NN31207.26

HET HYDROLOGISCH SYSTEEM IN HET GRENSGEBIED LUIK–MAASBRACHT; ONDERZOEKSRESULTATEN 1985–1990

LE SYSTÈME HYDROLOGIQUE DANS LA RÉGION FRONTALIÈRE LIÈGE–MAASBRACHT; RÉSULTATS DES RECHERCHES 1985–1990

CHO

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO

RAPPORTEN EN NOTA'S No. 26

(492)-50 ov

HET HYDROLOGISCH SYSTEEM IN HET GRENSGEBIED LUIK - MAASBRACHT; ONDERZOEKRESULTATEN 1985 - 1990

LE SYSTÈME HYDROLOGIQUE DANS LA RÉGION FRONTALIÈRE LIÈGE - MAASBRACHT; RÉSULTATS DES RECHERCHES 1985 - 1990

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Hydrologisch

Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik - Maasbracht: onderzoekresultaten 1985 1990 = Le système hydrologique dans la région frontalière Liège - Maasbracht; résultats des recherches 1985-1990. [A. van der Beken... et al.: samenstelling en red. J.C. Hooghart]. - Delft: Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO. - Ill. - (Rapporten en Nota's/Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO: no. 26). Teksten in het Nederlands, Engels of Frans. - Verslag van de: 9e CHO-studiebijeenkomst op 9 januari 1991 te Luik, georganiseerd in samenwerking met de Nationale IHP-comité's van België en Nederland en de Contactgroep Hydrologie van het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek uit België/ - Met lit. opg. - Met samenvattingen in het Nederlands, Engels of Frans.

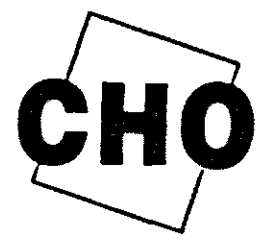
ISBN 90-6743-193-1

Trefw.: hydrologie, Limburgse Maasvallei

Copyright © NEDERLANDSE ORGANISATIE VOOR TOEGEPAST NATUURWETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK, 1991

HET HYDROLOGISCH SYSTEEM IN HET GRENSGEBIED LUIK - MAASBRACHT; ONDERZOEKRESULTATEN 1985 - 1990

LE SYSTÈME HYDROLOGIQUE DANS LA RÉGION FRONTALIÈRE LIÈGE - MAASBRACHT; RÉSULTATS DES RECHERCHES 1985 - 1990



Verslag van:
de 9e CHO-studiebijeenkomst op 9 januari 1991 te Luik, gemeenschappelijk georganiseerd door het Belgisch en Nederlands Nationaal Comité voor het Internationaal Hydrologisch Programma (IHP) en de Contactgroep Hydrologie van het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek (België).

Compte-rendu de:
la neuvième réunion d'étude (CHO) à 9 Janvier 1991 à Liège, organisée conjointement par les Comités Nationaux Belge et Néerlandais du Programme Hydrologique International (PHI) et le Groupe de Contact Hydrologie du Fonds National de la Recherche Scientific (Belgique).

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO
DELFT, 1991
RAPPORTEN EN NOTA'S No. 26

VOORWOORD

De 9e CHO-studiebijeenkomst "Het hydrologisch onderzoek in het grensgebied Luik - Maasbracht; onderzoekresultaten 1985 - 1990" op 9 januari 1991 in Luik, is een vervolg op de 5e CHO-studiebijeenkomst, die op 13 december 1985 in Maastricht is gehouden (zie Rapporten en Nota's van de CHO, no. 15). Deze 9e CHO-studiebijeenkomst werd gehouden ter afronding van de eerste fase van het onderzoek van de Stuurgroep Wetenschappelijk Onderzoek van de Maas (SWOM). De bijeenkomst werd georganiseerd door het Belgisch en Nederlands Nationaal Comité voor het Internationaal Hydrologisch Programma (IHP), de Contactgroep Hydrologie van het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek België en de CHO. Tijdens de bijeenkomst werden de resultaten gepresenteerd van het in de periode 1985 - 1990 verrichte onderzoek.

In deze publikatie zijn naast de inleidingen gehouden op 9 januari 1991, twee bijdragen opgenomen, die ook een nauwe relatie hebben met het onderwerp, namelijk "Methodology and operational use of the real-time flood forecasting model of the Belgian part of the river Meuse" en "Hoogwatervoorspelling voor de Nederlandse Maas". Daarachter is de samenvatting van de discussie en een samenvatting van de inleiding van de dagleider, Prof. dr. ir. A. Monjoie, over mogelijke activiteiten in de toekomst opgenomen. Tevens is een lijst met namen en adressen van de deelnemers en het programma van de studiebijeenkomst toegevoegd.

Hoewel het aantal deelnemers aan de studiebijeenkomst was gelimiteerd, zullen hopelijk ook vele andere geïnteresseerden, middels deze publikatie kennis nemen van de resultaten van de bijeenkomst.

Delft, augustus 1991

INHOUDSOPGAVE/TABLE DES MATIERES

		Pag.
AUTEURS		1
1a	LES ACTIVITES DU GROUPE DE COORDINATION (SWOM) A. van der Beken	5
1b	OVERZICHT VAN DE ACTIVITEITEN VAN DE STUURGROEP WETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK VAN DE MAAS (SWOM) A. van der Beken	11
2	HYDROLOGICAL SYSTEMS OF THE KEMPIAN PLATEAU AND ITS SURROUNDINGS G.B. Engelen	17
	Summary	17
	1 Introduction	18
	2 The Kempian Plateau as generator of a major groundwater flow system with a hierarchy of flow branches	18
	3 Remote sensing studies in relation to hydrological systems analysis in Kempian Plateau area and its surroundings	22
	4 Quaternary stratigraphic research in Belgian Limburg: correlation of the fluvial deposits on the Kempian Plateau and the Bocholt plain	23
	References	25
3	MODELISATION MATHEMATIQUE DE LA NAPPE ALLUVIALE DE LA MEUSE EN AVAL DE LIÈGE (BELGIQUE) A. Dassargues et A. Lox	27
	Resumé	27
	1 Cadre géologique	28
	2 Synthese et collecte des données	29
	3 Modèles hydrogéologiques	36
	4 Modèle de la plaine alluviale de la Meuse	42
	5 Conclusions générales	52
	References	54

4 HYDRO-GEOLOGISCHE KARAKTERISTIEKEN VAN DE PEY- EN WAUBACHFORMATIES IN BELGISCH NOORD-OOST LIMBURG 57
W. Loy, J. Hammenecker en P. Laga
Samenvatting/Abstract 57
1 Hydrogeologie 58
2 Besluit 68

5 STUDIE VAN DE REGIONALE GRONDWATERSTROMING IN HET KEMPISCH PLATEAU EN DE MAASVALLEI 71
F. De Smedt en W. Van Vaerenbergh
Abstract 71
1 Inleiding 71
2 Model 74
3 Resultaten 78
4 Besluit 81
Literatuur 83

6 DE VOEDING VAN DE MAAS VANUIT DE OOSTELIJKE DALWAND, IN HET TRAJECT TUSSEN VISÉ EN MAASBRACHT 85
D.J.G. Nota en B. van de Weerd
Abstract 85
1 Inleiding 86
2 Hydrogeologische karakteristiek 86
3 Kwantificering 92
Literatuur 93

7 BIJDRAGE TOT DE STUDIE VAN DE WATERBALANS VAN DE MAAS; DE OPPERVLAKTEWATERS TUSSEN LUIK EN BORGHAREN 95
K. Mombers en W. Bauwens
Samenvatting 95
1 Inleiding 95
2 Het studiegebied 96
3 De termen van de waterbalans 97
4 De balansberekeningen 105

5 Besluiten 107
Dankwoord 108
Referenties 108

8 EVALUATIE WATERBALANS 111
J.C. van Dam
Abstract 111
1 Inleiding en systeembegrenzing 111
2 Balansen 115
3 Opmerkingen betreffende het grondwater 123
4 Meet- en modelfouten 124
5 Conclusies 125
6 Hoe verder? 125
Referenties 126

9 METHODOLOGY AND OPERATIONAL USE OF THE REAL-TIME FLOOD FORECASTING MODEL OF THE BELGIAN PART OF THE RIVER MEUSE 129
D. Van Erdeghem, P.A. Troch and F.P. De Troch
Abstract 129
1 Introduction 130
2 Hydrological forecasting models 131
3 Hydraulic flood routing 134
4 Flood routing applied to the river Meuse 135
5 The forecasting model 136
6 Operational use 141
7 Conclusion 143
Acknowledgements 143
References 144

10 HOOGWATERVOORSPELLING VOOR DE NEDERLANDSE MAAS 147
H.E.J. Berger
Abstract 147
1 Inleiding 147

2 De Maas tijdens hoogwaters 148
3 De systeemanalyse 150
4 De functionaliteit van het model 152
5 De modules voor de hoofdtak van de rivier 153
6 De modules voor de zijrivieren 157
7 De voorspelling van de afvoer van Borgharen-dorp en de Nederlandse Maas 161
8 De informatiestromen 162
9 Eerste resultaten 163
10 Conclusies 164
11 Aanbevelingen 165
Dankwoord 166
Literatuur

11 RÉSUMÉ DE LA DISCUSSION/SAMENVATTING VAN DE DISCUSSIE 167
J.J. Peters

12 BIJLAGEN
- Programma studiebijeenkomst 179
- Lijst deelnemers 181

RAPPORTEN EN NOTA'S 187

AUTEURS

W. Bauwens	Vrije Universiteit Brussel, Dienst Hydrologie Pleinlaan 2 1050 BRUSSEL
A. van der Beken	Vrije Universiteit Brussel, Dienst Hydrologie Pleinlaan 2 1050 BRUSSEL
H.E.J. Berger	Technisch Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing Postbus 5048 2600 GA DELFT
J.C. van Dam	Technisch Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek, Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing Postbus 5048 2600 GA DELFT
A. Dassargues	Université de Liège, Laboratories de Géologie de l'Ingenieur, d'Hydrogéologie et de Prospection géophysique Batiment B 19-Parking 36 4000 LIÈGE
G.B. Engelen	Vrije Universiteit Amsterdam, Faculteit der Aardwetenschappen Postbus 7161 1007 MC AMSTERDAM
D. Van Erdeghem	Rijksuniversiteit Gent, Laboratorium voor Hydrologie Coupure Links 653 B9000 GENT

J. Hammenecker — Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening
Trierstraat 21
1040 BRUSSEL

P. Laga — Geologische Dienst van België
1040 Brussel

A. Lox — Université de Liège, Laboratories de Géologie de l'Ingenieur, d'Hydrogéologie et de Prospection géophysique
Batiment B 19-Parking 36
4000 LIÈGE

W. Loy — Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening
Trierstraat 21
1040 BRUSSEL

K. Mombers — Vrije Universiteit Brussel, Dienst Hydrologie
Pleinlaan 2
1050 BRUSSEL

D.J.G. Nota — Landbouw Universiteit Wageningen
Vakgroep Bodemkunde en Geologie
Postbus 37
6700 AA WAGENINGEN

J.J. Peters — Ministere Wallon de l'Equipment et des Transports, Administration des Voies, Hydrauliques
rue de l'Abattoir, 164
6200 CHÂTELET

F. De Smedt — Vrije Universiteit Brussel, Dienst Hydrologie
Pleinlaan 2
1050 BRUSSEL

F.P. De Troch Rijksuniversiteit Gent, Laboratorium voor Hydrologie
Coupure Links 653
B9000 GENT

P.A. Troch Rijksuniversiteit Gent, Laboratorium voor Hydrologie
Coupure Links 653
B9000 GENT

W. Van Vaerenbergh Vrije Universiteit Brussel, Dienst Hydrologie
Pleinlaan 2
1050 BRUSSEL

B. van de Weerd Landbouw Universiteit Wageningen, Vakgroep Hydrologie, Bodemnatuurkunde en Hydraulica
Nieuwe Kanaal 11
6709 PA WAGENINGEN

LES ACTIVITES DU GROUPE DE COORDINATION (SWOM)

A. van der Beken

Par l'intermédiaire des deux Comités Nationaux du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO - qui a entamé sa quatrième phase en 1990 (1990-1995) - dès l'automne 1984 des pourparlers ont été entrepris pour effecteur une étude collective. Sur proposition du Prof. A. Sterling, à l'époque Inspecteur-Général de l'Administration des Voies Navigables, Ministère des Travaux Publics de Belgique, le sujet concernant la Meuse, en aval Liège, a été retenu. Le but de ce projet était clair: fournir à la Commission Technique de la Meuse, qui s'occupe des problèmes de gestion, des renseignements scientifiques utiles à l'activité de cette Commission. Les deux Comités Nationaux du PHI semblaient être les organismes indiqués pour coordonner ces études. Etant donné que les Comités ne disposent pas de fonds d'études nécessaires, les études seraient subventionnées par les différents ministères.

Le début de cette coopération a été donné il y a 5 ans, à Maastricht où une journée d'étude sur le même sujet a été organisée. Le but, à cette époque, était de donner une vue d'ensemble de ce qui était connu.

Le rapport de cette journée d'étude, la 5ème dans la série Commission de Recherche Hydrologique (Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO (CHO-TNO)) a été publié sous le no. 15 dans la série Rapports et Notes et comptes 158 p. Les propositions pour des études plus précises telles que formulées à l'époque, peuvent être résumées par le tableau 1 dans lequel on a spécifié si la proposition d'étude en question a reçue une suite.

Ensuite un Groupe de Coordination, nommé SWOM (Stuurgroep Wetenschappelijk Onderzoek Maas), a été crée, comprenant deux groupes de travail: l'un pour les eaux de surface et l'autre pour les eaux souterraines. La composition du Groupe de Coordination ainsi que des Groupes de Travail a été formée de façon équilibrée. Ils comprennent aussi bien des membres d'universités et d'instituts de recherches que des membres des administrations. Après concertation, le groupe a opté pour des études uniquement dirigées sur des aspects quantitatifs.

Groupe de Coordination

PAYS-BAS		BELGIQUE
J.C. van Dam	Présidents	A. van der Beken
J. de Jong (1)		A. Monjoie
H.M. Schroten (5)		F. Bultot
G.B. Engelen		A. Sterling (2)
A. van Mazijk (3)	Secrétaires	J. Duchateau (4)

Groupes de Travail

EAU DE SURFACE			EAUX SOUTERRAINES	
J. de Jong (1)	NL	Présidents	A. Monjoie	B
J.J. Peters	B		P. Laga	B
J. Heyndrickx	B		P. de Smedt	B
J. Schmitz	B		P. van Rooijen	NL
J. Gerretsen	NL		G.H. van de Kolff (5)	NL
A. van Mazijk (3)	NL		J.H.C. Mulschlegel	NL
R.J. Cirkel	NL		J. Duchateau (4)	B
W. Bauwens (5)	B	Secrétaires	W.J. de Lange	NL

Au cours des activités les changements suivants se sont opérés:

(1) suivi par A.W. Dollee

(2) suivi par J. Heynderickx et J.J. Peters. Du côte Néerlandais J.W. De Lange se joint au Groupe de Coordination

(3) suivi par H.R. Vermeulen

(4) suivi par A. Dassargues

(5) depart

Le Tableau 2 donne une vue d'ensemble des réunions du SWOM et des deux Groupes de Travail.

Cette journée d'étude est la preuve que les Groupes de Travail ne se sont pas endormis sur leurs lauriers et que les fonds disponibles, relativement maigres d'ailleurs, ont été utiiisés à bon escient.

Pour cette journée d'étude, étant donné la limitation du temps d'un jour, il a fallu faire un choix concernant les sujets présentés. Parmi les différentes recherches, le modèle stochastique de l'écoulement de la Meuse, les prévisions des précipitations et des débits, les calculs de propagation des crues et la gestion de barrages n'entraient pas en ligne de compte.

Les résultats de toutes ces recherches seront néanmoins publiés dans ce rapport.

Nous profitons ici de l'occasion pour feliciter les membres du Groupe de Coordination et des Groupes de Travail, ainsi que tous les autres groupes pour leur travail scientifique. Les secrétaires y ont joué un rôle extrémement important.

Il va de soi que ce travail n'est pas terminé et que cette journée d'étude pourrait être une amorce pour de nouvelles activités et pour un champ d'application élargi, sous la direction d'un nouveau Groupe de Coordination à l'échelle Européenne.

Tableau 1 Les études

Propositions d'études en 1985	Réalisations dans la période 1986-1990
A. HYDROGEOLOGIE	
* failes géologiques * résistance hydrauliques des failles * coefficient d'emmagasinement * géochemie	Etudes des universités d'Amsterdam, de Liège et de Wageningen, et de la Compagnie Flamande pour l'Approvisionnement en Eau (VMW)
B. HYDROLOGIE QUANTITATIVE	
* problèmes hydrauliques	* Etudes des universités de Bruxelles (VUB), de Delft et du Rijkswaterstaat (modèle ZWENDL)
* bilans d'eaux	* Etudes des universités de Bruxelles (VUB) et de Delft
* prévisions des débits de la Meuse	* Etudes des universités de Bruxelles (VUB), de Delft et de Gand
* diminution niveau d'eau/sol	* Etablissement d'une série chronologique des débits à Borgharen
C. ETUDES INTEGRALES	
* Plateau de Campine * prélèvements * qualité des eaux * système des eaux à usage domestique	* Etudes partielles des universités d'Amsterdam, de Bruxelles (VUB) et de Liège, ainsi que de VMW
D. LITTERATURE	* disponible

Tableau 2 Place et dates des réunions du Groupe de Coordination (SWOM) et des Groupes de Travail

SWOM	Groupe de Travail Eaux de surface	Groupe de Travail Eaux de surface
Maastricht, 4/9/86		
	Bruxelles, 7/1/87	Liège, 26/11/86 Maastricht, 12/1/87
Bruxelles, 29/1/87	Maastricht, 25/2/87 Maastricht, 19/5/87 Bruxelles, 9/9/87	Liège, 4/9/87 Maastricht, 8/1/88
Maastricht, 18/9/87	Maastricht, 16/12/87 Bruxelles, 23/3/88 Maastricht, 22/9/88	Liège, 20/5/88 12/10/88 Liège, 25/1/89
Châtelet, 27-28/10/88	Réunion commune	
Maastricht, 3/3/89 Bruxelles, 2/3/90	Liège, 18/3/89 Maastricht, 26/10/89	Maastricht, 14/4/89 Liège, 20/10/89
	Maastricht, 5/9/90 Préparation de la journée d'étude du 9/1/91	

OVERZICHT VAN DE ACTIVITEITEN VAN DE STUURGROEP WETENSCHAPPELIJK ONDERZOEK VAN DE MAAS (SWOM)

A. van der Beken

Door beide Nationale Comités van het Internationaal Hydrologisch Programma (IHP) van UNESCO - dat in 1990 zijn vierde fase (1990-1995) inging - werden vanaf de herfst 1984 besprekingen gevoerd om een gemeenschappelijke studie aan te vatten. De eerste overlegvergadering tussen beide Comités ging door op 11 december 1984 te Den Haag. Op voorstel van Prof. A. Sterling, toenmalig Inspecteur-Generaal van het Bestuur van de Waterwegen, Ministerie van Openbare Werken van België, werd het onderwerp van de Maas, stroomafwaarts van Luik, weerhouden. De bedoeling van dit voorstel was duidelijk: aan de Technische Maascommissie, die zich met beleidsvraagstukken bezighoudt, wetenschappelijke bijdragen te leveren die nuttig zouden zijn voor haar werkzaamheden. De beide Nationale Comités van IHP leken hierbij de aangewezen organen om deze studies te coördineren. Aangezien de Comités zelf niet over de studiefondsen beschikken, zouden de studies betoelaagd worden door de onderscheiden ministeries.

De aanzet tot de samenwerking werd gegeven te Maastricht waar 5 jaar geleden een studiedag georganiseerd werd met dezelfde titel. De bedoeling was een overzicht te geven van wat gekend was. Het verslag van deze studiebijeenkomst, de 5e in de reeks van de Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO (CHO-TNO), werd gepubliceerd als No. 15 in de reeks Rapporten en Nota's en telt 158 pp. De voorstellen voor nadere studies, zoals toen geformuleerd, worden samengevat in Tabel 1 waarbij aangeduid wordt of het voorstel verder gevolg kreeg.

Vervolgens werd een Stuurgroep, SWOM genaamd, opgericht waaronder twee werkgroepen, één voor oppervlaktewater en één voor grondwater, actief waren. De

Stuurgroep en de werkgroepen werden evenwichtig samengesteld en omvatten zowel leden uit de universiteiten en onderzoekinstellingen als uit de administraties. Er werd toen, na overleg, gekozen voor studies uitsluitend gericht op de kwantitatieve aspecten.

De oorspronkelijke samenstelling van deze Stuurgroep en werkgroepen was als volgt:

Stuurgroep

NEDERLAND		BELGIË
J.C. van Dam	voorzitters	A. van der Beken
J. de Jong (1)		A. Monjoie
H.M. Schroten (5)		F. Bultot
G.B. Engelen		A. Sterling (2)
A. van Mazijk (3)	secretarissen	J. Duchateau (4)

Werkgroepen

OPPERVLAKTEWATER			GRONDWATER	
J. de Jong (1)	NL	voorzitters	A. Monjoie	B
J.J. Peters	B		P. Laga	B
J. Heyndrickx	B		P. de Smedt	B
J. Schmitz	B		P. van Rooijen	NL
J. Gerretsen	NL		G.H. van de Kolff (5)	NL
A. van Mazijk (3)	NL		J.H.C. Mulschlegel	NL
R.J. Cirkel	NL		J. Duchateau (4)	B
W. Bauwens (5)	B	secretarissen	W.J. de Lange	NL

In de loop der werkzaamheden werden de volgende wijzigingen uitgevoerd:

(1) opgevolgd door A.W. Dollee

(2) opgevolgd door J. Heynderickx en J.J. Peters. Aan NL-zijde trad W.J. De Lange toe tot de Stuurgroep

(3) opgevolgd door H.R. Vermeulen

(4) opgevolgd door A. Dassargues

(5) afscheid

In Tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de vergaderingen van de SWOM en de beide Werkgroepen.

Deze studiedag levert het bewijs dat de werkgroepen niet op hun lauweren gerust hebben en de beschikbare, relatief karige fondsen naar best vermogen hebben aangewend.

Voor deze studiedag moest echter noodgedwongen, gelet op het keurslijf van één dag, een keuze gemaakt worden met betrekking tot de onderwerpen. Verschillende onderzoekingen, zoals het stochastisch model van de Maasafvoeren, de neerslag-afvoervoorspellingen, de berekeningen van de hoogwatervoortplanting en het beheer van de stuwen, komen niet aan bod.

Resultaten van alle onderzoekingen zullen echter wel gepubliceerd worden in het rapport.

Het past hier de leden van de Stuurgroep en van de werkgroepen, en de andere groepen die aan het onderzoek meegewerkt hebben, lof te betuigen voor hun wetenschappelijk werk. De secretarissen speelden hierbij een uitermate belangrijke rol.

Uiteraard is dit werk niet beëindigd en kan deze studiebijeenkomst misschien de aanzet zijn voor hernieuwde en uitgebreidere opdrachten onder begeleiding van een nieuwe stuurgroep van Europees formaat.

Tabel 1 Overzicht studies

Voorstellen voor nadere studies in 1985	Verwezenlijkingen in de periode 1986-1990
A. HYDROGEOLOGIE	
* geologische geulen * hydraulische weerstand breukzones * bergingscoëfficiënten * géochemie * ondergrondse afvoeren	Studies van de Universiteiten van Amsterdam, Luik en Wageningen en van de Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening (VMW)
B. WATERKWANTITEIT	
* hydraulische problemen	* Studies van de Universiteiten Brussel en Delft en van Rijkswaterstaat (model ZWENDL)
* waterbalansen	* Studies van de Universiteiten van Brussel en Delft
* voorspelling Maasafvoeren	* Studies van de Universiteiten van Brussel, Delft Gent
* daling waterspiegel/bodem	* Geconsolideerde debietreeks van Borgharen
C. INTEGRALE STUDIES	
* Kempisch Plateau * onttrekkingen * waterkwaliteit * gehele waterhuishouding	* Doelstudies van de Universiteiten van Amsterdam, Brussel en Luik en van de VMW
D. LITERATUUR	* beschikbaar

Tabel 2 Plaats en datum van de vergaderingen van SWOM en Werkgroepen

<table>
<tr><th>SWOM</th><th colspan="2">Werkgroep Oppervlaktewater</th><th colspan="2">Werkgroep Grondwater</th></tr>
<tr><td>Maastricht, 4/9/86</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">Luik, 26/11/86</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Brussel, 7/1/87</td><td colspan="2">Maastricht, 12/1/87</td></tr>
<tr><td>Brussel, 29/1/87</td><td colspan="2">Maastricht, 25/2/87
Maastricht, 19/5/87
Brussel, 9/9/87</td><td colspan="2">Luik, 4/9/87
Maastricht, 8/1/88</td></tr>
<tr><td>Maastricht, 18/9/87</td><td colspan="2">Maastricht, 16/12/87
Brussel, 23/3/88
Maastricht, 22/9/88</td><td colspan="2">Luik, 20/5/88
12/10/88
Luik, 25/1/89</td></tr>
<tr><td colspan="3">Châtelet, 27-28/10/88</td><td colspan="2">Gemeenschappelijke vergadering</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Maastricht, 3/3/89
Brussel, 2/3/90</td><td colspan="2">Luik, 18/3/89
Maastricht, 26/10/89</td><td colspan="2">Maastricht, 14/4/89
Luik, 20/10/89</td></tr>
<tr><td colspan="2">Maastricht, 5/9/90</td><td colspan="2">Voorbereiding studiebijeenkomst 9/1/91</td></tr>
</table>

HYDROLOGICAL SYSTEMS OF THE KEMPIAN PLATEAU AND ITS SURROUNDINGS

G.B. Engelen

SUMMARY

The research by the Department of Hydrology of the Vrije Universiteit at Amsterdam in the framework of Belgian-Dutch interuniversity cooperation on the Belgian-Dutch border area of the Meuse catchment in the period 1985-1990 has focussed on three closely related themes with an emphasis on groundwater:

1 Regional hydrological systems analysis at various scales:
   a a supra-regional study of eastern Brabant and Middle Limburg with the adjacent Kempian Plateau (Van der Mey and Kok, 1989);
   b a regional study of the northern and eastern part of the Belgian Kempian Plateau and adjacent Dutch parts (Heslinga, 1989);
   c a semi-regional study of the eastern border of the Kempian Plateau and the adjacent section of the Meuse valley (Zoete, 1989);
2 Remote sensing studies on land use and mapping of seepage areas in relation with groundwater flow systems:
   a a study of the Meuse valley near Roermond (Allewijn, 1987);
   b a study of the entire project area (Peters, 1988);
   c a study of the Kempian Plateau and its immediate surroundings (Zoete, 1989).
3 Groundwater modelling studies:
   a two-dimensional models (FLOWNET) within the regional systems analyses;
   b Multi-layer finite element regional models (MICROFEM) of the entire project area (Nienhuis, Visser and Wang, 1989; Visser and Wang, 1989);

c Multi-layer analytical element regional model (Stoepker, Visser and De Lange, 1989), a cooperative project with the Institute for Inland Watermanagement and Wastewater Research.

