotere dichtheid van zout (zee)water. De dichtheid in het profiel is niet gecorrigeerd (zie ook 1.2 en appendix B).

brak water. In het profiel kon niet voor dichtheidsverschillen worden gecorrigeerd. Het stroomlijnenpatroon in het profiel is een benadering van de werkelijke situatie. De volgende systemen zijn zichtbaar in het profiel:

Het Duinsysteem van Castricum: Vanuit de duinen vindt grondwaterstroming plaats in oostelijke richting naar de Schermer, in westelijke richting naar de Noordzee.

Het Systeem van de Polder Geestmerambacht: Het profiel snijdt nog net het zuidelijke deel van dit systeem aan, daar waar het ligt ingebed in het Duinsysteem van Castricum. Het infiltratiegebied van dit systeem wordt gevormd door de Polder Geestmerambacht. Vanuit deze polder stroomt het water gedeeltelijk naar de wat lagere, westelijk ervan gelegen polders. Het grootste deel van de stroming vindt echter plaats in oostelijke richting naar de Schermer.

Het Eilandspolder Systeem: De Eilandspolder is het infiltratiegebied van dit systeem. Het water dat in deze polder geïnfilteerd is, kwelt grotendeels op in de Beemster. Een klein gedeelte kwelt op in de Schermer.

Het Noordzee Systeem: Onder het Castricum's Duinsysteem bevindt zich een stroomtak van het Noordzee Systeem, die zich splitst in een tak die opkwelt in de Schermer en een tak die opkwelt in het westelijke deel van de Beemster.

Het IJsselmeer Systeem: Vanuit het IJsselmeer vindt stroming plaats naar de Beemster. In het profiel is verder een klein systeem zichtbaar, waarbinnen het water vanuit de aangrenzende hogere polders naar de Beemster stroomt. Dit systeem is niet op de systemenkaart weergegeven.

7 Grondwaterstromingsstelsels in Zuid-Holland

De ontwikkeling van de stromingsstelsels en de verspreiding van water-soorten in de ondergrond van Zuid-Holland kan, evenals in vele andere delen van het land, slechts goed begrepen worden vanuit de laatpleisto-cene en holocene ontwikkeling van het gebied en de sterke menselijke ingrepen in het verleden. Een gedetailleerde beschrijving van de systemen in dit gebied door De Ruiter (1986, 1988) vormt de basis voor het volgende samenvattende overzicht.

Rond 4100 voor Christus ontstond achter een complex van strandwallen en duinen een wadachtig gebied met zout en brak water waardoor de ondergrond verziltte. Ongeveer duizend jaar later was de zoute invloed in het oppervlaktewater sterk teruggedrongen en beperkt tot zeegaten bij IJmuiden, Hoek van Holland en de monding van de Rijn bij Katwijk. De verzoeting ging gepaard met laagveenvorming tussen rivierarmen met oeverwallen. In de Romeinse tijd waren op het laagveen tussen de riviertakken inmiddels hoogveenkussens gegroeid. Daarna werden de veel bredere jonge duinen gevormd en begonnen veenontginningen, inpolderingen, droogmakerijen en boezemwaterbeheer. Vanaf 4100 voor Christus tot nu steeg het zeeniveau ongeveer vijf meter.

De hydrologische verziltings- en verzoetingsfasen in dit gebied en in West-Nederland in het algemeen kunnen vergaand ontrafeld worden door een combinatie van hydrologische systeemanalyse en hydrochemische analyses met behulp van de classificatie van Stuyfzand (1986).

De volgende typen stromingsstelsels kwamen van nature in dit gebied voor, voordat de invloed van de mens begon:

- a. de grote Haagse en Noordwijkse zoete duinwaterstromingsstelsels met zoetwaterzakken in een zout/brakke omgeving;
- b. het zoete stromingsstelsel van het stuwwallencomplex van de Utrechtse Heuvelrug in het oosten van het gebied;
- c. lintvormige zoete systemen van rivieren met hun oeverwallen;
- d. lensvormige zoete systemen gevoed door hoogveenkussens.

Al deze systemen waren ingebed in een ondergrond van weinig of niet stromend brak tot zout water. In het midden van de Alblasserwaard komt zout thermomineraal water vanuit het Carboon omhoog (figuur 33).

7.1 Systemen gevoed vanuit het Pleistoceen

In het centrum van de oostelijke grotere poldergebieden tussen de Rijn- en Maastakken bevinden zich op vaak geringe diepte zeer zoete watersoorten, die afkomstig moeten zijn van de stuwwalcomplexen van de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug en van de hogere Brabantse zandgronden. Betreft het hier voor een deel thans nog actieve overdekte stroomtakken van deze stelsels, voor een ander deel is dit waarschijnlijk laatpleistoceen water uit diezelfde gebieden, dat gestagneerd is onder de holocene bedekking en door de zeespiegelrijzing. Nu is het door de ten dele kunstmatig geactiveerde stromingsstelsels vanuit de rivieren weer in gang gezet en in die stromingsstelsels opgenomen.

7.2 Systemen gevoed vanuit het Holoceen

Door de ingrepen van de mens ontstonden aanzienlijke hoogte- en peilverschillen, die de oorspronkelijke natuurlijke toestand drastisch wijzigden en ook tot geheel nieuwe stromingsstelsels aanleiding gaven. Polders en boezemwateren zijn de belangrijkste factoren bij het ontstaan van deze nieuwe stelsels. De oorspronkelijke waterkwaliteitsverdeling in de ondergrond is door deze wijzigingen in het stromingsbeeld in veel gevallen nog niet in evenwicht met het huidige stromingspatroon. Verzoetings- en verziltingsfronten bewegen zich door de stromingsstelsels en duiden op een niet-stationaire chemische situatie, terwijl de stroming ten dele al wel stationair kan zijn geworden.

7.2.1 Het Haagse Duinsysteem (HD)

Dit zoete systeem heeft, door het hoogteverschil met het vroeger aangrenzende natuurlijke veenlandschap en later met het polderlandschap, een sterk verzoetende werking uitgeoefend in oostelijke richting. Het stelsel loopt onder de Oude Rijn door en heeft een venster aan de noordzijde daarvan. Door kunstmatige infiltratie van rivierwater in combinatie met duinwaterwinning is bij Den Haag binnen de oorspronkelijke zoetwaterzak een afzonderlijk, complex en kunstmatig stromingsstelsel ontstaan.

7.2.2 Het Zandvoortse Duinsysteem (DZ)

Dit systeem is door het Oude Rijn Systeem gescheiden van het Haagse Duinsysteem. Een belangrijk deel van de afstroming gaat in oostelijke richting naar de Haarlemmermeerpolder. Kunstmatige systemen van de Leidse en Amsterdamse duinwaterwinningen met kunstmatige infiltratie zijn in dit systeem 'ingelaten'.

7.2.3 Het Oude Rijn Systeem (OR)

Dit systeem volgt een oude Rijnloop met kleiige en zandige afzettingen door het vroegere veengebied. Deze loop vormt nu een inversierug in het landschap en ligt met zijn boezempeil ongeveer 1,5 m boven de aangrenzende polders. Deze rivierstrook vormt een duidelijk infiltratiegebied van zoet water. Het geïnfilterde zoete water heeft zout en brak water verdrongen, dat hierdoor nu lokale opkegelingen vertoont (bijvoorbeeld bij Leiden).

7.2.4 Het Braassemer-Westeinder Systeem (BW)

De voeding van dit systeem heeft plaats vanuit meren en kanalen op boezempeil, vanwaar het water naar de ingesloten vele meters lager gelegen polders stroomt. Vanuit de Westeinderplassen is er een duidelijke zoete kwelstroomtak naar de Haarlemmermeerpolder.

7.2.5 Het Zoetermeer Systeem (ZS)

Dit systeem wordt eveneens gevoed vanuit boezemwater en hogere gespaard gebleven veenrestgebieden. De infiltratiemogelijkheden zijn er beperkter en het systeem is dan ook minder diep verzoet dan het Braassemer-Westeinder Systeem. Het Zoetermeer Systeem wordt, behalve in het westen, aan alle zijden begrensd door systemen die gebonden zijn aan Rijntakken.

7.2.6 Het Hollandse IJssel Systeem (HY)

Dit systeem is van het Zoetermeer Systeem gescheiden door een zoute opkegeling. De grenzen van het Hollandse IJssel Systeem, met het Oude

Rijn Stelsel in het noorden en het Stelsel van de Rijn in het zuiden, zijn door gebrek aan gegevens nog enigszins onduidelijk.

7.2.7 Het Stelsel van de Rijn (RS)

Dit lintvormige riviersysteem vormt langs de Lek de voortzetting van het Rijngedeelte vanaf de Duitse grens en voedt de polders aan weerszijden van deze rivier. Bij de stuw van Hagestein vormt een combinatie van een hoger stuwpeil en een oude geul een extra zone van infiltratie van rivierwater. Langs dit systeem zijn door de winning van oevergrondwater een aantal kleinere afzonderlijke kunstmatige stromingsstelsels ontstaan.

7.2.8 Het Stelsel van de Waal (WL)

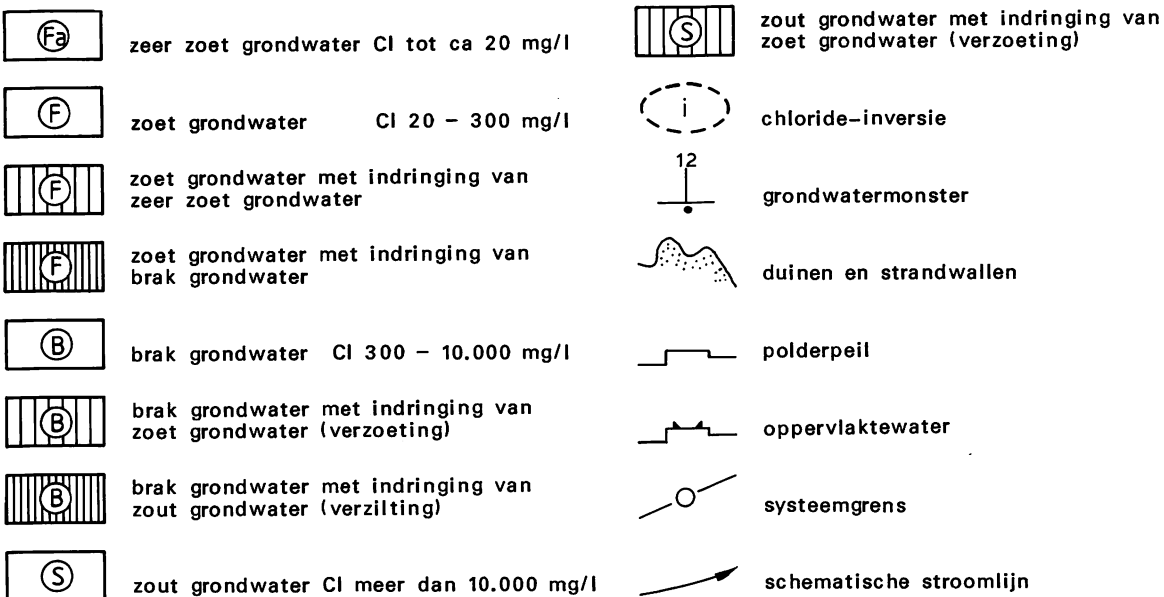
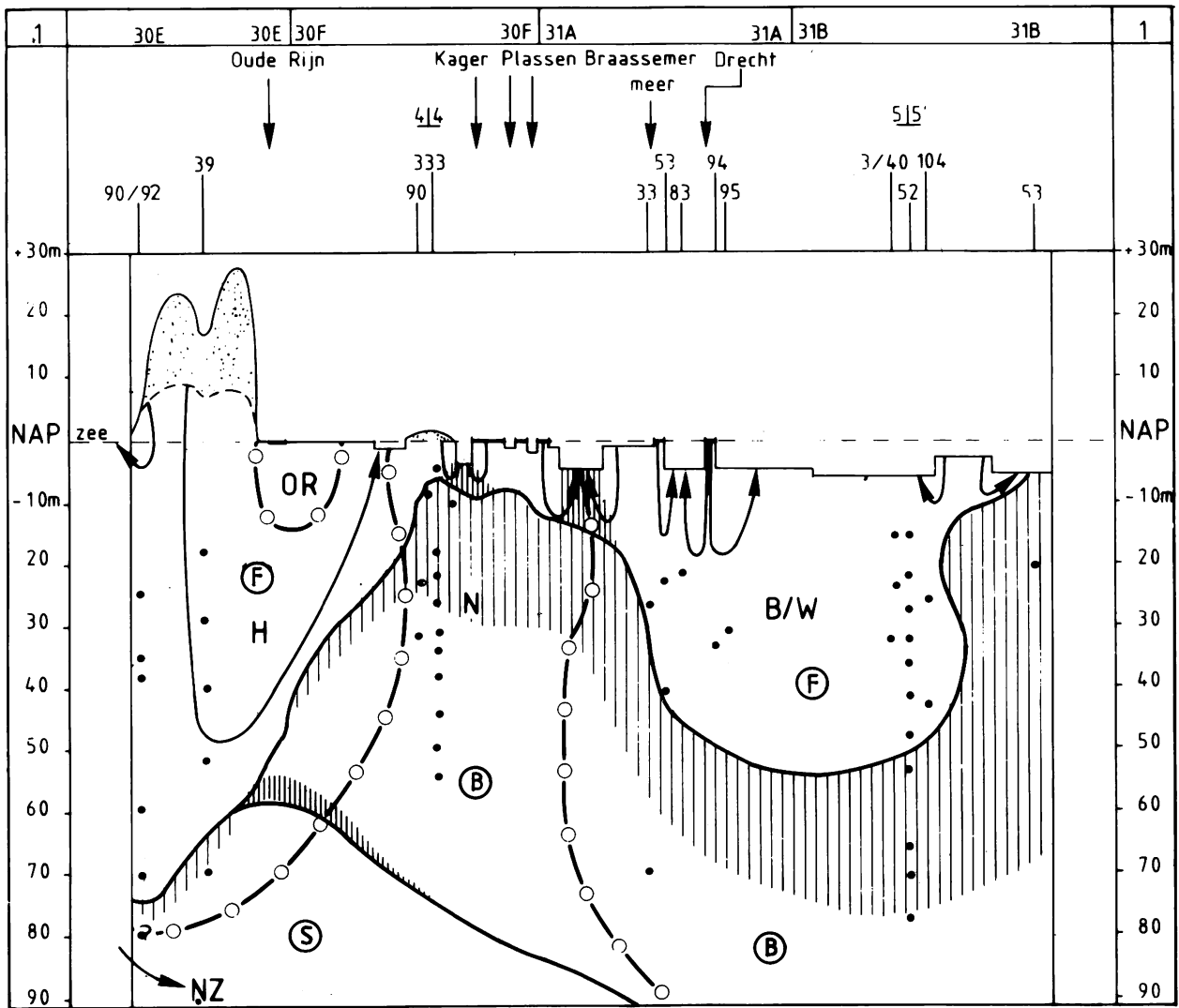
Dit lintvormige riviersysteem, vanaf Nijmegen tot Rotterdam langs Waal, Beneden Merwede, Noord en Nieuwe Maas, is door de sterk wisselende rivierpeilen tamelijk dynamisch, vooral in de smalle stroken met intensieve dijkwalen. De duidelijke kwaliteitsverslechtering van het Rijnwater wordt onder andere weerspiegeld in de hogere chloridegehalten van het jongere infiltratiewater.

7.2.9 Het Maas Stelsel (MS)

De uitloper van het Maas Stelsel, dat vanaf de Belgische grens door Nederland loopt, reikt via Dordtse Kil en Oude Maas tot onder Rotterdam. De verschillen in waterkwaliteit tussen Rijn en Maas vormen een hulpmiddel bij de begrenzingen van de systemen. Op de grenzen tussen de verschillende zich indringende zoete stromingsstelsels bevinden zich in de ondergrond kegel- of walvormige opwelvingen in de zoet-brak-zout grensvlakken. Deze zijn deels passief ontstaan door verdringing door het zoete water en deels actief door toestroming naar zones met lage potentialen.

7.3 Profielen

De profielen in Zuid-Holland zijn ontleend aan een hydrologische systeemstudie met het accent op hydrochemische informatie (De Ruiter, 1986, 1988). De gebruikte legenda wijkt af van de legenda die in dit rapport wordt gehanteerd. Het stroomlijnenpatroon is slechts schematisch aangegeven en de profielen zijn niet numeriek gemodelleerd. In een afzonderlijke studie is voor het noordelijk deel van deze provincie ter verificatie een modelstudie met FLOWNET en FLOSA uitgevoerd (Promes, 1988). In de profielen zijn met stippen de filters aangegeven, waarvoor hydrochemische informatie aanwezig is. Daarnaast is de scheiding tussen zoete en brak/zoute watersoorten met eventuele verziltende of verzoetende overgangszones (gearceerd) aangegeven met behulp van de classificatiemethode volgens Stuyfzand (1986). In deze profielen van West-Nederland is goed te zien dat waterkwaliteitsgrenzen niet altijd samen hoeven vallen met grenzen tussen stromingsstelsels. Er kan immers een watertype onder vroegere hydrologische condities zijn gevormd, dat later, bij wijziging van de stromingspatronen, kan worden opgenomen in een andere richting binnen hetzelfde stelsel of zelfs in het stromingsveld van een ander systeem. Terwijl het stromingsveld zelf zich snel aan nieuwe randvoorwaarden aanpast, wordt een ruimtelijk grondwaterkwaliteitspatroon dat in een voorafgaande situatie is ontstaan, dikwijls veel minder snel aangepast.



Figuur 31: Weergave van hydrologische systemen in de sectie Wassaenaarse Duinen-Uithoorn. Indeling is gemaakt op grond van verschil in waterkwaliteit en historie van het gebied (De Ruiter, 1988).

7.3.1 Profiel Wassenaarse Duinen-Kagerplassen-Braassemermeer-Uithoorn (figuur 31)

Haagse Duinsysteem: In dit profiel vormt de zoetwaterlens van het Haagse Duinsysteem, die hier tot 80 m diepte reikt, het oudste natuurlijke holocene systeem. Het jonge kunstmatige infiltratie- en winningssysteem binnen deze duinen is niet aangegeven op deze schaal. In het verleden heeft het systeem zich oostwaarts uitgebreid, als gevolg van veenontginningen, polderbemalingen en de aanleg van droogmakerijen in het midden van West-Nederland. Het systeem heeft een subregionale stroomtak naar een venster ten noordoosten van Katwijk, waar de stroming onder het Oude Rijn Systeem doorgaat.

Noordzee Systeem: Dit zoute intruderende systeem is hier na de ontginning van West-Nederland ontstaan door de kunstmatig geschapen potentiaalgradiënt tussen de Noordzee en de lagere bemalen polderzone ten oosten van de duingordel. De sterkte en omvang op grotere diepte van dit systeem zijn door een gebrek aan gegevens niet goed bekend. De opkegeling van het zout/brakke water in zone 'N' op figuur 31 kan deels worden toegeschreven aan het Noordzee Systeem, deels aan een verdringing van ouder brak water door de zich uitbreidende Systemen van de Haagse Duinen en van Braassemer-Westeinder.

Braassemer-Westeinder Systeem: Dit in het verleden ontstane complex van poldersystemen wordt aangedreven en gevoed door een oppervlaktewaterstelsel op boezempeil (oude veenriviertjes, kanalen, meren). Wegzijging uit dit oppervlaktewaterstelsel vindt plaats naar het mozaïek van aangrenzende polders met verschillende polderpeilen. Dit complex van systemen heeft de ondergrond verzoet. Dat proces gaat deels nog door, daar waar via verdringing door infiltrerend boezemwater zoute of brakke kwel uit de polders wordt uitgeslagen.

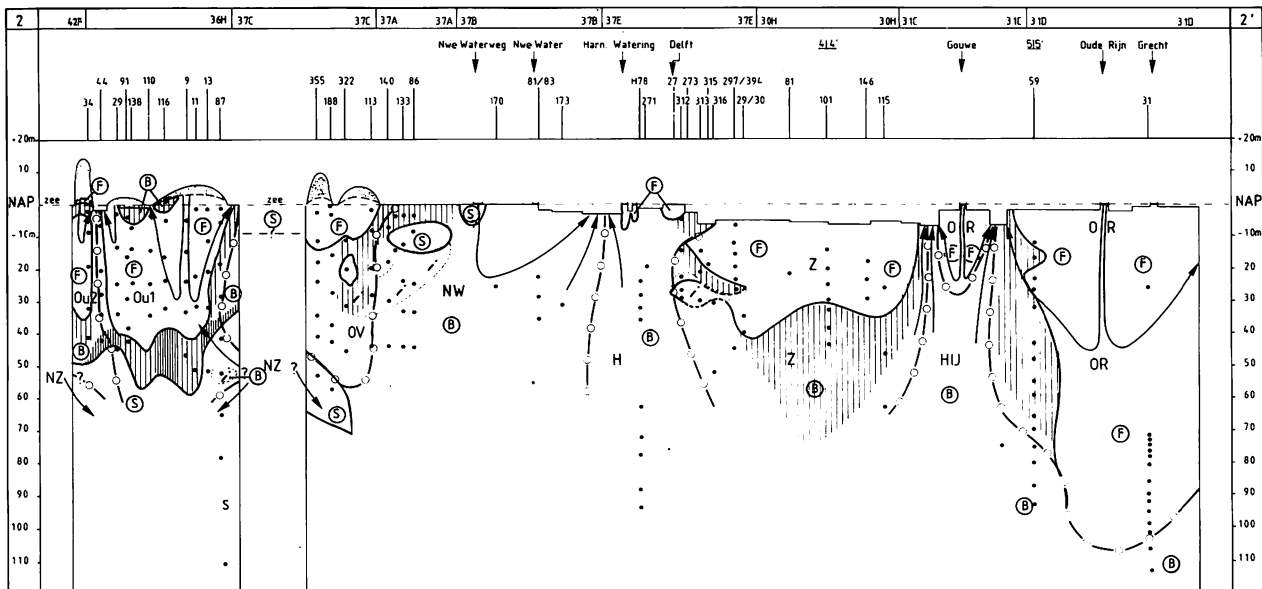
7.3.2 Profiel Goeree-Oostvoorne-Delft-Woerden (figuur 32)

Systemen van de westelijke en oostelijke duinen van Goeree en van de duinen van Oostvoorne: De zoetwaterlensen onder de duinen van Goeree en Oostvoorne zijn de oudste natuurlijke holocene systemen, in dynamisch evenwicht ingebed in het zoute Noordzee Systeem. Het Systeem van de Goereese Duinen bestaat uit twee deelsystemen, half gescheiden door een kleine ondiepe tong van het Noordzee Systeem, die echter in dit profiel niet afzonderlijk is weergegeven.

Noordzee Systeem: Dit zout/brakke systeem begrenst de duinsystemen aan de onderzijde en de zeezijde en dringt met een grote stroomtak (in het profiel als afzonderlijk Nieuwe Waterweg Systeem aangeduid) via de Nieuwe Waterweg binnen achter de duingordel in Voorne en Delfland.

Haagse Duinsysteem: Het zoete Haagse Duinsysteem heeft een uitloper naar het lage deel van Delfland in de richting Rotterdam, die de Nieuwe Waterweg-tak van het Noordzee Systeem scheidt van het Zoetermeer Systeem.

Oude Rijn Systeem: Dit zoete, intruderende, door boezemwater gevoede systeemcomplex volgt in grote lijn de zandige en kleiige stroomgeulen van het riviersysteem van de Oude Rijn. Het is in aanleg een natuurlijk holocene systeem, samenhangend met het fluviaal reliëf dat nog versterkt is door reliëfomkering ten gevolge van oxydatie, klink en bemaling van aangrenzende veengebieden.



Figuur 32: Weergave van de hydrologie in de sectie Goeree-Woerden.

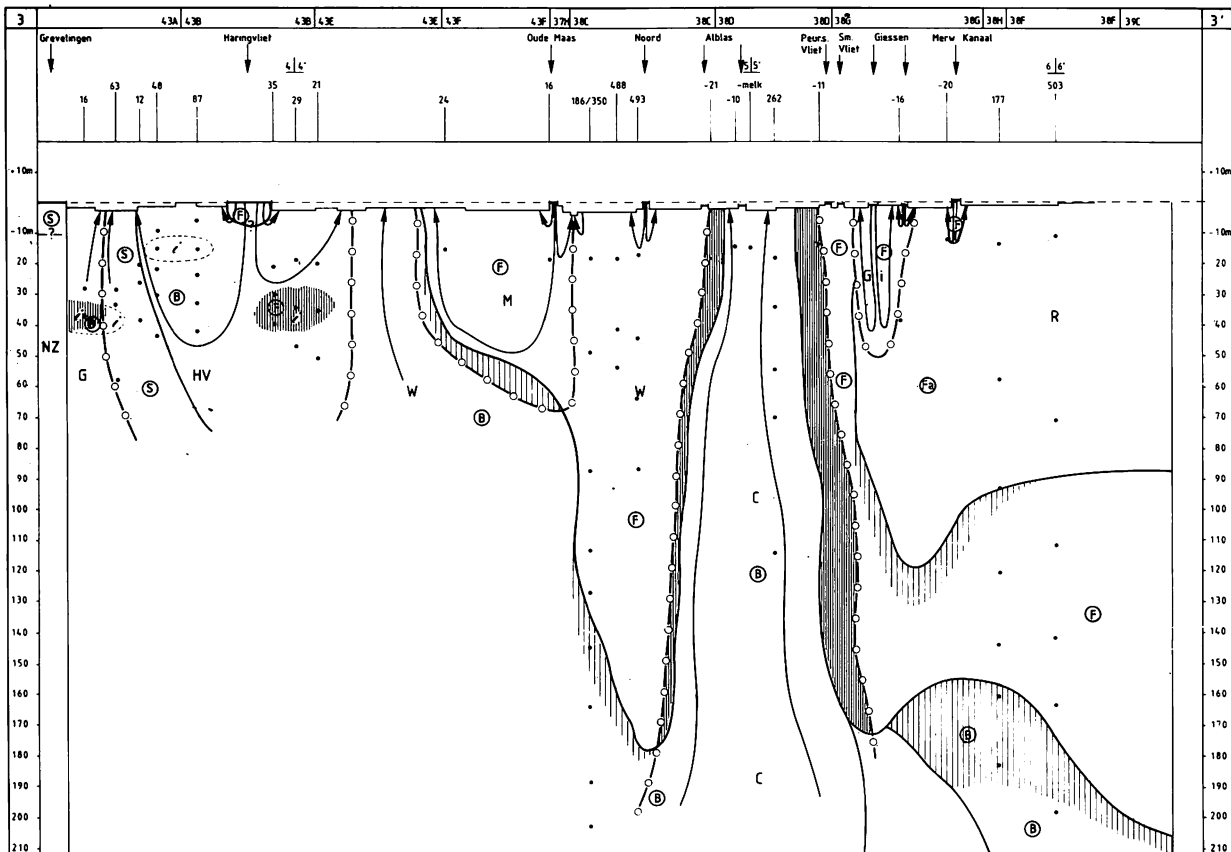
Zoetermeer System: Dit is waarschijnlijk een kunstmatig complex van poldersystemen. De omvang lijkt echter te groot, om geheel vanuit het beperkte netwerk van boezemwateren ter plaatse te kunnen zijn ontstaan. Het is niet uitgesloten dat een deel van het zoete water in dit systeem van oudere, voorhistorische herkomst is. Dit hangt mogelijk samen met een indringing in dit gebied vanuit een vroeger hoogveenkussen, voorafgaand aan de ontginning en inpoldering. Nader onderzoek is hier gewenst.

Inversies: In het profiel komen met een 'i' aangegeven inversies voor, waar zoet water onder zout water wordt aangetroffen. Deze in principe onstabiele ruimtelijke verdeling van watertypen is een door latere stroming nog niet geheel opgeruimd overblijfsel van een vroegere hydrologische situatie. Het betreft hier waarschijnlijk zoet pleistoceen water, dat tijdens een lagere zeespiegelstand in die positie is gekomen door grondwaterstroming vanuit het achterland. Het is vervolgens bij de snelle holocene zeespiegelrijzing onder slechter doorlatende jongere deklagen terecht gekomen, geïsoleerd en gedeeltelijk bewaard gebleven. Soortgelijke situaties komen ook elders in West-Nederland voor. Deze inverse zoete waterlichamen zijn in recente stromingsstelsels opgenomen en zullen uiteindelijk uitgespoeld worden.

7.3.3 Profiel Overflakkee-Hoekse Waard-Alblasserwaard-Beneden Betuwe (figuur 33)

Carboon System: In het centrum van de Alblasserwaard komt een pijler van thermo-mineraal water vanuit het Carboon omhoog tot vlak onder het maaiveld. Deze wordt omspoeld door de in aanleg natuurlijke holocene Systemen van Waal en Rijn. Aan de randen zijn verziltende overgangszones zichtbaar.

Waal, Rijn, Maas, en Giessen Systemen: Deze van oorsprong natuurlijke holocene systemen langs de diverse takken van de Rijn en Maas zijn door de bedijkingen van de rivieren en de polderbemalingen in het verleden geïntensiveerd. De fluxen zijn in het algemeen het grootst in smalle stroken binnendijs langs de rivieren en fluctueren met de wisse-



Figuur 33: Hydrologische weergave van de doorsnede door Overflakkee-Beneden Betuwe.

lende rivierpeilen. Grondwaterwinningen langs deze riviertakken vormen kleinere afzonderlijke kunstmatige stromingsstelsels die hierop gesuperponeerd zijn. Ze worden geheel of gedeeltelijk door oeverfiltraat gevoed.

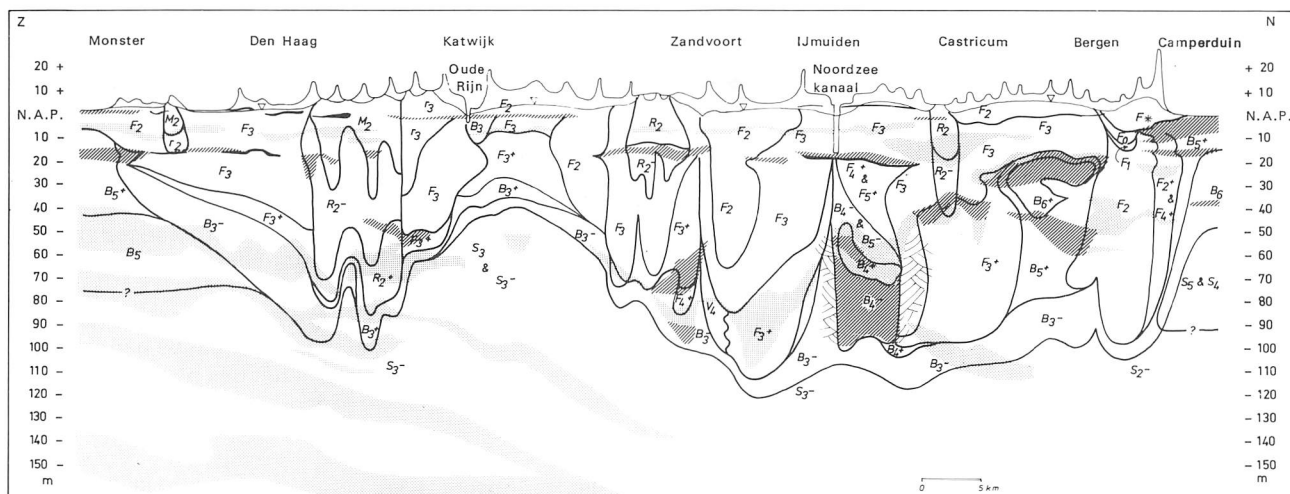
Grevelingen Systeem: Dit zout/brakke estuariene systeem intrudeerde voor de afsluiting van de Grevelingen onder getijdewerking in de aangrenzende lage polders van Flakkee. Door de afsluiting is het peil nu gestabiliseerd. Het water zal langzaam van kwaliteit veranderen en, als gevolg daarvan, ook de van hieruit gevoede kwelstromen.

Haringvliet Systeem: Het Haringvliet Systeem was oorspronkelijk zout tot brak en ook nu nog is dat grotendeels de samenstelling van het grondwater in de aangrenzende polders. Na de afsluiting is het Haringvliet snel verzoet door Waalwater. Het opdringende zoete front zal de zout/brakke vulling van dit stromingsdomein geleidelijk verzoeten door verdringing. Ook hier zullen de fossiele zoetwatervoorkomens in de inversies uitgespoeld worden door het indringende Haringvlietwater.

7.3.4 Profiel door de Hollandse duinen (figuur 34)

In het profiel door de jonge duinen is de zoetwaterlens op vijf plaatsen relatief dun. Dit zijn de oude zeegaten met of zonder smalle duingordel bij Monster, Katwijk en Camperduin, een stagnerende kleirijke zone tussen Castricum en Bergen en het industriegebied van IJmuiden, met een vroeger sterke uitputting van de zoetwatervoorraad, en een sinds 1885 sterk drainerend Noordzeekanaal.

De chemische karakteristieken van het grondwater, hier ingedeeld volgens een vereenvoudigde classificatie van Stuyfzand, verschaffen informatie over bewegingen van zoet- en zoutwaterfronten die hebben plaatsgevonden of nog plaatsvinden (een '-' achter het watertype duidt op verzilting, een '+' op verzoeting). Onder de zoetwaterlens hebben het brakke en het zoute water verziltende kenmerken. Hierboven, aan de onderzijde van de zoetwaterlens, is het overheersende watertype 'F3+', wat wijst op een zoetwaterindringing die aan de verzilting vooraf ging. Op het verzoetende F3+-water liggen de evengewichtswatertypen 'F2' en 'F3'. Duinwater met een zeer lage alkaliteit, de typen 'F*' en 'F1', komt alleen voor in de kalkarme duinen ten noorden van Bergen. De belangrijkste hydrologische voedingsgebieden hebben tot op grote diepte evengewichtswater. Dit geldt speciaal voor de watermassa's met betrekkelijk lage alkaliteit van het type 'F2'. De lage alkaliteit wijst op een geringe wisselwerking met slechtdoorlatende lagen, omdat die in het algemeen de alkaliteit verhogen. Kunstmatig geïnfiltrerd oppervlaktewater van elders is op een aantal plaatsen diep doorgedrongen, met name bij Den Haag, Katwijk, Zandvoort en Castricum. Bij Monster is een kunstmatige infiltratie vanuit bekkens pas later begonnen en heeft het infiltraat het tweede watervoerende pakket nog niet bereikt. Maaswater verving in 1976 het Rijnwater bij Den Haag en in 1983 het polderwater bij Monster. Het Rijnwater in het tweede watervoerende pakket heeft in het algemeen verziltende kenmerken ('R2-'), als het duinwater met lage natrium- en chloridegehalten verdringt (bij Zandvoort en Castricum). Bij Den Haag verdrong het eerste Rijnwater (1955) bij aankomst in het tweede watervoerende pakket brak water (oorspronkelijk het gevolg van overonttrekking). Het watertype is hier derhalve verzoetend ('R2+').



Figuur 34: Lengteprofiel door de Hollandse duingordel met de ruimtelijke verdeling van watertypen in de periode 1977-1987, gebaseerd op 500 monsters uit 100 piëzometernesten. De watertypenclassificatie is vereenvoudigd door het weglaten van subtypen. F = zoet, B = brak, S = zout, R = Rijn en M = Maaswater. *), 0 - 5 is een maat voor de totale hardheid, '+', '-' = verzoetend resp. verziltend water. Voorbeelden: B3- = brak, verziltend water met matig hoge alkaliteit; F5+ = zoet, verzoetend water met zeer hoge alkaliteit; S2 = zoet evengewichtswater met matig alkaliteit.

Gebruikte afkortingen in figuur 31, 32 en 33:

Namen van hydrologische systemen (tussen haakjes de naam van het systeem, zoals op bijlage 1 en in appendix C is aangegeven):

Brakke en zoute systemen

NZ	Noordzee Systeem
NW	Nieuwe Waterweg Systeem (NZ)
HV	Haringvliet Systeem
G	Grevelingen Systeem (GS)

Duinsystemen

N	Noordwijkse Duinsysteem (DZ)
H	Haagse Duinsysteem (HD)
OV	Duinsysteem van Oost-Voorne
Ou1	Ouddorp Duinsysteem (OG)
Ou2	West-Ouddorp Duinsysteem (WG)

Rivier- en meersystemen

B/W	Braassemer-Westeinder Systeem (BW)
OR	Oude Rijn Systeem
HIJ	Hollandse IJssel Systeem (HY)
R	Rijn Systeem (RS)
Gi	Giessen Systeem (GS)
W	Waal Systeem (WL)
M	Maas Systeem (MS)

Overige systemen

Z	Zoetermeer Systeem (ZS)
Ro	Rotterdam Systeem (SR)
C	Carboon Systeem

8 Grondwaterstromingsstelsels in het zuidwestelijke Deltagebied

8.1 Zeeuws-Vlaanderen

Vanuit Vlaanderen dringen drie zoete grondwaterstromingsstelsels Zeeuws-Vlaanderen binnen: in het westen het Sluis Systeem (SL), daarnaansluitend het Jeronimuspolder Systeem (JP) en verder naar het oosten het Systeem van St. Jansteen (JS).

In het midden van Zeeuws-Vlaanderen vormt het Kanaal van Gent naar Terneuzen het voedingsgebied voor het gelijknamige systeem (GT) met een westelijke stroomtak in de richting van de Braakman en een oostelijke tak naar De Vogel.

De noordelijke begrenzing van de vier genoemde systemen vormt in grote lijn de zuidelijke begrenzing van het Westerschelde Systeem (WE). Dit zoute tot brakke systeem dringt vanuit het noorden met een viertal takken Zeeuws-Vlaanderen binnen:

- a. de Breskens-tak (BR) tussen en mogelijk onder de Systemen van Cadzand (CZ) en van de Hoofdplaat (HP);
- b. de Biervliet-tak (BI) in de richting van de Passageule en de Braakman;
- c. de Eendragts-tak (ET) ten oosten van het kleine Systeem van Terneuzen-Zaamslag (TZ) in de richting van de Orthenesche Kreek en De Vogel;
- d. de Saeftinghe-tak (ST) ten oosten van het kleine Systeem van Kloosterzande (KZ), eveneens in de richting van De Vogel.

De vier kleinere systemen langs de Westerschelde, die het Westerschelde Systeem opdelen in een aantal stroomtakken, zijn het gevolg van een relatief hogere terreinligging, zodat lokaal toch infiltratie kan optreden. Het Duinsysteem van Cadzand (CZ) heeft nog een klein zoet kerntje bij de duinrest aan de kust, maar is verder grotendeels gevuld met brak tot zout water.

Het Hoofdplaat Systeem (HP) ten oosten van Breskens heeft eveneens een verzoetende brakke kern en stroomt in de richting Oostburg.

Een klein systeem (TZ) met een zoete kern wordt gevormd door het hogere deel van Terneuzen en de Zaamslag.

Een klein lokaal verzoetend systeem (KZ) is gelegen in het hogere terrein-gedeelte van Kloosterzande aan de Westerschelde.

8.2 Walcheren, Noord- en Zuid-Beveland

De belangrijke oppervlaktewatersystemen die als voedingsgebieden voor de landinwaarts gerichte grondwaterstromingsstelsels fungeren, zijn respectievelijk:

- a. de zoute Noordzee (NZ) met een gemiddeld peil van ongeveer 0 m NAP;
- b. de zoute tot brakke Westerschelde (WE) met een gemiddeld peil van 5 cm +NAP;
- c. de zoute Oosterschelde (OS) met een gemiddeld peil van ongeveer 1 cm -NAP;
- d. het brakke Veerse Meer (VM) met een zomerpeil rond NAP en een winterpeil van ongeveer 70 cm -NAP.

Binnen de dijken vormen hogere jongere polders en kreekinversieruggen kleinere gravitatieve zoete en brakke grondwaterstromingsstelsels met

afvoeren naar nabijgelegen diepere polders. Op Walcheren komen zoetwaterzakken voor onder de duinen. In het oosten van Zuid-Beveland dringt het zoete water binnen vanuit het infiltratiegebied van de Brabantse wal bij Bergen op Zoom.

8.2.1 Walcheren

Onder de zuidwestelijke en noordwestelijke duinen van Walcheren komen twee zoetwatersystemen voor, gescheiden door een zoute tak van het Noordzee Systeem (NZ). Zowel het Zuidwestelijke Duinsysteem van Walcheren (ZW) bij Westkapelle, als het tot 20 m diepte zoete Noordwestelijke Duinsysteem van Walcheren (NW) bij Oostkapelle met zijn uitloper naar Serooskerke, voeren hun water hoofdzakelijk af naar het centrum van Walcheren, voorzover het niet onttrokken wordt voor de drinkwatervoorziening. Ze zijn gescheiden door een zoute tong vanuit het Noordzee Systeem, die eveneens naar het centrum van het eiland reikt. Vanuit het Veerse Meer is sinds de afsluiting, in plaats van een stroomtak van het Oosterschelde Systeem, een afzonderlijk stromingsstelsel ontstaan met takken naar Walcheren en naar Noord- en Zuid-Beveland (VM). Aan de zuidzijde van Walcheren dringt een zoute stroomtak van het Westerschelde Systeem (WE) onder de dijk door het eiland binnen.

8.2.2 Noord-Beveland

Aan de zuid- en westzijde van Noord-Beveland dringt een stroomtak van het Veerse Meer Systeem (VM) binnen. Aan de noord- en oostzijde is dat een stroomtak van het zoute Oosterschelde Systeem (OS). Het Oosterschelde Systeem omstroomt het kleine, tot 15 m diepte nog zoete Systeem van Colijnsplaat (CP). Enigszins verzoet zijn de brak/zoute kleinere infiltratiesystemen van Kamperland (KL) en van Kortgene (KG) als gevolg van de relatief iets hogere terreinligging.

8.2.3 Zuid-Beveland

De jongere hogere poldergebieden, die als een naar het noordoosten geopende hoefijzervormige krans om de oudere lagere polders rond Goes heenliggen, vormen een tot 20 m diep verzoet stromingsstelsel, het Systeem van Zuid-Beveland (PB). Het voedingsgebied van dit systeem loopt vanaf Wilhelminadorp, via Lewedorp, Heinkenszand, Ovezande, 's-Gravenpolder, Goes en Kapelle-Biezelingse naar Wemeldinge. Verder oostelijk is een verzoetend infiltratiesysteem aanwezig op een relatief hoog gelegen polderstrook: het Systeem van Krabbendijke-Fredericapolder-Rilland (FP).

Aan de oostzijde tussen het Kreekrak en de Brabantse wal dringt het zoete water op naar het westen vanuit het stromingsstelsel van de Brabantse wal (hier tot het Kempisch microcuesta Systeem (KMc) gerekend) via een brede verzoetende overgangszone onder de slecht doorlatende deklaag.

Aan de zuidzijde van het schiereiland vormt een stroomtak van het Westerschelde Systeem (WE) de grondwaterinvoer voor een doorgaande strook van polders.

Aan de noordzijde heeft het Oosterschelde Systeem (OS) drie afzonderlijke stroomtakken die Zuid-Beveland binnendringen:

- a. de meest westelijke tak dringt de hoefijzervormige laagte bij Goes binnen en wordt omsloten door het verzoetende systeem van de hogere omranding;
- b. de middelste tak beslaat het gebied tussen de zoete uitloper van Wemeldinge en het verzoetende Systeem van Krabbendijke-Fredericapolder-Rilland. Deze tak grenst aan de zuidzijde aan het Westerschelde Systeem;

- c. de oostelijke tak dringt vanuit het noordwesten het Kreekrakgebied binnen tussen Rilland en Woensdrecht en grenst in het zuiden eveneens aan een stroomtak van het Westerschelde Stelsel.

8.3 Schouwen-Duiveland

Schouwen-Duiveland maakt deel uit van vijf grotere hydrologische systemen:

- a. het Schouwense Duinsysteem (SC). Dit zoetwaterinfiltratiesysteem heeft een zoetwaterzak van ongeveer 100 m diepte opgebouwd en stroomt af naar de Noordzee en naar het lage poldergebied aan de zuidostrand van de duinen;
- b. de Noordschouwense tak van het zoute Noordzee Stelsel, die tussen het Schouwense Duinsysteem en de Haringvlietdam naar het centrum loopt van de Polder Schouwen ten noorden van Serooskerke;
- c. het Grevelingen Stelsel (GS), dat met een Noordschouwense en een Noordduivelandse tak vanuit het noorden het eiland binnendringt tot in de laagste delen van respectievelijk de Polder Schouwen en de Polder Vierbannen van Duiveland;
- d. het verzoetende, brakke tot zoute Schuddebeurs Stelsel (SB), dat in een smalle strook van hogere polders ten oosten van de lijn Brouwershaven-Zierikzee het poldergedeelte van het eiland in twee grote compartimenten scheidt. Het deelt daarmee zowel het Oosterschelde Stelsel aan de zuidkant, als het Grevelingen Stelsel aan de noordkant op in twee stroomtakken;
- e. het verzoetende brakke tot zoute Bruinisse Stelsel (BS) aan de oostpunt van het eiland, dat afvoert naar de omliggende lagere polders.

8.4 Tholen

Tholen maakt deel uit van drie stromingsstelsels:

- a. het Oosterschelde Stelsel (OS) met een Noordtholense en een Zuidtholense tak, die elkaar in het centrum van het eiland ontmoeten;
- b. een verzoetend systeem van een hoger gedeelte rond Spijkenisse-St. Annaland aan de noordwestelijke rand, als scheiding tussen de beide stroomtakken van het Oosterschelde Stelsel (SA);
- c. een brak/zoete uitloper van de Brabantse wal aan de oostzijde, behorende tot het Stelsel van de Kempische microcuesta (KMc).

8.5 St. Philipsland

Het schiereiland behoort tot twee stromingsstelsels:

- a. het ondiepe verzoetende brak/zoute Stelsel van Anna Jacobapolder (AJ) aan de iets hoger westzijde, dat naar het oosten afvoert;
- b. het Oosterschelde Stelsel dat met een noordelijke en een zuidelijke St. Philipsland-tak binnendringt in het lagere oostelijke poldergedeelte.

8.6 Goeree-Overflakkee

Op Goeree-Overflakkee zijn de volgende stromingsstelsels te onderscheiden:

- a. het kleine zoete Westelijke Goereese Duinsysteem (WG) met afstroming naar de Noordzee;
- b. het veel grotere zoete Oostelijke Goereese Duinsysteem (OG) met afstroming naar de Noordzee in het noorden en naar de Grevelingen en de polders bij Ouddorp aan de zuidoostzijde. De dikte van de zoetwaterzak bedraagt hier maximaal 40 m;
- c. het zoute Noordzee Stelsel (NZ) met een kleine tak tussen de beide duinsystemen en een grotere Noordgoereese tak, tussen het Oostelijke Goereese Duinsysteem en de Haringvlietdam, naar het lage midden

- van Goeree tussen Ouddorp en Stellendam;
- d. het Grevelingen Systeem (GS) dringt het eiland binnen met een stroomtak over de volle lengte, tot aan de Grevelingendam;
- e. het zoute Oosterschelde Systeem (OS) dringt met een stroomtak het resterende zuidoostelijke deel van Overflakkee binnen;
- f. het verzoetende Kraaijer Systeem (KS), gevoed door infiltratie in een hogere polderstrook ten noorden van Dirksland;
- g. het thans zoete Haringvliet Systeem (HV) heeft een tweetal takken naar het zuidwesten: de noordwestelijke Overflakkee-tak en de zuidoostelijke Overflakkee-tak, gescheiden door het Kraaijer Systeem.