A brief review of the enlisted studies is presented.

1 INTRODUCTION

Staff and students of the Departments of Hydrology and Quaternary Geology and Lowland Studies of the Faculty of Earth Sciences of the Vrije Universiteit at Amsterdam continued to contribute in the period 1985-1990 in a bilateral Belgian-Dutch interuniversity hydrological research program on the Belgian-Dutch border area between Luik and Maasbracht of the Meuse catchment. The research consisted of desk studies, laboratory work, groundwater modelling and fieldwork.

The research focussed on four closely related themes, with an emphasis on groundwater:

1 Regional hydrological systems analysis at various scales.
2 Remote sensing studies on land use and mapping of infiltration and seepage areas in relation with groundwater flow systems.
3 Numerical groundwater modelling studies.
4 Quaternary geological studies.

Relevant studies of adjacent areas by other groups have been taken into consideration as well in the present synthesis.

2 THE KEMPIAN PLATEAU AS GENERATOR OF A MAJOR GROUNDWATER FLOW SYSTEM WITH A HIERARCHY OF FLOW BRANCHES

The Kempian Plateau with its cap of coarse fluvial Quaternary deposits of Rhine and Meuse is a major groundwater recharge area. Its radially dissected topography, the faulted structure of its northern and eastern borders and the valleys of the Meuse to the east and north and the valley of the Demer in the south are the main factors determining a hierarchical,

internal structure of flow branches within the gravity-driven flow system of the Kempian Plateau as a whole. The flow pattern is more or less radial.

The general hierarchy of the flow branches of the Kempian Plateau flow system is the following:
Flow lines starting in the undissected central core area and in the major interfluves of the Plateau feed the deepest and longest supra-regional and regional flow branches. An enveloping area around this central core area and the valleys dissecting the plateau feeds the intermediately deep subregional and local flow branches coming to the surface in a broad semi-circular zone of upward seepage from north through east to south at the base of the lower slopes of the Plateau. Along the eastern border this zone is narrow and most groundwater passes directly through the alluvial fill of the Meuse into that river. Ribbon-like flow systems of shallow flow branches drain the slopes of the interfluves of the Plateau into the small rivers, which dissect it radially.

The various flow branches will be discussed now somewhat more in detail, based on a number of regional hydrological systems analyses (Kok, 1988; Van der Mey and Kok, 1989; Zoete, 1989; Engelen, 1990; IWACO, 1990), numerical groundwater models (Nienhuis, Visser and Wang, 1989; Visser and Wang, 1989; Stoepker, Visser and De Lange, 1989; IWACO, 1990) and interpretation of Landsat remotely sensed images (Padt, 1987; Allewijn, 1988; Peters, 1988; Zoete, 1989).

2.1 The Cretaceous/eastern Meuse regional flow branch

This flow branch originates in the central core area of the Plateau passes through the Quaternary and Tertiary covering layers and flows east into the underlying Cretaceous towards the Meuse valley. It is deep but rather short due to the nearness of the deeply incised Meuse valley in the east. There it rises through the valley fill and feeds the channel of the Meuse between Maastricht and Maasbracht. The flux is low due to the presence of semi-pervious Tertiary formations in the infiltrating part of the flow path and the travel time is considerable, probably in the order of several thousand years.

2.2 The northern Meuse supra-regional flow branch

This is by far the longest (70-90 km) and most complex flow branch of the Kempian Plateau flow system. It originates in the central area of the plateau and flows northward across the border below superimposed local flow branches of the same flow system and other flow systems on top of it. Near Eindhoven it branches off in two major sub flow branches around the diverting Mid-Brabant ridge flow system:

a a smaller northern branch flowing due north towards the area of the Drunen Dunes south of the Meuse near 's-Hertogenbosch. There it bifurcates around the diverting deep lens of the Drunen Dunes flow system and terminates in the northern Meuse valley by upward seepage.

b a major northeastern branch flowing into the deep alluvial and highly permeable fill of the Central Graben below the semipermeable separating Kedichem Formation, locally creating a depth of about 500 m of the salt/fresh interface. In the Central Graben it branched off under undisturbed conditions in several offshoots by upward seepage across the semi-permeable covering layers into the Beerze and Dommel valleys. It created windows of deep seepage amidst smaller overlying local and subregional flow systems. The flow branch ended by upward seepage in the Meuse valley near 's-Hertogenbosch.

The supra-regional northern flow branch of the Kempian Plateau has been affected very severely by human intervention. In the Belgian recharge area the groundwater quality has deteriorated by agricultural and other pollution sources. In the Dutch part of this flow branch very large groundwater abstractions for public and industrial water supply - especially in the Central Graben area - have overexploited this branch. Consequently the natural outlets of the seepage windows have disappeared altogether or shave shrunken considerably to the detriment of import wetland areas with valuable ecosystems in these windows. Moreover massive downward invasion of strongly polluted shallow groundwaters in the newly created flow systems around the deep wells of the pumping stations is on its way now, replacing with time most of the original supra-regional flow branch from the Kempian Plateau. The deep stocks of high-quality, old water from Belgian origin in the deeper parts

of the eastern part of the Dutch province of North-Brabant are increasingly depleted and replaced by infiltrated, heavily polluted shallow groundwaters.

Wise water management (Engelen, 1990) would require the restoration of the supra-regional flow branch of the Kempian Plateau by curbing the pollution in the Belgian recharge area, reducing the groundwater extraction in the Dutch part or conversion to deep-well infiltration of surface water to supply the pumping stations. Thus a strategic stock of the remaining high-quality deep groundwater could be preserved for calamities and the seepage windows of deep waters rich in calcium bicarbonate could be restored for the endangered or disappeared and vulnerable wetland ecosystems in those window areas.

Research is needed to ascertain wether a subregional deeper flow branch is present to the south in the direction of the central part of the Demer valley.

2.3 The group of intermediate/shallow, subregional/local flow branches towards the foot zones of the Kempian Plateau

The peripheric zone of the Plateau is drained by a number of more or less radial, coalescing flow branches between the small river valleys within the Plateau. These cause a zone of upward seepage of variable width depending on the topographic conditions. The Plain of Bocholt along the northern rim is such a zone, a deeper part of that flow branch continues to the northeast under that plain and curves to the east to end up in the Meuse valley in the area between Maasbracht and Venlo. Along the steep eastern edge of the Plateau most of the flow does not surface at the base of the slope but continues as groundwater flow in the permeable alluvium of the Meuse directly to that river. Along the southern border of the Plateau in the Demer valley area a similar wet zone as in the north can be observed by remote sensing. However, this flow branch has not been studied as yet.

2.4 The group of elongated, ribbon-like, shallow, local flow systems towards the brooks of the Kempian Plateau

The brook valleys of the Bosbeek, the Itterbeek and the A-beek drain the northern and northeastern slopes of the Plateau. The brooks are fed by infiltrating rain on the middle and

lower parts of the interfluves. At the southern and southwestern side similar flow systems will probably exist along the upper reaches of the Zwarte Beek (Aggenbach et al. 1990), Demer, Grote Nethe and Kleine Nethe. They are superposed on the underlying flow branches of supra-regional, regional and subregional/local character.

The large extent of the Kempian Plateau flow system has been realised in the last years only. The interaction between the Belgian and Dutch parts of it are therefor much larger than previously assumed. It requires a comprehensive international management to protect it and to benefit fully from the water resources of this border crossing flow system.

The interaction between the hydrological system of the Kempian Plateau and the Meuse corridor due east has been studied by Zoete (1989). The strongly fluctuating levels of the River Meuse create alternating influent and effluent conditions with corresponding changes in bank storage. The Meuse is connected thus with a ribbon-like groundwater flow system of variable extent (near Maaseik e.g about 4-5 km wide and about 20-30 m thick). Close to the river the groundwater consists mainly of infiltrated river water with strong fluctuations in groundwater heads corresponding with the river stages. This zone is embedded in an outer envelope of groundwater from the plateaus and hills on either side of the river, which however still is influenced hydraulically by the fluctuating river stages.

3 REMOTE SENSING STUDIES IN RELATION TO HYDROLOGICAL SYSTEMS ANALYSIS IN KEMPIAN PLATEAU AREA AND ITS SURROUNDINGS

Reflected radiomagnetic radiation is recorded by the Landsat Thematic mapper satellite in various bands of the electromagnetic spectrum. The images can be interpreted i.a. for detailed land use mapping. Landuse/vegetation in turn gives often an indication of the hydrological conditions: heathland and coniferous forests often occupy higher and drier parts of the terrain; meadows and certain types of deciduous forests are often associated with wetter conditions in lower parts of the terrain, etc. An interpretation of the landuse types - using other information from the hydrological systems analysis procedure as well - in terms of probable infiltration areas, intermediate areas and upward seepage areas yields

fairly clear and consistent hydrological patterns associated with groundwater flow systems. Thus the method is a useful additional tool in regional hydrological analysis, especially when compared with other types of data and groundwater modelling results.

First local studies of this kind were made on the banks of the Meuse near Roermond (Allewijn, 1987; Padt, 1987). The entire project area was studied by Peters (1988). He produced remote sensing maps at the scale 1 : 100 000 of: landuse; landuse in combination with temperature; forest types in combination with temperature; surface waters in combination with temperature; and infiltration-and upward seepage related patterns. A combination of thermal information with landuse does not yield in all cases a close relation with infiltration or upward seepage because the physical relations may be too complex for that. However a straightforward hydrological interpretation of landuse types without temperature information, followed by automated smoothing of the obtained pixel patterns is fairly satisfactory.

The groundwater discharge areas along the brooks of the Kempian Plateau stand out clearly in the hydrological remote sensing map. The regional outlet of the groundwater branch to the Plain of Bocholt is also very evident in the map. The Demer area shows equally a high density of upward seepage related pixels, suggesting a major seepage zone there as well. However, no specific system-hydrological studies are available as yet for that area for verification.

Zoete (1989) studied the remote sensing data of the entire area as well to compare slightly different approaches to the landuse mapping.

4 QUATERNARY STRATIGRAPHIC RESEARCH IN BELGIAN LIMBURG: CORRELATION OF THE FLUVIAL DEPOSITS ON THE KEMPIAN PLATEAU AND THE BOCHOLT PLAIN

Huyzer & Huyzer (1987) made a detailed study of the Quaternary geology of the northern border zone of the Kempian Plateau in the framework of their MSc studies under the guidance of Prof. Dr. J.F. Vandenberghe of the Faculty of Earth Sciences of the Free

University. Although many studies on the Quaternary geology of the Kempian Plateau in Belgium and of the adjacent Central Rift valley in the Netherlands were available there still existed uncertainty about the litho-stratigraphical and chrono-stratigraphical correlation of the various deposits due to separate approaches in both countries. By means of litho-stratigraphical, sediment-petrographical, geo-electrical, sedimentological and geomorphological methods detailed paleogeographical reconstructions of the depositional history of the area and a correlation of the stratigraphies on either side of the border could be achieved.

Two sections perpendicular to the border of the Plateau and parallel to the brooks Itterbeek and A-beek were studied in detail by :

1 lithostratigraphic descriptions of boreholes to depths of 10-15 meters;
2 quantitative pebble analysis, yielding different associations with provenances from Rhine and Meuse;
3 analysis of heavy minerals, yielding a further subdivision in the heavy mineral assemblage zones of Weert (Rhine) and Budel (Meuse);
4 geoelectrical profiling with a Schlumberger electrode arrangement to a depth of about 30 m;
5 detailed descriptions of 5 quarries: Roes, Nijsenberg and Hennenhof, all southeast of Bree; Haels east of Opitter; and Grote Brogel;
6 geomorphological mapping at scale 1 : 25 000, supported by about 70 shallow borings.

In addition some detailed cross sections of the A-beek and Itterbeek valleys were studied.

The resulting general correlation of the lithostratigraphical units across the border and the remarkable diachronism of the Zone of Budel are given in their table 7.1.

The compilation and integration of all data resulted in six paleogeographical maps with distributions of the various Quaternary deposits and their directions of provenance from Rhine or Meuse during the "Cromerian complex", when the Upper Sterksel and the Veghel Formations were deposited.

REFERENCES

AGGENBACH, C., KOLKMAN, S., VEGTER, U., BOKELOH, D., GROOTJANS, A., VERLINDEN, A. and HOEK, D. VAN DER; 1990. Hydro-ecologie van de Zwarte Beek Vallei. Een mesotroof veen in de Belgische Kempen. Laaglandbekenproject. No. 21-1990. Instituut voor Natuurbehoud Hasselt, Landbouwuniversiteit Wageningen, Rijksuniversiteit Groningen.

ALLEWIJN, R.; 1988. Regional hydrological systems analysis using satellite remote sensing data and a geographical information system: Groundwater modelling of the Roermond Area. Int. J. Remote Sensing, vol. 10 and 11: 1755-1785.

ENGELEN, G.B.; 1990. Project Strategische Watervoorraden RPD-VU-DGV-TNO. Strategische watervoorraden in Nederland. Eindrapport. DGV-TNO-VU, Delft/Amsterdam. DGV-TNO rapport nr. OS 90-62-A.

HUYZER, A.S. and HUYZER G.P.; 1987. Kwartairstratigrafisch onderzoek in Belgisch Limburg. Korrelatie van de fluviatiele afzettingen op het Kempisch Plateau en de vlakte van Bocholt. Intern Rapport Faculteit der Aardwetenschappen, Vrije Universiteit, Amsterdam.

IWACO, 1990. NV Nutsbedrijf Regio Eindhoven. Effectenonderzoek wingebieden Aalsterweg en Welschap. Deelrapport II: Aanvullend onderzoek. Hoofdrapport. 331.4290.

KOK, W.J.M.; 1988. Een hydrologische systeemanalyse in het stroomgebied van de Maas in het gebied Midden-Limburg. Intern rapport, Fac. der Aardwetenschappen, Vrije Universiteit, Amsterdam.

MEY, J.L. VAN DER and KOK, W.; 1990. Project Strategische Watervoorraden RPD-VU-DGV-TNO, Intern technisch deelrapport no. 7. Amsterdam/Delft.

NIENHUIS, P.R., VISSER, A. and WANG, H.; 1989. Geohydrologische modelstudie in oostelijk Noord-Brabant en Noord- en Midden-Limburg. Project Strategische Watervoorraden RPD-VU-DGV-TNO, Intern technisch deelrapport no. 5. Amsterdam/Delft.

PADT, F.J.G.; 1987. Integratie van Landsat-TM beelden in hydrologische systeemanalyse van de Maasvallei. Intern rapport Fac. der Aardwetenschappen, Vrije Universiteit, Amsterdam.

STOEPKER, K.E., VISSER, A. and LANGE, W.J. DE.; 1989. Groundwater modelling of the Kempian Plateau and the Meuse Valley. Report Vrije Universiteit/Institute for

Inland Watermanagement and Wastewater Research. Amsterdam/Lelystad.

VISSER, A.L. and WANG, H.; 1990. Uitbreiding van het grondwatermodel Oost-Brabant/Noord/Midden Limburg tot de waterscheiding Maas-Schelde op het Kempisch Plateau. Intern rapport Faculteit der Aardwetenschappen, Vrije Universiteit, Amsterdam

ZOETE, C.; 1989. Toegepast Remote Sensingonderzoek in Midden-Limburg. Intern rapport Faculteit der Aardwetenschappen, Vrije Universiteit, Amsterdam.

ZOETE, C.; 1989. Invloed van de Maas op de grondwaterstroming in de omgeving van Maaseik (B). Intern rapport Faculteit der Aardwetenschappen, Vrije Universiteit, Amsterdam.

MODELISATION MATHEMATIQUE DE LA NAPPE ALLUVIALE DE LA MEUSE EN AVAL DE LIEGE (BELGIQUE)

A. DASSARGUES et A. LOX

RESUME

L'étude a été entreprise dans le but de simuler et d'estimer avec précision les débits non mesurés dans les jaugeages de surface, parce que s'écoulant en sous-sol dans les graviers de la plaine alluviale, transitant depuis le Canal Albert vers le fleuve, ou contournant les barrages-écluses. Des études hydrogéologiques très précises, assorties de puits de pompage, de nombreux piézomètres et de très nombreux essais électriques, ont permis une détermination fort précise des principaux paramètres hydrogéologiques. De plus, ces études ont également permis de faire la synthèse de l'ensemble des données disponibles dans la vallée de la Meuse à l'aval de Liège: géométrie des couches, solliciations extérieures, conditions aux frontières, niveaux piézométriques ... Le modèle utilisant la méthode des éléments finis est discrétisé en fonction de toutes ces données. Il comporte 4 couches (non-horizontales) d'éléments, pour un total de 2356 éléments. L'hétérogénéité de la nappe est introduite par l'affectation de plus de 15 valeurs différentes de perméabilité et toutes les solliciations et influences ont été prises en compte. Après calibration du modèle, les flux sont trouvés en tous les points du domaine étudié, permettant de quantifier et localiser très précisément les différentes infiltrations, venues d'eau, contournements d'ouvrages d'art, etc...

1 CADRE GEOLOGIQUE

En aval de Liège (figure 1), le substratum de la vallée de la Meuse et de ses versants est constitué par des formations du Primaire.

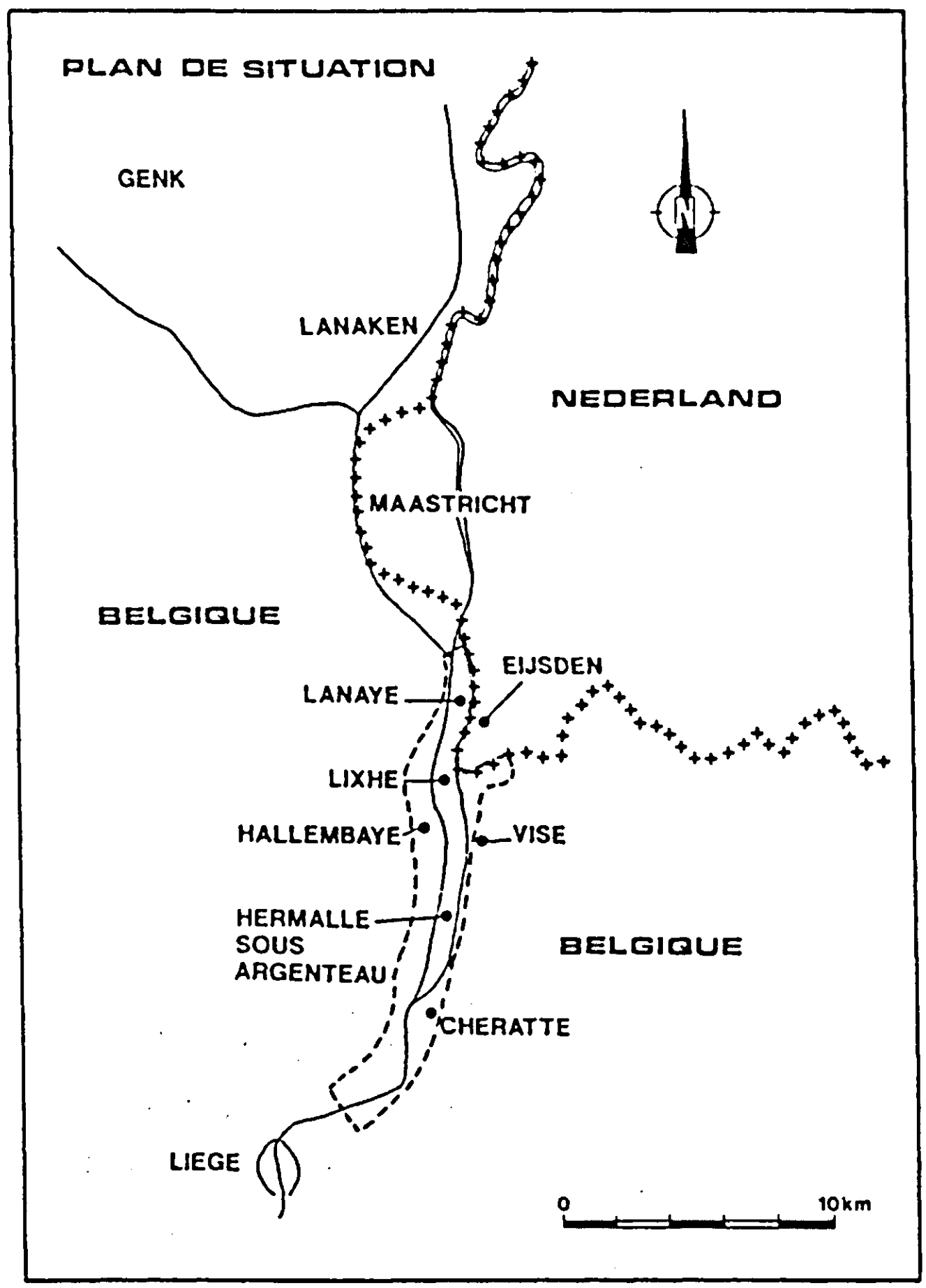


Figure 1 Plan de situation

Dans la région de Visé, une structure anticlinale en dôme fait affleurer les formations du Frasnien et du Tournaisien-Viséen composés de calcaires et dolomies. Des zones très karstiques de plusieurs hectares de superficie et de plusieurs dizaines ou centaines de mètres de profondeur, ont été localisées. Elles sont comblées par des schistes et psammites namuriens altérés, relativement aquifères. Ce paléokarst est l'objet de réactivations actuelles lorsqu'il apparaît en surface du fait de l'érosion. De part et d'autre de la structure anticlinale, les terrains houillers sus-jacents, composés de schistes, psammites et grès du Namurien,

inclinent de quelques degrés vers le Nord et vers le Sud. Après le plissement hercynien, l'ensemble fut pénéplané et recouvert au Crétacé supérieur par la Smectite de Herve (marne imperméable), épaisse généralement de 10 à 20 mètres, puis par des craies et tuffeaux du Campanien et du Maastrichtien. Ces formations affleurent au Nord de Visé, en rive gauche de la Meuse, et se prolongent au-delà de la tranchée de Caster jusqu'à Maastricht. De la vaste transgression tertiaire qui suivit ne subsistent que des lambeaux de sables oligocènes (Tongrien) conservés dans les aires de dissolution des craies et des tuffeaux. Au Quaternaire, la Meuse a entaillé son substratum, laissant subsister une dizaine de niveaux de terrasses. Son cours actuel, orienté sensiblement Sud-Nord dans cette région, comprend une importante plaine alluviale, large de plusieurs centaines de mètres et comportant 10 à 15 mètres de dépôts meubles, composés de limons fluviatiles et de graviers à matrice sableuse ou silteuse plus ou moins abondante.

2 SYNTHESE ET COLLECTE DES DONNEES

Ces dernières années, de nombreuses études relatives à la plaine alluviale de la Meuse à l'aval de Liège ont été réalisées pour l'exploitation des eaux souterraines, la réalisation de grands ouvrages de génie civil (élargissement du canal Albert, barrages, écluses, ...) et la mise en valeur des gisements de craies et de graviers. Toutes les données ont été collectées et synthétisées durant les années 1986 et 1987 par les L.G.I.H. de l'Université de Liège (Lox et al., 1987). Depuis 1987, des données complémentaires ont été acquises. Ces données proviennent des travaux effectués ou suivis par les Laboratoires de Géologie de l' Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection géophysique. Il s'agit de 97 points de données répartis en 47 sondages électriques, 37 sondages sismiques, 7 essais de pénétration, 4 forages et 2 puits. La Meuse Liégeoise a mis à notre disposition les données concernant la profondeur et le débit des drains en Meuse dans la région d'Hermalle, les résultats de 38 essais de pénétration et de 8 forages. La Société Wallonne de Distribution d'Eau a fourni les résultats de 6 puits testés et exploités entre 100 et 150 m^3/h à Vivegnis. La Société Anonyme Brock a fourni les résultats relatifs à 62 forages de prospection dont une vingtaine n'ont pas été suivis par un géologue. Sur base de la collecte ainsi réalisée, le Ministère des Travaux Publics a décidé d'acquérir encore quelques données supplémentaires dans certaines zones. Dans ce cadre, 108 sondages électriques, 13 sondages sismiques, 20 piézomètres et 2 puits ont été réalisés. Au total, les résultats d'environ 1500 forages, puits, piézomètres,

essais de pénétration, sondages sismiques et électriques sont disponibles, permettant de préciser la structure géologique des différentes formations et d'étudier les écoulements des nappes aquifères. 186 de ces points ont permis des mesures directes du niveau d'eau de la nappe alluviale.

2.1 Présentation des données

Sur base des données recueillies, ont été établies:

- une carte reprenant les zones des différentes résistivités apparentes des alluvions graveleuses de la Meuse (Figure 2);
- deux cartes piézométriques, la Figure 3 présente la situation du 10 Juillet 1989;
- 53 coupes géologiques transversales de la plaine alluviale, réparties entre Monsin et Lanaye.