Ten noordwesten en noordoosten van Oude Tonge komen in de ondergrond vrij uitgestrekte, zoete tot brakke opduikingen voor, die tevens zijn gekarteerd als zoete kwelarealen in een recent regionaal onderzoek van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (Werkgroep Zuid-Holland, 1988). Het betreft hier waarschijnlijk geen afzonderlijk systeem, maar het verdringen en uitstromen van fossiel zoet water vanaf een diepte van enkele tientallen meters uit de onderliggende Kreftenhye Formatie onder invloed van de huidige stromingsstelsels.

8.7 Tiengemeten

Op het eiland Tiengemeten heeft zich sinds de afsluiting van het Haringvliet een ondiep zoetwaterstromingstelsel in lensvorm ontwikkeld (TG).

8.8 Voorne-Putten en de Hoekse Waard

Voorne-Putten en de Hoekse Waard hebben de volgende grotere stromingsstelsels:

- a. het zoete Duinsysteem van Oost-Voorne (OV) op de kop van Voorne met een uitloper bij Rockanje en een zoet kwelvenster bij Heenvliet rond het Kanaal door Voorne;
- b. het nu zoete Haringvliet Systeem (HV) met een Voornse stroomtak ten westen van Het Spui en een Hoekse Waard-tak ten oosten daarvan;
- c. de zout/brakke tak uit de Nieuwe Waterweg aan de noordzijde van Voorne, gevoed vanuit het Noordzee Systeem (NZ).
- d. het zoete Oude Maas Systeem (OM), dat het noordelijke en oostelijke deel van de Hoekse Waard voedt en verzoet.

9 Grondwaterstromingsstelsels in Noord-Brabant

Vanuit de Belgische Kempen dringen twee grote stromingsstelsels Noord-Brabant binnen: in het westen het Systeem van de microcuesta van de Kempen (KMc), in het oosten het Systeem van het Kempisch Plateau (KP). Beiden doorstromen ten dele tertiaire en oudpleistocene afzettingen en worden bedekt door jongere stelsels in jongpleistocene en holocene afzettingen. Ze reiken met hun uitlopers noordwaarts tot aan de Maas. Grotere systemen die binnen Noord-Brabant hun voedingsgebieden hebben zijn respectievelijk:

- a. het Drunense Duinen Systeem (DD) in holocene stuifzandcomplexen;
- b. het Midbrabantse rug Systeem (MR) in pleistocene dekzanden;
- c. het Weert Systeem (WT) in pleistocene dekzanden;
- d. het Complex van Peelschol Systemen (PS) in pleistocene dekzanden en holocene hoogvenen (een complex met twee grotere subsystemen: het Oss Systeem en het Venray Systeem).

Talrijke kleinere lokale systemen zijn op de bovengenoemde systemen gesuperponeerd, waarbij de laatste vaak weer aan de dag treden met kwelvensters in de lage delen tussen de opliggende systemen.

9.1 Grondwaterstelsels gevoed vanuit het Tertiair

9.1.1 Het Systeem van de microcuesta van de Kempen (KMc)

Dit tertiair/pleistocene systeem heeft een zuidelijke stroomtak, die afvoert naar het Belgische Scheldebekken, en een noordelijke stroomtak, die tot Turnhout in België reikt en de stroomgebieden beslaat van de Roosendaalse en Steenbergse Vliet, de Aa of Weerijds en de Mark. Het aaneengesloten infiltratiegebied van dit supraregionale systeem ten westen van de Gilze Rijen-breuk verloopt hoefijzervormig (Oosterhout-Turnhout-Kalmt-hout-Bergen op Zoom) en heeft twee noordwaartse ruggen als uitlopers, die respectievelijk de Rucphen-stroomtak en de De Meer-stroomtak voeden. De diepere watervoerende pakketten worden door deze stromingsstelsels doorstroomd. De uittreding vindt plaats in de benedenlopen van de beken en langs de overgang tussen Pleistoceen en Holoceen.

9.1.2 Het Systeem van het Plateau van de Kempen (KP)

Het hoge Kempisch Plateau, met tertiaire afzettingen gedeeltelijk bedekt door Maasgrinden, vormt een zeer belangrijk infiltratiegebied. De noordzijde watert af naar Nederland en vormt een belangrijke grondwaterstroom, die zich ten zuiden van Eindhoven splitst rond het Midbrabantse rug Systeem (MR). De hoofdtak buigt noordoostwaarts af, versmalt en verdiept zich, zoals blijkt uit het verloop van het zoet-zout grensvlak, en stroomt vervolgens de Centrale Slenk in. De kleinere tak van de splitsing stroomt noordwaarts en wordt vervolgens afgebogen tegen het Drunense Duinen Systeem (DD) met een tak naar het noordoosten, richting 's-Hertogenbosch en een tak naar het noordwesten in de richting van de Maas. Het grondwater van het Kempisch Plateau stroomt aan de noordoostzijde, ten zuidoosten van het Weert Systeem (WT), naar de Maas in Midden-Limburg onder en tussen een groep kleinere systemen door. Aan de oostzijde gaat een stroomtak direct naar het Maasdal in Zuid-Limburg.

9.2 Grondwaterstelsels gevoed vanuit het Pleistoceen

9.2.1 Het Drunense Duinen Systeem (DD)

De grote infiltratie in dit systeem heeft een duidelijke lens veroorzaakt. Het radiaal afstromende systeem vormt een barrière voor de afgesplitste noordelijke stroomtak van het Systeem van het Kempisch Plateau. De laatste wordt daardoor gedwongen gedeeltelijk op te kwellen, zich te opnieuw te splitsen en verder af te buigen naar 's-Hertogenbosch en naar het noordwesten.

9.2.2 Het Midbrabantse rug Systeem (MR)

Dit systeem blokkeert de noordelijke tak van het Systeem van het Kempisch Plateau en splitst deze in tweeën. Het infiltratiegebied van dit systeem is een hoge strook dekzand bij Eindhoven die verloopt in zuidwest-noord-oostelijke richting en bedekt is met resten van heidecomplexen. Lokale stroomtakken voeden direct aangrenzende kwelgebieden, maar (sub)regionale takken met kwelvensters komen eveneens voor, onder andere in de Dommelbeemden.

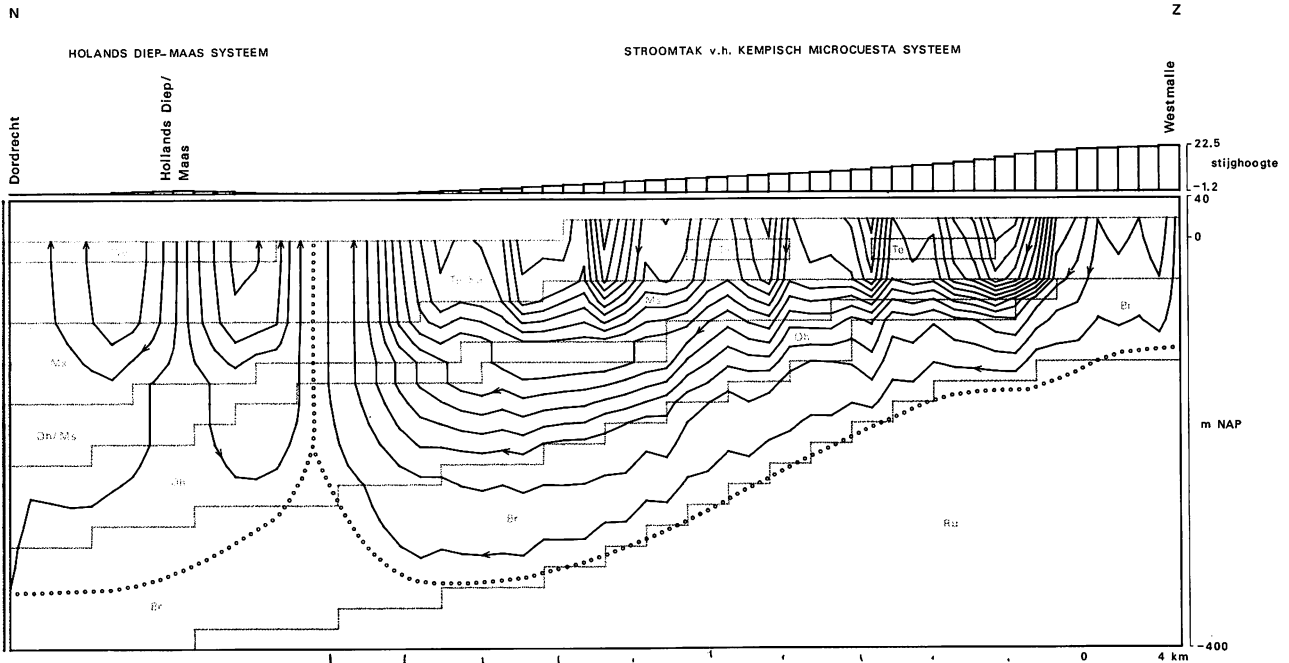
9.2.3 Het Weert Systeem (WT)

De hoge opwelving van Weert ligt dwars over de Centrale Slenk. De noordwestelijke tak van dit systeem stroomt naar het noordwesten door de bovenste delen van de opvulling van de Centrale Slenk. De zuidoostelijke tak voert ondiep af naar de Tungelroyse Beek en dieper, onder kleinere systemen door, naar de Maas in Midden-Limburg. De supraregionale stroming door Roerdalslenk en Centrale Slenk, vanuit de hogere infiltratiegebieden aan de oostzijde van de Maas, voert onder het Weert Systeem door naar het noordwesten in de richting van 's-Hertogenbosch. De zeer slecht doorlatende Brunssumkleien onder het Weert Systeem maken bij Weert de tegengestelde stroomrichtingen mogelijk in het onder- en bovenpakket. Stroomafwaarts van het Systeem van Weert voegen de afgebogen hoofdtak van het Systeem van het Kempisch Plateau en het water vanuit de Roerdalslenk zich samen onder de kleinere bedekkende systemen in de diepere delen van de Centrale Slenk. Binnen het Weert Systeem vormt wegzijging van Maaswater vanuit de Zuid-Willemsvaart nog een kunstmatig gesuperponeerd stromingsstelsel.

9.2.4 Het Complex van Peelschol Systemen (PS)

Dit systeem is in feite een complex van grotere en kleinere, vooral lokale systemen, die over de Peelrandbreuk uitstromen in de hogere niveau's van de Centrale Slenk en aan de oostzijde naar het Maasdal afvoeren, waar ze grenzen aan het Maas Systeem. Grotere eenheden hierbinnen zijn de subsystemen van Oss en van Venray, die vooral uit de COLN-kaarten goed naar voren komen. Door de ondiepe ligging van slechtdoorlatende lagen reikt het Complex van Peelschol Systemen niet diep en ligt de zoet-zout grens relatief hoog in het profiel.

Van de oorspronkelijke stromingsstelsels vanuit natuurlijke hoogveenkusens op de Peel zijn slechts rudimenten over. Grote delen van het Complex van Peelschol Systemen zijn in de laatste decennia kwalitatief ernstig aangetast door overbemesting.



Figuur 35: Schematische weergave van de hydrologie in de doorsnede Westmalle-Hollands Diep-Dordrecht. De stroomlijnen van kleine systemen zijn niet weergegeven.

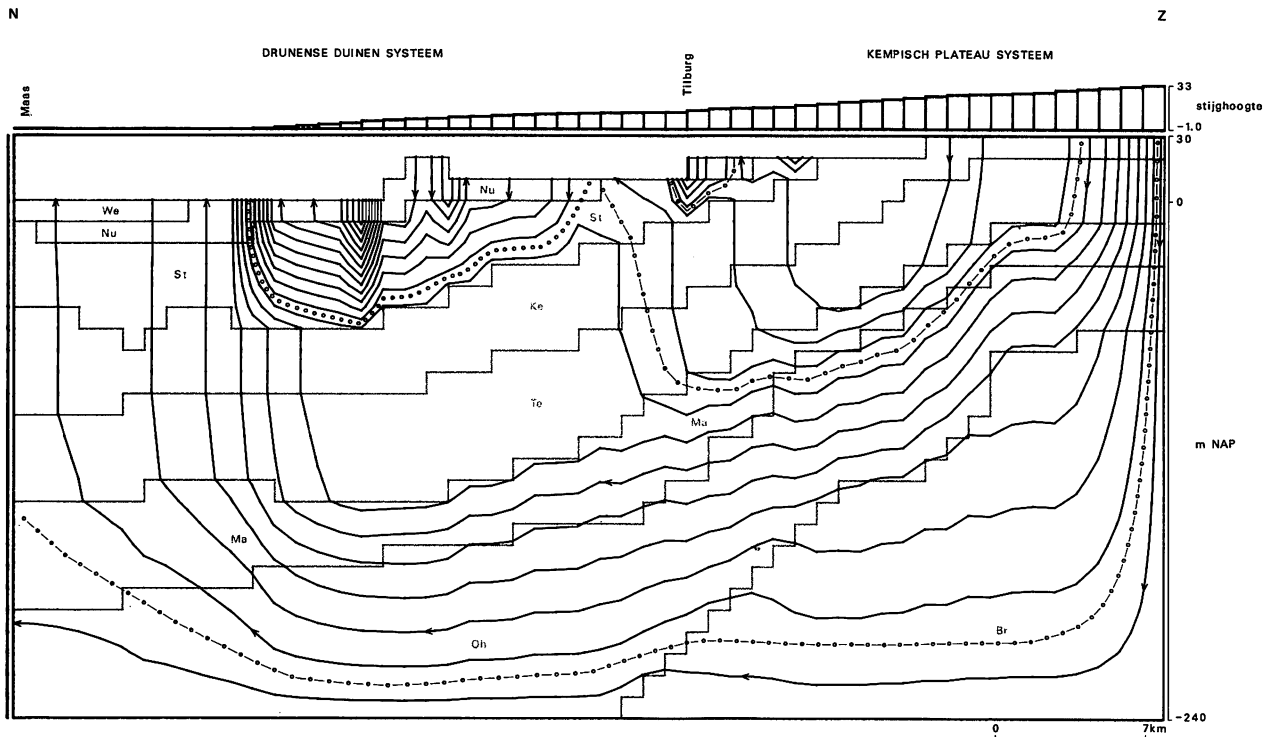
9.3 Profielen

9.3.1 Profiel Westmalle (België)-Hollands Diep-Dordrecht (figuur 35)

Het Kempisch microcuesta Systeem: In dit van zuid naar noord lopende profiel is het Kempisch microcuesta Systeem dominerend. In het noorden ligt het kleinere Hollands Diep-Maas Systeem er op en tegenaan. Talrijke kleinere ondiepe lokale systemen die in de grotere zijn ingebed, komen door de gekozen schaal van het profiel niet tot uiting. De voeding in het Belgische gebied en het Nederlandse grensgebied passeert eerst de matig- tot slecht doorlatende deklagen van de Formaties van Tegelen en Kedichem en splitst zich dan in twee grote stroomtakken met een grote horizontale verbreiding door de goed doorlatende Formaties van Maassluis en Oosterhout. De bovenste en kortste stroomtak passeert aan de rand van de hogere pleistocene gronden opnieuw de slecht doorlatende deklagen en komt als kwel omhoog in de benedenlopen van de beken en langs de overgang met het aangrenzende lage holocene gebied. De diepste en langste stroomtak, met een geringere flux en een lage snelheid, volgt vooral de Formatie van Oosterhout en in mindere mate de Formatie van Breda, naar het noorden en noordwesten tot aan het Hollands Diep-Maas Systeem. In de slecht doorlatende Rupel Formatie treedt vrijwel geen stroming meer op. Het grensoverschrijdend karakter van de diepe grondwaterstroming is opvallend.

9.3.2 Profiel Kempisch Plateau-Drunense Duinen-Maas (figuur 36)

De grote grondwaterafvoer uit het Belgische Kempisch Plateau splitst zich in een oostelijke hoofdtak, die via Eindhoven naar de Centrale Slenk in de richting 's-Hertogenbosch stroomt, en een kleinere, westelijke tak, die via dit profiel naar het noorden stroomt, in de richting van de Maas.



Figuur 36: Hydrologische situatie in de sectie Kempisch Plateau-Drunenese Duinen-Maas. Binnen het Systeem van het Kempisch Plateau vallen een aantal stroomtakken te onderscheiden.

Het Kempisch Plateau Systeem heeft in dit profiel vier stroomtakken:

- De kortste ondiepste lokale tak die aan de voet van de plateauhelling omhoog komt ten zuiden van een uitloper van het Systeem van de Midbrabantse rug;
- De daaronderliggende stroomtak, die onder het Systeem van de Midbrabantse rug doorloopt en opkwelt in de volgende depressie, ten zuiden van het heuvelcomplex van de Drunenese Duinen;
- De daar weer onderliggende lange stroomtak, die onder de Drunenese Duinen doorloopt en in het rivierengebied rond de Maas omhoog komt. Deze tak is de belangrijkste, omdat hij over grote afstand gebruik kan maken van de goed doorlatende Formatie van Maassluis en het volledige hoogteverschil overbrugt tussen de top van het Kempisch Plateau en de Maas.
- Tenslotte is er nog de langste diepste en traagste stroomtak die vanaf de waterscheiding op het Kempische Plateau tot in het centrum van het rivierengebied reikt, via de diepere Formaties van Oosterhout en Breda.

Het Drunenese Duinen Systeem: Dit eveneens zoete systeem met relatief sterke voeding in de duingebieden hangt als een lens in het Kempisch Plateau Systeem. De verticale uitbreiding beperkt zich tot de basis van de goed doorlatende Formatie van Sterksel. Het systeem is sterk asymmetrisch van vorm met een klein lokaal systeem onder het hoogste deel.

9.3.3 Profiel Midden-Limburg-Weert-'s-Hertogenbosch (figuur 37)

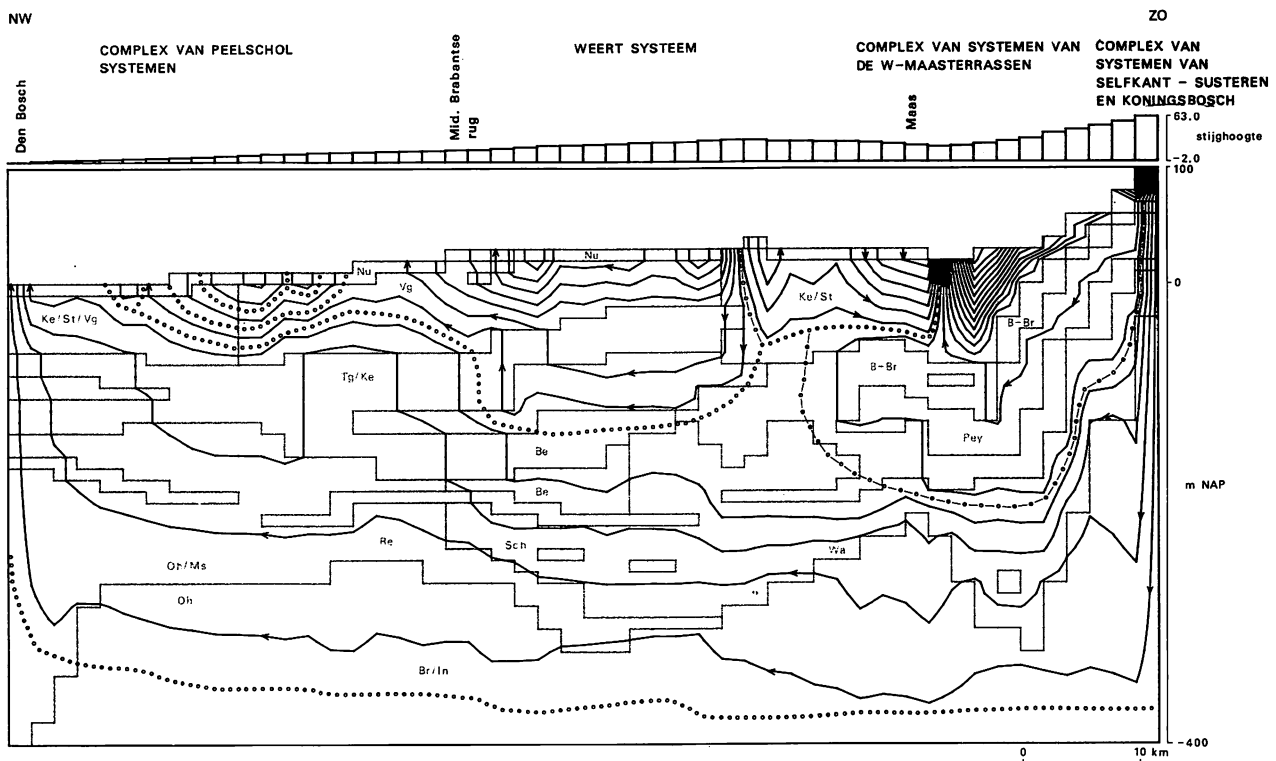
Het Complex van Systemen van Selfkant-Susteren en Koningsbosch: Dit systeem behoort met het Kempisch Plateau Systeem tot de langste van Nederland. De lange diepe langzaam stromende tak wordt gevoed door het hoge grensgebied met Duitsland ten zuidoosten van de Maas bij Roermond en Sittard. De tak stroomt onder de Maas door en

eindigt in een kwelvenster bij 's-Hertogenbosch na de hele Centrale Slenk te hebben doorstroomd. In de slenk onttrekken veel openbare waterwinnings water aan dit nog schone systeem. Een korte ondiepe tak met een sterke flux stroomt uit in het Maasdal bij Roermond.

Het Complex van Systemen van de westelijke Maasterrassen: Aan de westelijke oever van de Maas bij Roermond ligt een complex van kleinere ondiepe systemen op het Systeem van Selfkant-Susteren en de uitlopers van het Kempisch Plateau Systeem in de Centrale Slenk. Het Complex van Systemen van de westelijke Maasterrassen stroomt af naar het zuidoosten, naar de Maas. De stroomrichting in dit systeem is tegengesteld aan de systemen die daar onder liggen. Deze tegengestelde stroomrichting in het bovenpakket is mogelijk door de aanwezigheid van de zeer slecht doorlatende Brunssum Formatie, die de systemen met een tegengestelde stroomrichting scheidt.

Het Systeem van Weert: De hoge terreinrug bij Weert, nog versterkt door wegzijging vanuit de Zuid-Willemsvaart, voedt een vrij groot, tamelijk ondiep stromingsstelsel met een kleine diepere regionale tak naar de Maas in Midden-Limburg en een ondiepe lokale stroomtak tot aan het Complex van Systemen van de westelijke Maasterrassen.

Naar het noordwesten, stroomafwaarts in de Centrale Slenk, lijkt het systeem zich in dit profiel nog ver voort te zetten met halverwege een venster tussen uitlopers van de Systemen van de Midbrabantse rug en van het noordwestelijke deel van het Complex van de Systemen van de Peelschol. De vrij ingewikkelde situatie in en rond de Centrale Slenk maakt dat dit profiel slechts als een benadering kan worden beschouwd. Voor een nauwkeuriger beeld is een driedimensionale modellering met FLOSA vereist. Voor de situatie ten zuidoosten van Weert is reeds een detailkartering beschikbaar (Kok, 1988).



Figuur 37: Hydrologische situatie in de sectie Midden-Limburg-Weert-'s-Hertogenbosch. Opvallend is de diepe stroomtak van het Complex van Systemen van Selfkant-Susteren en Koningsbosch.

10 Grondwaterstromingsstelsels in Zuid-Limburg

De zeer complexe geologische bouw van Zuid-Limburg, met vele gesteentetypen, sterke breukwerking, verkarsting en daarop gesuperponeerd de invloeden van mijnbouw en grote waterwinningen, maken een inventarisatie van de hydrologische systemen in korte tijd moeilijk. Meer dan een benadering is niet mogelijk.

Voorlopig kunnen de volgende grondwaterstromingsstelsels onderscheiden worden, gaande van oud naar jong en van zuidzuidoost naar noordnoordwest *). Bij deze inventariserende systeemanalyse is dankbaar gebruik gemaakt van de uitvoerige gegevens van een meerjarig hydrologisch onderzoek in dit gebied door de Landbouwuniversiteit Wageningen (onder andere Nota et al., 1988; van Dorenmalen et al., 1988). De bedekkende lösslaag in dit gebied is weggedacht als er over dagzomend gesteente wordt gesproken.

10.1 Het Carboon Stelsel

De bovenlopen van Voer, Geul, Gulp en Berwinne ontspringen in de sterk versneden afhelling van het Massief van Brabant en het Massief van de Ardennen, waar de oude sokkel met onder andere devonische en carbonische gesteenten dagzoomt. Op de flanken van de dalhellingen komt in de verweringslaag een ondiep grondwatersysteem voor, dat op de rivieren afwatert. Dit deel ligt grotendeels in de aangrenzende gebieden van België en Duitsland.

Diepere circulaties in de oudere gesteenten voeren langs breuken thermomineraal water, dat in geïsoleerde vensters via bronnen omhoog komt. Bronnen van dit type komen voor bij Aken, Visé en Mons, bij de monding van de Berwinne in de Maas en bij Maastricht en werden vroeger aangetroffen in de mijnschachten van de kolenmijnen in Zuid-Limburg. De verder noordelijk in de ondergrond gelegen voorkomens, zoals die blijken uit de ligging van het zoet-zout grensvlak en thermische anomalieën, zijn reeds eerder besproken.

10.2 Systemen gevoed vanuit het Krijt

In de op het oude massief liggende Krijtgesteenten van Zuid-Limburg heeft zich een hoefijzervormige krans van stromingsstelsels gevormd.

10.2.1 Het St. Pietersberg Stelsel (PB)

Dit is een klein smal systeem op de westelijke Maasoever in de hogere strook tussen het Jekerdal en het Maasdal in de Krijtkalk van de Formatie van Maastricht. De afvoer is voornamelijk naar het Maasdal gericht.

10.2.2 Het Stelsel van het Plateau van Margraten (PM)

Dit zeer grote grondwaterstromingsstelsel is aan de westzijde begrensd door het Maas Stelsel en aan de zuid-, oost- en noordzijde door respectie-

*) Op bijlage 1 is het gebied tussen het Stelsel van Ubachsberg (UB) en het Heerlen-Brunssummerheide Stelsel (HB) wit gelaten. Hier komt nauwelijks grondwaterstroming voor.

velijk de Voer, de Gulp en de Geul. De min of meer radiale afwatering van het systeem, met een tot tientallen meters dikke onverzadigde zone, vindt plaats in de ten dele verkarste kalken van de Formaties van Gulpen en Maastricht. Het water treedt uit via contactbronnen op de onderliggende slechtdoorlatende Formatie van Vaals of in de flanken en dalbodems van de omringende rivierdalen. Op de plaatsen waar water van dit systeem vroeger via bronnen naar buiten tradt, zijn nu een aantal grote pompstations geplaatst die het water afvangen.

10.2.3 **Het Heijenrath Systeem (HS)**

Dit systeem in met name de kalken van de Formatie van Gulpen, in het heuvelland tussen Gulp en Geul, stroomt af naar de beide riviertjes. Aan de oostzijde treedt het water vooral uit via contactbronnen op de onderliggende Formatie van Vaals.

De geringe aanwezigheid van bronnen aan de noordzijde wijst op direct uittreden in de bedding van de Geul, of op een diepere ondergrondse afstroming in noordwestelijke richting langs het Geuldal.

10.2.4 **Het Vijlenerbosch Systeem (VB)**

Dit systeem in de Formatie van Gulpen wordt omsloten door de bovenloop van de Geul aan de zuidwestzijde en de Sinselbeek aan de noordoostzijde. Talrijke bronnen vormen de uitvoer van het systeem op het contact met de onderliggende slechtdoorlatende Formatie van Vaals.

10.2.5 **Het Bochholzerheide Systeem (BH)**

Van dit systeem, in de Formatie van Gulpen en in de Kunrader faciës van de Formatie van Maastricht, dat ligt tussen de Eyserbeek en de Sinselbeek is slechts weinig bekend. Er zijn slechts enkele bronnen op het contact met de Formatie van Vaals. Mogelijk zijn vroegere bronnen als gevolg van onttrekkingen bij Roodborn en Gulpen verdwenen. Eventueel bestaat er nog een diepere stroomtak in noordwestelijke richting onder het naastliggende Systeem van Ubachsberg door.

10.2.6 **Het Systeem van Ubachsberg (UB)**

Dit systeem watert af naar Eyserbeek, Geul en Geleenbeek en wordt naar het noordwesten, tussen Heerlen en Valkenburg, begrensd door een slechtdoorlatende strook van de tertiaire Formatie van Tongeren. Langs deze noordwestelijke grens zijn veel bronnen verdwenen door de intensieve grondwaterwinningen. Een toekomstige detailstudie en modellering zal moeten uitwijzen of dit systeem nog een diepe stroomtak naar het noordwesten heeft, onder het aangrenzende Systeem van het Plateau van Schimmert door.

10.2.7 **Het Systeem van het Plateau van Schimmert (SP)**

Dit systeem sluit in het oosten aan op het Systeem van Ubachsberg en wordt aan de oppervlakte begrensd door Geul, Maas en Geleenbeek. Het centrale infiltratiegebied ligt in de matig doorlatende tertiaire Formatie van Breda-Heksenberg. De onderliggende slechtdoorlatende tertiaire Formatie van Rupel vormt een verbroken krans rond het centrale deel. Daarop treedt grondwater via bronnen uit, met name aan de zuidwest- en noordwestranden. De belangrijkste stroomtak en afvoer verloopt echter naar het noordwesten, tussen de Geullebreuk en de Elsloobreuk, naar de Maasdalrand. In de kern van het infiltratiegebied van dit systeem treedt waarschijnlijk nog voeding op naar de onderliggende Krijtformaties. Zo voedt dit systeem ook een diepe stroomtak door de kalken naar het noordwesten. In

hoeverre dit water verder stroomafwaarts nog opkwelt in het Maasalluvium en zich daar mengt met het water van het Maas Systeem, of dat het uiteindelijk in noordwestelijke richting ondergronds de Centrale Slenk instroomt, zal nader onderzoek en modellering moeten uitwijzen. Winningen van het Emma- en mogelijk ook van het Maurits/DSM-complex vormen kunstmatige uitvoeren van de diepe stroomtak van dit systeem.

10.2.8 **Het Systeem van Kasen-Bunde-Elsloo (KB)**

Het Systeem van Kasen-Bunde-Elsloo is een klein stromingsstelsel langs de oostoever van de Maas ten noordwesten van Meerssen, in een hogere tektonische schol met de Formatie van Tongeren ten zuidwesten van de Geullebreuk. Dit systeem vult de ruimte op tussen het Systeem van het Plateau van Schimmert en het Maas Systeem. Een reeks bronnen van dit systeem met een eigen afwijkende chemie voedt de Ravenbeek.

10.2.9 **Het Limbricht Systeem (LB)**

De hogere infiltratiestrook, tussen de Maas en de Geleenbeek ten westen van Geleen in de tertiaire Formatie van Breda-Heksenberg, kan waarschijnlijk beter worden beschouwd als een afzonderlijk systeem dan als een uitloper van het Systeem van het Plateau van Schimmert. De menselijke invloed op dit systeem, via met name het industriecomplex van de voormalige staatsmijn Maurits en DSM, is waarschijnlijk groot.

10.2.10 **Het Heerlen-Brunsummerheide Systeem (HB)**

De strook tussen de Geleenbeek en de Roode Beek tot Sittard ligt in de zuidelijke trapvormig verbroken randzone van het breuksysteem van de Centrale Slenk en de Roerdalslenk, waar de tertiaire Formaties van Breda-Heksenberg en van de Kiezeloöliet dagzomen. Van dit grote systeem is nog weinig bekend. Ondiepe stroomtakken voeren af naar de nabijgelegen beken. Diepere infiltratie zal de grote regionale grondwaterstroming via de Centrale Slenk in de richting Helmond-'s-Hertogenbosch voeden.

10.2.11 **Het Systeem van Selfkant-Susteren (SK)**

Ten noorden van de Roode Beek vormt het hogere Duitse gebied, van de Selfkant tot aan de Saeffeler Bach, een infiltratiezone van een langgerekt systeem in de richting van de Maas bij Susteren.

10.2.12 **Het Koningsbosch Systeem (KBs)**

Dit systeem tussen Worm, Roer, Saeffeler Bach en Maas valt bij nader detailonderzoek waarschijnlijk uiteen in meerdere kleine stromingsstelsels. Op dit moment is hiervan nog maar weinig bekend. Wel is bekend dat vanuit dit hoge gebied een snelle ondiepe stroomtak naar de Maas stroomt en een diepe langzame tak de Centrale Slenk instroomt, onder de Maas en het Weert Systeem door (zie figuur 37).

10.2.13 **Het Geulmonding Systeem (GM)**

Terwijl de rivier de Geul in de boven- en middenloop de omgeving draineert, is dat in de benedenloop juist omgekeerd. De rivier verliest hier water aan de ondergrond en fungeert als invoer voor een kegelvormig grondwaterstromingsstelsel naar de Maas, dat tot in het onderliggende Krijt doordringt. De grondwateronttrekking van de papierfabriek van Weert vormt daarbinnen een klein gesuperponeerd kunstmatig stromingsstelsel.

10.2.14 **Het Maas Systeem (Zuidlimburgse deel) (MS)**

Dit min of meer lintvormige, zeer dynamische systeem wordt gevormd door de Maas met zijn sterk wisselende peilen en stuwpannen, in samenwerking met het grondwater in de aangrenzende rivierafzettingen en delen van de oudere ondergrond. Afhankelijk van de waterstand van de Maas en de plaats langs de rivier treedt afwisselend toestroming of oeverinfiltratie op. De grondwaterstromingsstelsels die vanuit de hogere omliggende gebieden naar het Maasdal afvoeren, vervingeren op deze wijze dynamisch met het Maas Systeem en veroorzaken zo zones met mengwater. In tijden van een lage Maasafvoer krimpt het Maas Systeem in. Tijdens langere hoogwaterperioden dijt het systeem uit door verdringing en opstuwung van de aangrenzende systemen.

10.2.15 **De Dekzand- en Duinsystemen op de oostelijke Maasoever (OMd)**

Op de oostelijke Maasoever, tussen de Maas en de Niers vanaf Roermond tot de stuwwal van Nijmegen, ligt een snoer van lokale grondwaterstromingsstelsels. Deze zijn voornamelijk gevormd vanuit infiltratiegebieden in culminaties van dekzanden met deels daarop holocene stuifduincomplexen op een ondergrond van de Formaties van Urk, Veghel en Sterksel. Op de hogere delen komen podzolen, enkeerdgronden en duinvaaggronden voor. De situatie vertoont veel overeenkomst met de strook rivierduinen langs de Oude IJssel. De systemen hebben kwelzones met lokale veenvorming rond de hogere delen. Aan de oostzijde voeren ze af naar de Niers. Aan de westkant vormt het sterk fluctuerende Maas Systeem een dynamische begrenzing. Kwel naar een oude Maasloop aan de oostkant van de Maas (noordoostelijk van Venray) heeft aanleiding gegeven tot een grote langgerekte strook met veengroei.

10.2.16 **Het Systeem van het Plateau van de Kempen (Zuid-Limburgse deel) (KP)**

Tussen Maastricht en Maaseik grenst het Systeem van het Plateau van de Kempen aan de linkerzijde van het Maasdal aan het Maas Systeem en vervingt daarmee in het Maasalluvium.

10.3 **Profiel**

10.3.1 **Profiel Plateau van Schimmert-Maas (figuur 38)**

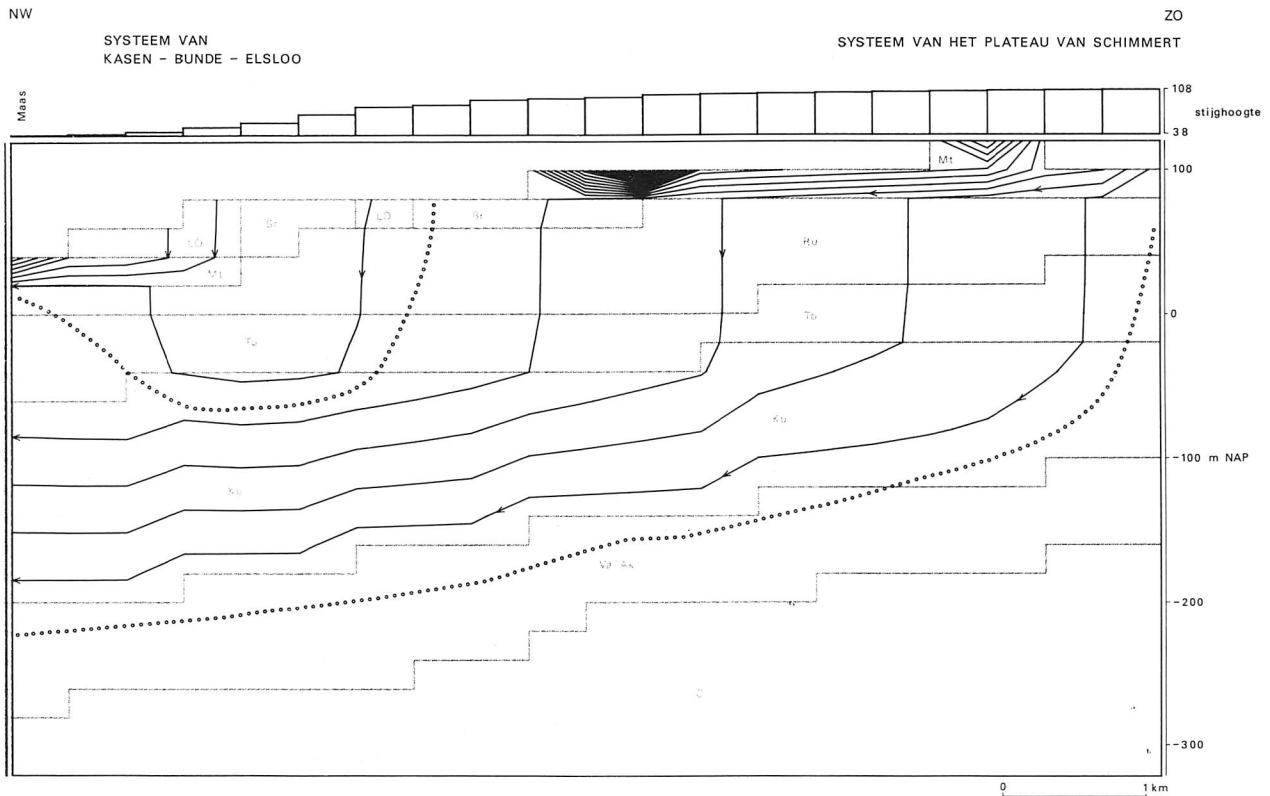
In dit 8 km lange en 440 m diepe profiel, vanaf het Plateau van Schimmert in het zuidoosten naar het Maasdal in het noordwesten, zit een hoogteverschil van ongeveer 90 m. De löss, de goed doorlatende oudere en jongere Maasafzettingen en de tertiaire Formatie van Breda-Heksenberg, aan de bovenzijde van het profiel, voeren de grootste grondwaterfluxen. Een kleiner, maar toch aanzienlijk deel zijgt weg naar de onderliggende Krijtkalken van de Formatie van Maastricht. Het daar onder liggende Onder-Krijt en het Carboon zijn zeer slecht doorlatend en vrijwel niet betrokken in bij regionale grondwaterstroming.

Het Systeem van het Plateau van Schimmert: Dit systeem heeft een ondiepe korte stroomtak door de löss, de goed doorlatende Maasafzettingen en de iets minder doorlatende tertiaire Formatie van Breda-Heksenberg. Het water treedt uit in een krans van bronnen op de flanken van het plateau op het contact met de onderliggende slechtdoorlatende tertiaire Rupel Formatie. Bronnen langs de Vliekerwaterlossing en de Keutelbeek vormen de westelijke begrenzing van deze ondiepe stroomtak. Het centrale en oostelijke deel van het Plateau van Schimmert voeden een diepe

regionale stroomtak, die via de Krijtkalken naar het westen en noordwesten loopt in de richting van de Centrale Slenk. De kortste verblijftijd van het water in deze diepe stroomtak is binnen het afgebeelde profiel ongeveer honderd jaar. Stroomlijnenpatroon en verblijftijd zijn echter sterk afhankelijk van de gekozen doorlatendheid voor de Formatie van Rupel. Deze is slecht bekend en moet hier hoger worden genomen dan verwacht (k-hor.: 0,05 m/dag, k-vert.: 0,005 m/dag), om te voorkomen dat alle water bij de modellering uitsluitend via de ondiepe stroomtak naar de bronnen wordt afgevoerd. Dit laatste is niet waarschijnlijk.

Een waterbalansstudie van het Plateau van Schimmert met zijn omliggende bronnen kan, in combinatie met hydrochemische en isotopenstudies, definitief uitsluitsel geven over de onderlinge sterkte van de ondiepe en diepe stroomtakken van dit systeem.

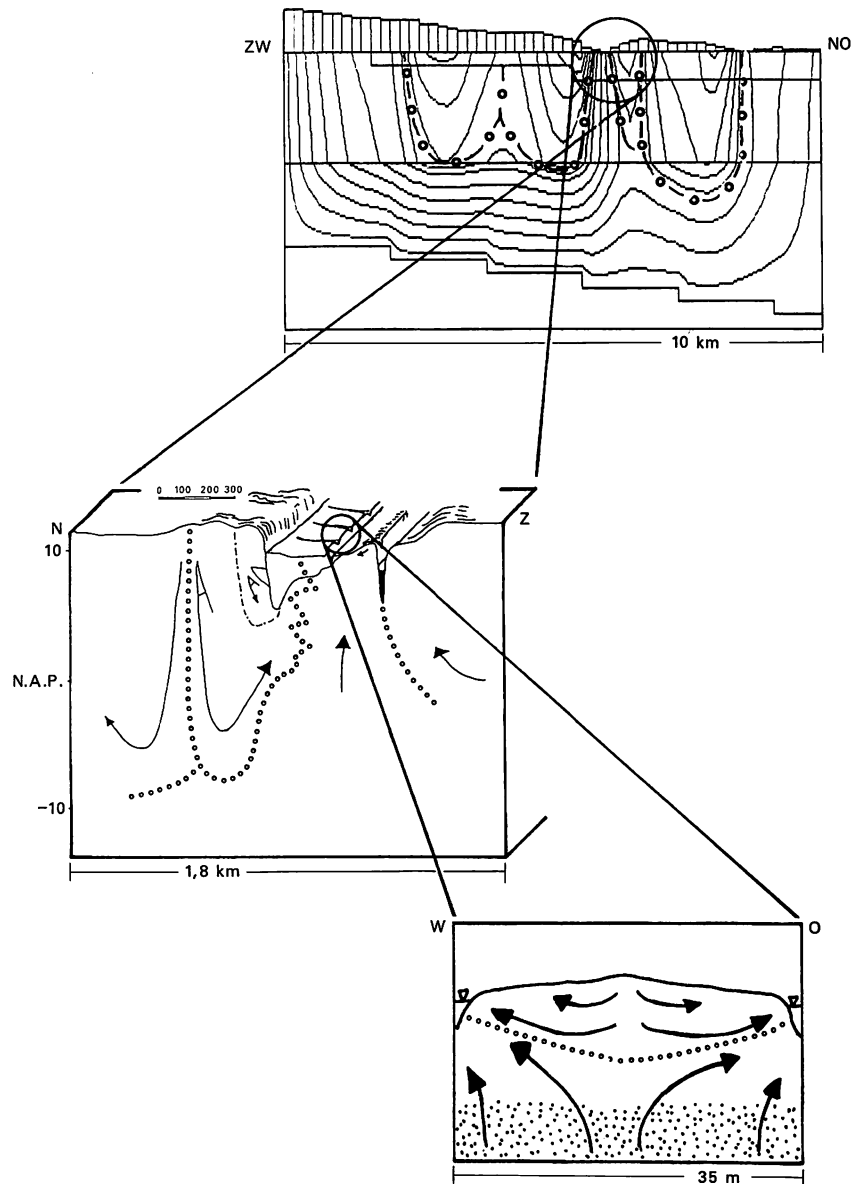
Het Systeem van Kasen-Bunde-Elsloo: Dit kleinere systeem op de rand van de Maasvallei loopt door löss, Maasafzettingen en de tertiaire Formatie van Breda-Heksenberg en voedt een reeks bronnen parallel aan de voet van de dalwand van de Maas, langs Ravenbeek, Spoorbeek en Hemelbeek, overlopend op het contact met de zeer slechtdoorlatende Formatie van Rupel. Naar het noorden sluit het Systeem van Kasen-Bunde-Elsloo aan op het Limbricht Systeem.



Figuur 38: Hydrologische situatie in de sectie Plateau van Schimmert-Maas.

11 Telescopische of 'inzoombenadering' met behulp van de hiërarchische opbouw van de hydrologie

De hiërarchische opbouw van de hydrologische structuur door een laagsgewijze stapeling van: (a) zeer vele kleine lokale stromingsstelsels, op (b) een volgende laag van meerdere grotere subregionale stelsels, op (c) een laag van enkele grote tot zeer grote regionale en supraregionale stromingsstelsels, biedt grote mogelijkheden tot een efficiënt beleid en beheer van alle aspecten van watersystemen.



Figuur 39: Inzoomen vanuit een groot gebied naar het detail. (Garritsen, 1988a).

Indien eerst het grotere hydrologische kader bekend is, waarbinnen een probleemgebied, bijvoorbeeld een bedreigd natuurgebied, ligt, kunnen de randvoorwaarden in ruimte en tijd voor de stroming van en naar een dergelijk gebied goed worden vastgesteld. Vervolgens wordt voortgaand gefocuseerd ('ingezoomd') op het probleemgebied qua vraagstelling, gegevensverzameling en gegevensbewerking, totdat op het vereiste niveau een antwoord op het probleem is gevonden.

De hydrologische systeemanalyse biedt op die wijze een zeer efficiënte methode om doelgericht om te springen met menskracht, tijd en middelen. In systeemtermen betekent dit, dat vanuit een afzonderlijk kleiner deel het grotere geheel niet kan worden begrepen. De omgekeerde hiërarchische weg, van overzicht naar detail, van het geheel naar de onderdelen, biedt deze mogelijkheid wél door de voortgaande verfijning bij de telescopische benadering. Anderzijds is bij een dergelijke aanpak ook steeds een inhoudelijke terugkoppeling mogelijk en noodzakelijk tussen de verschillende hiërarchische niveaus en stromingsstelsels. Enkele voorbeelden hiervan zijn recente hydrologische systeemkarteringen van Salland, Zuidwest-Drenthe, Zuid-Holland en van het Merkskedal en de Dommelbeemden in Noord-Brabant.

Bij de karteringen van het Merkske en de Dommelbeemden werd, omdat het grotere hydrologische systeemkader aanvankelijk nog ontbrak, begonnen met gedetailleerd lokaal onderzoek in en rond de te beschouwen natuurterreinen. Al spoedig bleek, dat de hydrologische situatie en systeemopbouw ter plaatse alleen konden worden begrepen als eveneens het omliggende gebied in een veel wijdere omgeving werd bestudeerd. Pas toen dit bredere kader beschikbaar kwam, kon de situatie worden doorzien en een afgewogen hiërarchisch opgebouwd pakket van beleids- en beheeradviezen worden geformuleerd. Dit is dan ook de reden dat in de hiërarchische reeks van regio, naar stroomgebied, naar beekdal, naar individuele beemd, iedere schakel zijn eigen plaats en functie heeft en in de juiste tijd/ruimtelijke volgorde bestudeerd dient te worden.

In figuur 39 (Garritsen, 1988a) wordt zichtbaar, hoe voor het reservaat 'De Dommelbeemden' bij St. Oedenrode drie sterk verschillende schalen van ruimte en tijd nodig zijn om de hydrologische situatie in dit reservaat te begrijpen.