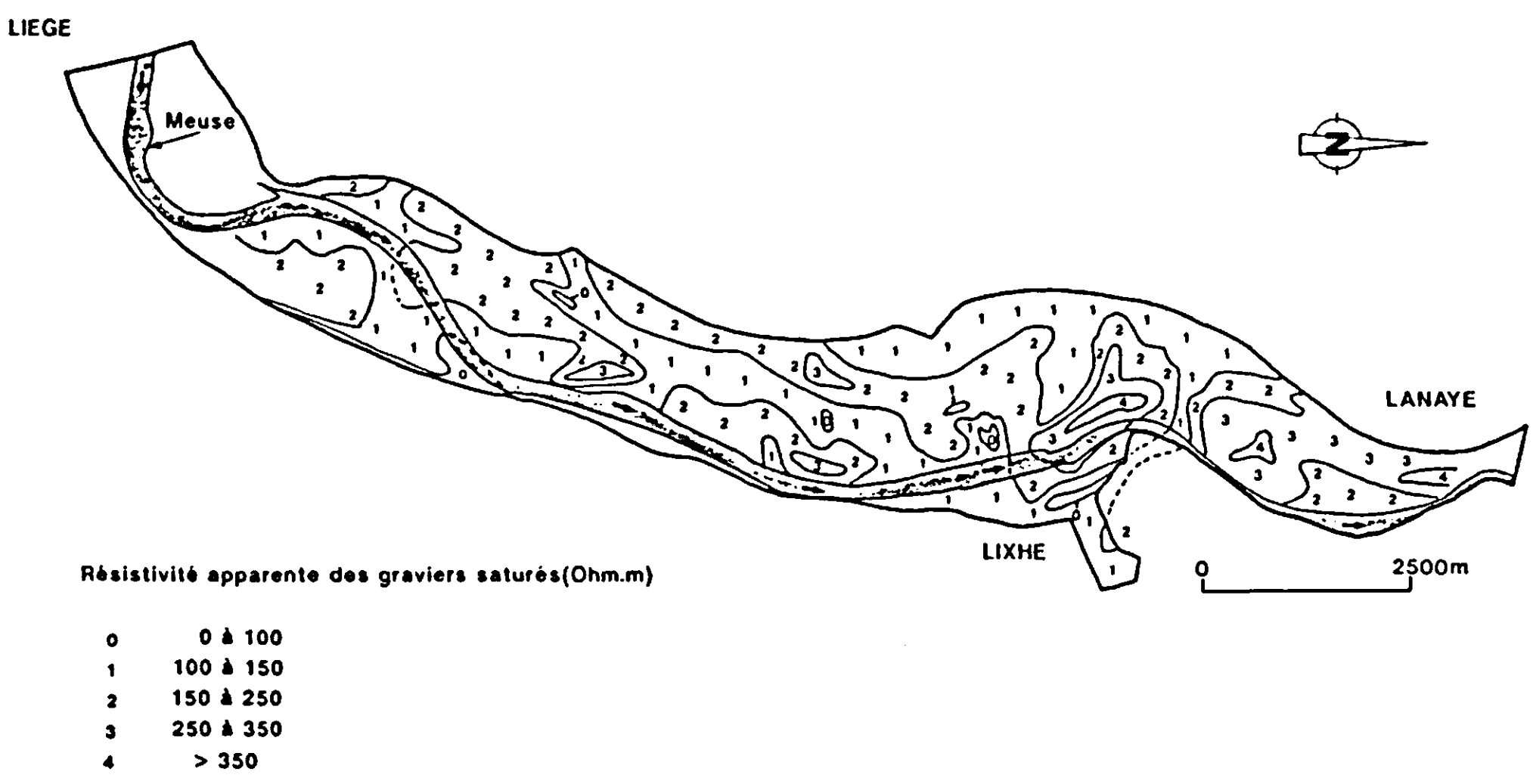


Figure 2 Carte des différentes zones de résistivités apparentes

Sur base de l'ensemble de ces documents, on a pu définir avec précision la géologie de la plaine alluviale. De l'aval vers l'amont ou du Nord au Sud, on remarque les faits suivants:

- En aval de Lanaye, la craie du Maastrichtien inférieur (Crétacé) constitue le substratum

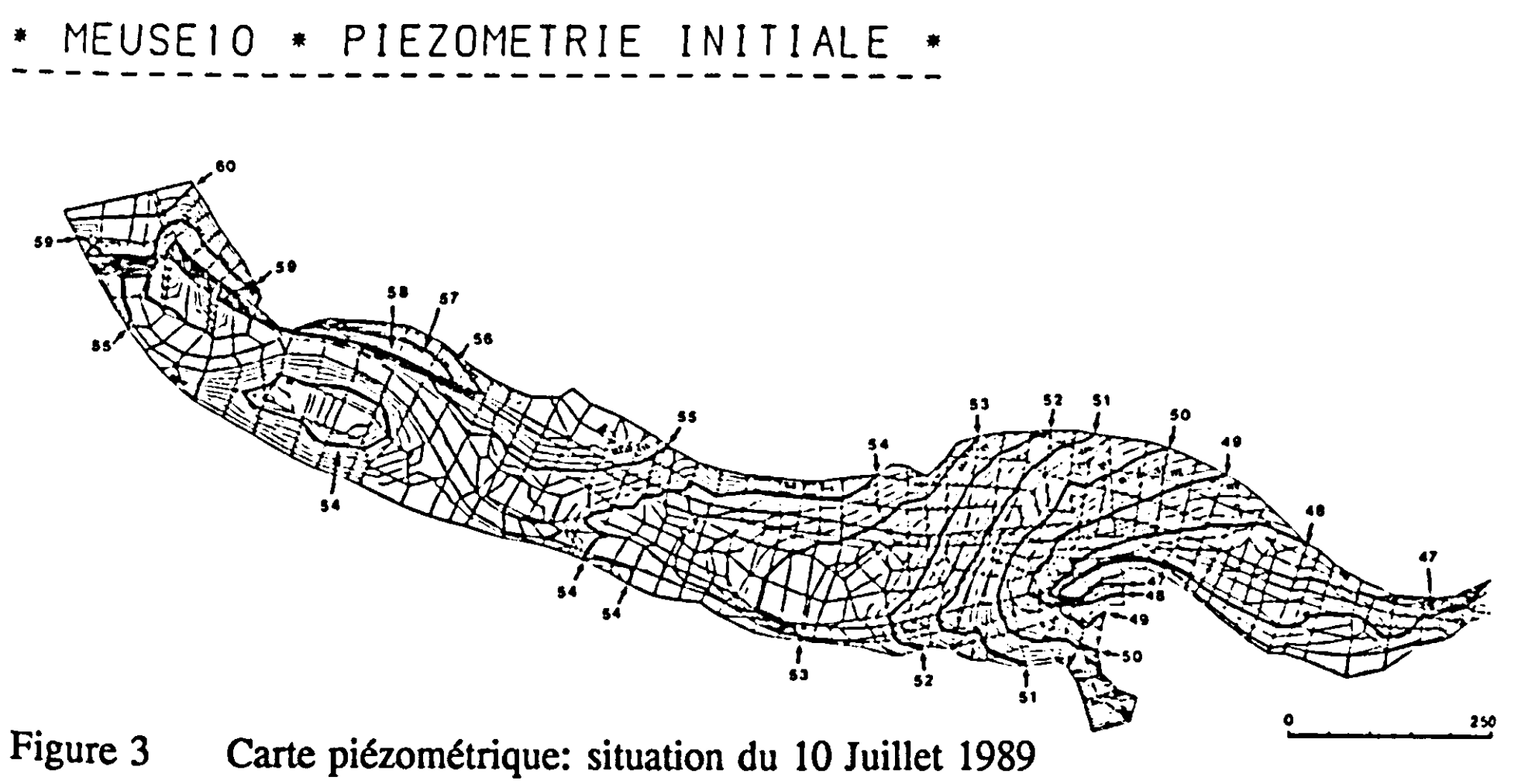


Figure 3 Carte piézométrique: situation du 10 Juillet 1989

sous les dépôts alluviaux et affleure sur le versant Ouest de la vallée (Figure 4: coupe CT3). Les craies du Maastrichtien et du Campanien, à pendage de quelques % vers le Nord-Est, constituent un aquifère puissant (Dassargues et al., 1989) surmontant la Smectite de Herve.

Les alluvions de la Meuse, d'une puissance moyenne de 10 mètres, comprennent à la base des graviers roulés à matrice silto-sableuse surmontés de limons fluviatiles. L'ensemble est souvent recouvert de remblais divers pouvant atteindre plus de 7 m. L'épaisseur des graviers varie entre 5 et 10 mètres, la teneur en matrice limono-sableuse varie fortement suivant les endroits, avec de fréquents lits sableux et lentilles d'argile. Les limons fluviatiles, plus ou moins argileux ou sableux suivant les endroits, ont une épaisseur comprise entre 2 et 6 m. Ils se chargent de petits cailloux roulés vers le bas.

- En remontant vers l'amont, le substratum crayeux est progressivement remplacé d'abord par la Smectite de Herve, ensuite par les phtanites et schistes du Houiller (Figure 5 : coupe CT15 et Figure 6 : CT18). Ces phtanites sont fortement bréchifiées par endroit, par effondrement dans des poches karstiques affectant les calcaires viséens sous-jacents (Figure 7 : CT20). Leur perméabilité est alors de 10^{-6} à 10^{-5} m/sec et la nappe est parfois artésienne de plusieurs mètres, par rapport à la nappe alluviale. A hauteur du barrage de Lixhe, des sondages ont révélé la présence d'une poche de plus de 200 m de profondeur. Les schistes et grès du Houiller peuvent contenir localement une faible quantité d'eau dans les fissures mais, en général, ils jouent plutôt le rôle d'écran à la circulation des eaux souterraines. Le sommet du Houiller est altéré sur quelques mètres et a un pendage Nord. Sa surface présente de nombreuses irrégularités locales dues à des surcreusements par le fleuve.

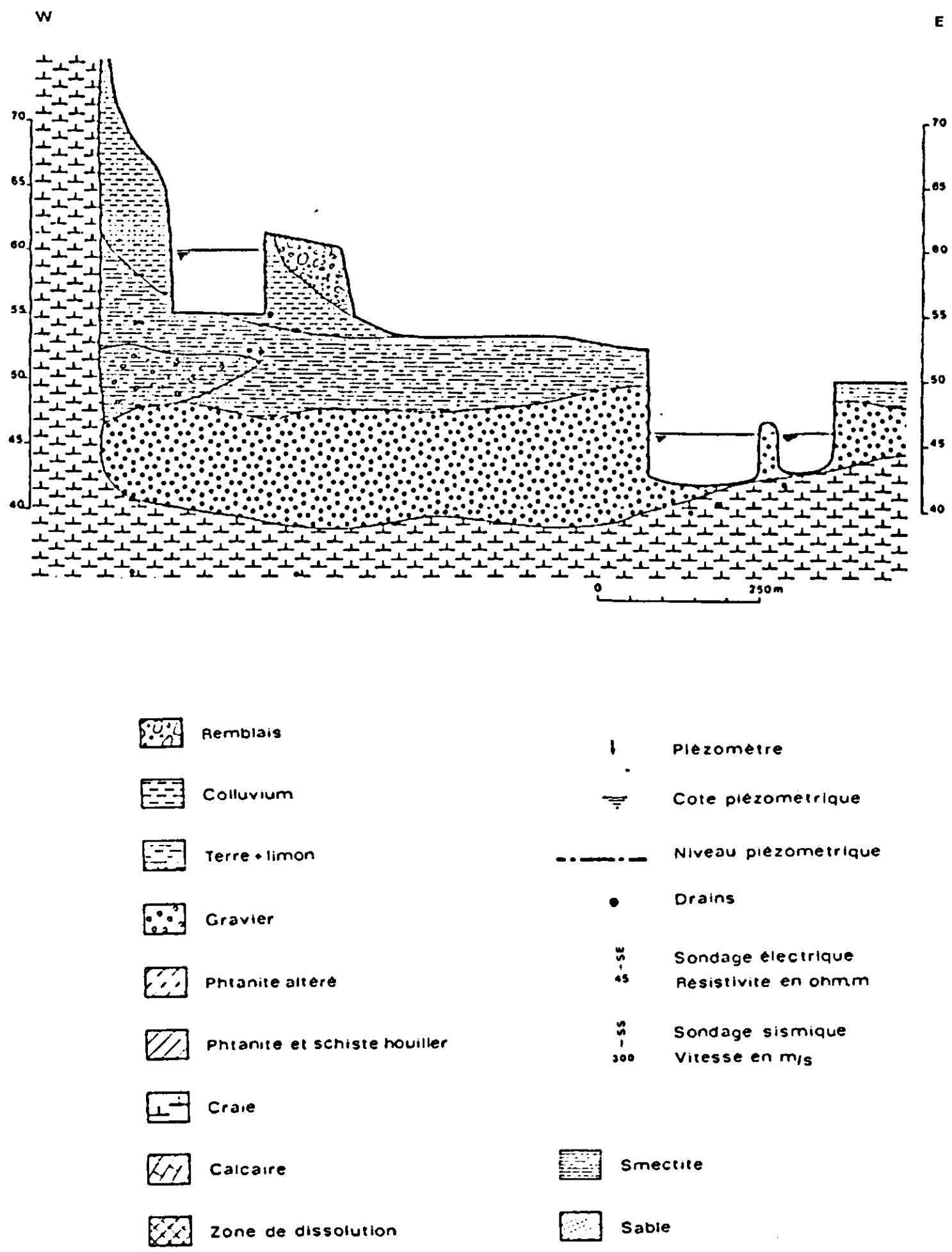


Figure 4 Coupe transversale CT3, Lanaye

- Plus au Sud, les calcaires viséens affleurent sur le versant Est de la vallée entre Visé et Hermalle, (Figure 8: CT28). Après Hermalle, les schistes houillers constituent à nouveau l'entièreté du substratum de la plaine alluviale (Figure 9: CT40). La couche de graviers, comprise entre le bed rock houiller pratiquement imperméable et les limons fluviatiles peu perméables, renferme une nappe aquifère s'étendant sur l'ensemble de la plaine alluviale. Elle est alimentée par l'impluvium direct, par l'eau de ruissellement des coteaux, par les nappes des versants et enfin par le canal Albert et la Meuse.

2.2 Etude de la nappe alluviale

L'épaisseur des dépôts graveleux varie entre 10 et 5 mètres, suivant que l'on se trouve sur d'anciens îlots de graviers ou au droit de chenaux anastomosés. Les variations de faciès sont

nombreuses et engendrent des zones de circulation préférentielle. La perméabilité des graviers varie entre 5.10^{-3} et 1.10^{-1} m/sec suivant leur granulométrie et leur teneur en matrice sablo-silteuse. Une série de sondages électriques a permis d'étudier les résistivités de la formation graveleuse, résistivités fonction de la teneur en éléments sablo-silteux influençant la perméabilité. La corrélation résistivité apparente - perméabilité obtenue est reprise au Tableau 1.

Tableau 1 Corrélation résistivité-perméabilité obtenue pour les graviers de la plaine alluviale de la Meuse dans la région liégeoise

Zone	0	1	2	3	4
Résistivité apparente en ohm. m	< 100	100 - 150	150 - 250	250 à 350	> 350
Perméabilité en m/sec	$0\text{-}6.10^{-3}$	$6.\text{-}7.10^{-3}$	$7.\text{-}8.10^{-3}$	$8.\text{-}10.10^{-3}$	$> 10.10^{-3}$

Sur base de cette corrélation, la perméabilité des graviers est établie dans toute la plaine alluviale à partir de la carte d'isorésistivité (Figure 2). Les valeurs de transmissivités, trouvées dans les derniers puits de pompage situés à Lanaye et à Hermalle, sont très élevées, de 12.10^{-2} à 54.10^{-2} m/s, elles sont supérieures aux estimations réalisées à partir de la corrélation. Il faudra donc s'attendre à devoir augmenter les perméabilités lors de la calibration du modèle. Deux campagnes de mesures piézométriques ont été réalisées le 31-05-1989 et le 10-07-1989, les cartes piézométriques obtenues serviront de référence pour la calibration du modèle. La composition chimique de l'eau de la nappe et notamment sa minéralisation plus forte que celle de la Meuse et du Canal semble indiquer un apport important d'eau de versant. L'ensemble des études hydrogéologiques relatives à la nappe alluviale de la Meuse à l'aval de Liège permet donc l'élaboration d'un modèle mathématique d'écoulement régional tout en restant très précis. Il reste à préciser les aménagements de la plaine alluviale qui sont susceptibles d'avoir modifié l'écoulement naturel dans la nappe.

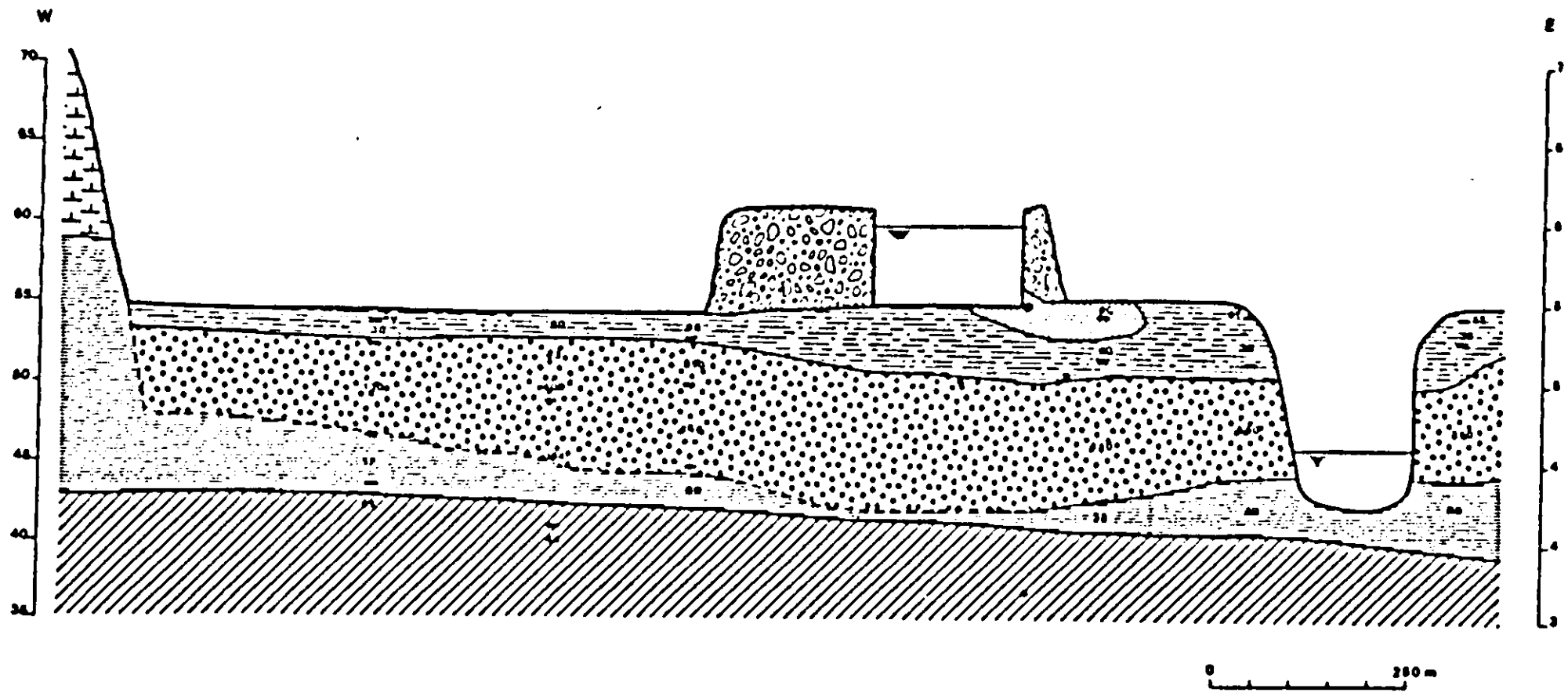


Figure 5 Coupe transversale CT 15

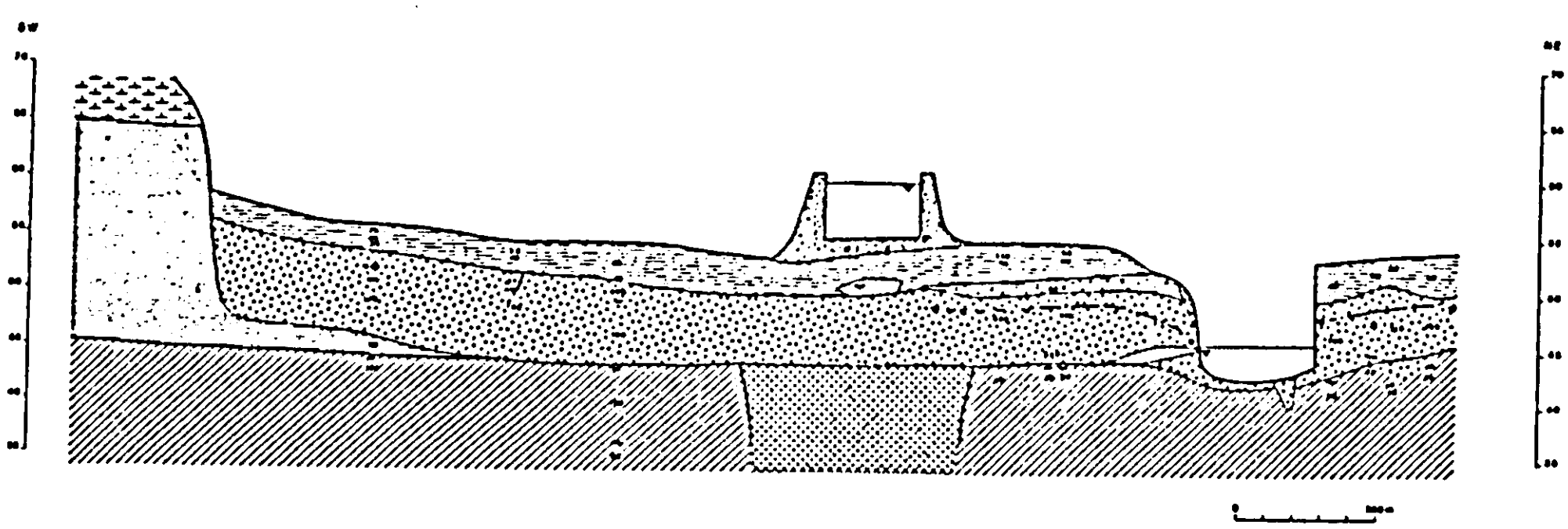


Figure 6 Coupe transversale CT 18, aval du barrage de Lixhe

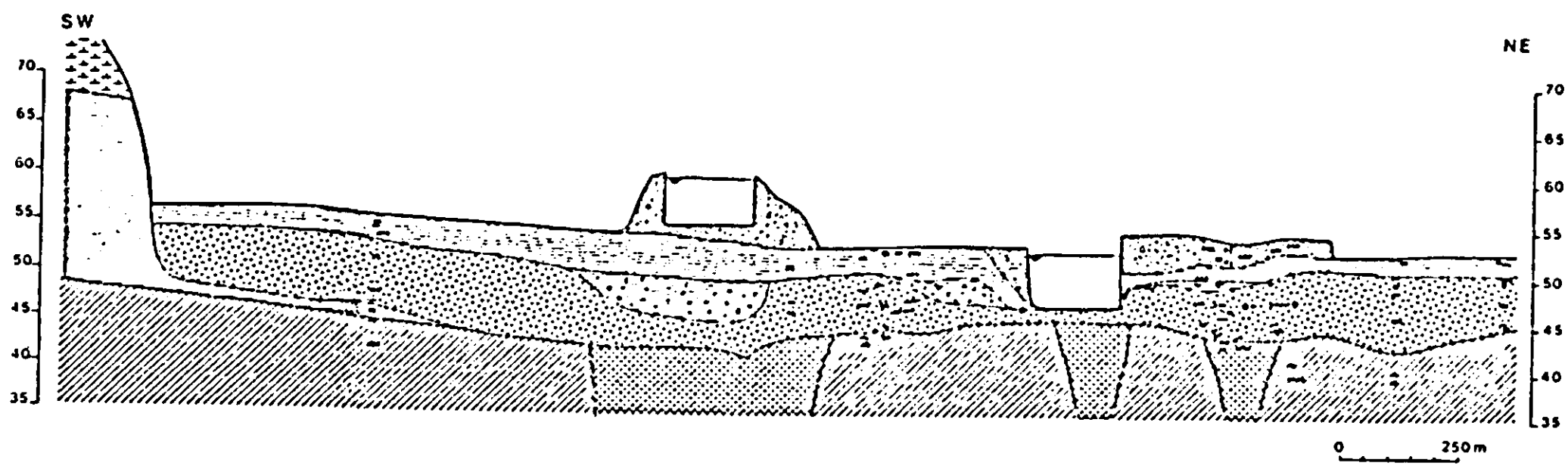


Figure 7 Coupe transversale CT20, barrage de Lixhe

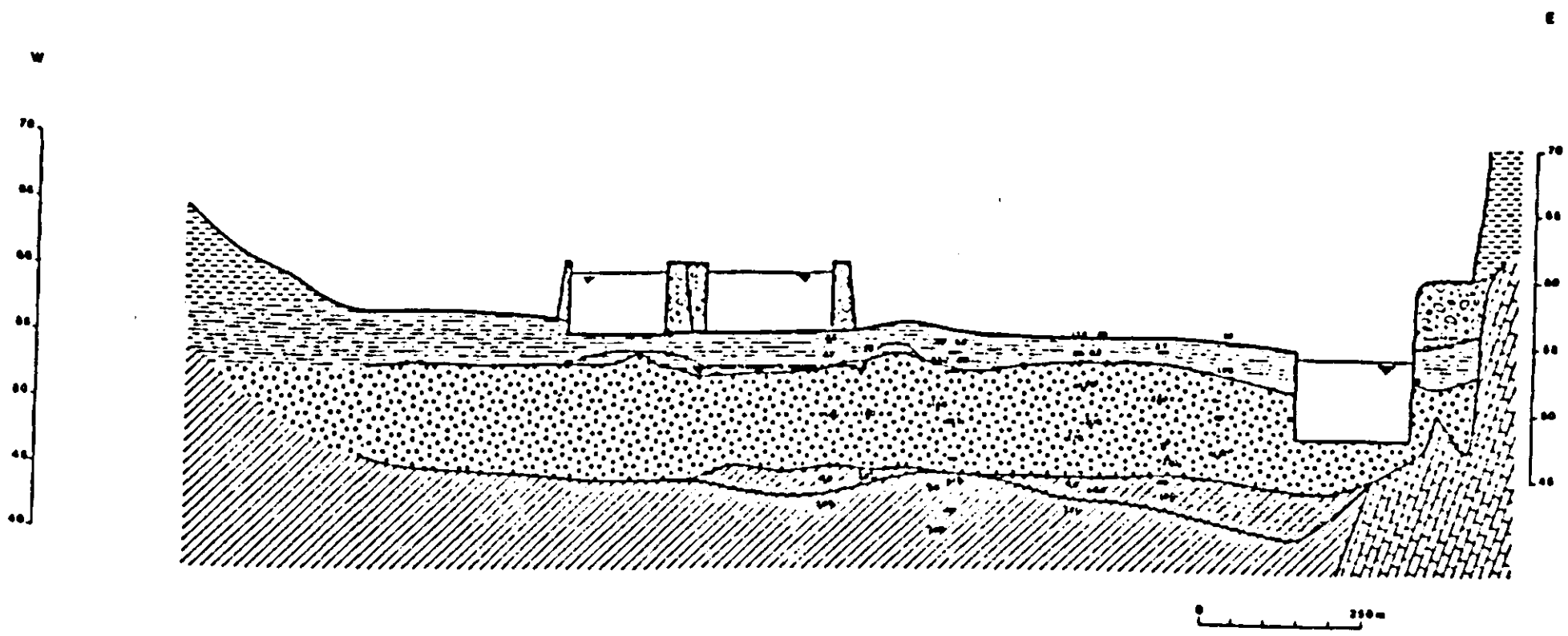


Figure 8 Coupe transversale CT 28, Basse-Hermalle

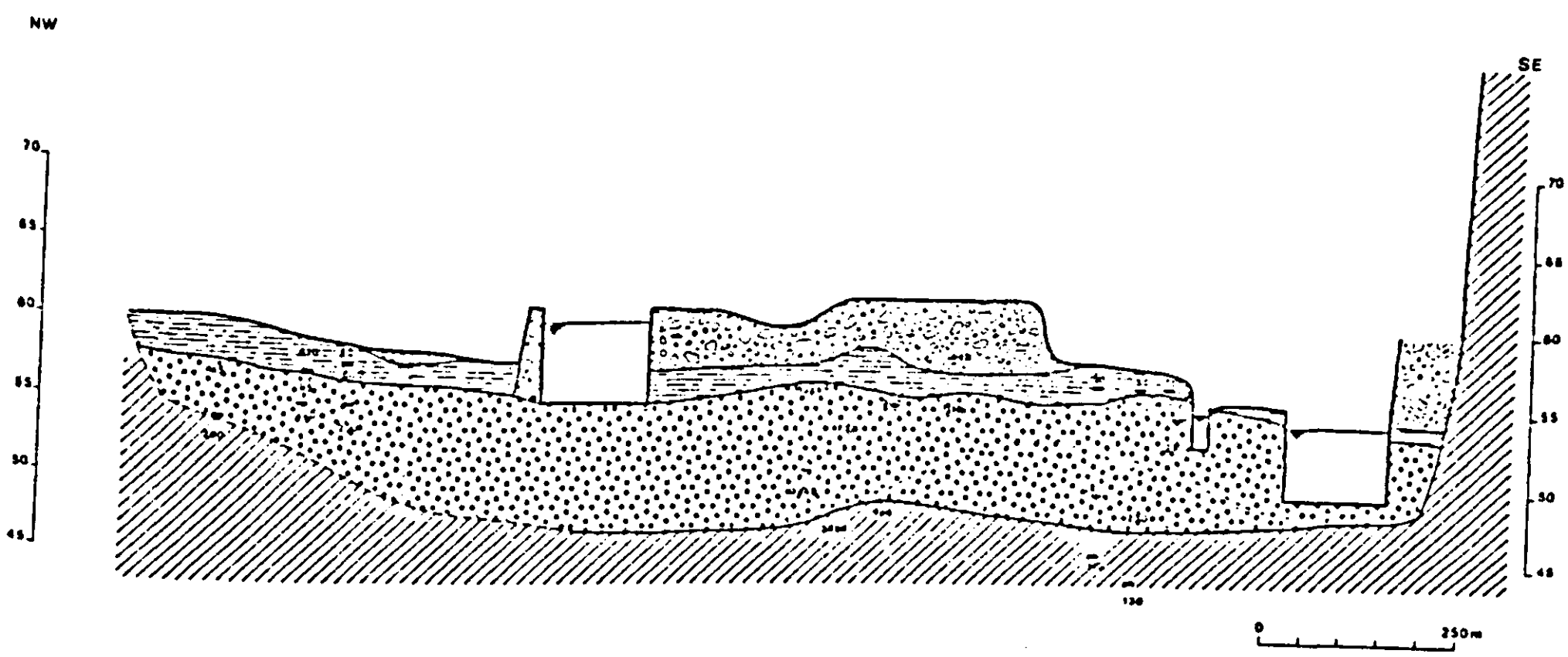


Figure 9 Coupe transversale CT 40, Vivegnis

Les principaux ouvrages sont:

- Le Canal Albert, dont le niveau de flottaison est calé à la cote 60 par le barrage de Monsin. Le fond du canal, à la cote 55 m, repose dans les alluvions tantôt limoneuses, tantôt sablo-graveleuses. Le niveau de la nappe alluviale atteint le fond du canal entre Monsin et Cheratte, puis décroche progressivement pour se situer 7,50 m plus bas à Lanaye. De ce fait, entre Monsin et la tranchée de Caster, le Canal subit des pertes à travers le dispositif d'étanchement du fond, pertes parfois accrues par les récents

travaux de mise au gabarit 9000 tonnes.

- Les murs de quai et les drains le long de la Meuse. A l'aval de Liège, la Meuse est canalisée jusqu'au barrage de Lixhe, à l'aval du quel sa section redevient naturelle. En rive gauche, un drain existe depuis Hermalle (sous-Argenteau (cote + 51,92) jusqu'en aval du barrage de Lixhe (cote + 46,20).

  En rive droite, il s'étend de Richelle (cote + 53) jusqu'à l'aval du barrage de Lixhe (cote 48,00). Les murs de quai et les drains influencent probablement les relations nappe alluviale-fleuve, modifiant les gradients piézométriques et les débits de transfert.
- Les barrages sur la Meuse, avec les niveaux de flottaison théorique suivants:
  . barrage-écluse de Monsin:
  niveau de flottaison amont: 60,00
  niveau de flottaison aval : 54,70
  . barrage-écluse d'Hermalle-sous-Argenteau (en cours de démolition):
  niveau de flottaison amont : 54,70
  niveau de flottaison aval : 54,00
  . barrage de Lixhe:
  niveau de flottaison amont : 54,00
  niveau de flottaison aval : 46,00

Les dénivellées ainsi créées entre bief amont et bief aval engendrent des écoulements importants via la nappe alluviale.

3 MODELES HYDROGEOLOGIQUES (DASSARGUES, 1990)

Les modèles hydrogéologiques, physiquement significatifs, sont basés sur des lois d'écoulement en milieu poreux utilisant comme paramètres la transmissivité (ou la perméabilité), le coefficient d'emmagasinement et des coefficients d'infiltration. Le calcul est réalisé en résolvant l'équation différentielle avec les paramètres spécifiés, les sollicitations extérieures et les conditions aux limites imposées. La solution proposée par le modèle consiste en une description de la piézométrie (ou du champ de pression).

Cette solution peut être obtenue analytiquement ou par des méthodes numériques. Les solutions analytiques sont exactes dans leurs développements mathématiques mais supposent

des conditions géologiques homogènes et des sollicitations uniformes. Les simulations les plus réalistes sont obtenues à l'aide de méthodes numériques telles que les méthodes des différences finies, éléments finis et éléments frontières.

3.1 Equations et hypothèses

La loi de Darcy, établissant que le flux est inversément proportionnel au gradient hydraulique s'écrit:

$$q_i = - K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \qquad i, j = 1, 2, 3 \qquad (1)$$

avec K_{ij} = tensur des perméabilités du milieu $[LT^{-1}]$

q_i = vecteur flux $[LT^{-1}]$

x_j = coordonnée $[L]$

h = hauteur piézométrique $[L]$

Cette loi, écrite sous forme scalaire, consiste en fait en 3 équations avec 4 inconnues: les q_i et la hauteur piezométrique h. La 4ième équation scalaire est fournie par l'expression du principe de conservation de la masse. En combinant la loi de Darcy et l'équation de continuité, on obtient l'expression de l'"équation de diffusivité":

$$\frac{\partial}{\partial_{x_i}}\left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j}\right) - Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (2)$$

avec S_s = coefficient d'emmagasinement spécifique $[L^{-1}]$

t = temps $[T]$

Q = terme de flux externes (pompages, réinjections, infiltrations) $[T^{-1}]$

La transmissivité est définie lorsque l'on considére que le flux s'effectue sur l'épaisseur saturée totale de l'aquifère et on a

$$T = K.e$$

travaux de mise au gabarit 9000 tonnes.

- Les murs de quai et les drains le long de la Meuse. A l'aval de Liège, la Meuse est canalisée jusqu'au barrage de Lixhe, à l'aval du quel sa section redevient naturelle. En rive gauche, un drain existe depuis Hermalle (sous-Argenteau (cote + 51,92) jusqu'en aval du barrage de Lixhe (cote + 46,20).

  En rive droite, il s'étend de Richelle (cote + 53) jusqu'à l'aval du barrage de Lixhe (cote 48,00). Les murs de quai et les drains influencent probablement les relations nappe alluviale-fleuve, modifiant les gradients piézométriques et les débits de transfert.
- Les barrages sur la Meuse, avec les niveaux de flottaison théorique suivants:
  . barrage-écluse de Monsin:
  niveau de flottaison amont: 60,00
  niveau de flottaison aval : 54,70
  . barrage-écluse d'Hermalle-sous-Argenteau (en cours de démolition):
  niveau de flottaison amont : 54,70
  niveau de flottaison aval : 54,00
  . barrage de Lixhe:
  niveau de flottaison amont : 54,00
  niveau de flottaison aval : 46,00

Les dénivellées ainsi créées entre bief amont et bief aval engendrent des écoulements importants via la nappe alluviale.

3 MODELES HYDROGEOLOGIQUES (DASSARGUES, 1990)

Les modèles hydrogéologiques, physiquement significatifs, sont basés sur des lois d'écoulement en milieu poreux utilisant comme paramètres la transmissivité (ou la perméabilité), le coefficient d'emmagasinement et des coefficients d'infiltration. Le calcul est réalisé en résolvant l'équation différentielle avec les paramètres spécifiés, les sollicitations extérieures et les conditions aux limites imposées. La solution proposée par le modèle consiste en une description de la piézométrie (ou du champ de pression).

Cette solution peut être obtenue analytiquement ou par des méthodes numériques. Les solutions analytiques sont exactes dans leurs développements mathématiques mais supposent

des conditions géologiques homogènes et des sollicitations uniformes. Les simulations les plus réalistes sont obtenues à l'aide de méthodes numériques telles que les méthodes des différences finies, éléments finis et éléments frontières.

3.1 Equations et hypothèses

La loi de Darcy, établissant que le flux est inversément proportionnel au gradient hydraulique s'écrit:

$$q_i = - K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \qquad i, j = 1, 2, 3 \qquad (1)$$

avec K_{ij} = tensur des perméabilités du milieu $[LT^{-1}]$

q_i = vecteur flux $[LT^{-1}]$

x_j = coordonnée $[L]$

h = hauteur piézométrique $[L]$

Cette loi, écrite sous forme scalaire, consiste en fait en 3 équations avec 4 inconnues: les q_i et la hauteur piezométrique h. La 4ième équation scalaire est fournie par l'expression du principe de conservation de la masse. En combinant la loi de Darcy et l'équation de continuité, on obtient l'expression de l'"équation de diffusivité":

$$\frac{\partial}{\partial_{x_i}} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \qquad (2)$$

avec S_s = coefficient d'emmagasinement spécifique $[L^{-1}]$

t = temps $[T]$

Q = terme de flux externes (pompages, réinjections, infiltrations) $[T^{-1}]$

La transmissivité est définie lorsque l'on considére que le flux s'effectue sur l'épaisseur saturée totale de l'aquifère et on a

$$T = K.e$$

Bien que l'épaisseur saturée (e) n'est pas nécessairement constante, ce concept est sans signification en écoulement 3D. Pour le coefficient d'emmagasinement, dans le cas des nappes libres, il faut considérer l'emmagasinement de fluide lors du passage de l'état non-saturé à l'état saturé. Cet emmagasinement correspond alors à la porosité efficace du milieu poreux (n_e).

3.2 Conditions aux frontières

Une nappe aquifère a une extension limitée dans l'espace et, sur ces limites les échanges d'eau avec l'extérieur sont régis par les conditions aux frontières.
Ces conditions sont de trois types:

1 Condition de Dirichlet ou de potentiel imposé:

$$h = \underline{h} \tag{3}$$

La valeur du potentiel h est alors spécifiée sur la frontière considérée, cette condition est typiquement celle d'un contact nappe-rivière, le potentiel constant imposé étant égal à la cote de la surface libre.

2 Condition de Neuman ou de flux imposé:

$$\frac{\partial h}{\partial n} = \frac{\partial h}{\partial x} 1_x + \frac{\partial h}{\partial y} 1_y = \phi \tag{4}$$

avec n = la normale extérieure à la frontière considérée

1_x et 1_y = les cosinus directeurs de cette normale

ϕ = flux imposé à la frontière

La valeur du gradient de potentiel normal à la frontière est alors imposée. Dans le cas particulier où $\phi = 0$, cette condition exprime, par application de la loi de Darcy, que la composante d'écoulement normale à la frontière est nulle. Les équipotentielles sont donc perpendiculaires à cette frontière et les lignes de flux, parallèles.

3 Condition de Fourier ou mixte:

$$h + \lambda \frac{\partial h}{\partial n} \quad \text{imposé} \tag{5}$$

Ce troisième type de condition permet d'imposer une relation entre le potentieel et le flux, comme cela est le cas lors:
- de la drainance par une frontière séparant la nappe aquifère d'un plan d'eau;
- du suintement à la frontière d'un milieu poreux, au contact de l'atmosphère.

La définition ad hoc de ces conditions aux frontières est indispensable à la résolution correcte du problème de champ posé.

3.3 Techniques de résolution

Les équations aux dérivées partielles, présentées ci-avant, représentent des phénomènes physiques bien précis. En y incluant les paramètres représentant les propriétés physiques, les conditions aux frontières et les sollicitations du système, les solutions de ces équations fournissent la simulation mathématique du système et de son état. Moyennant des hypothèses très restrictives quant aux propriétés de l'aquifère, aux conditions aux frontières et aux directions d'écoulement, des solutions analytiques peuvent être trouvées. L'exemple le plus connu et le plus utilisé est la solution de Theis appliquée au cas d'un essai de pompage. Ce type de solution est acceptable lors d'estimations relativement grossières mais inapplicable dans les cas où la géométrie complexe, le caractère transitoire des écoulements et l'hétérogénéité des propriétés, conditions aux frontières et sollicitations de l'aquifère étudié doivent être prises en compte. Diverses solutions numériques permettent de résoudre les équations en s'affranchissant des hypothèses très contraignantes des solutions analytiques. Ces solutions numériques constituent des approximations de la solution, mais les erreurs numériques sont le plus souvent négligeables par rapport aux erreurs dues à l'estimation des paramètres, à la conceptualisation du système et surtout à l'imposition d'hypothèses trop restrictives. Les méthodes des différences finies, des éléments finis et des éléments frontières sont très utilisées dans ce domaine. Elles se sont développées très rapidement dans les 20 dernières années et elles sont améliorées quotidiennement par les numériciens. Pour la description et le détail de ces méthodes le lecteur intéressé consultera la littérature spécialisée (Bear (1987), Zienkiewicz (1974), Ledoux (1978), Pinder (1977)...). Ces méthodes demandent une discrétisation spatiale et temporelle du domaine. La discrétisation spatiale consiste en une division de la région étudiée en cellules, éléments ou sous-régions,

qui peuvent être rectangulaires (différences finies), polygonales quelconques (éléments finis) ou de formes quelconques (éléments frontières). La solution de l'équation différentielle est obtenue en résolvant un système d'équations algébriques valables sur le maillage réalisé et pour des paramètres et conditions aux frontières donnés. Le système est résolu à chaque pas de temps, après actualisation des équations algébriques qui le composent.

3.4 Données nécessaires

L'application de modèles numériques en hydrogéologie requiert la détermination d'un certain nombre de paramètres à entrer dans le modèle. D'autre part, de nombreuses mesures doivent fournir les données géométriques, les sollicitations extérieures, les conditions aux frontières, les conditions initiales et enfin les valeurs à différentes époques de la variable de champ recherchée (Tableau 2). Ces dernières seront utilisées dans la phase de calibration du modèle.

La taille des éléments du maillage sera choisie en fonction des circonstances, de la densité des mesures disponibles, de la précision désirée pour les résultats, mais aussi des contingences informatiques (taille du système, temps CPU). Dans tous les cas, il s'agit donc d'un compromis entre ces différents impératifs. L'hydrogéologue doit alors réaliser l'assemblage de toutes ces données, transformant le système réel en un modèle mathématique préservant les éléments essentiels du système.

Tableau 2 Données nécessaires à un modèle écoulement

Données géométriques
- Représentation du domaine étudié par un maillage; choix des dimensions des cellules ou des éléments du modèle

Paramètres
- Perméabilité ou transmissivité
- Coefficient d'emmagasinement (spécifique) (spécifiés dans chaque élément du maillage)

Sollicitations extérieures
- Pompages et réinjections
- Infiltrations, flux latéraux (spécifié là où c'est nécessaire)

Conditions aux frontières

- Imperméables
- Flux imposés
- Potentiels imposés (choix d'une des options pour chaque frontière)

Conditions initiales

- Hauteurs piezométriques dans toute la zone au début de la simulation (spécifiées à chaque élément du maillage)

Variables calculées à comparer aux mesures

- Hauteurs piezométriques dans tous les éléments du maillage, à tout moment
- Flux
- Bilan

3.5 Calibration

Ce n'est que lorsqu'un modèle mathématique représente de façon précise les phénomènes simulés que son application pourra être envisagée pour d'éventuelles prédictions. Dans la plupart des cas d'étude, la connaissance quantitative des propriétés de l'aquifère est le problème majeur lors de l'élaboration d'un modèle, à cause de l'insuffisante connaissance quantitative de la géologie. Les valeurs des paramètres ne sont connues que dans certaines zones locales et l'hydrogéologue doit fournir des estimations pour les autres zones. Ces constations démontrent l'obligation de vérifier si les résultats d'un modèle sont réalistes ou non par rapport à la réalité.

Cette procédure est appelée "calibration", elle consiste à minimiser la différence entre mesures et résultats par l'ajustement des données d'entrée jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable. Le plus souvent les données modifiées sont essentiellement les valeurs et répartitions des paramètres car les autres données résultent de mesures plus fiables.

4 MODELE DE LA PLAINE ALLUVIALE DE LA MEUSE

4.1 Caractéristiques du code LAGAMINE

LAGAMINE est un ensemble modulaire de programmes d'éléments finis du type cinématiquement admissible et non linéaire. Certains modules sont plus particulièrement destinés à la modélisation des écoulements en milieu poreux. Certains sous-programmes, l'architecture générale et le pré-processeur sont communs à tous les modules. De nouveaux éléments et de nouvelles lois constitutives peuvent aisément être introduits. Le programme procède par pas de temps successifs et itère dans chaque pas jusqu'à obtenir l'équilibre selon la précision imposée par l'utilisateur, suivant la méthode de Newton-Raphson.

4.2 Modélisation de la surface libre en mode transitoire

Jusqu'à ce jour, les programmes d'éléments finis visant à modéliser des nappes aquifères à surface libre, travaillaient généralement avec un maillage variable, limité à la zone saturée du milieu poreux. A chaque pas de la simulation, la nouvelle hauteur piézométrique calculée provoquait un remaillage automatique de la zone saturée. Ce système est précis, mais extrêmement lourd et gros consommateur de temps ordinateur. Vu les dimensions de la nappe alluviale de la Meuse, il était rigoureusement impossible d'envisager ce procédé. La méthode utilisée, exceptionnelle de par son originalité (Charlier et al., 1987, Dassargues, 1991), se base sur la technique "enthalpique" de modélisation des changements de phase en conduction thermique et fait passer le milieu poreux de l'état non saturé à l'état saturé à pression constante nulle. Elle permet de simuler les nappes libres en régime transitoire avec un maillage fixe.

4.3 Discrétisation spatiale et temporelle

Les éléments finis utilisés dans le modèle écoulement à 3 dimensions sont des "éléments briques" à 8 noeuds. La discrétisation géométrique doit tenir compte de beaucoup d'impératifs, le maillage final obtenu étant le résultat de la prise en compte de l'ensemble de ceux-ci. Pour éviter une multiplication excessive du nombre d'éléments, il a été distingué 4 couches d'éléments (5 couches de noeuds). Afin de faciliter les manipulations de fichiers de données, les couches successives de noeuds ont la même répartition dans leur représentation

horizontale. D'une couche de noeuds à une autre, seule la coordonnée Z change pour les différents noeuds. Les numéros des noeuds et des éléments sont calculés d'une couche à l'autre par incrémentation. Il est évident que les couches successives de noeuds ne sont pas horizontales puisqu'elles épousent les limites des différentes entités géologiques distinguées. Le maillage (dont la représentation horizontale est la même pour les couches successives) tient compte des données disponibles pour le modèle: des noeuds ont été placés à l'endroit des piézomètres et forages donnant des informations sur la lithologie ou l'hydrogéologie. Le modèle compte 589 éléments par couche d'éléments et 671 noeuds par couche de noeuds. Il couvre une superficie de 30 km² correspondant à l'entièreté de la plaine alluviale de la Meuse entre Monsin et Lanaye (frontière hollandaise). On obtient donc une structure de 2356 éléments et 3355 noeuds.

4.4 Introduction des paramètres hydrogéologiques

Les paramètres hydrogéologiques à affecter aux différentes couches sont la perméabilité K (m/sec) et le coefficient d'emmagasinement S. La répartition de ces paramètres dans les 2356 éléments du modèle peut se faire de manière très souple; à la limite, nous pourrions imposer 2356 couples de paramètres différents. Pour faciliter cette répartition, nous définissons des "matériaux" différents, en regroupant sous le même matériau les éléments affectés des mêmes paramètres. Dans une première approche, les matériaux correspondent principalement à des couches géologiques distinctes. Nous définissons les matériaux suivants:

matériau 1 : graviers
matériau 2 : limons
matériau 3 : remblais
matériau 4 : limons graveleux
matériau 5 : craies
matériau 6 : remblai de gravière
matériau 7 : matériau spécial faisant en sorte que l'élément qui en est affecté n'est pas pris en compte dans le calcul (élément inactif)
matériau 8 : eau
matériau 9 : colluvium
matériau 10 : calcaires.

La répartition des différents matériaux en fonction des 4 couches d'éléménts est la suivante:

- la couche 1 est composée d'éléments représentant les graviers à l'exception de la zone de la tranchée de Caster où ce sont des craies (mat. 5) et de la zone de Visé où ce sont des calcaires (mat. 10)
- la couche 2 est également composée d'éléments représentant les graviers à l'exception de la zone de la tranchée de Caster (craies: mat. 5), de la zone de l'écluse de Lanaye (limons: mat. 2), de la Meuse et certaines gravières (eau: mat. 8), de certaines gravières remblayées (mat. 6) et de limons plus graveleux près de Lanaye (mat. 4)
- la couche 3 est composée d'éléments représentant les remblais à l'exception de la zone de la tranchée de Caster (craies: mat. 5), de la zone en amont de l'écluse de Lanaye (limons graveleux mat. 4), de gravières remblayées (mat. 6), de la Meuse et des gravières (eau : mat. 8) et de quelques zones de remblais (mat. 3)
- la couche 4 est composée d'éléments représentant les remblais à l'exception de la zone de la tranchée de Caster (craies: mat. 5), de certaines zones de colluvium (mat. 9), de gravières remblayées (mat. 6), de la Meuse et des gravières (eau: mat. 8) et d'un élément de colluvium (mat. 2) situé en amont de l'écluse de Lanaye.

Les éléments affectés du matériau 7 n'interviennent pas dans le calcul. Dans une seconde approche plus détaillée, différentes perméabilités sont affectées au sein des graviers sur base des résultats de la corrélation transmissivité-résistivité apparente. Au lieu du seul matériau 1, neuf matériaux représentant les graviers ont été distingués. Les caractéristiques hydrogéologiques introduites dans le modèle au départ de la calibration sont les suivantes:

Première approche

mat. 1	: graviers	$K = 8.10^{-3}$ m/s	S = 0.10
mat. 2	: limons	$K = 5.10^{-7}$ m/s	S = 0.05
mat. 3	: remblais	$K = 5.10^{-6}$ m/s	S = 0.08
mat. 4	: limons graveleux	$K = 1.10^{-5}$ m/s	S = 0.07
mat. 5	: craies	$K = 1.10^{-4}$ m/s	S = 0.05
mat. 6	: remblai de gravière	$K = 1.10^{-6}$ m/s	S = 0.08

mat. 7	: spécial[1]					
mat. 8	: eau					
mat. 9	: colluvium	K	=	1.10^{-7} m/s	S =	0.04
mat. 10	: calcaire	K	=	1.10^{-5} m/s	S =	0.08

Les coefficients d'emmagasinement n'interviendront pas dans le calcul car la simulation sera menée en mode quasi-permanent.

4.5 Conditions initiales, conditions aux frontières, flux et potentiels imposés

La piézométrie mesurée de référence, correspond à la campagne de mesures de Juillet 1989, prise comme piézométrie initiale. La discrétisation temporelle est réalisée avec des pas de temps croissants et la piézométrie calculée après 40 ans est comparée à la piézométrie mesurée. Durant ce temps, les sollicitations sont permanentes. Les conditions aux frontières sont les suivantes:

a Frontières extérieures latérales:

Au vu du contexte géologique et hydrogéologique, des conditions de potentiels imposés ont été choisies aux frontières extérieures du modèle. Ce type de condition implique que des flux entrants ou sortants sont permis en chaque noeud de la frontière. Dans les zones de versant où la perméabilité est faible, dans la smectite, dans les schistes comme dans le colluvium de pied de versant, ces flux seront faibles. Par contre, aux bordures affectées de perméabilités élevées, comme dans les craies et les calcaires fracturés, ces flux peuvent être très importants.

b Frontières intérieures: les berges de la Meuse:

Lorsque les berges n'ont pas été imperméabilisées, il est évident qu'il s'agit de frontières où le potentiel est imposé au niveau de la Meuse. Par contre, dans la partie située immédiatement en amont du barrage de Lixhe, la Meuse est canalisée et un drain reprend les écoulements éventuels en provenance de la nappe alluviale. Dans ce dernier cas, des frontières imperméables ont été choisies avec néanmoins des débits sortants de la nappe, correspondant aux débits collectés par les drains: 0.158 m^3/s en rive droite et

---

1 Le matériau "special" est utilisé pour des éléments qui n'interviennent en aucune façon dans le calcul, dans des zones comme les graviéres au-dessus du niveau de l'eau.

0.385 m^3/s en rive gauche. Ces débits imposés ont été répartis sur tous les noeuds concernés représentant le drain.

c Frontière à la base du modèle:

Vu le contexte géologique, des frontières imperméables ont été choisies à la base du modèle en raison du caractère imperméable de la smectite de Herve, des schistes du Houiller et des phtanites saines. Cependant, pour les zones de la plaine alluviale situées au droit du bed rock crayeux ou calcaire, des conditions à potentiel imposé ont été choisies. De plus, au droit des poches de dissolution dans les phtanites, des flux entrants répartis ont été imposés, correspondant aux flux réels dus à la pression supérieure de la nappe contenue dans les phtanites altérées.

d Venues d'eau et pompages:

Les principales venues d'eau sont dues à la mauvaise étanchéité du fond et des berges du canal Albert et ont été estimées lors d'une étude précédente (rapport LGIH-MTP/871). En première approximation, ces flux sont répartis sur les noeuds bordant la représentation du canal. Sur base du rapport MTP/871, quatre zones sont distinguées:

- zone de Hermalle: 0.2 à 0.3 10^{-3} m^3/s par m de longueur de canal;
- zone de Lixhe: 0.45 à 0.73 10^{-3} m^3/s par m de longueur de canal;
- zone de Nivelle: 0.08 à 0.17 10^{-3} m^3/s par m de longueur de canal;
- zone de Lanaye: 0.12 à 0.23 10^{-3} m^3/s par m de longueur de canal.

Par la suite, lors de la calibration du modèle, certaines de ces valeurs ont été modifiées. D'autres venues d'eau sont prises en compte, notamment dans les versants en bordure de la plaine alluviale. Dans chaque cas, des flux entrants sont imposés aux noeuds concernés. Certains pompages sont effectués dans la nappe alluviale et les plus importants sont ceux du démergement de la plaine alluviale situés à Herstal et Wandre. Les pompages significatifs (> 0.004 m^3/s) sont pris en compte par imposition d'un débit sortant aux noeuds concernés ou les plus proches. Une infiltration uniforme, due à la partie des précipitations qui n'est pas évaporée ni ruissellée, est imposée sur l'ensemble de la couche supérieure du modèle. Sa valeur est de 300 mm d'eau par an, soit 9.5 10^{-9} m^3/s par m^2.

4.6 Calibration

Les changements de perméabilités effectués lors de la calibration sont résumés au Tableau 3.