In de kern van het gebied komt schoon kalkrijk kwelwater omhoog, dat eeuwen geleden vele kilometers verder infiltreerde in het infiltratiegebied van het regionale grondwaterstromingsstelsel van de Midbrabantse rug. Aan de randen van de vegetatiekundig waardevolle beemden dringt een ondieper stromingsstelsel vanaf de aangrenzende hogere rand het Dommeldal binnen, dat in de laatste decennia sterk door de landbouw is vervuild. Binnen de beemden zijn tussen de slootjes nog weer zeer ondiepe lensvormige stromingsstelsels van recent regenwater aanwezig. Tenslotte wordt het gebied bij hoogwater regelmatig overstroomd door vervuild oppervlaktewater.

Een landsdekkende, inventariserende maar nog voorlopige hydrologische systeemkartering kan het kader bieden voor het formuleren van landelijk beleid en beheer, bijvoorbeeld bij het integrale waterbeheer en de plaats van de natuurwaarden daarin.

Specifieke maatregelen voor individuele natuurterreinen vereisen aanvullende, gedetailleerdere systeemkarteringen en modelleringen. Die kunnen direct binnen de grotere kaders geplaatst worden en vervolgens op maat worden gesneden. Het is niet nodig om een hydrologische systeemkartering op schalen van 1 : 10 000 of groter, landelijk dekkend uit te voeren, zoals ten dele bij het Merkske en de Dommelbeemden nodig bleek. Een uiteindelijke landelijke basiskartering op basis van de hydrologische systeemanalyse op een schaal van 1 : 50 000 lijkt echter noodzakelijk als fundament voor een samenhangend, doelgericht, landelijk, regionaal en lokaal, integraal waterbeheer.

12 Kwetsbaarheid van natuurgebieden in relatie tot vervuiling en verdroging van grondwaterstelsels

Veel voor het natuurbeheer interessante levensgemeenschappen zijn voor hun bestaan voor een groot deel afhankelijk van het regiem en de kwaliteit van het grondwater dat het gebied voedt. Als dit grondwater verandert van kwaliteit en hoeveelheid, zoals de afgelopen decennia op verschillende plaatsen is gebeurd, worden daarmee ook de levensgemeenschappen die van dit grondwater afhankelijk zijn, in hun voortbestaan bedreigd. Teneinde de aard van deze bedreigingen en de mate waarin deze een rol spelen vast te kunnen stellen, is kennis omtrent de gevolgen van onttrekkingen en het lozen van vervuilingen onontbeerlijk. De analyse van grondwaterstromingsstelsels is daarbij een noodzakelijk hulpmiddel, onder andere om de ruimtelijk gedifferentieerde achtergrondkennis te verschaffen voor een aantal basisvisies op natuurbehoud en natuurontwikkeling (Van Amstel et al., 1988).

12.1 Kwetsbaarheid van grondwaterstelsels voor vervuiling

Hieronder wordt nader ingegaan op de samenhang tussen vervuilingen en het transport ervan door grondwaterstromingsstelsels. Hierbij is het van belang om inzicht te krijgen in de verbreiding, de snelheid van de verspreiding en de uiteindelijke samenstelling van een vervuiling.

De verbreiding van een vervuiling hangt af van:

- **De aard van de lozing:** Deze kan in een puntbron worden geconcentreerd, zoals vaak bij industrieën het geval is, of als diffuse bron over een groot vlak worden uitgesmeerd (bijvoorbeeld bij de landbouw).
- **De aard van de vervuilende stof:** Slecht of niet afbreekbare stoffen zullen, als ze onderweg niet irreversibel gebonden worden, uiteindelijk de hele weg van inzig- tot uitgangspunt afleggen. Goed afbreekbare stoffen kunnen onderweg omgezet worden, waardoor het vervuilde areaal beperkt kan blijven, afhankelijk van de tijdsduur waarover de vervuiling plaatsvindt en het vermogen van de omgeving de stof om te zetten.
- **De hiërarchie en de grootte van het systeem waarop de lozing plaatsvindt:** Omdat de vervuiling zich in het algemeen slechts binnen éénzelfde systeem verplaatst, zal deze zich bij een ondiep lokaal systeem minder ver uitbreiden dan bij een groot regionaal systeem.
- **De plaats in het systeem waarop wordt geloosd:** Indien een vervuiling plaats vindt in het infiltratiegebied, zal het gehele systeem worden vervuild. Wanneer de vervuiling aan de uitgang plaatsvindt, heeft zij geen kans het systeem binnen te dringen. Bij vervuilingen tussen de in- en uitgang van een systeem zal alleen het benedenstroomse gedeelte van het systeem worden vervuild.
- **Het dynamische karakter van het systeem:** Indien een systeem grote fluctuaties vertoont, zal de vervuiling een sterk dispersief karakter hebben. Wanneer een lokaal systeem wordt vervuild dat boven een groter systeem ligt, kan, wanneer dat lokale systeem tijdelijk verdwijnt, de pluim met vervuild water door inkrimping van het lokale systeem buiten de systeemgrens komen te liggen. Op deze manier dringt de

vervuilde pluim door in het onderliggende systeem en wordt daar vervolgens door aangedreven.

In dit verband is een begripsmatig onderscheid tussen stroomlijnen en padlijnen nuttig. Bij modellering van stroomlijnen in een evenwichtssituatie van een systeem (zoals tot dusverre bij de modelleringen met FLOWNET en FLOSA-FD is gedaan) ligt de positie van alle stroomlijnen in de ruimte vast en verandert niet met de tijd. Als echter de randvoorwaarden voor de stroming in een grondwaterstromingsstelsel in de loop van de tijd veranderen (bijvoorbeeld door een wijziging in de grondwatervoeding, veranderend landgebruik of door onttrekking, kunstmatige infiltratie of gewijzigd peilbeheer van oppervlaktewater), zullen de stroomlijnen zich ook schoksgewijs of geleidelijk in de ruimte verplaatsen. Bij de modellering van een dergelijke niet-evenwichtssituatie volgen de waterdeeltjes niet langer een vastliggende stroomlijn maar een zogenaamde padlijn door de ondergrond. Dergelijke padlijnen beschrijven de werkelijke baan van de waterdeeltjes bij niet-stationaire stroming. Ze kunnen worden opgevat als de resultante van de beweging langs deelstukken van stroomlijnpatronen die elkaar opvolgen in ruimte en tijd. Bij stationaire stroming vallen padlijnen en stroomlijnen samen. Dit verklaart ook, waarom waterkwaliteitspatronen binnen grondwaterstromingsstelsels soms niet in overeenstemming zijn met de stroomlijnpatronen. De watermassa's met verschillende hydrochemische kenmerken weerspiegelen in hun ruimtelijke verbreiding nog de verplaatsingen bij één of meer voorafgaande stromings-situaties. Hun posities kunnen dan wel met padlijnen, maar niet met de actuele stroomlijnen worden begrepen.

De snelheid waarmee het transport van de vervuiling plaatsvindt hangt af van:

- **De snelheid van de grondwaterstroming binnen een stromingsstelsel:** In het algemeen is de verblijftijd in een lokaal systeem korter dan in een regionaal systeem.
- **De interactie tussen de vervuiling en de ondergrond:** Deze interactie hangt op haar beurt weer af van chemische, vaak zuurgraad- en redox-afhankelijke reacties, de adsorptie- en desorptiekenmerken van de ondergrond en van het materiaal waaruit de vervuiling bestaat. In het algemeen hebben bodems die uit kleien en venen bestaan een groot adsorptievermogen. Bodems die uit zand bestaan hebben een klein vermogen om stoffen te adsorberen. Verder geldt dat organische stoffen en meerwaardig valente en/of zware ionen gemakkelijker worden geadsorbeerd dan bijvoorbeeld éénwaardige of lichte ionen.

De vervuiling van grondwaterstromingsstelsels vindt grotendeels plaats op of in de nabijheid van het oppervlak en treft in de eerste plaats de zeer talrijke kleinere lokale systemen. Op de voorlopige systemenkaart van bijlage 1 zijn die echter niet aangegeven, vanwege de gekozen kaartschaal en het grotendeels ontbreken van een systematische kartering daarvan. Deze kleinere lokale systemen, die de grotere diepere over aanzienlijke oppervlakken bedekken, nemen echter wel het grootste deel van de totale grondwaterflux voor hun rekening met relatief hoge snelheden (in de orde van enkele meters tot honderd(en) meters per jaar) en relatief korte verblijftijden (vaak in de orde van enkele jaren tot tientallen of honderden jaren). Zij zijn in het algemeen het snelst vervuild en het meest kwetsbaar. Anderzijds zijn ze door hun beperkte omvang, diepte en snelle verversing eerder te reguleren en te saneren. Vervuilingen direct in de infiltratiegebieden van grotere systemen werken veel langzamer door naar de uitgangen van dergelijke systemen, maar zijn door hun grote omvang en diepte veel moeilijker te corrigeren. Na langere tijd raken dan ook grote arealen van de ondergrond verontreinigd. Juist de grondwatervoorraden, die worden

gevoed door deze grotere diepere stromingsstelsels, worden veel gebruikt voor de openbare watervoorziening en verdienen een gericht, op de systemen gebaseerd beschermingsbeleid met een veel langere tijdshorizon dan vaak tot nog toe het geval is.

Bij de bestudering van afzonderlijke verontreinigingsbronnen zal dan ook steeds moeten worden nagegaan in welke systemen, en op welke positie daarbinnen, ze zich bevinden en tevens of de kennis van de systemen op voldoende nauwkeurige schaal aanwezig is voor de bestudering van het probleem. Dikwijls zal plaatselijk een aanvullende kartering van de lokale hydrologische systemen nodig zijn, eventueel aangevuld met een niet-stationaire modellering (dit laatste is in principe mogelijk met FLOSA-FD maar tot dusverre niet toegepast).

De uiteindelijke samenstelling van het vervuilde grondwater dat aan de uitgang van een systeem wordt aangetroffen, hangt af van chemische reacties die hebben plaatsgevonden tijdens het transport in de ondergrond. Als voorbeeld kunnen verschillende reacties worden genoemd die een rol spelen bij omzetting van nitraat onder aërobe en anaërobe condities.

Enkele producten die door de omzetting van nitraat kunnen vrijkomen zijn waterstofionen (verzuring), waardoor de zuurgraad daalt en meer carbonaten opgelost kunnen worden. Bij sterke denitrificatie kan de zuurgraad ^{? moet zijn nitrificatie?} beneden de 5 dalen en wordt aluminium uit de bodem vrijgemaakt. Bij denitrificatie onder anaërobe omstandigheden kan sulfaat vrijkomen.

12.2 Gevolgen voor grondwaterkwaliteit door overbemesting

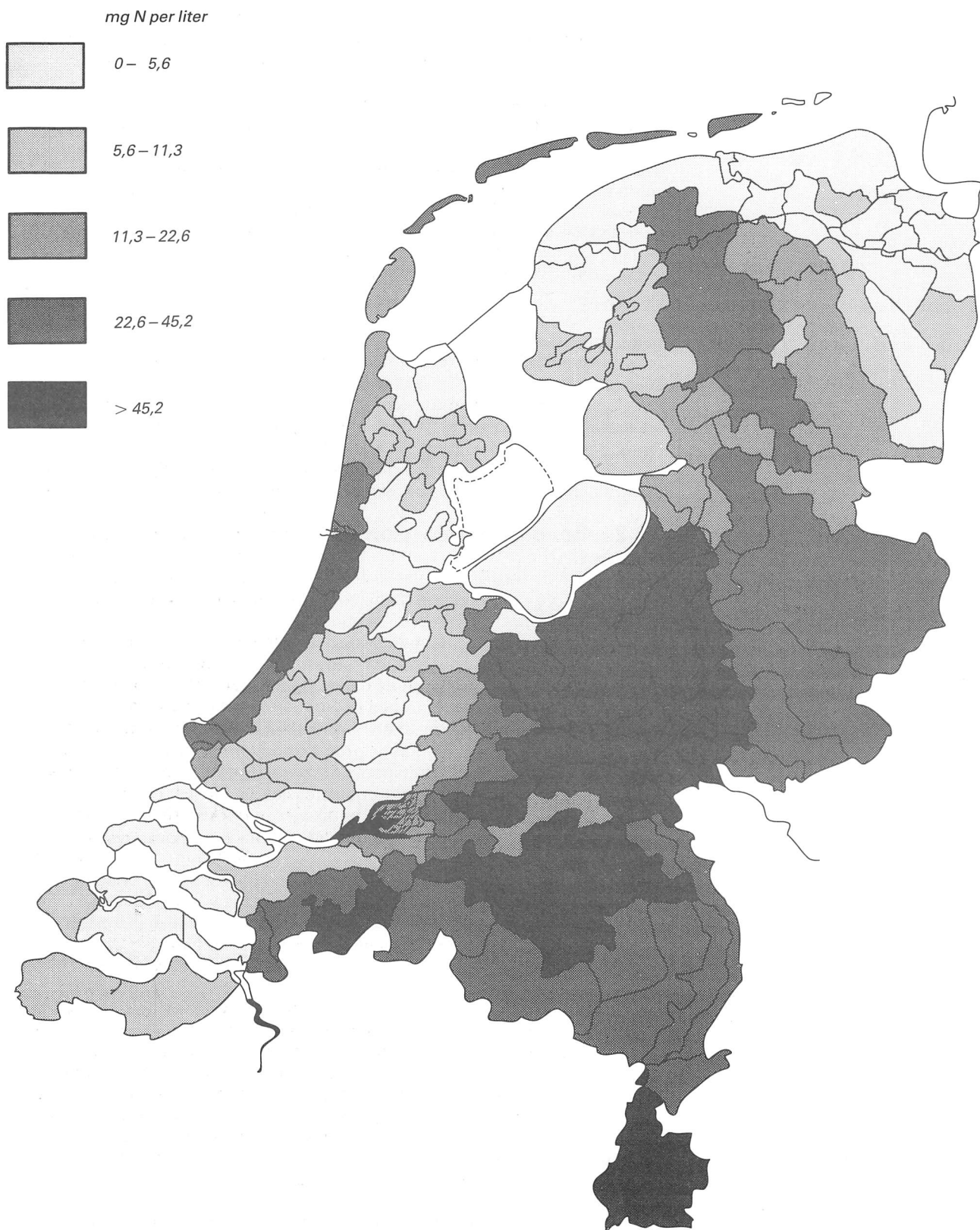
In figuur 40 is de gemiddelde nitraatconcentratie in het percolatiewater (neerslagoverschot) per landbouwgebied weergegeven (RIVM, 1988). De berekende concentraties hebben betrekking op het bovenste grondwater en zijn berekend aan de hand van de stikstofoverschotten, afkomstig uit dierlijke mest en kunstmest, en de denitrificatiecapaciteit van de bodem. Naarmate de grondwaterstand zich dieper beneden het maaiveld bevindt, neemt denitrificatiecapaciteit af en hiermee het gevaar voor nitraatuitspoeling toe. Gronden met een ondiepe grondwaterstand zijn daarentegen extra kwetsbaar voor fosfaatuitspoeling. Vooral op zandgronden zijn de nitraatgehalten in het bovenste grondwater hoog vanwege de relatief diepe grondwaterstand. Volgens de berekeningen wordt bij de huidige mestdoseringen in het gehele zandgebied de drinkwaternorm overschreden (50 mg nitraat/liter).

In infiltratiegebieden met een dik watervoerend pakket en een goede doorlatendheid kan het grondwater naar diepere lagen doordringen, waardoor de nitraatverontreiniging zich over een aanzienlijke diepte en over grote afstand kan verplaatsen. Met name het ondiepe grondwater onder de cultuurgronden op de Veluwe, in de Gelderse Vallei en het centrale en oostelijke deel van Brabant en in Zuid-Limburg loopt ernstig gevaar om met nitraat verontreinigd te worden. In mindere mate kan ook op de overige delen van zandgronden uitspoeling van nitraat optreden.

De vervuiling van het grondwater vanuit de Veluwe kan vrij diep gaan en zich relatief snel verbreiden. De snelle verbreiding wordt veroorzaakt door de relatief hoge doorlatendheid van de zandige ondergrond en de relatief steile helling van het grondwatervlak.

Bij de westelijke tak van het Veluwe Systeem wordt een deel van het infiltratiegebied vervuild. Daarmee wordt ook de waterkwaliteit bedreigd in het benedenstroomse gebied (De Gelderse Vallei) en het gehele uitgangsgebied. Hetzelfde geldt voor de gehele tak die vanuit de stuwwal van Garderen wordt gevoed.

In het oostelijk deel van Brabant wordt met name het Complex van Peelschol Systemen vervuild. Dit bestaat uit ondiepe lokale systemen, die over de randen van de schol afwateren. Doordat het hier voor het meren-



Figuur 40: Gemiddelde stikstofconcentraties in het percolatiewater per landbouwgebied in 1986 (RIVM, 1988)

deel vervuiling van lokale systemen betreft, reikt zij niet diep en worden de stroomtakken die van het Kempisch Plateau en van de oostzijde van de Maas uit Limburg komen, niet aangetast.

Voor het kwaliteitsherstel van grondwaterstelsels geldt dat twee uiterste gevallen kunnen worden onderscheiden, waartussen zich een geheel scala bevindt (Engelen, 1985). Deze gevallen zijn:

- Kleine lokale stromingsstelsels waarin het water snel stroomt en waarbij de ondergrond uit zand bestaat, zullen wanneer de vervuiling stopt relatief snel in hun oude staat terugkeren.
- Grote regionale systemen met lage stroomsnelheden en veel klei of veen in de bodem, waarbij desorptieprocessen voor een lange nalevering zorgen, zullen veel tijd nodig hebben om in hun oorspronkelijke staat terug te keren.

12.3 De invloed van onttrekkingen op systemen

Voor het beoordelen van de invloed van onttrekkingen op systemen moeten de volgende punten in beschouwing worden genomen:

- Het evenwicht tussen systemen onderling is een dynamisch evenwicht. Onttrekkingen kunnen dit evenwicht verschuiven, waarbij de ruimte die oorspronkelijk door een systeem werd ingenomen kleiner kan worden en een aangrenzend systeem zich kan uitbreiden.
- Voor het evenwicht binnen een systeem is de verhouding tussen de grootte van het systeem en de grootte van de onttrekking van belang. Een kleine onttrekking in een groot systeem heeft weinig invloed. Een grote onttrekking in een klein systeem kan het hele systeem doen verdwijnen.
- Hierbij moet ook de plaats van de onttrekking binnen het systeem worden beschouwd. Er is een zekere speelruimte, wanneer een onttrekking zich in de natuurlijke uitgang van het systeem bevindt. Wanneer de onttrokken hoeveelheid de aanvoer door kwel niet overschrijdt, zullen het kwantitatieve evenwicht en de grondwaterstanden binnen het grootste deel van het systeem niet ernstig verstoord worden. Is dit wel het geval dan zullen de systeemgrenzen verschuiven. De kwalitatieve gevolgen van een dergelijke relatief kleine onttrekking kunnen lokaal wel van grote betekenis zijn. In het kwelgebied kunnen bijvoorbeeld de waterkwaliteitsgrenzen ten nadele van de vegetatie verschuiven. Een onttrekking op elke andere plaats binnen een systeem zal, mits bovengenoemde verhouding voldoende groot is, eveneens effect hebben op de omvang van het systeem en de ruimtelijke waterkwaliteitsverdeling.
- Verder is het al dan niet stationaire karakter van de onttrekking van belang. Een niet stationair onttrekkingspatroon kan dispersie van de systeemgrenzen veroorzaken.
- Tenslotte is de verhouding tussen de mate van (kunstmatige) aanvulling en de grootte van de onttrekking van belang. Is de aanvulling in de orde van grootte van de onttrekking, dan zal de sterkte van het systeem gehandhaafd blijven. Wel kunnen nog belangrijke vormveranderingen van het systeem optreden, afhankelijk van de onderlinge positie van de aanvullings- en onttrekkingspunten of -zones en hun plaats binnen het systeem. Uiteraard kunnen dan ook belangrijke veranderingen optreden in de waterkwaliteit en in de waterkwaliteitspatronen, met mogelijk grote gevolgen voor hele systemen.

Omtrent de locatie van de onttrekkingen binnen de systemen kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden:

Bij een aantal systemen valt het op dat de meeste en de grootste onttrekkingen gesitueerd zijn nabij de randen van het infiltratiegebied van de systemen. Dit is het geval bij het Glaciale Plateau Systeem, bij het

Oostgroningse Dekzandsysteem en bij het Veluwe Systeem (vergelijk bijlage 1 met figuur 14).

Bij enkele andere systemen vinden de onttrekkingen juist grotendeels in het infiltratiegebied plaats. Voorbeelden hiervan zijn: het Utrechtse Heuvelrug Systeem, de duinsystemen, het Systeem van de Twentse stuwwallen, het Systeem van de Sallandse stuwwallen, het Complex van Systemen van de Achterhoek, de kleinere Systemen van het Montferland, van St. Nicolaasga-Joure en van Vroomshoop-Hooge Hexel.

Verder valt op dat in het Systeem van de Twentse stuwwallen de onttrekkingen zijn geconcentreerd in de glaciale geulen, omdat hier de ondoorlatende basis met zout water diep ligt en een relatief grote hoeveelheid zoet water wordt aangetroffen.

In Noord-Brabant valt op dat onttrekkingen voorkomen in alle systemen, behalve in het Complex van Peelschol Systemen. Dit laatste systeem bestaat uit een groot aantal kleine lokale systemen, waaruit geen waterwinning van betekenis mogelijk is. Het overgrote deel van de resterende onttrekkingen komt voor in riviersystemen, waar oeverfiltraat wordt onttrokken.

Enkele industriële onttrekkingen komen voor in gebieden met zout of brak grondwater (onder andere bij Hoogovens in IJmuiden).

Literatuur

Algemeen

De gegeven literatuurverwijzingen vormen slechts een deel van het beschikbare bestand. Een selectie van de meest op het onderwerp stromingsstelsels betrekking hebbende titels biedt de geïnteresseerde lezer de mogelijkheid, via de daarin opgenomen uitvoerige literatuurverwijzingen, zelf verder zijn weg te zoeken.

Atlas van Nederland (1987). Deel 16, Landschap. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.

Commissie Hydrologisch Onderzoek TNO (1986). Water in the Netherlands. Proc. and Information no. 37. 's-Gravenhage.

Elburg, H. van, G.B. Engelen en C.J. Hemker (1987). FLOWNET, Gebruikersgids versie 5. Vrije Universiteit, Amsterdam.

IWACO en Raadgevend Bureau Drs. A. Tukkers BV. (1987). Herstelbaarheid van bodemverontreiniging: verblijftijden van verontreinigd grondwater in de bodem. Project 223 en 1163. Ministerie VROM, Woerden.

Pedroli, G.B.M. (1987). Ecohydrologie, een overzicht. In: Landschap, 1987, 4, pp. 320-330.

Streefkerk, J.G. en W.A. Casparie (1987). De hydrologie van hoogveensystemen. Staatsbosbeheer 1987-19, Utrecht.

Stuyfzand, P.J. (1986). Een nieuwe hydrochemische classificatie van watertypen met Nederlandse voorbeelden van toepassing. In: H₂O (19) nr. 23, pp. 562-568.

Zagwijn, W.H. (1975). De paleogeografische ontwikkeling van Nederland in de laatste drie miljoen jaar. In: KNAG Geogr. Tijdschr. IX, 3, pp. 181-201.

Zagwijn, W.H. (1986). Nederland in het Holoceen. Geologie van Nederland, Deel 1. Rijks Geologische Dienst, Haarlem, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.

Zijl, W. (1988). Three-dimensional flow systems analysis: Basic equations and numerical modeling. Rapport OS 88-12. TNO-DGV, Delft.

Hoofdstuk 1

Engelen, G.B. (1984). Hydrological systems analysis. A regional case study. Rapport OS-84-20. TNO-DGV, Delft.

Engelen, G.B. en G.P. Jones (red.) (1986). Developments in the analysis of groundwater flow systems, IAHS Publ. 163.

Freeze, R.A. en P.A. Witherspoon (1966). Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. In: Wat Resources Res. 2, pp. 641-656.

Freeze, R.A. en P.A. Witherspoon (1967). Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. In: Wat Resources Res. 3, pp. 623-643.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (1985). Omgaan met water. Naar een integraal waterbeleid. 's-Gravenhage.

Nawalany, M. (1986a). FLOSA-FD. Introduction to system-analysis of three dimensional groundwater flow. Rapport OS 86-07. TNO-DGV, Delft.

- Nawalany, M. (1986b). Numerical model for the transport velocity representation of groundwater flow. VIth Int. Conf. on Finite Elements in Water Resources, Lissabon.
- Stuurman, R.J., A. Biesheuvel en L.J. van der Mey (1988). Ecohydrologisch onderzoek van het Merkske-stroomgebied. Eindrapport: Een hydrogeologisch en vegetatiekundig onderzoek ten dienste van het natuurbeschermingsbeleid. Benelux Economische Unie.
- Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. In: Journal of Geophysical research, vol 8 no 16, pp. 4795-4812.
- Tóth, J. (1966). Mapping and interpretation of field phenomena for groundwater reconnaissance in a prairie environment. In: Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrol., 11, no 2, pp. 1-49. Alberta Canada.
- Witmer, M.C.H., J. Jelsma en J.H. Woudstra (1987). Watersystemen en integraal waterbeheer. In: Milieu 2, 1987/3, pp. 66-71.
- Zijl, W. (1986). Numerical simulations based on stream functions and velocities in three-dimensional groundwater flow. In: Journal of Hydrology, 85, pp. 349-365.
- Zijl, W. (1988). Three-dimensional flow systems analysis: Basic equations and numerical modelling. Rapport OS 88-12. TNO-DGV, Delft.

Hoofdstuk 2

- Engelen, G.B. (1963). Hydrochemistry as a tool in the determination of the origin of upward seepage in the polder area Alblasserwaard (the Netherlands). In: Geologie en Mijnbouw 48-2, pp. 226-239.
- Engelen, G.B. (in voorbereiding). Anomalieën in de zoet-zout en thermische grensvlakken als aanwijzingen voor opstijgend hydrothermaal water in de ondergrond.
- Ton, H. en J. Lourens. (1978). Inventarisatie van de waterbeheersing. Werkgroep Inventarisatie Landbouw. Landinrichtingsdienst, Utrecht.
- Van Dalftsen, W. (1981). The shallow surface temperature field in the Netherlands. Rapport OS 81-05. TNO-DGV, Delft.
- Van Dalftsen, W. (1982). Koolstof-14. Proefonderzoek naar de hydraulische geleiding van de ondergrond in de Over-Betuwe. Rapport OS 82-30. TNO-DGV, Delft.
- Van Dalftsen, W. (1983). Het ondiepe ondergrondse temperatuurveld in Nederland. Rapport OS 83-31. TNO-DGV, Delft.

Hoofdstuk 3

- Bots, W.P.C.M., P.C. Jansen en G.J. Noordewier (1978). Fysisch Chemische samenstelling oppervlakte- en grondwater in het noorden des lands. ICW Regionale Studies 13. Wageningen.
- Broers, H.P. (1987). Grondwaterstromingsstelsels in Zuid-Friesland. Prov. Friesland, Limnologisch instituut, VU. Amsterdam.
- Broers, H.P. (1988). Modelstudie grondwaterstromingsstelsels in Zuid-Friesland. Rapport 88-08. TNO-DGV, Delft.
- Csengö, T. (1981). Matig tot slecht doorlatende afzettingen boven het grove watervoerende pakket 'deklagen' in Drenthe.
- Csengö, T. (1982). Het grondwater in Drenthe. Waterleidingmaatschappij Drenthe. Assen.
- Geoëlektrisch onderzoek Stavoren Steenwijk. (1980). Rapport GF-124. TNO-DGV, Delft.
- Gieske, J.M.J. (1988). Hydrologische systemen in Zuidwest-Drenthe, Provinciale Waterstaat Drenthe. Assen.
- Gonggrijp, G.P. (red.) (1984). Gea-Objecten van Drenthe, RiN-rapport 84/8. Rijksinstituut voor Natuurbeheer, Arnhem.
- Griede, J.W. (1978). Het ontstaan van Frieslands Noordhoek. Vrije Universiteit, Amsterdam.

- Grondwaterplan Provincie Friesland (1986). TNO-DGV, Delft.
 Grondwaterplan Provincie Groningen (1987).
 Oude Munnink, J.M.E. en G.B. Engelen (1986). Hydrological systems of the dissected Pleistocene Plateau in south-west Drenthe (the Netherlands). In: Engelen, G.B. en G.P. Jones (red.). Developments in the analysis of groundwater flow systems, IAHS Publ. 163, pp. 224-239
 Rijks Geologische Dienst (1987). Geologische en hydrogeologische inventarisatie IJsselmeergebied.
 Roeleveld, W. (1974). The holocene evolution of the Groningen marine-clay district. Berichten Rijksdienst Oudheidkundig Bodemonderzoek, suppl, jaargang 24, pp. 1-132.
 Snijders, F.L. (1985). Fysische geografie in de provincie Groningen. Milieu en Landschapsonderzoek. PPD Groningen.
 Technische Werkgroep Grondwaterplan (1984). Rapportage grondwaterplan. Provinciale Waterstaat van Drenthe, Assen.
 Werkgroep geohydrologisch onderzoek in de provincie Drenthe (1978). Regionaal geohydrologisch onderzoek in de provincie Drenthe.
 Werkgroep Watervoorziening Drenthe (1979). Water naar Drenthe.
 Zagwijn, W.H., en C.J. van Staalduinen (1975). Geologische overzichtskaarten van Nederland (1: 600 000). RGD, Haarlem.

Gebruikte kaarten:

- Atlas van Nederland (1974). Geomorfologische kaart 1 : 600 000.
 Bodemkaart van Nederland, 1 : 250 000 (1985). Stiboka, Wageningen.
 Geomorfologische kaart van Nederland 1 : 50 000. Stiboka/RGD (alle bladen voor zover gereed).
 Grondwaterkaart van Nederland (TNO-DGV):
 (1975) Groningen;
 (1978) Noordoost-Groningen;
 (1978) Overijsselse Vecht;
 (1979) Alkmaar;
 (1979) Zandvoort, Amsterdam;
 (1980) Lelystad, Zwolle;
 (1980) Medemblik;
 (1984) Sneek, Heerenveen;
 (1984) Stavoren, Steenwijk;
 (1987) Leeuwarden, Groningen (concept).
 Topografische kaart Nederland, 1 : 250 000. Topografische Dienst Nederland, Delft.
 Grote Topografische Atlas van Nederland 1 : 50 000 (1987). Wolters-Noordhoff, Groningen. Topografische Dienst Nederland, Emmen.
 Waterstaatskaart 1 : 50 000. Rijkswaterstaat, Topografische Dienst Nederland (alle bladen voor zover gereed).

Hoofdstuk 4

- Beukeboom, Th.J. (1976). Hydrology of the Frisian islands. Vrije Universiteit, Amsterdam.
 Grondwaterkaart van Nederland (1987). Waddeneilanden. Rapport nr. GWK 42. TNO-DGV, Delft.

Hoofdstuk 5

- Appelo, C.A.J. (1988). Beïnvloeding van de waterkwaliteit in het Hierdense Beekgebied. Vrije Universiteit, Amsterdam.
 Brouwer, G.K., en J.H. Hoogendoorn (1986). Grondwaterstromingssystemen Salland/oostelijke Veluwe. Rapport OS 86-36. TNO-DGV, Delft.
 Brussel, J. van (1987). De Hydrochemie van het Hammervliet, Waterleidingmaatschappij 'Overijssel' NV, Zwolle en Vrije Universiteit, Amsterdam.

- Engelen, G.B. (1984). Hydrological Systems Analysis. Rapport OS 84-20. TNO-DGV, Delft.
- Engelen, G.B. en B.F.M. Kal (1985). Hydrologisch onderzoek in WOL-kader van het Loosdrechtse Plassengebied in verband met beleid en beheer voor waterkwaliteitsherstel, WOL-rapport 1985-1, Instituut voor Aardwetenschappen. VU, Amsterdam.
- Haak, A.M. (1985). Inventarisatie grondwatergegevens in de provincie Overijssel. Rapport OS 85-06. TNO-DGV, Delft.
- Hettling, H.K. (1985). Isotopic groundwater study of the Loosdrecht lakes area, WOL-rapport 1985-4, Instituut voor Aardwetenschappen. VU, Amsterdam.
- Lanen, H.A.J. van (1983). Globale verblijftijden in de onverzadigde zone van de Utrechtse Heuvelrug. Rapport 83-22. RID, Leidschendam.
- Meinardi, C.R. (1986). De relatie tussen de hydrogeologische opbouw (pleistoceen) van Nederland en grondwaterstroming. LUW, PAO-cursus. RIVM, Leidschendam.
- Provincie Gelderland (1985). Grondwaterplan provincie Gelderland.
- Provincie Utrecht (1987). Grondwaterplan provincie Utrecht (ontwerp).
- Vasak, L. (1979). Hydrochemische patronen in het Barneveldse Beekgebied. Syllabus St. Postac. Training Gezondheidstechniek. Cursus geohydrologische systemen en exploratietechnieken. Delft.
- Verkooijen, R.G.V.A. (1981). Een geohydrologische inventarisatie voor het Gelderse rivierengebied en een regionaal-hydrologische systeembepaling voor het rivierengebied ten oosten van Tiel. Dienst Waterbeheer prov. Gelderland, Arnhem.
- Verkooijen, R.G.V.A., J.H. Hoogendoorn en P. Grootjans (1985). Hydrochemie van de provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer, provincie Gelderland, Arnhem, TNO-DGV Oosterwolde, Delft.
- Zagwijn, W.H., en C.J. van Staalduinen (1975). Geologische overzichtskaarten van Nederland (1: 600 000). RGD, Haarlem.

Gebruikte kaarten:

- Atlas van Nederland (1974). Geomorfologische kaart 1 : 600 000.
- Bodemkaart van Nederland, 1 : 250 000 (1985). Stiboka, Wageningen.
- Geomorfologische kaart van Nederland 1: 50 000. Stiboka/RGD (alle bladen voor zover gereed).
- Grondwaterkaart van Nederland (TNO-DGV):
- (1972) 34W, 41W: Enschede, Aalten;
 - (1973) 28O, 29, 34O, 35: Almelo, Denekamp, Enschede-Oost, Glanerbrug;
 - (1978) 21O, 22WO, 23W: Overijsselse Vecht;
 - (1978) 31O, 32W, 38O, 39W: Utrecht;
 - (1981) 40W: Arnhem-West;
 - (1983) 33O: Apeldoorn-Oost;
 - (1985) 20W, 26WO: Lelystad, Harderwijk;
 - (1985) 27O, 28W: Heerde, Almelo.
- Topografische kaart Nederland, 1 : 250 000. Topografische Dienst Nederland, Delft.
- Grote Topografische Atlas van Nederland 1 : 50 000 (1987). Wolters-Noordhoff, Groningen, Topografische Dienst Nederland, Emmen.
- Waterstaatskaart 1 : 50 000. Rijkswaterstaat, Topografische Dienst Nederland (alle bladen voor zover gereed).

Hoofdstuk 6

- ICW (1982). Grond- en oppervlaktewater Noord-Holland benoorden het IJ. Regionale Studies 16, Wageningen.
- Provinciaal Grondwaterplan Noord-Holland (1986).

- Stuyfzand, P.J. (1985). Hydrochemie en hydrologie van het duingebied tussen Egmond en Wijk aan Zee. Kaartblad 19C, SWE-85-012. KIWA, Rijswijk.
- Stuyfzand, P.J. (1987). Hydrochemie en hydrologie van duinen en aangrenzende polders tussen Zandvoort en Wijk aan Zee (Kaartbladen 24F en 25A). SWE 86-016. KIWA, Rijswijk.
- Stuyfzand, P.J. (1988). Hydrochemical evidence of fresh and salt water intrusion in the coastal dunes aquifer system of the Western Netherlands. Proc. SWIM 10 symposium, Gent 1988. In: Natuurwetenschappelijk Tijdschrift (in druk).

Gebruikte kaarten:

- Atlas van Nederland (1974). Geomorfologische kaart 1 : 600 000.
- Bodemkaart van Nederland, 1 : 250 000 (1985). Stiboka, Wageningen.
- Geomorfologische kaart van Nederland 1 : 50 000 Stiboka/RGD (alle bladen voor zover gereed).
- Grondwaterkaart van Nederland (TNO-DGV):
 (1979) 19W, 19O, 20A: Alkmaar;
 (1979) 24, 25W, 25O: Zandvoort, Amsterdam;
 (1980) 14W, 14O, (9D, 15C): Medemblik.
- Topografische kaart Nederland, 1 : 250 000. Topografische Dienst Nederland, Delft.
- Grote Topografische Atlas van Nederland 1 : 50 000 (1987). Wolters-Noordhoff, Groningen, Topografische Dienst Nederland, Emmen.
- Waterstaatskaart 1 : 50 000. Rijkswaterstaat, Topografische Dienst Nederland (alle bladen voor zover gereed).

Hoofdstuk 7

- Promes, P. (1988). Modelstudie hydrologische systemen in centraal Zuid-Holland. Rapport OS 88-21. TNO-DGV, Delft.
- Ruiter, J.C. de (1986). Hydrologische systeemanalyse in centraal Zuid-Holland. Prov. Waterstaat van Zuid-Holland, Vrije Universiteit.
- Ruiter, J.C. de (1988). Hydrologische systeemanalyse van Zuid-Holland. Rapport in voorbereiding. TNO-DGV, Delft.
- Stuyfzand, P.J. (1988). Hydrochemical evidence of fresh and salt water intrusion in the coastal dunes aquifer system of the Western Netherlands. Proc. SWIM 10 symposium, Gent 1988. In: Natuurwetenschappelijk Tijdschrift (in druk).

Hoofdstuk 8

- Werkgroep Zuid-Holland (1988). Wateraanvoerbehoefte Zuidhollandse eilanden en waarden. ICW, Wageningen, rapport in voorbereiding.

Gebruikte kaarten:

- Geomorfologische kaart van Nederland (Stiboka/RGD):
 (1984) 49: Bergen op Zoom;
 (1986) 42, 47, 48: Middelburg, Zierikzee, Cadzand;
 (1987) Zeeuws-Vlaanderen.
- Grondwaterkaart van Nederland (TNO-DGV):
 (1982) 47O, 48, 49W, 53O, 54W, 55W: Zeeuws-Vlaanderen;
 (1984) 36H, 42WO, 43W: Goedereede, Zierikzee, Willemstad;
 (1985) 48, 49W, 43c en d: Middelburg, Bergen op Zoom.

Hoofdstuk 9

- Flink, J. (1985). De verspreiding van arseen in het grondwater in zuidelijk Noord-Brabant. Rapport 840348004. RIVM, Leidschendam.

- Garritsen, A.C. (1988a). Stromingsstelsels en waterkwaliteit in de Dommelbeemden. Consulentschap NMF Noord-Brabant, Tilburg.
- Heslinga, W. (1988). Rapport over stromingssystemen aan de Noord- en Oostrand van het Kempisch Plateau (in voorbereiding aan de VU, Amsterdam).
- IWACO (1987). Eindrapport geohydrologisch onderzoek Centrale Slenk. Fase 2, Rapport 30.349-A ten behoeve van Prov. Waterstaat Noord-Brabant.
- Joosten, J.H.J. en T.W.M. Bakker (1987). De Groote Peel in verleden, heden en toekomst. Rapport 88-4. SBB, Utrecht.
- Kok, W. (1988). Rapport over stromingssystemen in Midden-Limburg (in voorbereiding aan de VU, Amsterdam).
- Stuurman, R.J., A. Biesheuvel en J.L. van der Mey (1987). Hydrologische systeemkartering van het Merkske-stroomgebied, Noord-Brabant. Ecohydrologisch onderzoek van het Merkske-dal; Hydrologische systeemanalyse ten dienste van het natuurbeschermingsbeleid (hoofdstuk 3). Benelux Economische Unie, sectie 'natuurbehoud en landschapsbescherming', werkgroep 'inventarisatie beleidsinstrumenten grensoverschrijdende natuurgebieden'.
- Stuurman, R.J., A. Biesheuvel, J.L. van der Mey (1987). Hydrologische systeemkartering westelijk Noord-Brabant. Analyse van westelijk Noord-Brabant op kaartschaal 1 : 200.000, Deelrapport 2. Rapport OS 87-42. TNO-DGV, VU.
- TNO-DGV, VU (1988). Hydrologische systeemkartering westelijk Noord-Brabant. Serie Technische en Beleidsrapporten, diverse auteurs, Delft, Amsterdam.

Hoofdstuk 10

- Dorenmalen, N. van, M. Inckel, H. Ligeon en P. Richters (1988). Bijdragen van het Plateau van Margraten en het Plateau van Schimmert aan de voeding van de Maas. Vakgroep Bodemkunde en Geologie, Landbouwuniversiteit, Wageningen.
- Nota, D.J.G. en B. van de Weerd (1978). A hydrogeological study in the basin of Gulp Creek. A reconnaissance in a small catchment area 1. Groundwater flow characteristics. Meded. 78-20. Landbouwhogeschool, Wageningen.
- Nota, D.J.G. en B. van de Weerd (1980). A hydrogeological study in the basin of Gulp Creek. A reconnaissance in a small catchment area 2. Fissured rocks and their anisotropic behavior in catchment studies. Meded. 80-15. Landbouwhogeschool, Wageningen.
- Nota, D.J.G., en A.M.G. Bakker (1983). Surface- and groundwater in the basin of Gulp Creek. Some major characteristics. In: Geologie en Mijnbouw 62 pag. 511-517.
- Nota, D.J.G., A.M.G. Bakker, B. van de Weerd en G. Halma (1988). A hydrological study in the basin of the Gulp Creek. A reconnaissance in a small catchment area 3. Chemistry of surface- and groundwater. Meded. 87-7. Landbouwuniversiteit, Wageningen.
- Provinciale Staten van Limburg (1987). Grondwaterplan Provincie Limburg Maastricht.

Gebruikte kaarten:

- Grondwaterkaart van Nederland (uitgave TNO-DGV):
 (1974) 57O, 58O, 58W: Roerdalslenk;
 (1977) 60W, 60O: Sittard;
 (1980) 61, 62W, 62O: Maastricht, Heerlen.

Hoofdstuk 11

- Diggelen, R. van en A.P. Grootjans (1988). Hydro-ecologisch onderzoek Gorecht. Vegetatie en grondwatersystemen. Concept rapport Lab. van Plantenoecologie, Rijksuniversiteit, Groningen.
- Garritsen, A.C. (1988a). Stromingsstelsels en Waterkwaliteit in de Dommelbeemden, Consulentschap NMF Noord-Brabant, Tilburg.
- Stuurman, R.J., A. Biesheuvel, J.L. van der Mey, 1988, Hydrologische systeemkartering rond beekdalen en dan speciaal met betrekking tot het Merkske. Deelrapport 3, OS 87-43. TNO-DGV, VU.

Hoofdstuk 12

- Amstel, A.R. van, G.F.W. Herengreen, C.S. Meyer, E.F. Schoorl-Groen en H.E. van Veen (1988). Vijf visies op natuurbehoud en natuurontwikkeling. Rapport nr. 30. RMNO, Rijswijk.
- Engelen, G.B. (1985). Vulnerability and restoration aspects of groundwater flow systems. Mem. 18th Congres IAHR, part 3, pp 64-69. Cambridge.
- Garritsen, A.C. (1988b). Permanente onttrekkingen van grondwater in Nederland. Interimrapport jan. 1988. Instituut voor Milieuvraagstukken Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne (1988). Zorgen voor Morgen. Nationale milieuverkenning 1985-2010. Alphen aan den Rijn.
- Rolf, H.L.M (1988). Verdroging in Nederland? Jaarverslag 1987, pp 83-89. TNO-DGV, Delft.

Samenvatting

In dit rapport zijn de belangrijkste natuurlijke en kunstmatige grondwatersystemen in Nederland samengevat.

Het resultaat is een voorlopige kaart 1 : 600 000, waarop de grondwaterstromingsstelsels in Nederland zijn weergegeven. Naast de kaart worden profielen met numeriek gemodelleerde stroomlijnen en een korte systematische beschrijving van de systemen gegeven.

De benadering is gebaseerd op de theorie van Tóth, die uitgaat van geneste stromingsstelsels en die voor Nederland nader is getest en uitgewerkt door Engelen en medewerkers in nauwe samenwerking met de Dienst Grondwaterverkenning van TNO.

Hoofdstuk 1 behandelt de schaal, homogeniteit, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de kaart en de profielen en van de theorie en methodologie van geneste grondwaterstelsels, die aan deze studie ten grondslag ligt.

Hoofdstuk 2 belicht acht typen grondwaterstromingsstelsels en plaatst hun ontstaan in een geologische en historische context. De behandelde stelsels variëren van natuurlijke oude thermo-minerale stelsels, die langs breuken worden gevoed, tot jonge kunstmatige stelsels, waarin het water naar waterwinningen en polders stroomt. Het geheel wordt toegelicht aan de hand van een aantal globale kaartjes.

In hoofdstuk 3-10 worden de individuele, voornamelijk regionale en subregionale stromingsstelsels kort toegelicht. Een verdere detaillering is te zien in de profielen.

Hoofdstuk 11 licht het 'inzoomen' toe van regionale via subregionale naar lokale systemen. Met deze methode is het mogelijk om systematisch de ruimtelijke en tijdseffecten van beschermende of bedreigende ingrepen in de nabije of verre omgeving na te gaan, bijvoorbeeld ten behoeve van de landbouw, de drinkwatervoorziening of de afvalverwerking.

Hoofdstuk 12 behandelt in het kort de kwetsbaarheid van stromingsstelsels en de voortplanting van bedreigingen voor natuurterreinen, zoals die kunnen ontstaan door grondwateronttrekkingen, intensieve drainage en het doorleken van meststoffen naar het grondwater. Deze bedreigingen worden benaderd vanuit het perspectief van hiërarchische geneste stromingsstelsels.

Appendix A geeft een overzicht van de historie en de verbreiding van hydrologische systeemkarteringen in Nederland.

Appendix B bevat een lijst van de geologische formaties met de horizontale en verticale doorlatendheden, zoals die zijn gebruikt voor de berekening van stroomlijnen in de profielen.

Appendix C bevat een alfabetische lijst van de afkortingen van de systemen per regio.

Summary

An inventory survey was done on the principal natural and man-induced groundwater flow systems of the Netherlands, based on existing data and recent studies.

The result is a preliminary map of the groundwater flow systems of the Netherlands at the scale 1 : 600 000 with accompanying more detailed hydrogeological sections with numerically modelled flow line patterns and a systematic, brief description of the flow systems.

The approach is based on the theory of hierarchically-nested flow cells by Tóth, which has been tested and elaborated further in recent years for a variety of hydrological conditions in the Netherlands, using a methodology of regional hydrological systems analysis as developed by Engelen and co-workers in close co-operation with the Groundwater Survey of the Netherlands (TNO-DGV).

Chapter 1 discusses in brief scale, homogeneity, accuracy and reliability of map and sections, the underlying theory of flow systems and the methodology of regional hydrological systems analysis.

Chapter 2 presents the eight major types of groundwater flow systems in their geological and historical sequence of genesis accompanied by a set of small-scale maps of their distribution. They range from very old natural thermo-mineral flow systems rising along deep-seated faults to recent man-made flow systems towards well fields and reclaimed polder areas. Chapters 3-10 contain a systematic, short description of the individual, main (mostly regional and subregional) flow systems of the Netherlands. More details are visible in the accompanying hydrogeological sections with flow line patterns.

Chapter 11 demonstrates the procedure of zooming in from regional, via subregional to local flow systems. It allows for the systematic analysis of preventive and curative measures and the appropriate time spans to protect nature areas from degradation due to the impacts of water supply, agricultural drainage, waste disposal etc. in their immediate and distant surroundings.