Au 23 ème passage, on peut remarquer (Figure 10) que la piézométrie calculée est concordante avecla piézométrie mesurée (Figure 3) avec un écart moyen de l'ordre de 10 à 15 cm sur l'ensemble du domaine, excepté dans les zones amont, où le manque d'informations piézométriques ne permet pas d'affiner la calibration.

4.7 Résultats et conclusions

Les résultats du modèle peuvent donc être déduits car il est considéré comme calibré valablement. La répartition finale des différents matériaux est obtenue pour les différentes couches du modèle, montrant une grande hétérogénéité des perméabilités des graviers. Une carte des flux à la base du modèle (Figure 11) permet de visualiser très nettement les directions et l'importance relative de tous les flux calculés dans la zone modélisée. Les résultats chiffrés que le modèle permet d'obtenir, sont les suivants:

A Sur la zone 1 (Figure 12), la frontière inférieure du modèle étant situé dans les craies, les flux calculés sont de 0.24 m^3/s entrant dans la nappe alluviale.

B Sur la zone 2 (Figure 12), la frontière inférieure du modèle reposant sur les calcaires, les flux calculés résultant sont -0.121 m^3/s sortant du modèle par le substratum perméable des calcaires.

C La zone 3 (Figure 12) est constituée de tous les noeuds de la frontière latérale du modèle, situés dans les craies en rive gauche du canal Albert en amont de Lanaye. Les flux calculés résultant sont de 0.341 m^3/s entrant dans la plaine alluviale par cette zone de la frontière latérale commune avec la nappe aquifère de Hesbaye.

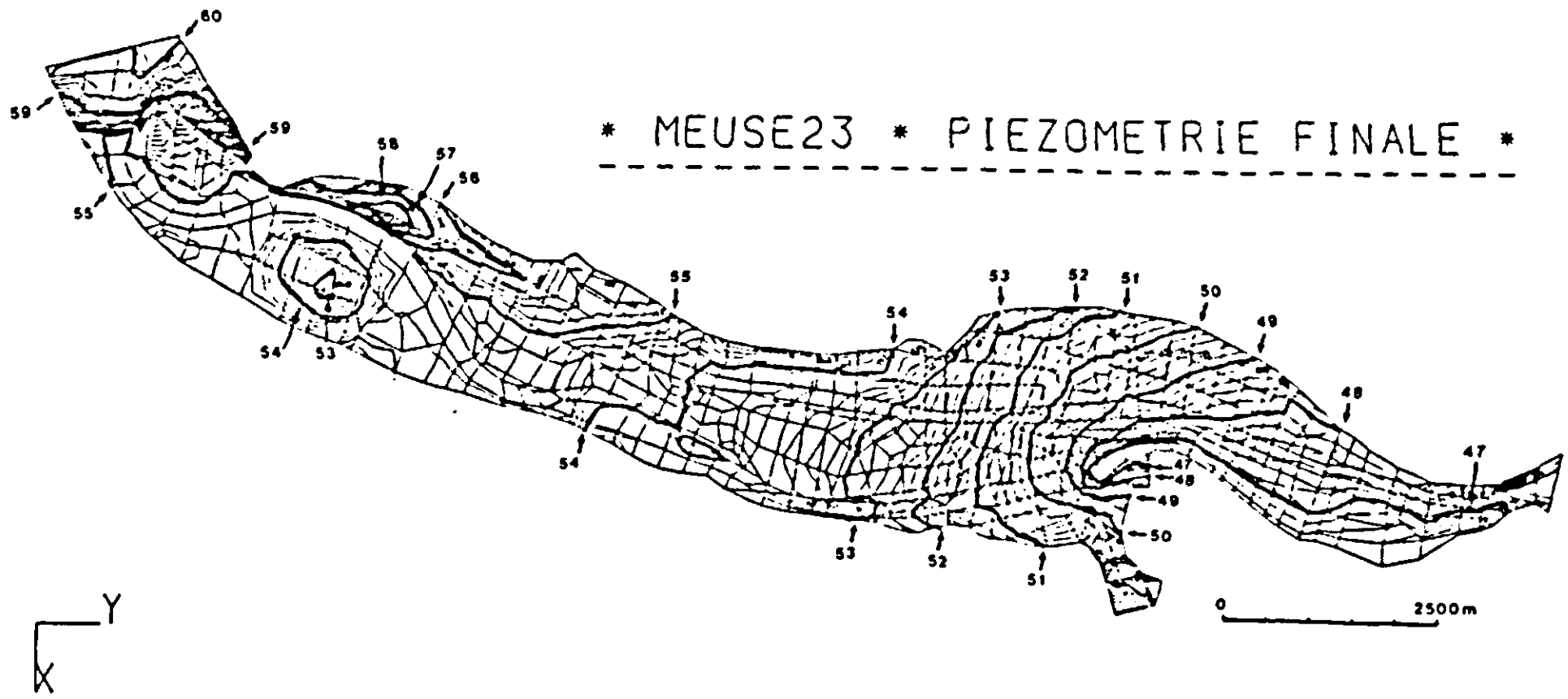


Figure 10 Carte piézométrique calculée au 23 éme passage

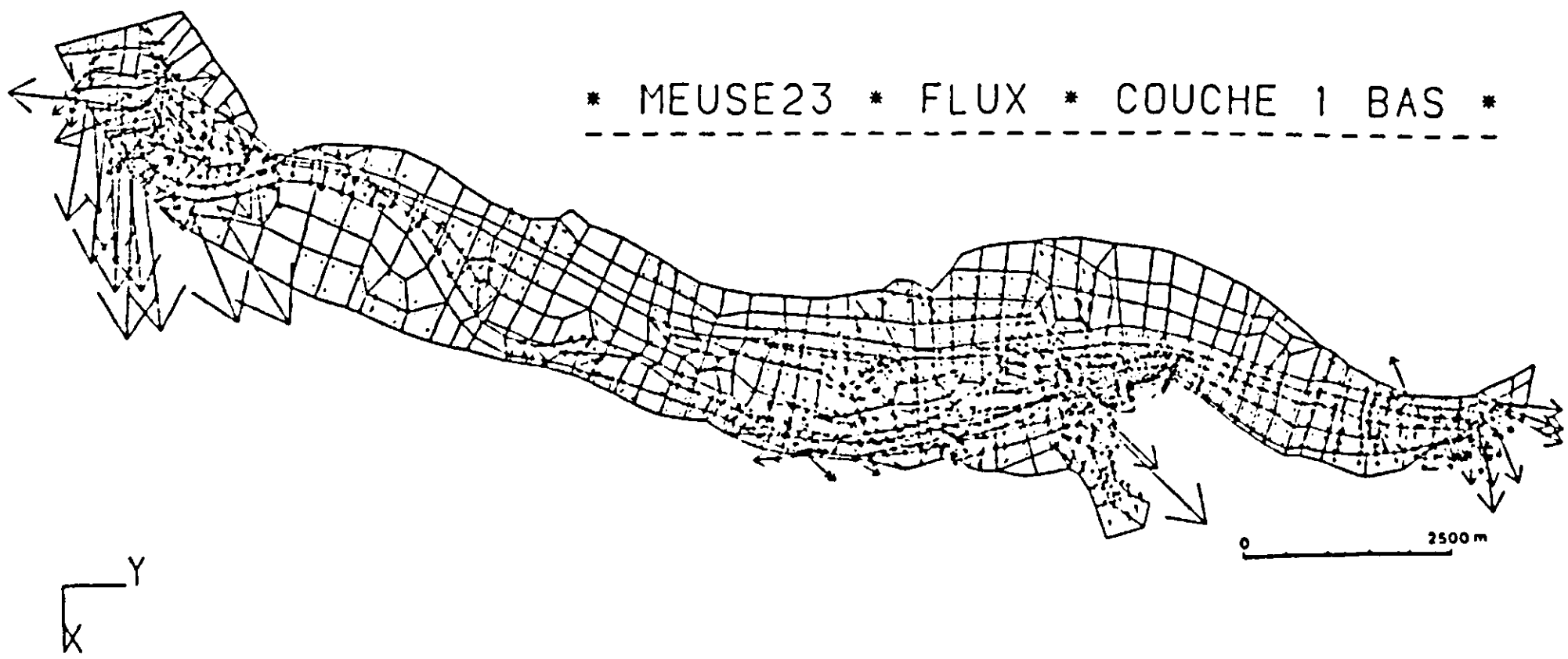


Figure 11 Carte des flux calculés

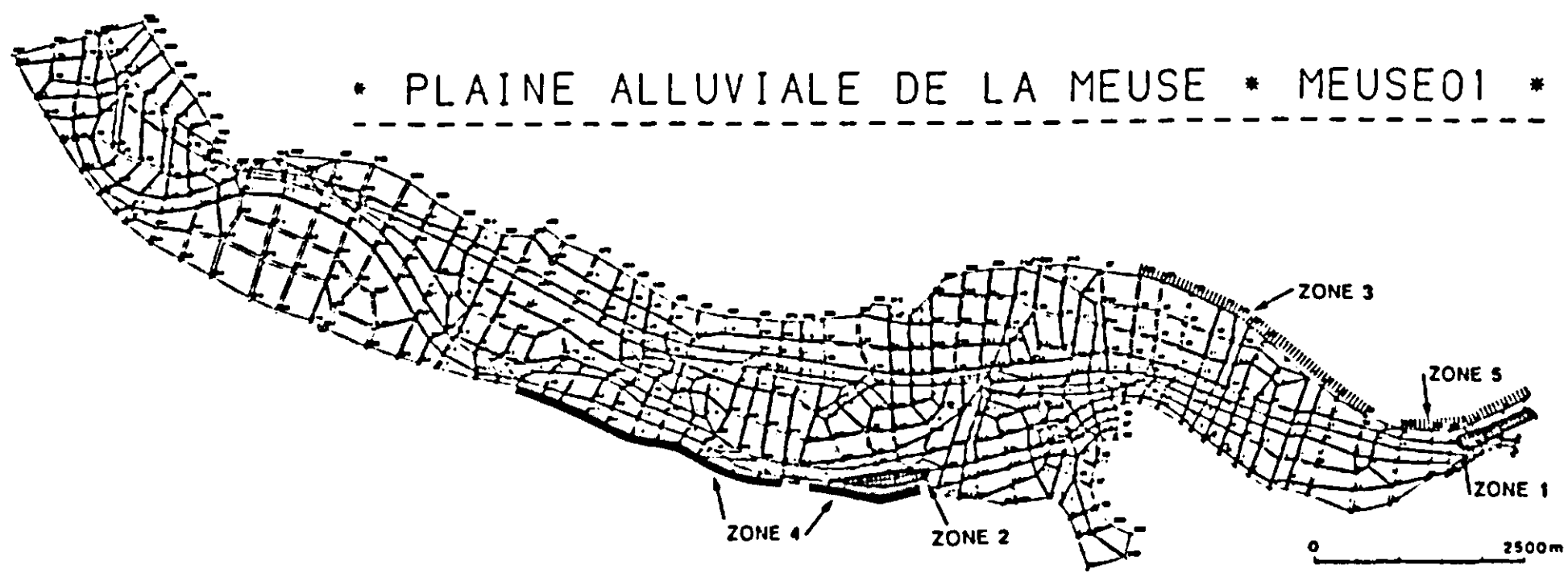


Figure 12 Carte illustrant les échanges aux frontières du domaine

Tableau 3 Calibration Du Modele Meuse

N° du passage de calibration Valeur introduite	Meuse 08 K(m/s)	Meuse 23 K(m/s)
Mat. 1 : graviers	$7.5\ 10^{-3}$	$1.5\ 10^{-3}$
Mat. 2 : limons	$5\ 10^{-7}$	-
Mat. 3 : remblais	$1\ 10^{-6}$	-
Mat. 4 : limons graveleux	$1\ 10^{-5}$	-
Mat. 5 : craies	$1\ 10^{-4}$	-
Mat. 6 : remblais de gravière	$1\ 10^{-6}$	-
Mat. 7 : "spécial"	0	-
Mat. 8 : eau	1	-
Mat. 9 : colluvium	$1\ 10^{-7}$	-
Mat. 10 : calcaires	$1\ 10^{-5}$	-
Mat. 11 : graviers	$3\ 10^{-3}$	$6\ 10^{-3}$
Mat. 12 : graviers	$6\ 10^{-3}$	$1.2\ 10^{-2}$
Mat. 13 : graviers	$6.5\ 10^{-3}$	$1.3\ 10^{-2}$
Mat. 14 : graviers	$7\ 10^{-3}$	$1.4\ 10^{-2}$
Mat. 15 : graviers	$8\ 10^{-3}$	$2\ 10^{-2}$
Mat. 16 : graviers	$9\ 10^{-3}$	$4.5\ 10^{-2}$
Mat. 17 : graviers	$10\ 10^{-3}$	$5\ 10^{-2}$
Mat. 18 : graviers	$15\ 10^{-3}$	$7.5\ 10^{-2}$
Mat. 25 : graviers + colluvium	-	$3.5\ 10^{-3}$
Mat. 26 : graviers très propres	-	$1.0\ 10^{-1}$

D La zone 4 (Figure 12) est constituée de tous les noeuds de la frontière latérale du modèle, situés dans les calcaires en rive droite de la Meuse, à l'exception du noeud 368 où une venue d'eau (flux imposé) a été prise en compte. Les flux calculés résultant sont de 0.583 m^3/s entrant dans la plaine alluviale, auquel il faut ajouter le débit ajusté de 0.250 m^3/s au noeud 368 correspondant à une venue d'eau connue. Au contact de la plaine alluviale et des calcaires en rive droite de la Meuse, un débit global de 0.833 m-3/s entre dans la nappe alluviale venant de la nappe calcaire du Pays de Herve.

E La zone 5 (Figure 12) correspond aux noeuds de la frontière latérale du modèle, situés dans les craies à proximité immédiate de l'écluse de Lanaye. Les flux calculés, résultant des potentiels imposés dans les 4 couches inférieures des noeuds sont de 0.461 m³/s entrant dans la nappe alluviale dans cette zone.

F La zone 6 correspond à l'ensemble des noeuds bordant la Meuse, là où celle-ci n'est pas canalisée. Il s'agit de frontières latérales internes au modèle qui permettent de comptabiliser les flux échangés avec la Meuse. Les flux totaux sont de -5.3 m³/s sortant de la nappe aquifère et alimentant la Meuse.

G La zone 7 correspond à l'ensemble des noeuds situés sur les autres bordures latérales du modèle. Les flux calculés, résultant des potentiels imposés, sont de 1.448 m³/s entrant dans la nappe alluviale.

H Les pompages et arrivées d'eau sont les suivants:

noeud 368: 0.250 m³/s (entrant) (venue d'eau comptabilisée dans la zone 4);
noeud 478: -0.045 m³/s (sortant) (pompage);
noeud 488: -0.063 m³/s (sortant) (pompage);
noeud 547: 0.028 m³/s (entrant) (venue d'eau);
noeud 566: -0.050 m³/s (sortant) } Démergement et pompages;
noeud 592: -0.010 m³/s (sortant) } en rive gauche du canal;
noeud 564: -0.050 m³/s (sortant); } Démergement et pompage divers en rive droite de la Meuse pour un total de -0.250 m³/s
noeud 575: -0.030 m³/s (sortant);
noeud 563: -0.040 m³/s (sortant);
noeud 583: -0.030 m³/s (sortant);
noeud 555: -0.040 m³/s (sortant);
noeud 574: -0.020 m³/s (sortant);
noeud 554: -0.020 m³/s (sortant);
noeud 582: -0.020 m³/s (sortant);
noeud 634: -0.012 m³/s (sortant); } Pompage en rive gauche du canal
noeud 655: -0.016 m³/s (sortant);

Certaines valeurs de pompage ont été augmentés par rapport aux valeurs moyennes connues. Ces augmentations ont été imposées pour améliorer la comparaison

piézométrie mesurée - piézométrie calculée dans certaines zones de Wandre et de Vivegnis-Herstal. Il faut cependant remarquer que dans ces zones, la piézométrie mesurée à été établie sur peu de piézomètres disponibles et que d'autre part, les valeurs de pompage du démergement sont des valeurs basées sur des moyennes annuelles, tandis que la piézométrie mesurée, prise comme référence, est relative à une date bien précise.

I Les débits récoltés par les drains le long de la Meuse sont au total de -0.732 m^2/s sortant de la nappe alluviale. Ils ont été adaptés à la hausse pour les mêmes raisons que précédemment.

J Les débits d'infiltration venant du canal Albert sont de 2.692 m^3/s, entrant dans la nappe alluviale. Ils ont été adaptés à la baisse par rapport aux valeurs prises initialement, car le modèle a montré que dans certaines zones, pour obtenir la piézométrie mesurée, il était nécessaire soit d'augmenter la perméabilité, soit de diminuer les flux en provenance du canal. Ayant déjà atteint des valeurs importantes de perméabilité (de 1.10^{-1} à 6.10^{-3} m^3/s) pour les graviers, il a été conclu que les flux en provenance de fuites du canal ALbert devaient être réduits dans certaines zones.

K L'infiltration uniforme de 300 mm/an correspond à un débit total de 0.285 m^3/s entrant dans le modèle.

L Les débits entrant dans les zones où le substratum de phtanites altérées met en contact direct la nappe artésienne des phtanites et la nappe alluviale, sont de 0.271 m^3/s au total. Ces zones de phtanites altérées sont situées à proximité du barrage de Lixhe.

En conclusion, le bilan est exprimé au Tableau 4.

Tableau 4 Le Bilan

	ENTRANT	SORTRANT	BILAN	
A	0.334	-0.094	0.240	Craie (inférieure)
B	0.012	-0.133	-0.121	Calcaires (inférieurs)
C	0.344	-0.003	0.341	Craie (latérale)
D	0.770	-0.187	0.583	Calcaires (latéraux)
E	0.565	-0.104	0.461	Craie (latérale à Lanaye)
F	46.862	-52.162	-5.300	Meuse
G	2.557	-1.109	1.448	Autres bordures
H	0.278	-0.446	-0.168	Venues d'eau - pompages
I	-	-0.732	-0.732	Drains Meuse
J	2.692	-	2.692	Canal Albert
K	0.285	-	0.285	Infiltration uniforme
L	0.271	-	0.271	Phtanites altérées
	54.97	-54.97	0	Bilan

D'autre part, on peut déterminer les flux sortant du modèle à hauteur de la frontière Belgo-Hollandaise en rive droite de la Meuse. Un flux total de -0.143 m^3/s sort du modèle par cette frontière.

5 CONCLUSIONS GENERALES

L'étude hydrogéologique a permis:

- la détermination des paramètres hydrodynamiques à introduire dans le modèle;
- la collecte de nombreuses mesures relatives à la géométrie des couches, aux sollicitations extérieures du système, aux conditions aux frontières et aux niveaux piézométriques de référence.

Sur base de la carte d'iso-résistivité des alluvions et d'une corrélation résistivité-perméabilité, une première approximation du champ de perméabilité dans la zone étudiée a pu être introduite dans le modèle. Les essais de pompages et les piézomètres réalisés ont permis de compléter le jeu de données disponibles et de prouver la valeur élevée des transmissivités dans les graviers de la plaine alluviale de la Meuse. La composition chimique des eaux pompées confirme que l'alimentation de la nappe alluviale par les versants est importante.

Le modèle a été discrétisé en se basant sur toutes les données géométriques disponibles, relatives à la nature du substratum, des versants et des différents terrains en présence dans la plaine alluviale. Il comporte quatre couches d'éléments pour un total de 2.356 éléments. Les paramètres ont été introduits en distinguant des matériaux, les éléments d'un même matériau étant affectés des mêmes paramètres.

Toutes les sollicitations et influences ont été prises en compte: infiltration uniforme, infiltration par les versants, infiltration en provenance du canal Albert, infiltration par les phtanites altérées, imperméabilité des murs de quai de la Meuse et débits des drains, pompages et venues d'eau constatées. Les cartes piézométriques calculées ont été comparées à la piézométrie mesurée de référence après chaque passage de la phase de calibration. Les données du problème ont été ajustées successivement de manière à minimiser la différence entre les mesures et les résultats calculés. Au passage 23, on a considéré que le modèle reproduisait les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable. On en déduit automatiquement que les flux obtenus dans la zone modélisée et aux frontières de celle-ci sont les plus probables. On constate que la nappe alluviale s'alimente d'environ 3 m^3/s par ses versants, dont 1.5 m^3/s par ceux en contact avec les craies et les calcaires et l'équivalent par l'ensemble de ses autres versants. L'alimentation majeure est en provenance des fuites du canal Albert et se chiffre à 2.7 m^3/s. L'alimentation de la Meuse par l'eau de la nappe alluviale est calculée à 5.3 m^3/s pour l'ensemble de la zone modélisée et pour les conditions de piézométrie de référence utilisée (Juillet 1989). Une alimentation plus importante est vraisemblablement à prévoir dans le cas de piézométries relatives à des mois moins secs. Sur base du modèle, la quantité d'eau fournie aux Pays-Bas par la Meuse et la plaine alluviale, à ajouter au débit de la Meuse mesuré en amont de la zone modélisée, est de l'ordre de 5.4 m^3/s pour les mois d'été. D'autres cas de figures peuvent être calculés sur base du modèle établi.

REFERENCES

BATHE, K.J. et KHOSHGOFTAAR, M.R.; 1979. Finite element free surface seepage analysis without mesh iteration. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., 3, 13-22.

BEAR, J. and VERRUIJT, A.; 1987. Modelling groundwater flow and pollution, 414 p.

BOLLY, P.Y. et DASSARGUES, A.; 1987. Modélisation mathématique des nappes aquifères, Actes du Congrès Scientifique sur les Eaux souterraines en Wallonie, Mons, 11 décembre 1987.

CHARLIER, R., RADU, J.P. et DASSARGUES, A.; 1988. Numerical Simulation of Transient Unconfined Seepage Problems, Proceedings of first International Conference on Computer Methods and Water Resources, vol. 1, Groundwater and Aquifer Modelling, Rabat 14-18 Mars 1988, Springer-Verlag.

DASSARGUES, A.; 1990. Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation, accepté dans le Bulletin de la Société Géologique de Belgique, à paraître.

DASSARGUES, A. et BOLLY, P.Y.; 1987. Modélisation par différences finies et par éléments finis de la nappe aquifère de Hesbaye, Actes du Congrès Scientifique sur les Eaux souterraines en Wallonie, Mons, 11 décembre 1987.

DASSARGUES, A., MONJOIE, A., LAMBERT, J.M. et PIERLOT, A.; 1989. Modèle mathématique de la nappe aquifère de Hesbaye, Tribune de l'Eau, vol. 41 n° 6, Editions CEBEDOC, Liège, Belgique.

DASSARGUES, A., RADU, P. et CHARLIER, R.; 1988. Finite elements modelling of a large water table aquifer in transient conditions, Advances in Water Resources, volume 11 n° 2, June 1988, Computational Mechanics Publications.

DASSARGUES, A.; 1989. Applications hydrogéologiques d'un modèle mathématique 2D par différences finies sur Personal Computer, Tribune de l'Eau, vol. 41, n° 6, Avril 1989 Editions CEBEDOC.

DE MARSILY, G.; 1982. Quantitative hydrogeology, Groundwater Hydrology for Engineers, 440 p.

LOX, A., ANTHONUS, P., et MONJOIE, A., Etude de la nappe alluviale de la Meuse au barrage de Lixhe à la frontière avec les Pays-Bas, rapport LGIH MTP 872, pour le Ministère des Travaux Publics Administration des Voies Hydrauliques, 1987, non publié.

LOX, A., DASSARGUES, A., et MONJOIE, A.; 1990. Modélisation mathématique des écoulements souterrains de la nappe alluviale de la Meuse entre Monsin et Lanaye, ainsi que des interactions entre le Canal Albert et la Meuse, rapport MTP 901, pour le Ministère des Travaux Publics LGIH Université de Liège.

MONJOIE, A.; 1984. Hydrogéologie, Note de cours U.Lg.

HYDROGEOLOGISCHE KARAKTERISTIEKEN VAN DE PEY- EN WAUBACH-FORMATIES IN BELGISCH NOORD-OOST LIMBURG

W. Loy, J. Hammenecker en P. Laga

SAMENVATTING

In het Belgisch deel van de Roerdal-slenk komen onder het Maasgrind 200 m dikke zand- en kleipakketten voor van continentale oorsprong. In deze hoofdzakelijke pliocene afzettingen kunnen drie watervoerende lagen worden onderscheiden: een subfreatische waterlaag, gevormd door het Maasgrind en het daaronder liggend zand, en twee, door Brunssumkleien afgesloten waterlagen, gevormd door het Zand van Pey en het Zand van Waubach. Uitgebreide pomptesten leveren de hydrologische karakteristieken van deze afgesloten waterlagen en hun onderlinge drukverhoudingen.

ABSTRACT

In the Belgian area of the Roerdal-graben, sand and clay formations of continental origin occur up to 200 m thick. In these mostly pliocene deposits, three aquifers can be distinguished: a shallow phreatic one and two other aquifers, formed by the sands of Pey and Waubach and confined by the Brunssum clay. Pumptests give the hydrogeological parameters of both confined aquifers and their pressure relation.