Chapter 12 deals briefly with the vulnerability of flow systems and the spatial pattern of major threats to nature areas due to groundwater extraction, agricultural drainage and the leaching of manure and fertilizers from the perspective of the spatial pattern and the hierarchy of the flow systems in the Netherlands.

Appendix A summarizes the history and extent of hydrological systems mapping in the Netherlands up to 1988.

Appendix B contains a list of geological formations and their permeabilities used in the numerical flow modelling.

Appendix C contains a list of alphabetical ordered characters referring to systems in a certain region.

Appendix A

Een chronologisch overzicht van hydrologische systeemkarteringen in Nederland tot medio 1988

Hydrologische systeemkarteringen vanuit het hiërarchisch stromingsconcept van Tóth zijn in Nederland door de Vrije Universiteit reeds verricht, voordat de methode later meer geformaliseerd en uitgewerkt zou worden (Engelen, 1984; Engelen en Jones, 1986). In de tweede helft van de tachtiger jaren is de ontwikkeling versneld en verdiept door een samenwerkingsverband met TNO-DGV.

Een eerste voorbeeld van een regionale studie op deze basis was een hydrochemisch detailkartering van grond- en oppervlaktewater van de Alblasserwaard (Engelen, 1963). Daarbij werden reeds onderscheiden: de recente stromingsstelsels vanuit de omringende rivierarmen, de onderliggende schone oudere wateren uit de aangrenzende zandgebieden en de thermo-minerale anomalie van het Carboon Systeem in het centrum van de Alblasserwaard.

In 1974 publiceerde de Vries een dissertatie over geheel Nederland, waarin vooral werd ingegaan op de relatie tussen grondwaterstromingsstelsels en het oppervlaktewaternet.

In 1976 werden de stromingsstelsels op de Friese Waddeneilanden in de dissertatie van Beukeboom behandeld, waarbij de uitbreidingsmogelijkheden van zoetwaterzakken in verband met de aanwezigheid van slechtdoorlatende lagen aandacht kregen.

In de periode 1977/1978 werd door Vasak (1979) een zeer gedetailleerde studie in het gebied van de Barneveldse Beek verricht, waarbij de schone westelijke stroomtak van het Veluwe Systeem en de daarop gesuperponeerde landbouwkundig sterk vervuilde kleinere systemen konden worden onderscheiden. Bovendien bleek hier dat bovenop deze kleinere systemen nog een laag van zeer ondiepe, slechts gedurende het winterseizoen bestaande stromingsstelsels voorkwam. Chemisch en isotopenonderzoek met een nauw interval van minifilters in proefboringen was hierbij een belangrijk hulpmiddel.

Een eerste hydrologische indeling van Nederland op systeemanalytische basis werd in 1980 door Engelen voorgesteld.

In 1981 werd door Verkooyen in het kader van een stage bij Provinciale Waterstaat van Gelderland een gebiedsdekkende systeemkartering van de Boven-Betuwe uitgevoerd. Hierbij kon onder andere een venster van het Veluwe Systeem worden vastgesteld via een stroomtak onder de Rijn door. Eveneens in 1981 werd een dwarsdoorsnede door West-Nederland vanaf de kust tot het Gooi gepubliceerd (Engelen, 1981), waarin de complexe hydrologische geschiedenis van dit gebied in geologisch perspectief werd geplaatst om de huidige zoet/zout verdeling te kunnen begrijpen. Tevens werd de zeer belangrijke rol uitgediept van de ontginningsgeschiedenis en het waterbeheer in het gebied voor het ontstaan en de vervorming van stromingsstelsels. Een methodologische ondersteuning voor de chemische aspecten van systeemkarteringen vond een aanzet (Engelen, 1981).

Een proefkartering van hydrologische systemen en een uitwerking van de methodiek vond plaats voor kaartblad Arnhem-Oost op schaal 1 : 50 000 in een sindsdien nauwe samenwerking tussen TNO-DGV en de Vrije Universiteit (Engelen, 1984).

In 1986 werd een hydrologische systeemanalyse van Zuidwest-Drenthe in het kader van een stage bij Provinciale Waterstaat van Drenthe afgesloten door Oude Munnink. Een vertaling naar mogelijke beleids- en beheerimplicaties volgde (Oude Munnink, 1986).

Eveneens in het kader van een stage werd voor de provincie Zuid-Holland een sterk chemisch gerichte systeemkartering verricht (De Ruiter, 1986). Hierbij werd met behulp van een nieuw hydrochemisch classificatiesysteem (Stuyfzand, 1986) veel aandacht besteed aan de verzoetings- en verziltingsprocessen en een groot aantal kaarten en doorsneden van de stromingsstelsels in hydrochemische context gegeven.

Als vervolg op de proefkartering van kaartblad Arnhem-Oost werd door Brouwer en Hoogendoorn (1986) een systeemkartering van Salland op overzichtsschaal uitgevoerd en op grond daarvan een uitvoerig aanvullend meetnet ter verificatie geïnstalleerd.

Een gezamenlijke kaartenbrochure van de Rijks Geologische Dienst, Stiboka en TNO-DGV getiteld 'De Bodem in Beeld' (1986) bevat een hydrologische systemenkaart van de Midden-Betuwe.

Hydrologische systemen vormen tevens een essentiële onderzoekscomponent in een langjarig samenwerkingverband Waterkwaliteitsonderzoek Loosdrechtse Plassen (WOL), in het kader van eutrofiëringsbestrijding (Engelen, 1986; Engelen et al., 1988).

In 1987 wordt een aantal systeemkarteringen afgerond, inmiddels allemaal verder uitgewerkt en ondersteund met steeds verbeterde versies van numerieke modellen, zoals FLOWNET van de Vrije Universiteit en FLOSA van TNO-DGV.

Een gedetailleerd onderzoek van het stroomgebied van het Merkske in Noord-Brabant (Stuurman et al., 1987) in opdracht van de Directie Natuur-, Milieu en Faunabeheer van het Ministerie van Landbouw en Visserij, varieerde in schaal van 1 : 1000 tot 1 : 100 000. Het was vooral gericht op de problematiek van de bescherming van waardevolle natuurgebieden en heeft tot een aantal concrete aanbevelingen en verdere verfijning van de onderzoeksmethodologie geleid.

Als vervolg op de systeemkartering in Zuidwest-Drenthe is door Gieske (1987) een aanvullend hydrochemisch onderzoek en een uitvoerige modellering met het driedimensionale model FLOSA van TNO-DGV uitgevoerd. De eerder gevonden resultaten konden in grote lijn bevestigd worden en tevens verder worden verfijnd met behulp van de modellering. Een onderzoek in het kader van een stage bij Provinciale Waterstaat van Friesland naar de hydrologie van Zuidwest-Friesland vond plaats in samenwerking met het Limnologisch Instituut in verband met de eutrofiëringsproblematiek van de Friese boezem. De belangrijke rol van de grote verschillen in polderpeilen in dit gebied voor de stromingsstelsels kon worden gedocumenteerd aan de hand van een zeer groot aantal kaarten en doorsneden op een schaal van 1 : 100 000 (Broers, 1987).

Een stageonderzoek bij NMF over de hydrologische systemen in het natuurgebied van de Dommelbeemden bij St. Oedenrode in Noord-Brabant door Garritsen (1988a) laat zien hoe een 'inzoommethodiek' met schalen van 1 : 100 000 tot 1 : 1000 noodzakelijk was om tot verantwoorde beleids- en beheeradviezen voor dit natuurerrein te kunnen komen.

In 1988 is het aantal en de diversiteit van in een afsluitingsfase verkerende en juist aangevangen systeemstudies sterk toegenomen. Een systeemkartering van westelijk Noord-Brabant, in opdracht van de provincie door TNO-DGV in samenwerking met de Vrije Universiteit (Stuurman et al., 1988), behandelt in een reeks deelrapporten op schalen van 1 : 200 000 tot 1 : 50 000 alle aspecten van de regionale hydrologie in verband met de wensen voor integraal waterbeheer en het bodem- en grondwaterbeschermingsbeleid.

In 1988 komen de rapporten beschikbaar van hydrologische systeemkarteringen, die worden uitgevoerd sinds 1986 door de Vrije Universiteit in het kader van het Belgisch-Nederlandse samenwerkingsverband Stuurgroep

Literatuur

De nummers voor de literatuuropgaven verwijzen naar de bij benadering aangegeven gebieden met detailstudies op de kaart (bijlage 2).

1. Engelen, G.B. (1963). Hydrochemistry as a tool in the determination of the origin of upward seepage in the polder area Alblasserwaard (the Netherlands). In: *Geologie en Mijnbouw*, 48-2, pp: 226-239.
2. Beukeboom Th.J. (1976). *The hydrology of the Frisian Islands*. Vrije Universiteit, Amsterdam.
3. Vasak, L. (1979). De chemische samenstelling van het grondwater in het Barneveldse Beekgebied. Basisrapport ten behoeve van de Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland. Prov. Gelderland, Arnhem.
4. Verkooyen, R.G.V.A. (1981). Een geohydrologische inventarisatie voor het Gelderse rivierengebied en een regionaal-hydrologische systeem-benadering voor het rivierengebied ten Oosten van Tiel. Dienst Waterbeheer, Prov. Gelderland, Arnhem.
5. Engelen, G.B. (1986). Interaction of hydrological systems and eutrophication of the Loosdrecht Lakes. In: *Hydrobiol. Bull.* 20 (1/2), pp 17-25.
Engelen, G.B., B.F.M. Kal, J.J. Buyse, A.Wakjira, S.O. Los (1988). Waterhuishoudkundige beleids- en beheersmogelijkheden in verband met waterkwaliteitsherstel van het Loosdrechtse Plassen Stelsel. WOL-rapport 1988-1. Vrije Universiteit, Amsterdam.
6. Engelen, G.B. (1984). Hydrological systems analysis. A regional case study. Arnhem east. Rapport OS 84-20. TNO-DGV, Delft.
7. Oude Munnink, J.M.E. (1985a). Geohydrochemisch onderzoek Zuidwest-Drenthe. Een toepassing van de regionale hydrologische systeem-analyse. Vrije Universiteit Amsterdam, Prov. Waterstaat Drenthe.
Oude Munnink, J.M.E. (1985b). De regionale hydrologische systeem-analyse in de praktijk. Vrije Universiteit, Amsterdam.
Oude Munnink, J.M.E. (1986). Isotopenonderzoek Zuidwest-Drenthe. Vrije Universiteit, Amsterdam.
Oude Munnink, J.M.E. en G.B. Engelen (1986). Hydrological systems of the dissected Pleistocene Plateau in south-west Drenthe (the Netherlands). In: Engelen, G.B en G.P. Jones (Ed.). *Developments in the analysis of groundwater flow systems*, IAHS Publ. 163, pp. 224-239.
Gieske, J.M.J. (1987). Hydrologische systemen in Zuidwest-Drenthe, Provinciale Waterstaat Drenthe.
8. Ruiter, J.C. de (1986). Hydrologische systeem-analyse in Centraal Zuid-Holland, Prov. Waterstaat van Zuid-Holland, Vrije Universiteit.
9. Brouwer, G.K. en J. Hoogendoorn (1986). Grondwaterstromingssysteemen Salland en oostelijke Veluwe. Rapport OS 86-36. TNO-DGV, Delft.
10. Rijks Geologische Dienst, Stichting voor Bodemkartering, TNO-DGV (1986). *Bodem in beeld*.
11. Stuurman, R.J., A. Biesheuvel en J.L. van der Mey (1987). Hydrologische systeemkartering van het Merkske stroomgebied, Noord-Brabant. *Eco-Hydrologisch onderzoek van het Merkske-dal; Hydrologische systeem-analyse ten dienste van het natuurbeschermingsbeleid (hoofdstuk 3)*. Benelux Economische Unie, sectie 'natuurbehoud en

Wetenschappelijk Onderzoek Maas (SWOM). De regionale hydrologie van de oostelijke en noordelijke afhelling van het Kempisch Plateau en van de aangrenzende delen van Zuid-Limburg wordt op schaal 1 : 50 000 behandeld door Kok (1988) en Heslinga (1988).

Het noordelijke aansluitende gebied van de Centrale Slenk is onderwerp van een inventariserende systeemkartering door TNO-DGV op schaal 1 : 200 000 (Bloemendaal, 1988).

In Zuid-Holland wordt als vervolg op de systeemkartering van het centrale deel door De Ruiter in 1986 voor de gehele provincie een systeemkartering door TNO-DGV uitgevoerd en afgerond als basis voor het grondwaterkwaliteitsmeetnet (De Ruiter, 1988).

Eveneens in 1988 wordt het noordelijk deel van Zuid-Holland met de computercodes FLOWNET en FLOSA-FD door Promes (1988) bij TNO-DGV gemodelleerd. Er wordt een goede overeenstemming gevonden met de eerdere, vooral op hydrochemie gebaseerde systeemanalyse van Zuid-Holland van de Ruiter (1986).

In Zuid-Friesland komt in opdracht van de provincie een uitvoerige modelstudie als vervolg op de eerdere systeemkartering tot stand in een samenwerking tussen TNO-DGV en de VU met behulp van de modellen FLOWNET, MICROFEM en FLOSA. Hierbij wordt de invloed van grote wijzigingen in grondwateronttrekkingen, voorgenomen ruilverkavelingen, polderpeilverhogingen en vuilstortbemaling op de grondwaterstelsels in detail onderzocht (Broers, 1988).

Op de linker Maasoever bij Roermond wordt, in aansluiting op een eerder onderzoek door Allewijn (1986) op de rechteroever, opnieuw remote-sensinginformatie gebruikt als een verdere uitbreiding van het onderzoeksinstrumentarium bij de hydrologische systeemanalyse (Padt, 1988). Dit alles in het kader van een verdere voortzetting van het onderzoek door SWOM. Voor 1988 en 1989 zijn in het Maasgebied verdere gedetailleerde karteringen in gang gezet en zal tevens voor de gehele afhelling van het Kempisch Plateau naar de Maas een aanvullende overzichtsstudie met behulp van Landsat- en Spot-satellietbeelden plaats vinden.

In 1988 of 1989 zal eveneens een langjarig, zeer uitvoerig en gedetailleerd dissertatieonderzoek van de hydrologie en hydrochemie van de Hollandse duinkust afgerond worden dat sterke verwantschap met de hydrologische systeemanalyse vertoont (Stuyfzand, 1988, in voorbereiding).

In 1988 is een vierjarig dissertatieonderzoek gestart, in een samenwerkingsverband tussen TNO-DGV, de Rijksuniversiteit Groningen en de Vrije Universiteit, met als thema de koppeling en uitbreiding van isotopenstudies in samenhang met watersystemen van Nederland.

Eveneens in 1988 is door Schot vanuit de interfacultaire Vakgroep Milieukunde van de Rijksuniversiteit Utrecht een vrij gedetailleerde systeemanalyse verricht ten behoeve van het beheer van het natuurmonument Naardermeer. Hierbij kon het recente proces van brakke kwel aan de westzijde van het Naardermeer verklaard worden uit een oostwaartse verschuiving van de westelijke stroming van het Systeem van de Utrechtse Heuvelrug.

Deze studie van de grondwatersystemen van Nederland in opdracht van NMF/Staatsbosbeheer (Engelen et al., 1989) vormt een eerste tussentijdse balans van de snelle ontwikkelingen op het gebied van de hydrologische systeemkartering in Nederland. Mede naar aanleiding van en als vervolg op bovengenoemde studie is in oktober 1988 begonnen met een eerste verkennende studie naar strategische grondwatervoorraden voor de drinkwatervoorziening in opdracht van de Rijks Planologische Dienst in een samenwerkingsverband van de Vrije Universiteit en TNO-DGV (Engelen et al, in voorbereiding).

landschapsbescherming', werkgroep 'inventarisatie beleidsinstrumenten grensoverschrijdende natuurgebieden'.

12. Broers, H.P. (1987). Grondwaterstromingsstelsels in Zuid-Friesland. Toepassing van regionale hydrologische systeemanalyse ten behoeve van het eutrofiëringsonderzoek van de Friese boezem. Provincie Friesland, Limnologisch Instituut Vrije Universiteit, Leeuwarden.
- Broers, H.P. (1988). Modelstudie grondwaterstromingsstelsels in Zuid-Friesland, Rapport 88-08. TNO-DGV, Delft.
13. Garritsen, A.C. (1988a). Stromingsstelsels en waterkwaliteit in de Dommelbeemden. Consulentschap NMF Noord-Brabant, Tilburg.
14. Stuurman, R.J., A.Biesheuvel, J.L. van der Mey (1987). Hydrologische systeemkartering van westelijk Noord-Brabant. Analyse van westelijk Noord-Brabant op kaartschaal 1 : 200 000, Deelrapport 2, Rapport OS 87-42. TNO-DGV, VU.
15. Kok, W. (1988). Rapport over stromingssystemen in Midden-Limburg (in voorbereiding aan de VU, Amsterdam).
- Heslinga, W. (1988). Rapport over stromingssystemen aan de noord- en ooststrand van het Kempisch Plateau (in voorbereiding aan de VU, Amsterdam).
- Padt, F.J.G. (1987). Integratie van Landsat-TM beelden in hydrologische systeemanalyse van de Maasvallei. Vrije Universiteit, Amsterdam.
16. Allewijn, R. (1987). Regional hydrological systems analysis of the Roermond area. Proc. Earsel Symp.: European Remote Sensing Needs in the 1990s. Noordwijkerhout.
17. Bloemendaal, S. (1988). Grondwaterstromingssystemen in het slenkgebied van Zuidoost-Nederland. TNO-DGV (in voorbereiding).
18. Stuyfzand, P.J. (1988). Hydrochemical evidence of fresh and salt water intrusion in the coastal dunes aquifer system of the Western Netherlands. Proc. SWIM 10 symposium, Gent 1988. In: Natuurwetenschappelijk Tijdschrift (in druk).
19. Promes, P. (1988). Modelstudie hydrologische systemen in centraal Zuid-Holland, Rapport OS 88-21. TNO-DGV, Delft.
20. Ruiters, J.C. de (1988). Hydrologische systeemanalyse van Zuid-Holland. TNO-DGV (in voorbereiding).
21. Schot, P.P. (1988). Groundwater systems analysis as a basis for wetland management in the Central Netherlands. Case: the wetland Naardermeer. Proc. VIIIth Int. Symp. on Problems of Landscape Ecological Research, 3-7 Vol 1988. Czechoslovakia.

Appendix B

Hydrogeologische schematisatie van de profielen

Voor het modelleren van grondwaterstroming in een doorsnede verwacht het programma FLOWNET onder meer lengte en hoogte van het profiel en waarden voor de stijghoogtes, de doorlatendheid en de porositeit (alleen voor tijdstappen). De lengte en hoogte zijn per profiel gegeven. Het verloop van de stijghoogtes wordt aan de bovenkant (eventueel zijanten en onderkant) van ieder profiel getekend. Daarnaast zijn de maximale en minimale waarden van de stijghoogtes aangegeven. De waarden voor de verticale en horizontale doorlatendheid in de profielen zijn in de tabel gegeven. De profielen, die met FLOWNET zijn berekend, laten stroomlijnen en de formaties (achtergrond) zien. Omdat het debiet tussen stroomlijnen voor een bepaald profiel constant is, geeft verdichting van het patroon aan dat het debiet (per oppervlakte-eenheid) toeneemt.

K-waarden voor de lithologische eenheden in de profielen

Profielen door Noord-Nederland en Noord-Holland

Figuur	16		17		18		19		29		30	
	K _h	K _v	K _h	K _v	K _h	K _v	K _h	K _v	K _h	K _v	K _h	K _v
Formatie												
Duinen											10	10
Holoceen	1	0,1			1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1
Twente	5	1	5	0,5	5	0,5	5	0,5	5	1	5	1
Kreftenhye	15	1,5										
Eem	0,1	0,1			1	0,1						
Drenthe	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Eindhoven	5	1	5	0,5	10	1	10	1				
Peelo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02				
Urk	30	3	20	2	30	3	30	3	30	3	30	3
Sterksel									20	2		
Enschede	60	6	30	3					20	2	20	2
Kedichem									0,01	0,01		
Harderwijk	50	5	60	6	50	5			60	6	60	6
Tegelen									0,01	0,01	0,01	0,01
Maassluis			5	1					1	1	1	1
Scheemda	5	1			5	1	20	2				
Breda							1	0,1				

Profielen door Midden-Nederland

Figuur	21		20		22		23		24		25		26	
	K _h	K _v	K _h	K _v	K _h	K _v	K _h	K _v	K _h	K _v	K _h	K _v	K _h	K _v
Formatie														
Holoceen									2	0,1	0,1	0,01	1	0,4
										0,1	0,007			
										0,005	0,0005			
Stuwwal					10	0,1	15	0,02	15	0,05	20	0,02	15	0,1
Eem						0,01		0,005				0,04		0,004
wvp 1			5	0,2	2	0,1	35	1	10	0,1	5	0,04	50	0,5
Drenthe	0,005	0,001	0,01	0,001	0,01	0,002	0,002	0,002	0,01	0,002	0,01	0,001		
wvp 2			30	2	25	0,5	35	1	10	0,1	30	0,04	25	1
Tegelen	0,005	0,005				0,01	0,001	0,01	0,01	0,05	0,005		1	0,01
wvp 3	15	2	5	0,1	25	0,5	10	0,2					15	0,05
				2		0,1	5	0,1				30	1	
Breda	0,1	0,01	0,05	0,008	0,1	0,01	0,5	0,01	0,5	0,06			1	0,01
Bentheim	5	1												

Profielen door Noord-Brabant

Figuur	35		36		37		
	K _h	K _v	K _h	K _v	K _h	K _v	
Formatie							
Westland			0,05	0,05	Nuenen	0,01	0,01
Holoceen	0,07	0,01	7	4	Veghel	70	22
Nuenen			30	30	Ked/St/Vg	50	17
Sterksel			0,5	0,5	Tegelen	40	13
Kedichem	5,1	2,1	0,002	0,002	Brunsum	1E-4	1E-4
Tegelen	2,5	2,5	3	3	Teg/Ked	0,01	0,01
Maassluis	26	18	20	20	Waubach	30	10
tussenlg	0,02	0,007			Reuver	30	10
Oosterhout	20	10	15	15	Maassluis	20	7
Breda	6	6	6	6	Breda	6	2
Rupel	1E-4	1E-4					

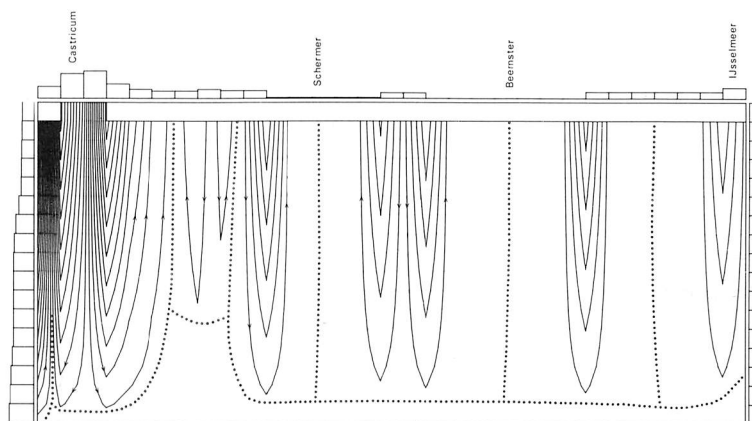
Profiel door Limburg

Figuur	38	
	K _h	K _v
Formatie		
Maasterras	200	50
löss	0,1	0,03
Breda	1	0,5
Rupel	0,05	0,005
Tongeren	0,5	0,02
onverz		
Gulpen		
Maastricht	200	50
(Kunrader faciës)		
Vaals/Aken	0,1	0,01
Carboon	3E-4	1E-4

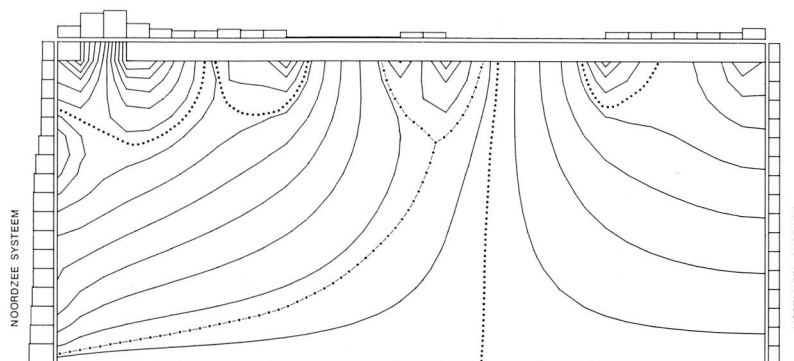
Gevoeligheid van het model FLOWNET voor veranderingen in het doorlatendheidspatroon van de ondergrond.