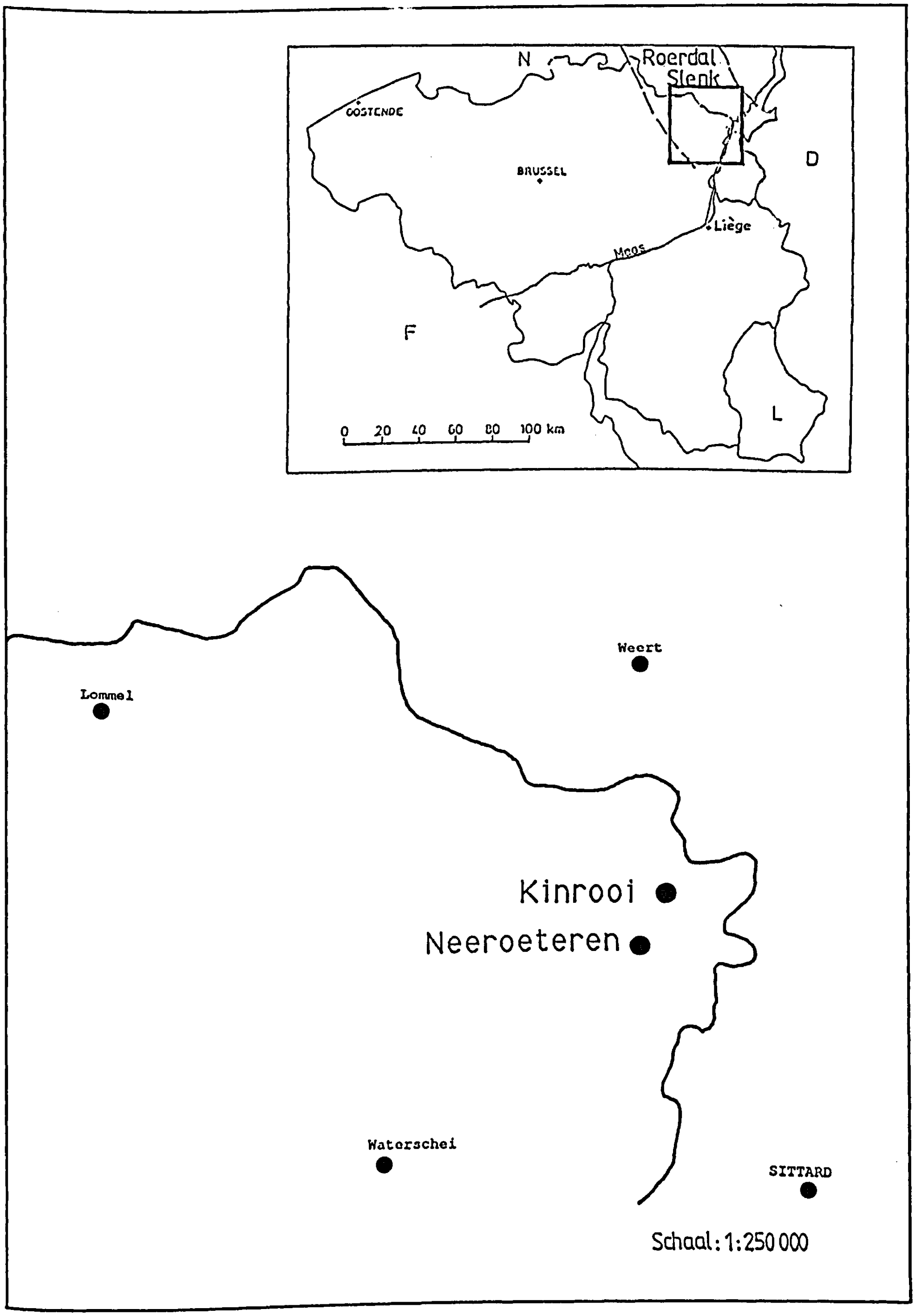
1 HYDROGEOLOGIE

In 1984 werd door de Geologische Dienst van België een seismische campagne uitgevoerd in het noord-oostelijk deel van Belgisch Limburg. Deze seismiek, waarvan de resultaten gepubliceerd zijn door R. Demyttenaere en P. Laga ("Breuken en isohypsenkaarten van het Belgisch gedeelte van de Roerdal slenk" - Professional Paper 1988/4 nr. 234), bracht een complexe structuur van de ondergrond aan het licht. Heel het noord-oosten van Belgisch-Limburg (Figuur 1) behoort tektonisch tot de Roerdal-slenk, en wordt dan ook gekenmerkt door een opeenvolging van steilhellende, NW-SE gerichte breuken (Figuur 2 en 3). Opvallend is de zeer dikke ontwikkeling ten noorden van de Feldbiss-breuk, van pliocene afzettingen van continentale oorsprong.

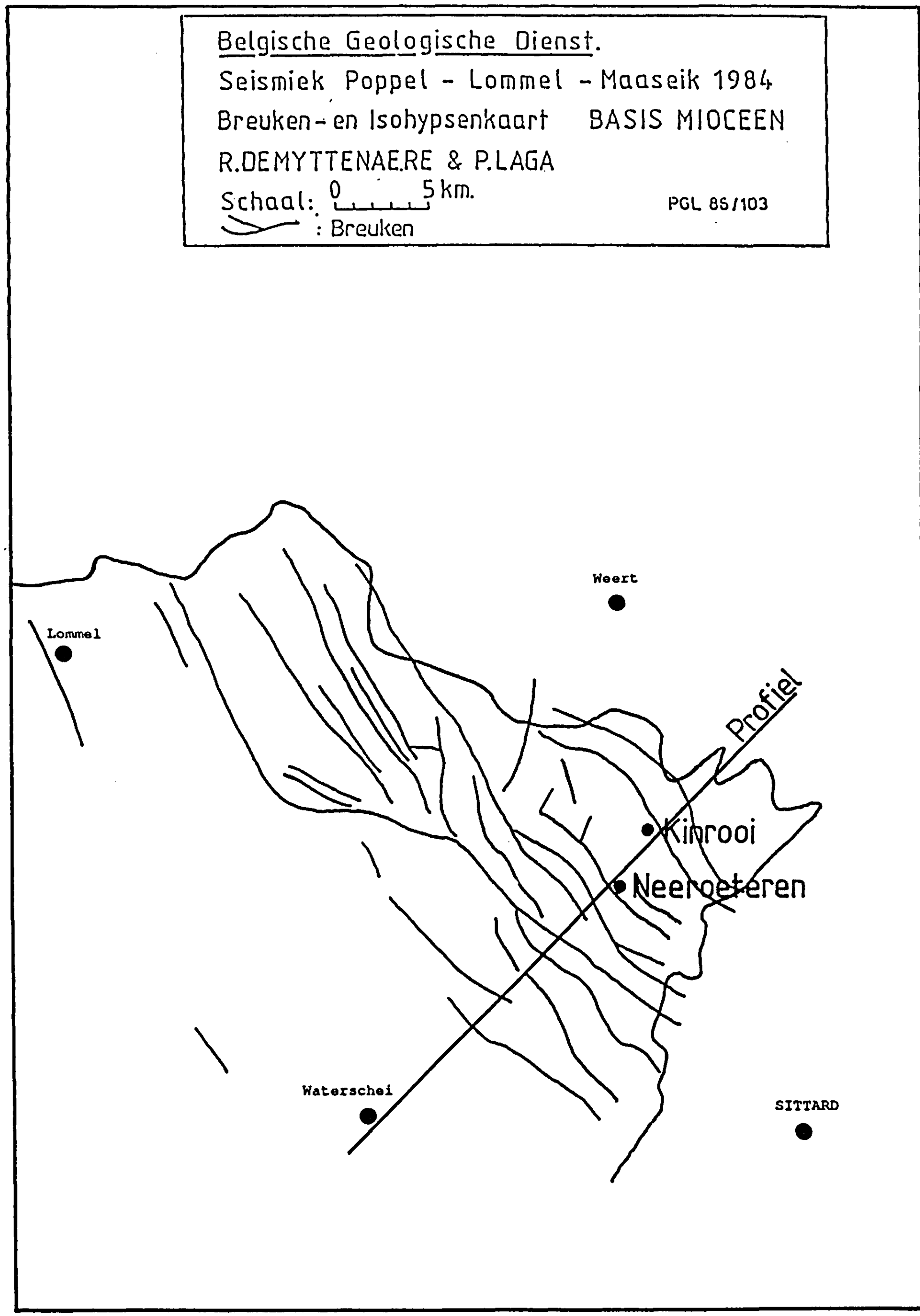
Met deze gegevens in het achterhoofd en gedwongen door de kwalitatieve degradatie van het ondiep, freatisch grondwater, is de V.M.W. overgegaan tot een hydrogeologische verkenning van deze afzettingen, meer bepaald in de streek tussen Neeroeteren en Kinrooi. De studie werd opgevat als een reeks verkenningsboringen, met bijbehorende boorgatmetingen en pompproeven.

Op het grondgebied van Neeroeteren zijn de verkenningsboringen VB1 en VB2 uitgevoerd met bijbehorende peilputten. Een analoge set boringen, VB3 en VB4, is te Kinrooi ingeplant, op zowat 3 kilometer ten noord-oosten van de eerste werf.
De putfilters zijn op verschillende dieptes ingebouwd. De aangeboorde lagen kunnen als volgt geschematiseerd worden (zie ook Figuur 5).

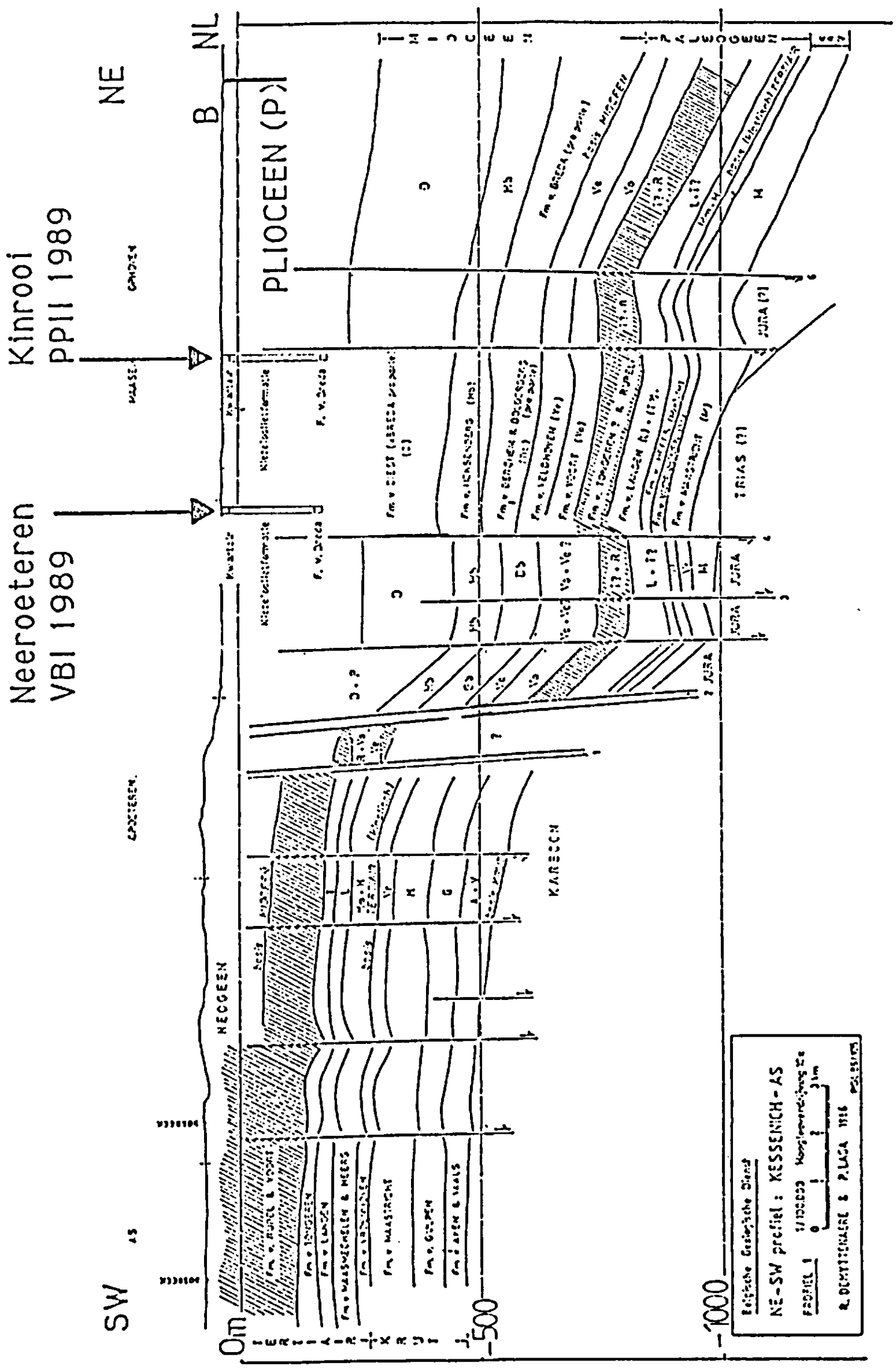
Zowel de boorplaats Neeroeteren als Kinrooi liggen in één en hetzelfde tektonisch blok (zie Figuur 3 en 4). Dit verklaart de geologische gelijkenis tussen beide boorprofielen: onder een kwartaire leem en het Maasgrind komen continentale afzettingen voor van hoofdzakelijk pliocene ouderdom die behoren tot de zogenaamde Kiezelzoölietformatie, het lateraal equivalent van de Formatie van Mol. Deze afzetting bestaat uit een afwisseling van zand- en kleilagen, waarin veenhorizonten voorkomen. Deze lagen rusten op de relatief ondoorlatende Formatie van Breda.



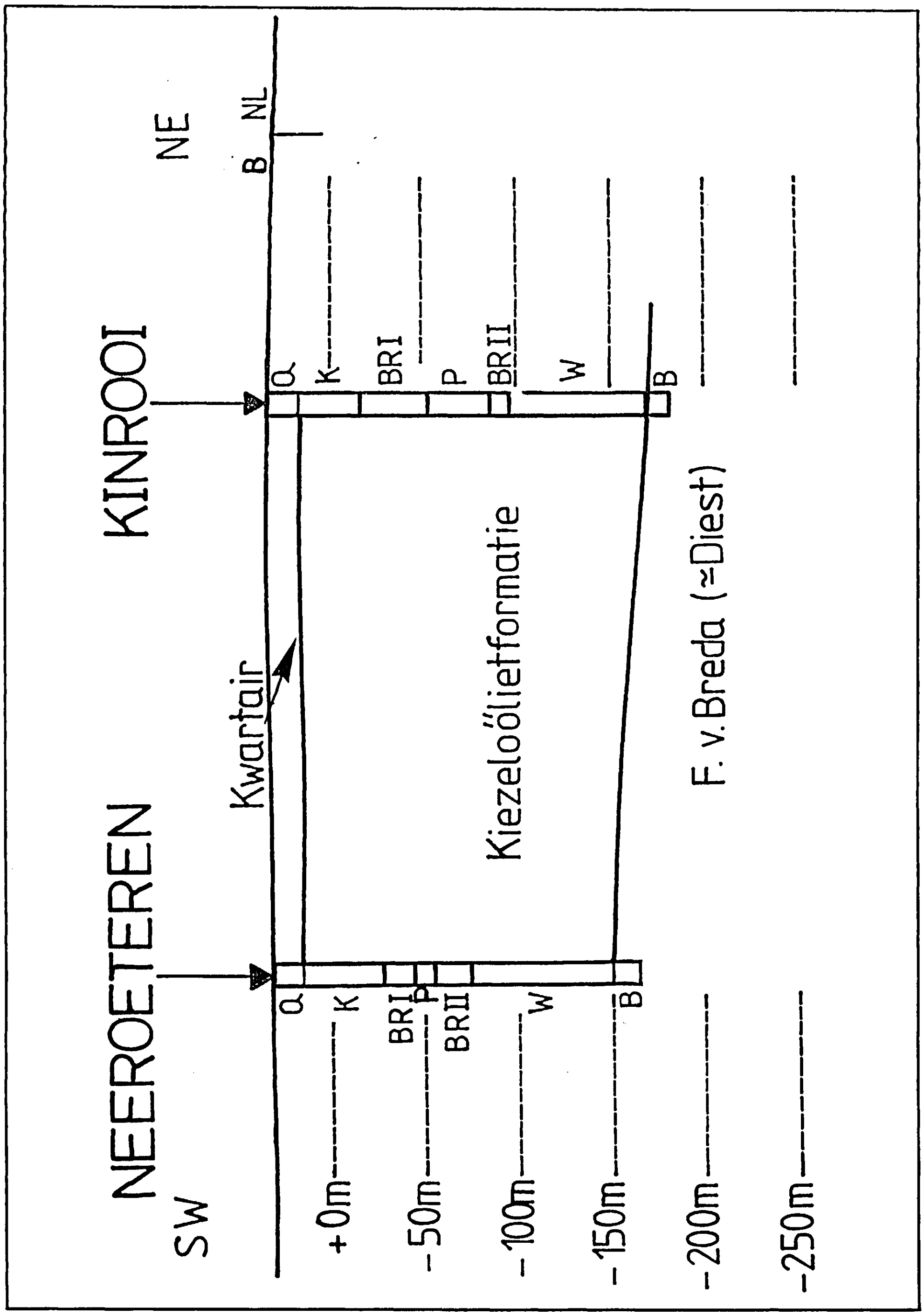
Figuur 1 Localisatie studiegebied



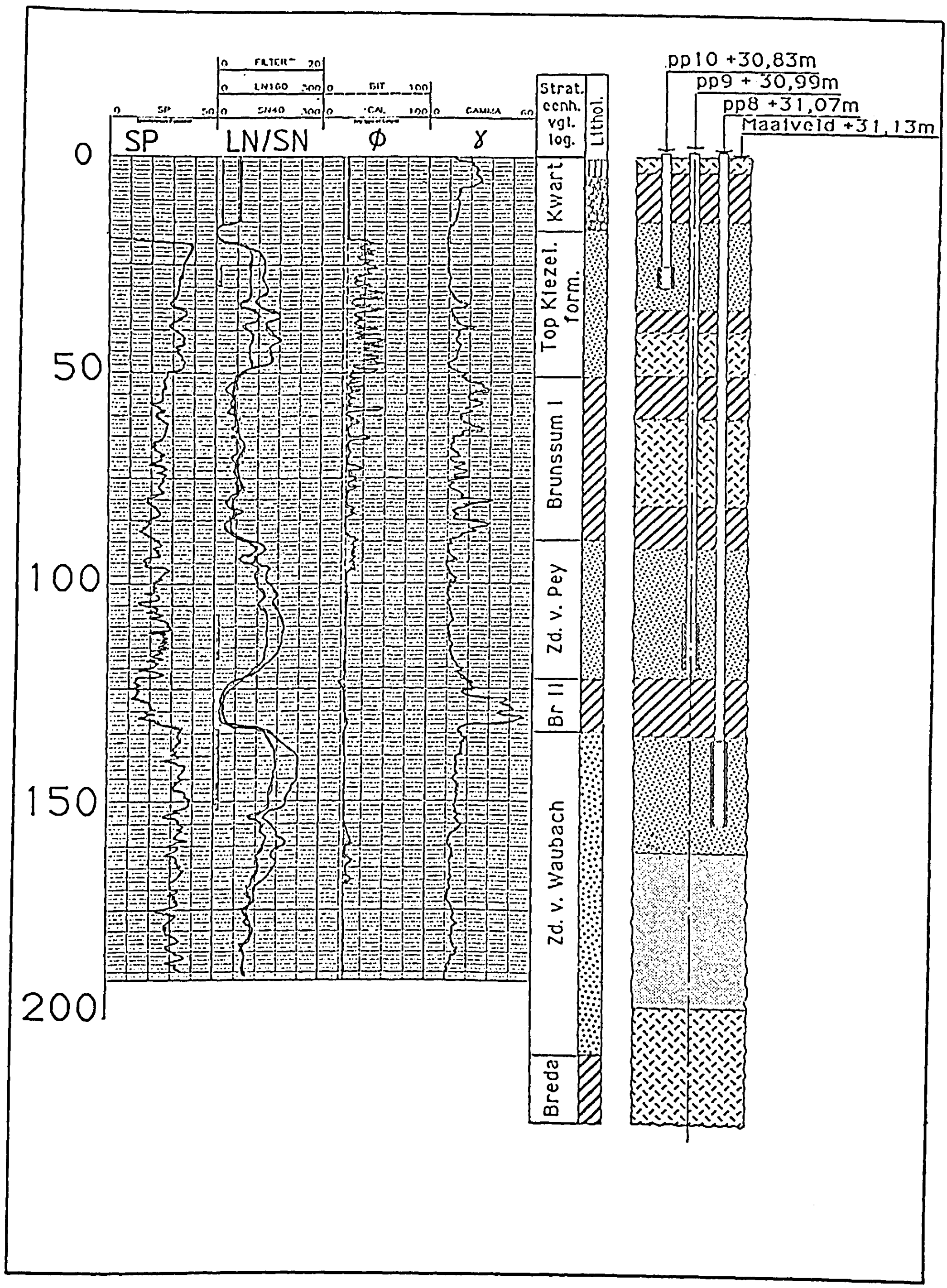
Figuur 2 Localisatie van profiel van figuur 3



Figuur 3 Neeroeteren-Kinrooi : geologische doorsnede



Figuur 4 Detail figuur 3



Figuur 5 Logging en peilfilters van de boring Kinrooi PP II

Tabel 1

Remmende laag Watervoerende laag	Dikte te Neeroeteren	Dikte te Kinrooi	Aard
- Leem	6 m	5 m	//////////////
- Maasgrind	10 m	10 m	1e aquifer:
- Zandige top van de Kiezeloölietformatie	45 m	33 m	(sub-) freatisch
- Brunssum I-klei	14 m	48 m	//////////////
- Zand van Pey	14 m	35 m	2e aquifer: afgesloten
- Brunssum II-klei	19 m	8 m	//////////////
- Zand van Waubach	77 m	73 m	3e aquifer: afgesloten
- Formatie van Breda			//////////////

Het Zand van Pey en de Brunssum I-klei zijn veel dikker ontwikkeld in Kinrooi. Bovendien is het Zand van Pey er grofzandig. Het Zand van Waubach is op beide boorplaatsen meer dan 70 m dik ontwikkeld en is grofkorrelig over het ganse pakket. Dit brengt uiteraard ook implicaties mee op hydrologisch vlak.

In totaal komen over een diepte van zowat 200 m drie belangrijke waterlagen voor:

- de sub-freatische waterlaag, die gevormd wordt door het Maasgrind en het daaronder liggende zand.
- de watervoerende lagen in het Zand van Pey en in het Zand van Waubach; beide lagen worden onder druk gehouden door de afdekkende Brunssum-kleien.

Zowel de waterlaag in het Zand van Pey als die in het Zand van Waubach zijn getest met uitgebreide pompproeven. Tabel 2, alsook Figuur 6 en 7, geven een overzicht van enkele relevante peilen van 7 december 1990.

De reeds opgesomde verschillen tussen de twee boorprofielen komen ook tot uiting in de proefpompingen, uitgevoerd op de Zanden van Pey en Waubach, zoals blijkt uit Tabel 3.

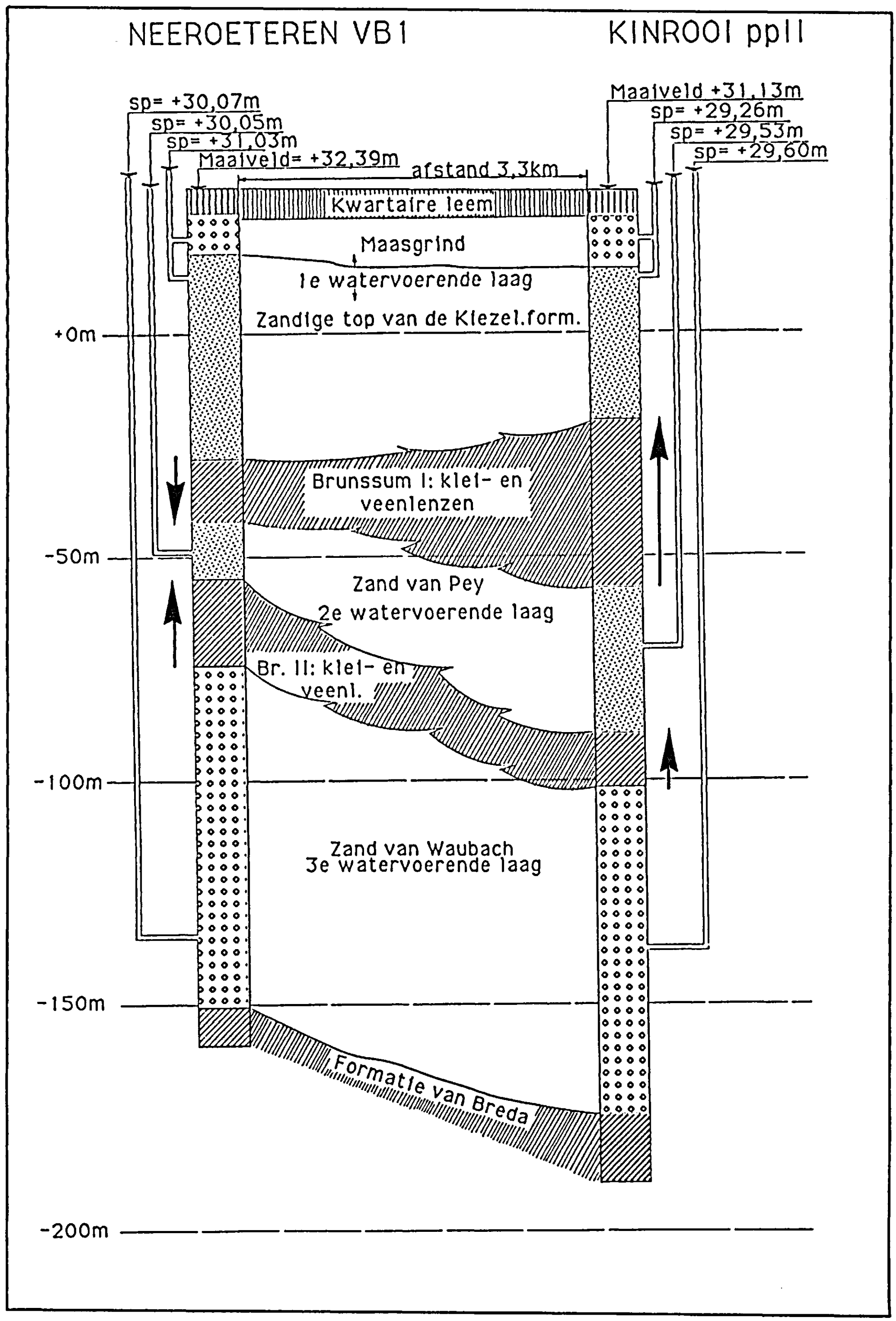
Tabel 2

Aquifer	Filter-diepte vanaf maaiveld	Maaiveld-hoogte	Statisch peil van 7-12-'90	
			absoluut	onder mv.
Neeroeteren				
1e (s. freat.) 2e (Pey) 3e (Waubach)	20 - 25 76 - 84 121 - 180	+ 32,39	+ 31,03 + 30,05 + 30,07	1,36 2,34 2,32
Kinrooi				
1e (s. freat.) 2e (Pey) 3e (Waubach)	25 - 30 99 - 121 135 - 194	+ 31,13	+ 29,26 + 29,53 + 29,60	1,87 1,60 1,53

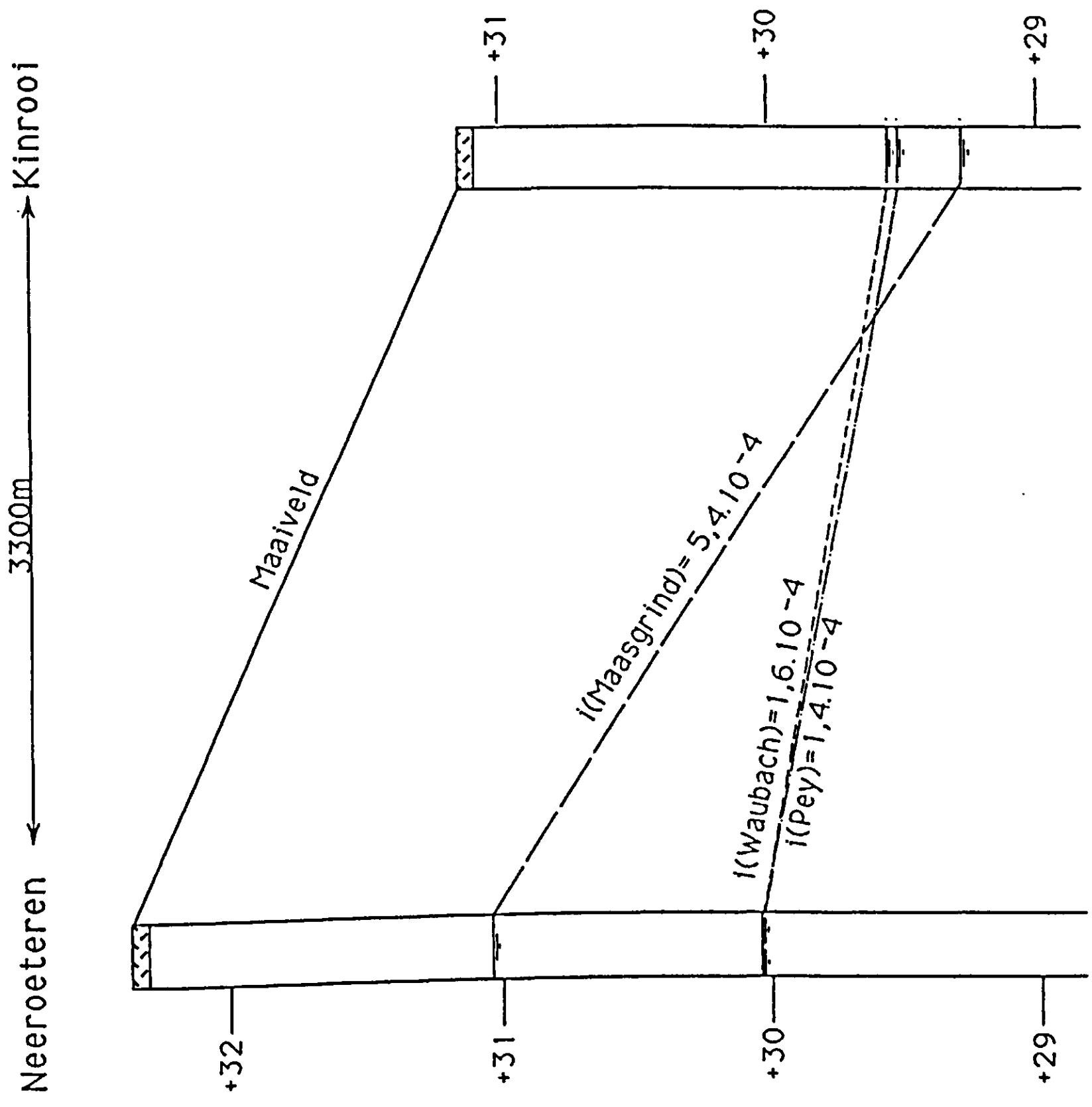
Tabel 3

Put	Aquifer	Q m^3/h	s_{max} m	Qs m^3/hm	T(gemidd.) m^2/dag	k m/dag	k m/s
Neeroeteren							
VB2	Pey	18	8,78	2	100	6,8	8.10^{-5}
VB1	Waubach	49 105 151	0,81 2,08 3,24	61 51 47	2180	28,3	3.10^{-4}
Kinrooi							
VB4	Pey	29 49 82	1,21 2,16 3,67	24 23 22	859	25,0	3.10^{-4}
VB3	Waubach	48 106 146	0,70 1,98 2,95	69 54 50	3456	47,0	6.10^{-4}

- Het Zand van Waubach heeft duidelijk een grotere opbrengst dan het Zand van Pey. De Qs-waarden van 47 m^3/hm en meer zijn typerend voor Waubach.