Aan de hand van het west-oost profiel door Noord-Holland (figuur 41) kan een indruk worden verkregen van de gevoeligheid van het stroomlijnenpatroon met behulp van FLOWNET voor veranderingen in het doorlatendheidspatroon van de ondergrond. In de figuren 41a, b en c zijn de randvoorwaarden voor de stijghoogte steeds hetzelfde gehouden.

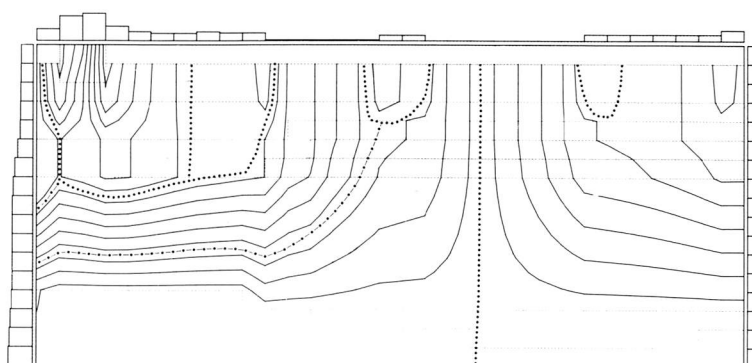
In figuur 41a is een homogene isotrope ondergrond met een horizontale en verticale doorlatendheid van 24 m/dag voor het gehele pakket gemodelleerd.



(a) homogeen, isotroop: $k_h = k_v = 24\text{m/dag}$



(b) homogeen, anisotroop: $k_h = 24\text{m/dag}$, $k_v = 0,02\text{m/dag}$



(c) inhomogeen, anisotroop, voor k_h , k_v zie tabel 8 fig. 30

Figuur 41: Gevoeligheid van de modelresultaten voor verschillende manieren van invoer van de doorlatendheden in een oost-west profiel door Noord-Holland (figuur 30). De stijghoogten op de randen zijn steeds dezelfde.

In figuur 41b is een homogene maar anisotrope ondergrond gemodelleerd. De horizontale doorlatendheid is opnieuw 24 m/dag. Deze waarde is het gemiddelde van het complexe patroon van horizontale doorlatendheden van figuur 41c, zoals dat is afgeleid op basis van literatuurgegevens over boringen, laboratoriummetingen, pompproeven en waterbalansen voor de verschillende formaties. De verticale doorlatendheidswaarde bedraagt nu echter voor het gehele pakket slechts 0,02 m/dag. Deze waarde is berekend uit de som van alle verticale stromingsweerstand in het profiel en vervolgens daaruit de omrekening naar een gemiddelde voor de volledige diepte van het profiel.

In figuur 41c is de 'werkelijke' (benaderd voorzover bekend) inhomogene en anisotrope doorlatendheidssituatie als basis voor de modellering genomen. De voor de verschillende formaties gebruikte horizontale en verticale doorlatendheidswaarden zijn in de tabel van appendix B gegeven. De formatiegrenzen zijn in het profiel zelf weergegeven.

Uit de vergelijking van de drie modelleringen blijkt, dat verwaarlozing van de anisotropie (figuur 41a) tot een onrealistisch beeld van een groot aantal tot grote diepte doordringende lokale stromingsstelsels voert.

De invoering van een gemiddelde anisotropie voor het hele profiel heeft tot gevolg dat een duidelijke hiërarchie van lokale, subregionale en regionale stromingsstelsels ontstaat, die reeds verregaand lijkt op de modelresultaten van figuur 41c met de volledige invoer van inhomogeniteit en anisotropie voor iedere formatie.

Het geprononceerde stijghoogtepatroon op de randen is hier van grotere invloed op het stroomlijnenpatroon dan de inhomogeniteit van de ondergrond. Anisotropie, ook al is het slechts in gemiddelde vorm, is echter essentieel om tot een redelijke benadering van de 'goede' modelresultaten van figuur 41c te komen. De laatste zijn met onafhankelijke gegevens van bijvoorbeeld hydrochemie en verloop van de zoet-zout grenzen zo goed mogelijk geverifieerd.

Soortgelijke voortgezette gevoeligheidsanalyses wijzen erop dat, indien bij de modellering het doorlatendheidspatroon wel inhomogeen en anisotroop wordt ingevoerd, de verticale doorlatendheid bovenin het profiel een doorslaggevende invloed heeft op aantal en typen van stromingsstelsels en op de plaats van kwelvensters. De hoofdlijnen van de stromingspatronen variëren aan het oppervlak echter veel minder, wanneer grotere variaties in doorlatendheden dieper in de profielen worden nagebootst. In dat geval is het verloop van de grondwaterspiegel aan het bovenvlak van veel grotere invloed op het ontstane stroomlijnenpatroon (zie voor aanvullende opmerkingen over beoordeling van de modelresultaten ook hoofdstuk 1.2).

Appendix C

Gebruikte afkortingen op bijlage 1.

De nummering verwijst naar het hoofdstuk waarin het betreffende deel van Nederland wordt besproken.

3. Noord-Nederland

FB	Friese Boezemcomplex
GP	Glaciale Plateau Systeem
KP	Complex van Kwelderwallen- en Poldersystemen
LM	Lauwersmeer Systeem
NJ	Stuwwalsysteem van St. Nicolaasga-Joure
NP	Noordelijke Groningse Poldersysteem
OD	Oostgroningse Dekzandsysteem
OM	Ommerveld Systeem
RM	Randmeren Systeem
SF	Stuwwalsysteem van Finsterwolde
SG	Stuwwalsysteem van Gaasterland
SM	Stuwwalsysteem van Midwolda
SO	Stuwwalsysteem van Onstwedde
ST	Stuwwalsysteem van Steenwijk
SW	Stuwwalsysteem van Schildwolde
WR	Systeem van de Weerribben
WZ	Waddenzee Systeem
YM	IJsselmeer Systeem
ZP	Zuidelijke Groningse Poldersysteem

4. Waddeneilanden

Texel

ED	Eierlandse Duinen Systeem
NZ	Noordzee Systeem
OO	Poldersysteem van Oosterend
SB	Systeem van de stuwwal van Den Burg
WD	Westerduinen Systeem
WZ	Waddenzee Systeem

Friese Waddeneilanden

BA	Ballumer Duinsysteem
BP	Systeem van de Boschplaat
BU	Buurder Duinsysteem
DS	Duinsysteem van Schiermonnikoog
NZ	Noordzee Systeem
OE	Systeem van de Oerderduinen
OS	Kweldersysteem van Oost-Schiermonnikoog
OT	Duinsysteem van Oost-Terschelling
VD	Duinsysteem van Vlieland
WT	Duinsysteem van West-Terschelling

WZ Waddenzee Systeem
ZW Kweldersysteem van de Zoute Weide

5. Midden-Nederland

AH Complex van Systemen van de Achterhoek
BL Systeem van de bedekte stuwwallen van Lochhuizen
BW Systeem van Bergharen-Wijchen
dd Dekzand- en Duinrugsystemen ten oosten van de IJssel
DV Systeem van Deventer
DW Systemen van Didam en Wehl
GD Systeem van Geesteren-Delden
MO Systeem van de stuwwal van het Montferland
NM Systeem van de stuwwal van Nijmegen
OV Systeem van de Overijsselse Vecht
RM Systeem van de Randmeren
RS Systeem van de Rijn
SA Systeem van de Sallandse stuwwallen
SI Systeem van de stuwwal van Sibculo
TW Systeem van de Twentse stuwwallen
UH Systeem van de Utrechtse Heuvelrug
VA Systeem van de Vecht en het Amsterdam-Rijnkanaal
VE Systeem van de Veluwe
VH Systeem van Vroomshoop-Hooge Hexel
VI Systeem van de Vinkeveense Plassen
WI Complex van Systemen van Winterswijk
WL Systeem van de Waal
YS Systeem van de IJssel

6 en 7. West-Nederland

AM Complex van Systemen van Amsterdam
BW Braassemer-Westeinder Systeem
C Carboon Systeem
DC Duinsysteem van Castricum
DH Duinsysteem van Den Helder
DP Duinsysteem van Petten
DZ Duinsysteem van Zandvoort
EP Eilandspolder Systeem
GA Systeem van de Polder Geestmerambacht
GS Giessen Systeem
HD Haagse Duinsysteem
HY Hollandse IJssel Systeem
LI Linge Systeem
MS Maas Systeem
NZ Noordzee Systeem
OR Oude Rijn Systeem
RS Systeem van de Rijn
SR Systeem van Rotterdam
SW Stuwwalsysteem van Wieringen
WF Systeem van Westfriesland
WL Systeem van de Waal
YM IJsselmeer Systeem
ZS Zoetermeer Systeem

8. Deltagebied van Zuidwest Nederland

AJ Systeem van Anna Jacobapolder
BI Biervliet-tak van het Westerschelde Systeem
BR Breskens-tak van het Westerschelde Systeem

BS Bruinisse Systeem
 CP Systeem van Colijnsplaat
 CZ Duinsysteem van Cadzand
 ET Eendragts-tak van het Westerschelde Systeem
 FP Systeem van Krabbendijke-Fredericapolder-Rilland
 GS Grevelingen Systeem
 GT Systeem van het Kanaal van Gent naar Terneuzen
 HP Hoofdplaat Systeem
 HV Haringvliet Systeem
 JP Jeronimuspolder Systeem
 JS Systeem van St. Jansteen
 KG Systeem van Kortgene
 KL Systeem van Kamperland
 KS Kraaijer Systeem
 KZ Kloosterzande Systeem
 NW Noordwestelijk Duinsysteem van Walcheren
 NZ Noordzee Systeem
 OG Oostelijke Goereese Duinsysteem
 OM Oude Maas Systeem
 OS Oosterschelde Systeem
 OV Duinsysteem van Oost-Voorne
 PB Systeem van Zuid-Beveland
 SA Systeem van Spijkenisse-St. Annaland
 SB Schuddebeurs Systeem
 SC Schouwense Duinsysteem
 SL Sluis Systeem
 ST Saeftinge-tak van het Westerschelde Systeem
 TG Systeem van Tiengemetten
 TZ Systeem van Terneuzen-Zaamslag
 VM Veerse Meer Systeem
 WE Westerschelde Systeem
 WG Westelijke Goereese Duinsysteem
 ZW Zuidwestelijk Duinsysteem van Walcheren

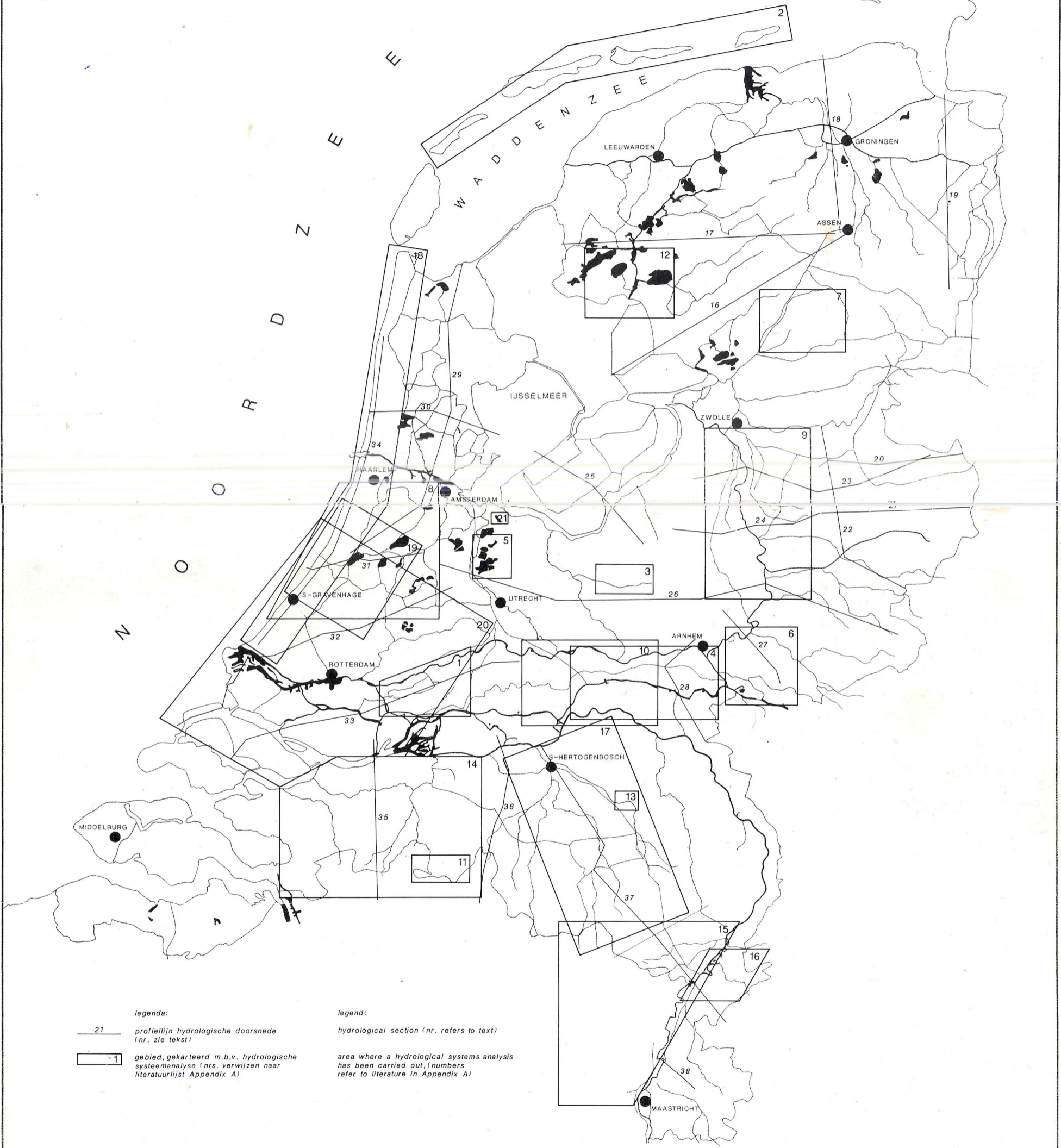
9 en 10. Zuid-Nederland

BH Bochholzerheide Systeem
 DD Drunense Duinen Systeem
 GM Geulmonding Systeem
 HB Heerlen-Brunssumerheide Systeem
 HP Hoge Peel Systeem
 HS Heijenrath Systeem
 KB Systeem van Kasen-Bunde-Elsloo
 KBs Koningsbosch Systeem
 KMc Systeem van de microcuesta van de Kempen
 KP Systeem van het Plateau van de Kempen
 LB Limbricht Systeem
 MR Midbrabantse rug Systeem
 MS Maas Systeem
 OMd Dekzand- en Duinsystemen op de oostelijke Maasoever
 PB St. Pietersberg Systeem
 PM Systeem van het Plateau van Margraten
 PS Complex van Peelschol Systemen
 SK Systeem van Selfkant-Susteren
 SP Systeem van het Plateau van Schimmert
 UB Systeem van Ubachsberg
 VB Vijlenerbosch Systeem
 WMt Systeem van de westelijke Maasterrassen
 WT Weert Systeem

De achtergrondreeks Natuurbeleidsplan bestaat uit:

1. **Internationale betekenis van de Nederlandse Natuur.**
Inventarisatie en waardering van de natuurwaarden in Nederland.
2. **Grondwaterstromingsstelsels in Nederland.**
Een landsdekkend beeld van de grondwaterstromingsstelsels.
3. **Levend verleden.**
Inventarisatie en waardering van gebieden en elementen in Nederland die van cultuurhistorische waarde zijn.
4. **Toestand van de natuur.**
De veranderingen van natuur en landschap in beeld gebracht en geanalyseerd.
5. **Nederland in vorm.**
Inventarisatie en waardering van gebieden en elementen in Nederland die van aardkundige waarde zijn.
6. **Natuurontwikkeling.**
Een visie op het creëren van nieuwe natuurgebieden.
7. **Natuurwaardenkaart 1988.**
Een kartografische weergave van natuurgebieden, bossen en natte gronden in Nederland.

Profiellijnen en in detail onderzochte gebieden
 Sections and areas investigated in detail



legenda:

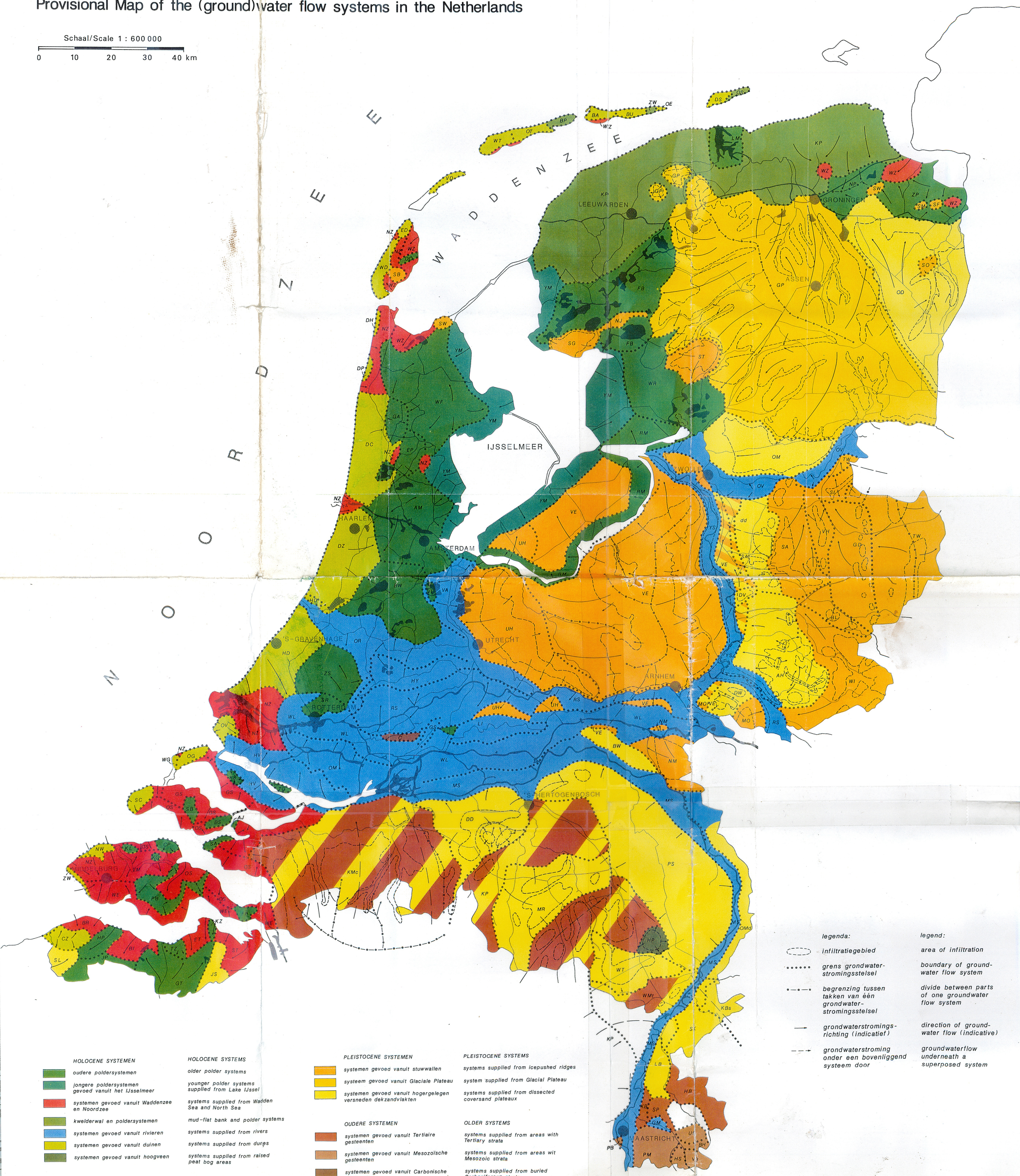
- 21 profiellijn hydrologische doorsnede (nr. zie tekst)
- 1 gebied, gekarteerd m.b.v. hydrologische systeemanalyse (nrs. verwijzen naar literatuurlijst Appendix A)

legend:

- hydrological section (nr. refers to text)
- area where a hydrological systems analysis has been carried out, (numbers refer to literature in Appendix A)

BIBLIOTHEEK
 STARINGGEBOUW
 Voorlopige kaart van de (grond)water systemen in Nederland
 Provisional Map of the (ground)water flow systems in the Netherlands

Schaal/Scale 1 : 600 000
 0 10 20 30 40 km



- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| HOLOCENE SYSTEMEN | HOLOCENE SYSTEMS |
| ■ oudere poldersystemen | older polder systems |
| ■ jongere poldersystemen gevoed vanuit het IJsselmeer | younger polder systems supplied from Lake IJssel |
| ■ systemen gevoed vanuit Waddenzee en Noordzee | systems supplied from Wadden Sea and North Sea |
| ■ kwelderwal en poldersystemen | mud-flat bank and polder systems |
| ■ systemen gevoed vanuit rivieren | systems supplied from rivers |
| ■ systemen gevoed vanuit duinen | systems supplied from dunes |
| ■ systemen gevoed vanuit hoogveen | systems supplied from raised peat bog areas |

- | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| PLEISTOCENE SYSTEMEN | PLEISTOCENE SYSTEMS |
| ■ systemen gevoed vanuit stuwwallen | systems supplied from icepushed ridges |
| ■ systeem gevoed vanuit Glaciale Plateau | system supplied from Glacial Plateau |
| ■ systemen gevoed vanuit hogergelegen versneden dekzandvlakten | systems supplied from dissected coversand plateaux |
| OUDE SYSTEMEN | OLDER SYSTEMS |
| ■ systemen gevoed vanuit Tertiaire gesteenten | systems supplied from areas with Tertiary strata |
| ■ systemen gevoed vanuit Mesozoïsche gesteenten | systems supplied from areas with Mesozoic strata |
| ■ systemen gevoed vanuit Carbonische gesteenten | systems supplied from buried Carboniferous strata |

- | | |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| legenda: | legend: |
| infiltratiegebied | area of infiltration |
| grens grondwaterstromingsstelsel | boundary of groundwater flow system |
| begrenzing tussen takken van één grondwaterstromingsstelsel | divide between parts of one groundwater flow system |
| grondwaterstromingsrichting (indicatief) | direction of groundwater flow (indicative) |
| grondwaterstroming onder een bovenliggend systeem door | groundwaterflow underneath a superposed system |

bijlage 1 bij: G.B.Engelen, J.M.J.Gieske, S.O.Los, 1988 (Grond)waterstromingsstelsels in Nederland (SBB,VU,NMF).

De laatste jaren heeft de ecohydrologie zich stormachtig ontwikkeld. Dat heeft geleid tot het inzicht dat de hydrologie van levensbelang is voor de natuur. Zo blijkt voor grondwaterafhankelijke ecosystemen niet alleen de kwantiteit, maar ook de grondwaterkwaliteit een belangrijke rol te spelen. Deze studie biedt het eerste landsdekkende overzicht van de belangrijkste regionale grondwaterstromingsstelsels en vormt daarmee een van de bouwstenen voor het natuur- en landschapsbeleid, zoals dat is geformuleerd in het Natuurbeleidsplan.