Figuur 6 Neeroeteren-Kinrooi: vergelijkend schema



Figuur 7 Piëzometrie Neeroeteren-Kinrooi (07-12-1990)

Het is bovendien belangrijk te weten dat de Brunssum-kleien in hun geheel weinig doorlatend zijn: tijdens de proefpompingen op Pey en Waubach kon geen onderlinge invloed, noch enige invloed op de bovenliggende (sub)freatische waterlaag worden vastgesteld.

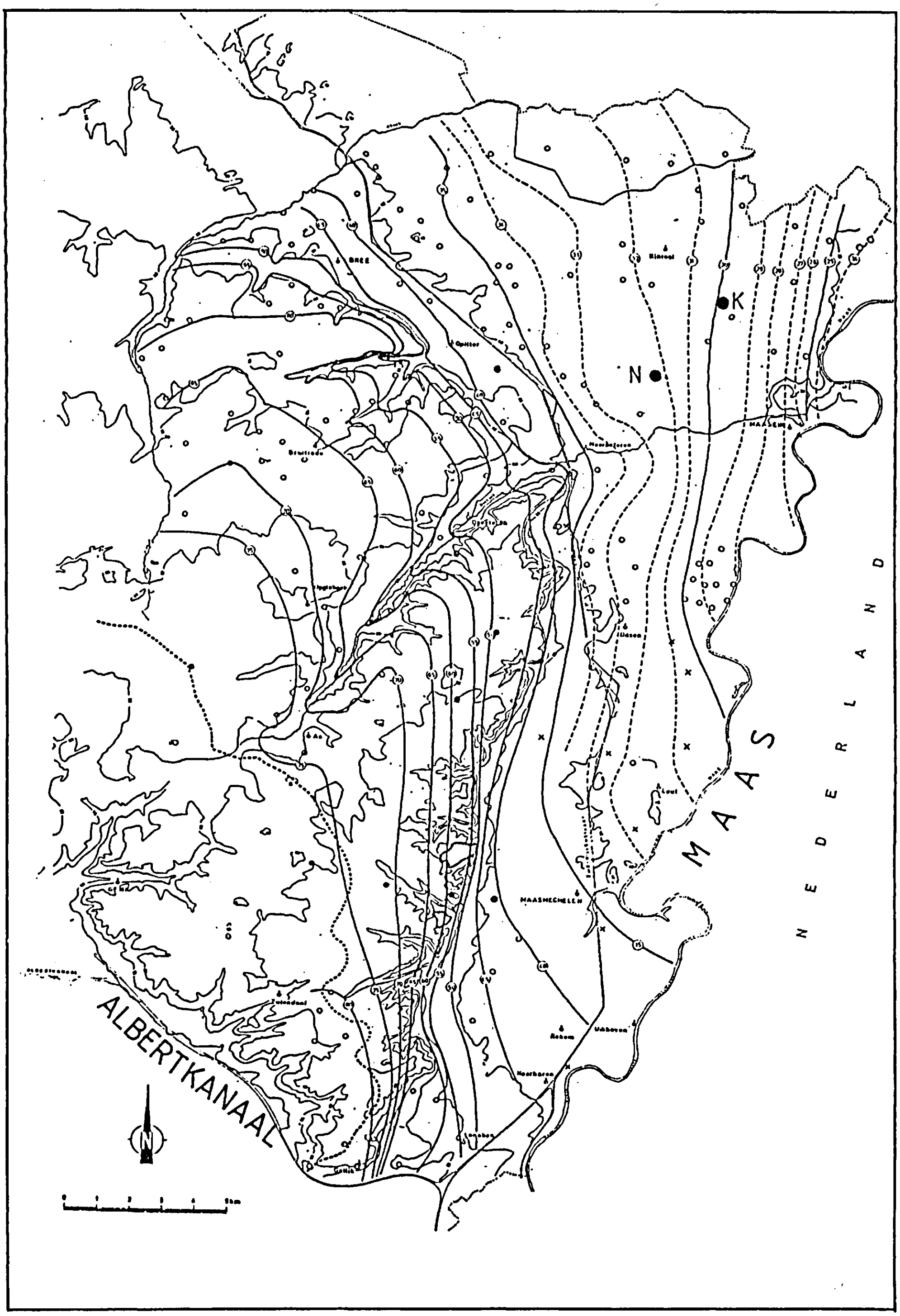
2 BESLUIT

Uit de dynamische en statische gegevens blijkt dat:

1 de waterende laag in het Zand van Waubach veruit de meest interessante is qua doorlatendheid, pakketdikte, afscherming en opbrengst. De hydrogeologische gesteldheid van deze laag blijft quasi constant tussen beide uitgeteste boorplaatsen.
De waterlagen van Pey en Waubach leveren een gelijkwaardige, goede waterkwaliteit. Het water bevat geen nitraten of nitrieten. Het ijzergehalte schommelt rond 2 mg/l, het mangaangehalte rond 0,07 mg/l. De totale hardheid ligt tussen 8 en 16 Franse graden.

2 Eveneens rekening houdend met de in 1989 uitgevoerde metingen van de statistische peilen kan het volgende besloten worden:
- Het statisch peil van de subfreatische waterlaag staat in Neeroeteren hoger dan in Kinrooi. De gradiënt tussen beide plaatsen bedraagt 5.10^{-4}. De watertafel is bovendien onderhevig aan weersinvloeden en schommelingen van het Maaswaterpeil. In Neeroeteren staat de subfreatische watertafel hoger dan die van Pey en Waubach; in Kinrooi daarentegen staat ze lager.
- In het Zand van Waubach heerst een druk die enkele centimeters tot enkele decimeters waterkolom hoger ligt dan de druk in de Pey-laag.
  Er is dus steeds een opwaartse druk aanwezig in de Brunssum II-klei. In de Brunssum I-klei werden zowel opwaartse (Kinrooi) als neerwaartse drukken gemeten (Neeroeteren).
- Zowel het piëzometrisch oppervlak van de aquifer van Pey als dat van Waubach dalen in de richting van Kinrooi, met een gradiënt van 2.10^{-4}.

- Het is duidelijk voor de (sub-)freatische laag dat er, naast de rechtstreekse voeding door neerslag, een stroming bestaat vanuit het Kempisch Plateau richting Maas waarbij de Feldbiss-breuk geen hydrologisch scherm vormt.



Figuur 8 Piëzometrische kaart (november 1978)

Het hydrologisch onderzoek in het grensgebied Luik-Maasbracht; onderzoekresultaten 1985-1990
Rapporten en Nota's No. 26 van de CHO-TNO

STUDIE VAN DE REGIONALE GRONDWATERSTROMING IN HET KEMPISCH PLATEAU EN DE MAASVALLEI

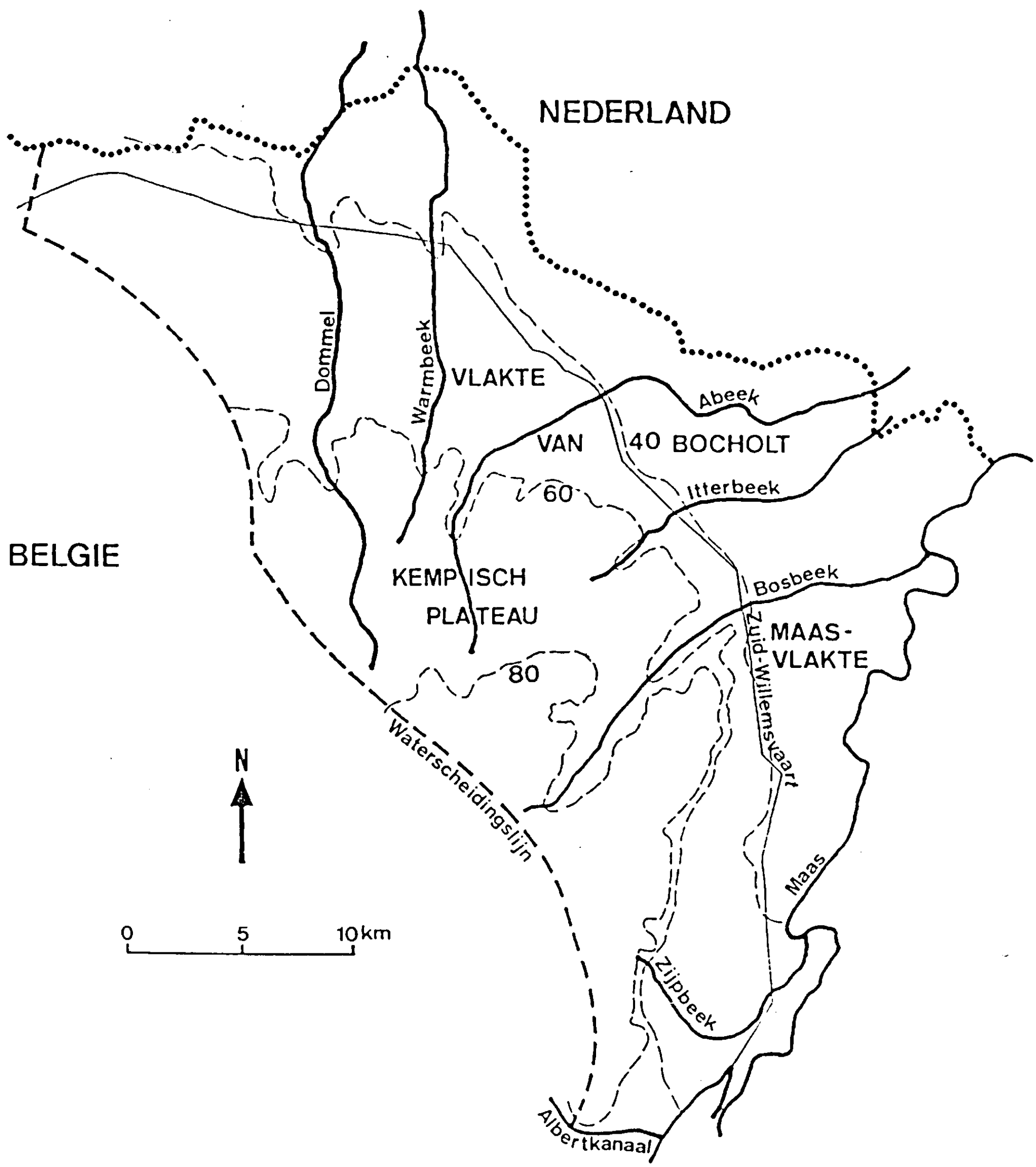
F. De Smedt en W. Van Vaerenbergh

ABSTRACT

The regional groundwater flow in the Campine plateau and The Meuse valley is simulated with a finite difference model. The solution procedure consists of dividing the study area in recharge and discharge zones of 1 km². In each zone all components of the water balance are calculated, as groundwater recharge, hydraulic potentials, discharge by the surface river water system, groundwater flow velocities etc. Also three dimensional flow lines are obtained which yield a complete insight into the groundwater flow system. The results show that the Campine plateau is the major recharge area from which the groundwater flows to the valleys, where the groundwater is drained by the Meuse river and its tributaries or by important groundwater abstraction installations. The average groundwater flow directed to the Meuse river is in the order of 61,000 m³/d which would yield an additional flow rate of 0.7 m³/s.

1 INLEIDING

Het studiegebied (Figuur 1) strekt zich uit over een oppervlakte van ongeveer 900 km² en wordt begrensd in het zuiden door het Albertkanaal, in het westen door de waterscheidingskam tussen het Maas- en het Scheldebekken, in het noorden door de grens tussen Nederland en België, en in het oosten door de Maas. De morfologische deelgebieden zijn het Kempisch plateau, de vlakte van Bocholt en de laagterrassen en alluviale vlakte van



Figuur 1 Situatieplan

de Maas. Het Kempisch plateau daalt van 100 m in het zuiden tot 60 m in het noorden en wordt gescheiden van de lager gelegen gebieden door een steilrand. De vlakte van Bocholt in het noorden ligt op een hoogte van 50 m to 30 m. In het deelgebied met de laagterrassen en alluviale vlakte van de Maas daalt het topografisch peil van 50 m in het zuiden tot 30 m in het noorden.

Een geologische en hydrogeologische beschrijving van het gebied wordt gegeven door De Smedt en Loy (1986). Nuttige informatie is ook te vinden in Van Rooijen (1986). Onder de 1 m tot 2 m zandige deklaag komen bijna overal Pleistocene Maasafzettingen voor met een dikte van 10 m tot 20 m, voornamelijk bestaande uit grind vermeng met grof zand en soms leemlenzen. Het tertiaire substraat bestaat uit verschillende lagen. Ten zuiden en ten westen van de Feldbissbreuk hellen deze naar het noorden zodat achtereenvolgens Pliocene, Miocene en Oligocene zanden voorkomen, die rusten op de Oligocene klei van Boom. De dikte van het tertiair zandpakket varieert van 0 m in het zuiden tot meer dan 300 m in het noorden. Onder de laagterrassen en de alluviale vlakte van de Maas is het verloop meer onregelmatig door het voorkomen van talrijke breuken. Ten noorden van de Feldbissbreuk wordt het substraat gevormd door zeer dikke Pliocene afzettingen, bestaande uit matig grove zanden en kleien.

De basis van de freatische waterlaag wordt gevormd door de klei van Boom in het zuidelijk gedeelte en door kleilagen in de Pliocene afzettingen in het noordelijk gedeelte van het studiegebied. De watervoerende formaties zijn de tertiaire zanden en het kwartaire grind, indien de watertafel voldoende hoog staat. De dikte van de grondwaterlaag varieert van 240 m tot 10 m ten westen en zuiden van de Feldbissbreuk en bedraagt ongeveer 40 m ten noorden ervan. Een schematische voorstelling wordt gegeven in Figuur 2. De hydraulische geleidbaarheid varieert in grootte orde van 10^{-4} m/s tot 10^{-5} m/s voor de tertiaire zanden afhankelijk van de plaats en soort; de grinden bezitten een hydraulische geleidbaarheid van 10^{-3} m/s tot 10^{-2} m/s.

Verschillende factoren verstoren de natuurlijke grondwaterstroming. De voornaamste grondwateronttrekkingen situeren zich in de Maasvlakte, voor de drinkwatervoorziening te Eisden en Maasmechelen met elk ongeveer 30.000 m^3d, en in het mijnverzakkingsgebied te Meeswijk waar 25.000 m^3/d opgepompt wordt. De invloed van de Zuid-Willemsvaart, die het gebied doorkruist, wordt verondersteld gering te zijn.

2 MODEL

Alleen de freatische grondwaterstroming wordt beschouwd, die in stationaire toestand beschreven kan worden met de volgende horizontale stromingsvergelijking.

$$\nabla(T\nabla h) + R - Q - W = 0 \qquad (1)$$

met h : hydraulische potentiaal of piëzometrisch peil [L], gelijk aan de stand van de grondwatertafel (gemeten vanaf zeeniveau).

T : transmissiviteit [L^2T^{-1}], zijnde de totale horizontale hydraulische geleidbaarheid over de ganse dikte van de grondwaterlaag; voor een homogene laag gelijk aan de hydraulische geleidbaarheid maal de dikte.

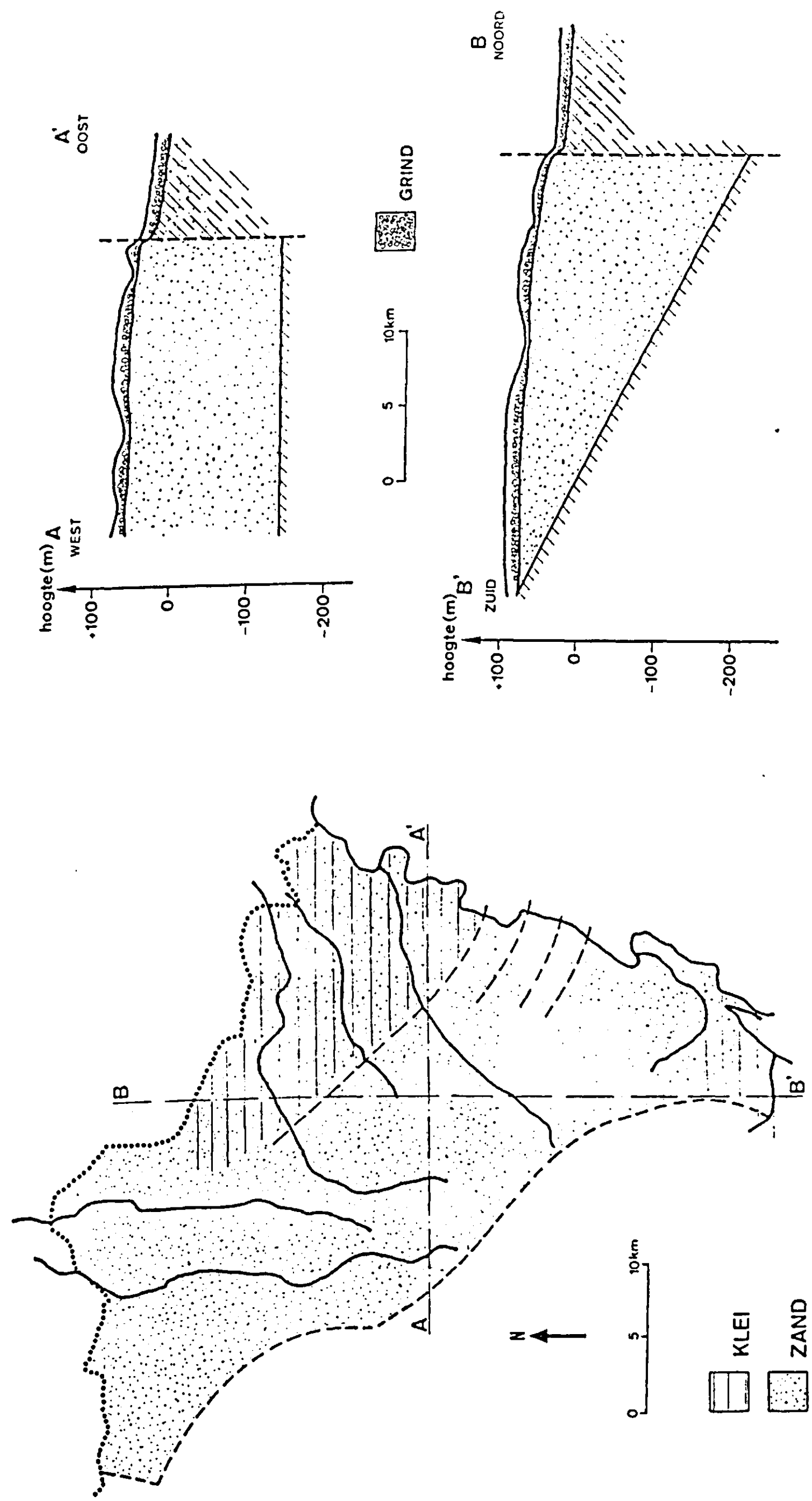
∇ : del-operator [L^{-1}]; ∇h is de gradiënt van de hydraulische potentiaal (dus de helling van de grondwatertafel) en $-T\nabla h$ geeft de totale horizontale grondwaterstroming.

R : natuurlijke grondwatervoeding [LT^{-1}], dit is de hoeveelheid water die vanaf het grondoppervlak door de bodem percoleert en het grondwater aanvult; in deze studie wordt verondersteld dat deze flux gelijk is aan de gemiddelde neerslag min evapotranspiratie, waarbij abstractie wordt gemaakt van de oppervlakkige directe afstroming daar het gebied weinig geürbaniseerd is.

Q : natuurlijke drainage of kwel [LT^{-1}]; deze flux geeft de hoeveelheid grondwater die door de rivieren afgevoerd wordt, hetgeen moeilijk te schatten is.

W : artificiële grondwateronttrekking [LT^{-1}], of opgepompt grondwater.

Vergelijking (1) is oplosbaar naar h, indien alle andere termen bekend zijn. De transmissiviteit, natuurlijke voeding en grondwateronttrekking kunnen geschat worden met de bestaande gegevens. De interactie tussen het grondwater en het oppervlaktewater beschreven door de kwel, is echter grotendeels ongekend. Principieel zou het mogelijk zijn om het volledig rivierenstelsel met gekende waterpeilen op te nemen in het model als randvoorwaarde voor de grondwaterstroming, doch praktisch is dit moeilijk uitvoerbaar daar een waterlopenstelsel een fractale dimensie bezit.



Figuur 2 Hydrogeologische schets

Daarom wordt gebruik gemaakt van een vereenvoudigd concept. De maximaal mogelijke stand van de grondwatertafel, h_oO, wordt afgeleid uit de topografische situatie. Er wordt verondersteld dat h_o overeenkomt met een peil 0,5 m onder het grondoppervlak. Er zijn nu 2 situaties mogelijk:

1) het grondwaterpeil is lager, $h < h_o$, waaruit volgt dat er geen afvoer door de rivieren kan plaatsvinden, dus $Q = O$, zodat de stromingsvergelijking wordt

$$\nabla(T\nabla h) = W - R \qquad (2)$$

Een dergelijk gebied wordt een voedingszone genoemd.

2) het grondwaterpeil is maximaal, dus $h = h_o$ waaruit volgt dat drainage naar de rivieren berekend kan worden als

$$Q = \nabla(T\nabla h_o) + R - W \qquad (3)$$

Zulk gebied vormt een kwelzone. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen een volledige kwelzone, $Q > R$, en een partiële kwelzone in het andere geval.

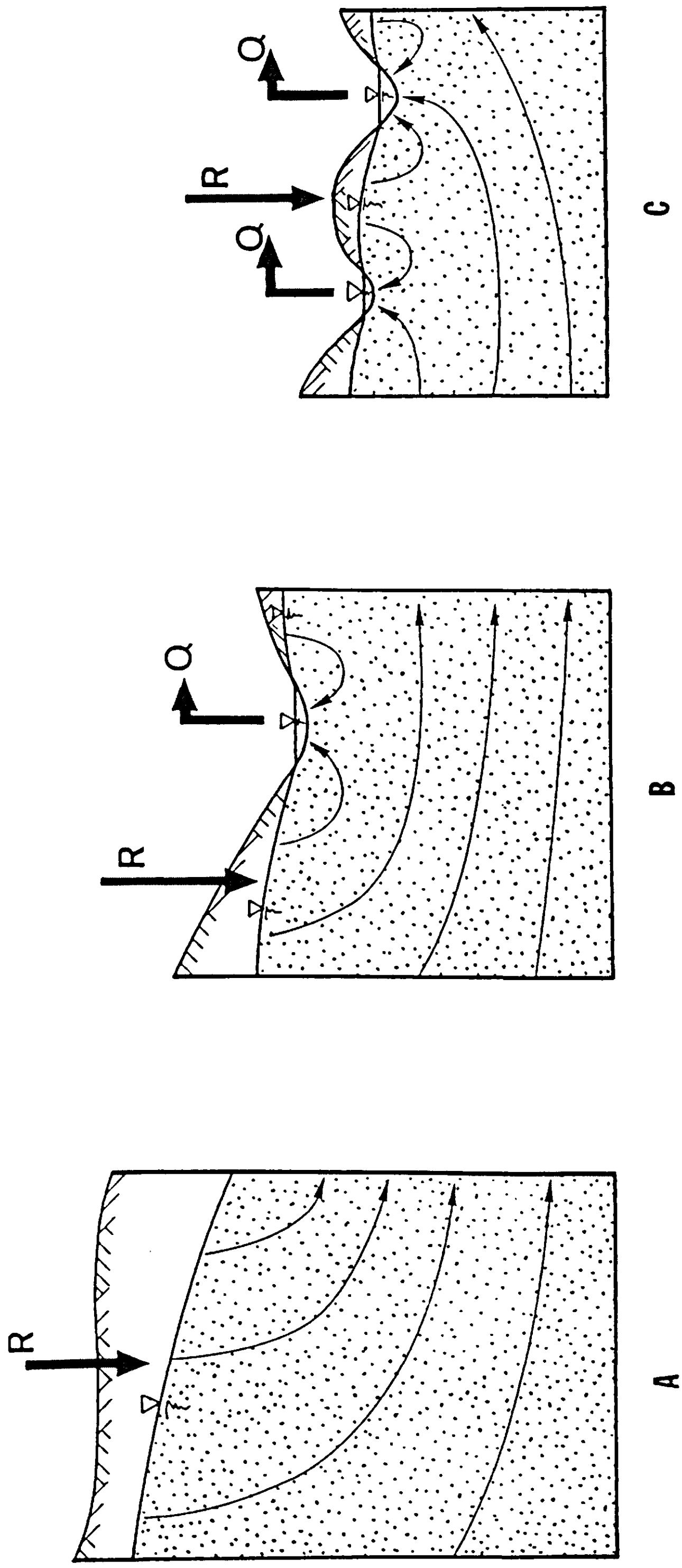
De verschillende zones worden schematisch voorgesteld in Figuur 3. Met behulp van vergelijkingen (2) en (3) kan de grondwaterstroming volledig berekend worden, waarbij eveneens de interactie met, en zelfs het ontstaan en de loop van, het rivierenstelsel kan worden gesimuleerd.

Ook drie-dimensionale stroomlijnen kunnen berekend worden. De horizontale stromingscomponenten, $\underline{v}$, wordt gegeven door

$$\underline{v} = -K\nabla h/n \qquad (4)$$

met K : hydraulische geleidbaarheid $[LT^{-1}]$, in de huidige studie wordt hiervoor de gemiddelde waarde over de ganse dikte van de grondwaterlaag genomen.

met n : porositeit $[L^3L^{-3}]$



Figuur 3 Verschillende zones: voedingszone (A), gedeeltelijke kwelzone (B) en volledige kwelzone (C)

De verticale stroomsnelheid, v_z, kan benaderd worden met

$$v_z = -(Q-R)z/nd \tag{5}$$

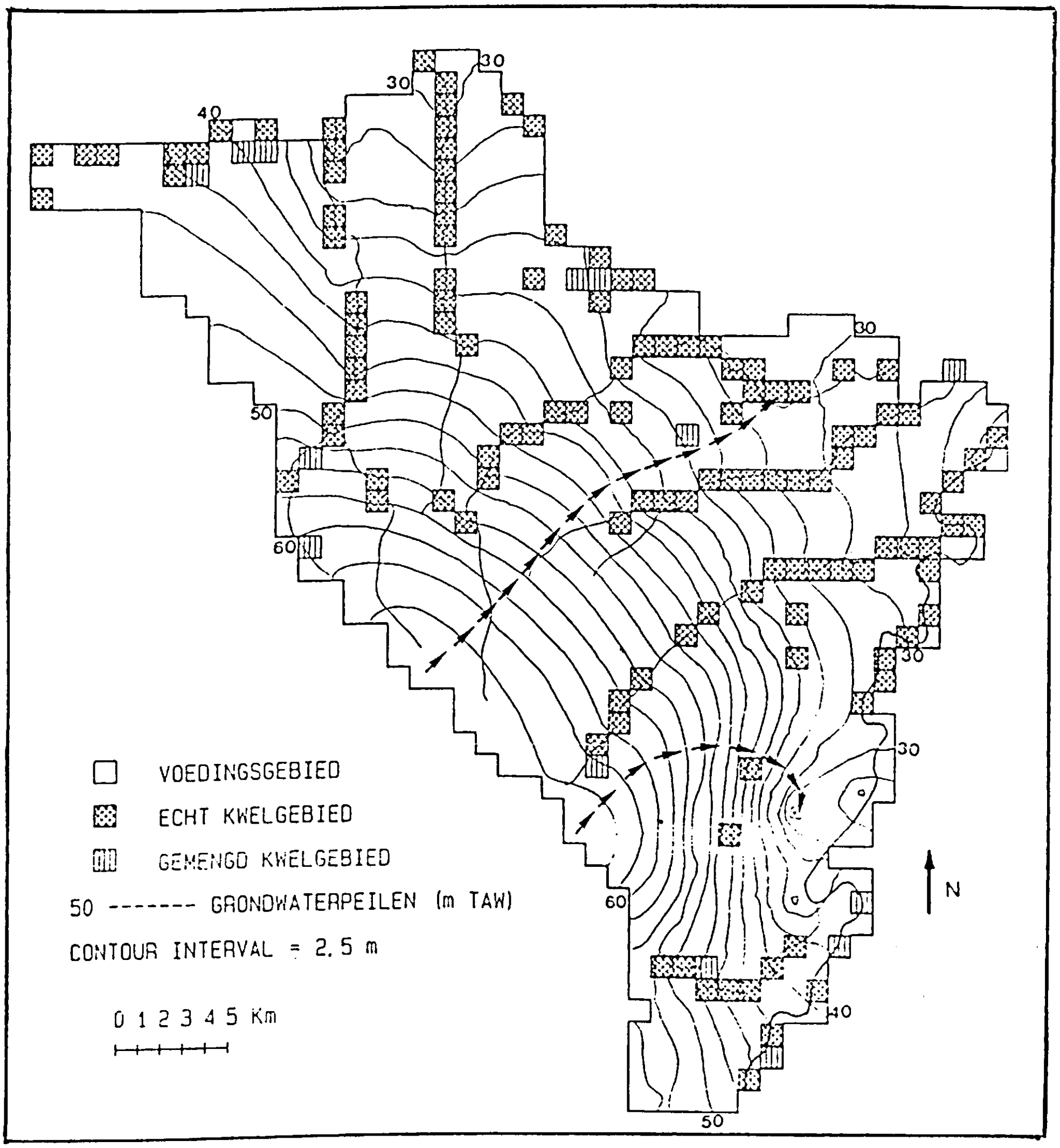
met z : hoogte gemeten vanaf de basis van de grondwaterlaag [L]

d : dikte van de grondwaterlaag [L]

3 RESULTATEN

De stromingsvergelijkingen werden opgelost met een eindige differentie benadering, waarbij het studiegebied opgedeeld werd in zones van 1 km x 1 km. In elke zone werden de verschillende grootheden constant verondersteld. De grondwatervoeding werd afgeleid uit de gemiddelde jaarlijkse neerslag en de afvoercoëfficiënten van de verschillende stroomgebieden. In het westelijk deel van het gebied bedraagt de voeding 0,64 mm/d en in het oostelijk deel 0,71 mm/d. De transmissiviteit en dikte van de grondwaterlaag werden per zone berekend uitgaande van de hydrogeologische gegevens. De porositeit werd uniform gelijk aan 0,3 genomen. De maximale grondwaterstanden werden visueel afgeleid van de topografische kaarten op schaal 1 : 25.000. De grondwateronttrekkingen werden bepaald per zone uitgaande van de gekende of vergunde oppompingsdebieten.

De details van de inputgegevens, berekeningen en resultaten zijn gegeven door Van Vaerenbergh (1989). De berekende grondwaterstanden, te zamen met de aanduiding van de kwelgebieden, worden voorgesteld in Figuur 4. Het overgrote gedeelte van het gebied, meer bepaald 84%, blijkt voedingszone te zijn. De overblijvende 16% zijn kwelgebieden, die voornamelijk overeenkomen met de bovenloop van de voornaamste waterlopen, zoals Dommel, Warmbeek, Abeek, Itterbeek, Bosbeek en Zijpbeek. Het is opmerkelijk dat vooral de bovenloop van de Dommel, Warmbeek, Abeek, en in iets mindere mate de Itterbeek, op het Kempische plateau niet volledig tot uiting komen. Dit zou te wijten kunnen zijn aan het feit dat deze beken alleen maar in de winterperiode of in tijden van wateroverlast gevoed worden door het grondwater, terwijl in meer gematigde periodes het water ondergronds kan afvloeien. In het geheel komt het Kempisch plateau naar voren als een gebied met bijna uitsluitend voedingszones. De kwelzones manifesteren zich voornamelijk in de vlakte van Bocholt en de alluviale vlakte van de Maas. Eveneens opmerkelijk is het feit dat de Maas



Figuur 4 Berekeningsresultaten

zelf geen kwelzone is in de streek van Eisden en Maasmechelen, hetgeen verklaard kan worden door de zeer grote artificiële grondwateronttrekkingen in dit gebied. Dus heel waarschijnlijk zal de Maas in dit gebied water verliezen naar de grondwaterlaag. Ook de bovenloop van de Zijpbeek blijkt in dit gebied geen kwelzone te zijn.

De grondwaterstanden dalen van 65 m aan de waterscheidingskam op het Kempisch plateau min of meer radiaal in alle richtingen tot minimum 25 m in het noord-westen waar de Maas zijn laagste peil bereikt. Op het Kempisch plateau dalen de grondwaterpeilen geleidelijk en gelijkmatig, soms lokaal beïnvloed door de drainage van de waterlopen. De diepte van de watertafel onder het maaiveld in het centrum van het Kempisch plateau is in de grootte orde van 10 m. Ter hoogte van de steilrand daalt het grondwaterpeil sneller, vooral in het zuid-oostelijk deel van het studiegebied, waar het Kempisch plateau overgaat in het terras van eisden-Lanklaar. Nabij de steilrand ligt het grondwater meer dan 20 m diep beneden het maaiveld aan de zijde van het plateau en slechts enkele meters diep aan de andere zijde. Hier komen ook enige geïsoleerde kwelzones voor die overeenkomen met waterrijke gebieden, zoals de zandgroeven op de Mechelse heide en de Limburg-Maas kolenmijnen. In de lager gelegen vlakte van Bocholt en de vlakte van de Maas is het verloop van de grondwatertafel opnieuw geleidelijker. Bijna overal staat de grondwatertafel hier zeer dicht bij het grondoppervlak. De enige belangrijke uitzondering hierop is de zone van Eisden en Maaseik, waar de grondwaterpeilen concentrisch dalen naar de grote grondwateronttrekkingen, te Maaseik, Eisden en Meeswijk. Lokaal staat de grondwatertafel er tot meer dan 10 m diep.

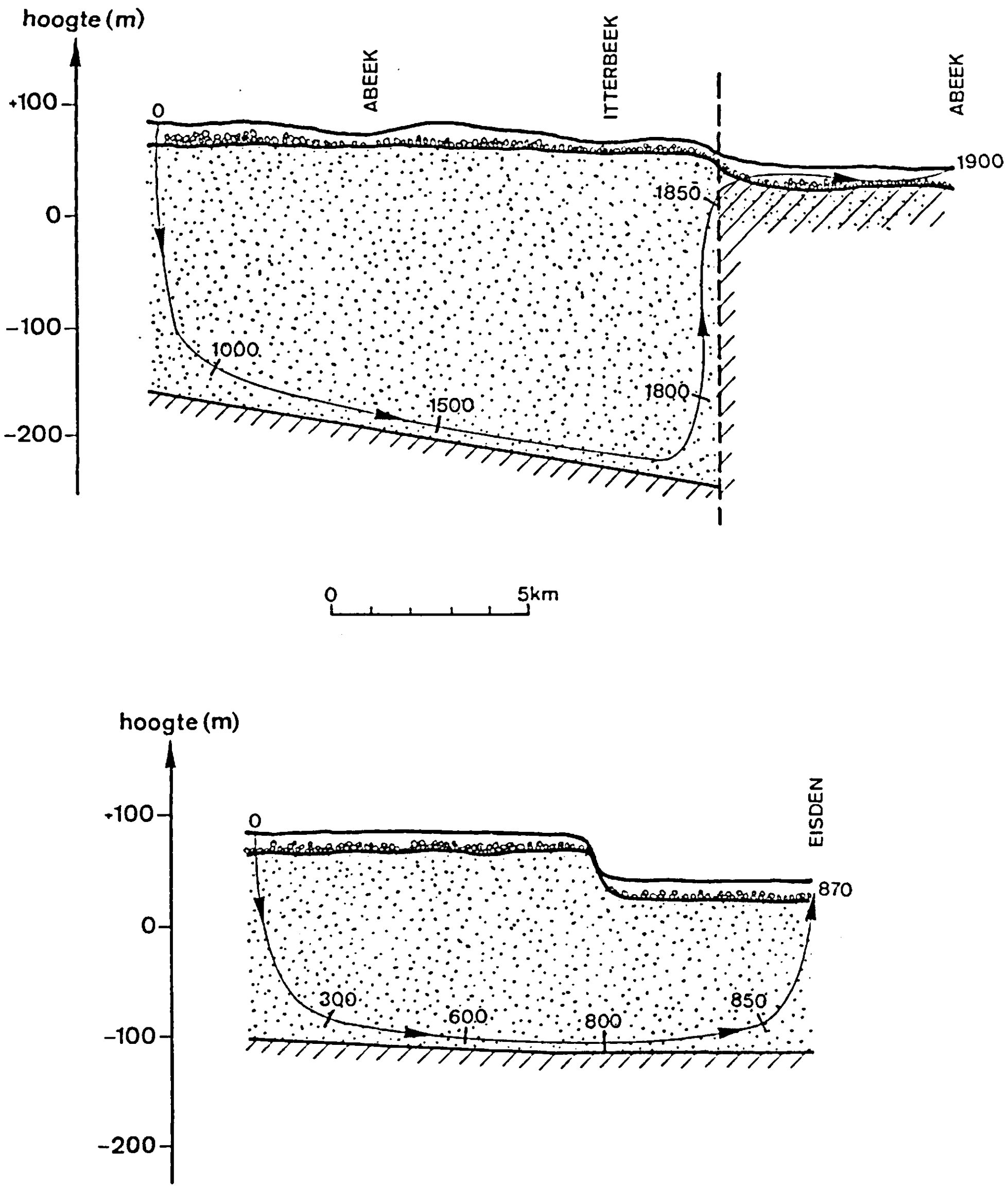
De grondwaterstroming is gericht volgens de dalende gradiënt van de grondwater-potentialen. Globaal is de grondwaterstroming gericht vanaf het Kempisch plateau naar de omliggende lager gelegen gebieden. Lokaal zijn er kleine afwijkingen nabij de kwelgebieden. Vanaf de voedingsgebieden aan de bovenloop van de Dommel en Warmbeek stroomt het grondwater naar het noorden; in het voedingsgebied tussen de bovenloop van de Abeek en Bosbeek stroomt het grondwater naar de vlakte van Bocholt en in het gebied ten zuiden van de Bosbeek stroomt het grondwater oostelijk naar de Maas, met echter een sterke afbuiging naar de grondwateronttrekkingszones. Met behulp van de bekomen resultaten kan er uitgerekend worden hoeveel grondwater er rechtstreeks naar de Maas stroomt, hetgeen begroot werd als 61.000 m^3/d wat een bijkomend debiet aan de Maas zou geven van gemiddeld 0,7 m^3/s. Er dient evenwel opgemerkt te worden dat dit cijfer

uiteraard het resultaat is van het gebruikte model met al zijn inherente benaderingen en veronderstellingen. In Figuur 4 worden 2 stroomlijnen gegeven, waarvan de voorstelling in het verticale vlak, met aanduiding van de verblijftijden, worden weergegeven in Figuur 5. De meest noordelijke stroomlijn start aan de scheidingslijn met het Scheldebekken. De stroomlijn is gericht naar het noord-oosten en komt na een afstand van ongeveer 20 km terecht in Abeek. De stroomsnelheid is onregelmatig. Uit het verticaal profiel blijkt dat de stroomlijn eerst vanaf de grondwatertafel steil naar beneden gaat met een verticale snelheid van ongeveer 0,2 m/j, zodat na 1000 jaar de ondoorlatende Boomse kleilaag bereikt wordt op een diepte van meer dan 200 m onder het grondoppervlak. Daarna loopt de stroomlijn parallel met de Boomse kleilaag met een horizontale snelheid in de grootte orde van 17 m/j. De stroomlijn gaat onder de bovenloop van de Abeek en de Itterbeek door. Na een afstand van ongeveer 12 km en een periode van 1800 jaar wordt de Feldbissbreuk bereikt. Hier stijgt de stroomlijn om daarna opnieuw horizontaal verder te stromen. Na bijna 2000 jaar komt de stroomlijn in de Abeek terecht.

De tweede stroomlijn is meer zuidelijk gelegen en start eveneens op het Kempisch plateau aan de waterscheidingslijn. Ze beschrijft een boog met een afstand van ongeveer 14 km en verlaat het grondwater te Eisden in de pompputten van de drinkwatervoorziening. De totale reistijd bedraagt iets minder dan 900 jaar. De stroomlijn daalt eerst geleidelijk en volgt daarna de Boomse kleilaag. Na in 800 jaar een afstand te hebben afgelegd van 9 km, dit is een snelheid van 11 m/j, verlaat de stroomlijn het Kempisch plateau en komt in de Maasvallei terecht. In de aldaar aanwezige grondlagen wordt in 70 jaar de resterende afstand van 5 km afgelegd tot in Eisden.
De stroomsnelheid in het laatste traject wordt daarbij groter en groter door het effect van de pompputten. De maximale snelheid is in de grootte orde van 300 m/j.

4 BESLUIT

De grondwaterstroming in het Kempisch plateau en de Maasvallei werd berekend met een numeriek model. Het model is gebaseerd op een eindige differentie oplossing van de horizontale stromingsvergelijking, waarbij het gebied opgesplitst wordt in voedingszones, waar er geen rivieren zijn, en kwelzones waar het grondwater gedraineerd wordt door het oppervlakte waterlopenstelsel. Het Kempisch plateau blijkt grotendeels uit voedingszones te



Figuur 5 Berekende stroomlijnen

bestaan. In de lager gelegen gebieden zijn er kwelzones overeenkomend met alle belangrijke beekvalleien. Het grondwater stroomt dan ook vanaf het Kempisch plateau naar de lager gelegen gebieden en voedt daar de beken en de Maas. Een belangrijke uitzondering hierop is de streek van Eisden-Maasmechelen, waar al het grondwater voornamelijk opgevangen wordt door de pompputten van de drinkwatervoorziening en de mijnverzakkingsgebieden. De hoeveelheid grondwater rechtstreeks gedraineerd door de Maas bedraagt 61.000 m^3/d. De verblijftijden van het grondwater zijn maximaal in de grootte orde van 2000 jaar met stromingssnelheden in de grootte orde van 0,2 m/j verticaal en 20 m/j horizontaal, behalve nabij de pompputten waar regionaal gemiddelde stroomsnelheden van 300 m/j kunnen voorkomen.

LITERATUUR

DE SMEDT, P. en LOY, W.; 1986. Hydrogeologie van de Limburgse Maasvallei. Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik-Maasbracht, Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, Rapporten en Nota's no. 15 : 9-20.

ROOIJEN, P. VAN; 1986. Het hydrogeologisch systeem van het stroomgebied van de Maas tussen Visé en Maasbracht. Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik-Maasbracht, Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, Rapporten en Nota's no. 15 : 37-50.

VAN VAERENBERGH, W.; 1985. Studie van de regionale grondwaterstroming in het Kempisch plateau en de Limburgse Maasvallei. Interuniversity Postgraduate Programme in Hydrology, Proefschrift : 110 blz. + bijlagen.

DE VOEDING VAN DE MAAS VANUIT DE OOSTELIJKE DALWAND, IN HET TRAJECT TUSSEN VISÉ EN MAASBRACHT

D.J.G. Nota en B. van de Weerd

ABSTRACT

A hydrogeological study was undertaken to find out to what extent the eastern bank of the river Meuse receives groundwater directly from the adjacent aquifers along its Dutch flank; the study was restricted to the stretch roughly between Visé and Maasbracht.
The most important aquifers that may directly or indirectly sustain the river discharge are, from south to north respectivily:

a. the subhorizontal Upper-Cretaceous chalk deposits of the strongly dissected Margraten Plateau with, in the western part, a discontinuous cover of waterbearing Pleistocene sands and gravels of the Middle and Lower Terrace.
b. the Tertiary sandy deposits from the undulating Schimmert Plateau; the sands are mainly from the Miocene Heksenberg Formation; sands and gravels from the Middle and Lower Terrace locally form part of the aquifer system.
c. the Pleistocene deposits from the rivers Rhine and Meuse, situated at a distinctly lower level; an area with reduced relief, located north of the Feldbiss fault and forming part of the Central Graben.

The investigation has shown that the major part of the water flowing into the Meuse valley between Visé and Maasbracht is surface water. The groundwater that directly flows out into the eastern valley side amounts to only 10-15 % of the total inflow. The small amount of direct groundwater supply is caused by deeply incised tributary valleys, such as the Geul valley, that effectively drain the various aquifers before groundwater can reach the major valley of the Meuse. Base flow to sustain the discharge of the river Meuse is most

important in the area between the Feldbiss fault (Sittard) and Maasbracht, in the area where the relief is less pronounced and consequently groundwater discharge into the various tributary valleys is relatively low.

1 INLEIDING

Het studiegebied ligt tussen Visé en Maasbracht in een strook van ongeveer 15 km aan de oostzijde van de Maas. Het oppervlak van het studiegebied helt in noordwestelijke richting van circa 350 m +NAP bij Henri-Chapelle (B) naar 25 m +NAP in het meest noordwestelijke gedeelte van het studiegebied. Zuid-Limburg met het aangrenzende Belgische Land van Herve vormt het voorland van een oud Hercynisch gebergtemassief. Door de Alpiene opheffing zijn de Mesozoïsche en Tertiaire afzettingen die oorspronkelijk ook het eigenlijke massief bedekten verdwenen, maar in het voorland, dat naar het noorden toe steeds minder is opgeheven, zijn deze gedeeltelijk gespaard gebleven voor erosie. Wel vertonen genoemde formaties een helling in noordwestelijke richting. De opheffing is oorzaak van het ontstaan van een plateau-en dallandschap door een zich insnijdend drainagepatroon (Figure 1).

In het studiegebied zijn een aantal landschappelijke eenheden te onderscheiden, die geogenetisch en hydrogeologisch duidelijk verschillen. De eenheden of deelgebieden zijn te beschouwen als reservoirs van grond- en oppervlaktewater, die ieder hun bijdrage leveren aan de voeding van de Maas via de oostelijke rivieroever.

2 HYDROGEOLOGISCHE KARAKTERISTIEK

Het vanggebied van de Berwine is het meest zuidelijke deelgebied. Het draineert het westelijke deel van het plateau van Herve. Noordelijk daarvan ligt het Plateau van Margraten, een belangrijk grondwater reservoir dat vooral via de Voer, Gulp en de Geul afwatert op de Maas. Ter hoogte van ongeveer Schin op Geul scheidt de Geul het Plateau van Margraten van het noordelijker gelegen Plateau van Schimmert, dat vooral door de Geul en de Geleenbeek wordt gedraineerd. Verder kunnen als reservoirs nog deelgebieden

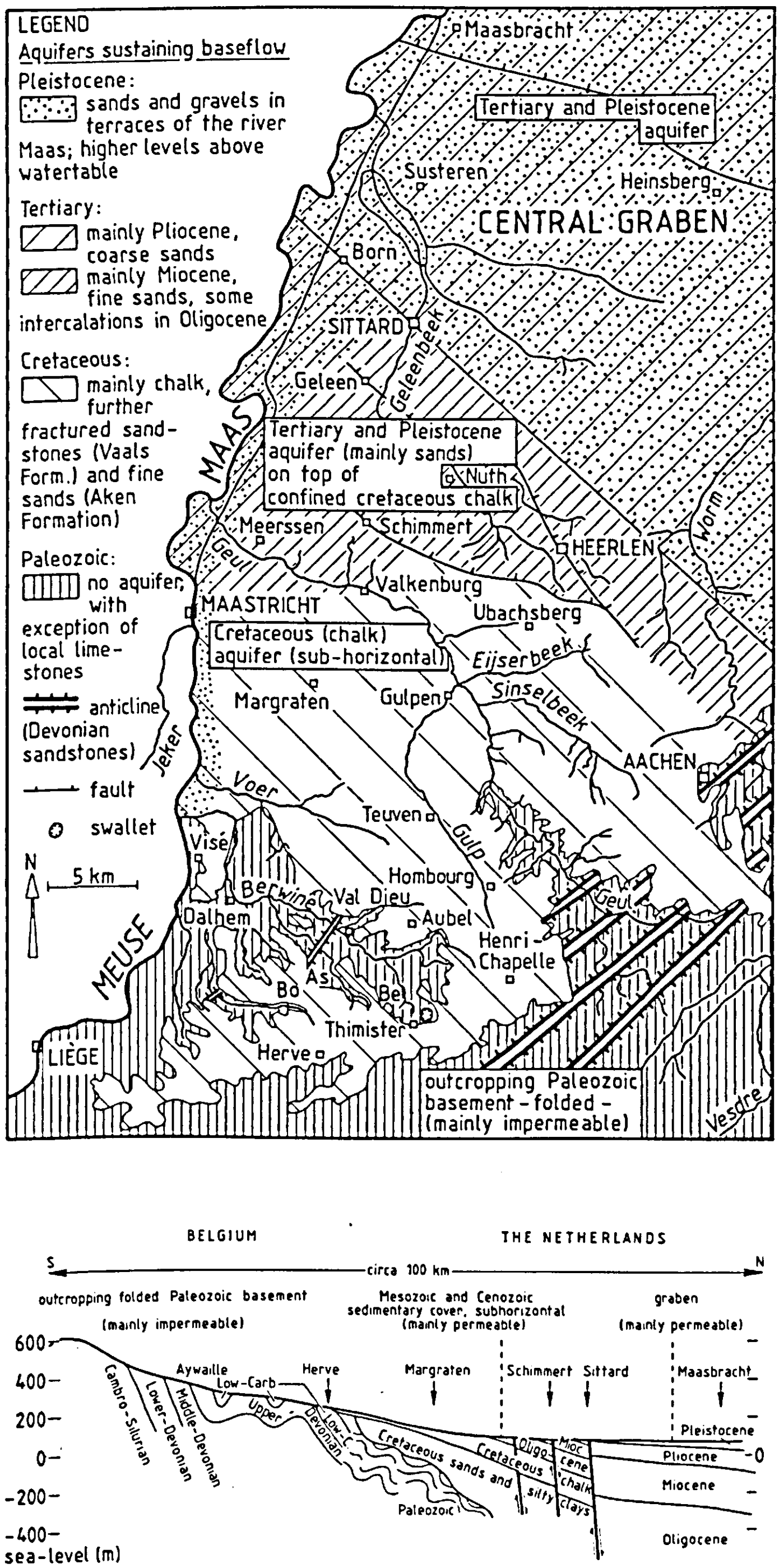


Figure 1 Map and longitudinal profile to show the hydrogeological framework of the study area

ten zuiden en ten noorden van de Feldbiss worden onderscheiden. Kort samengevat wordt de Maas vanuit oostelijke richting gevoed door een aantal aangrenzende, min of meer versneden plateauresten, respectievelijk resten van terrasniveau's.

De belangrijkste hydrogeologische karakteristieken van de bovengenoemde deelgebieden zullen hieronder in het kort worden toegelicht.

- Het westelijk gedeelte van het Plateau van Herve wordt gedraineerd door het diep ingesneden dalsysteem van de Berwine. De Laat-Tertiaire opheffing heeft tot gevolg gehad dat de oorspronkelijke bedekking met Mesozoïsche en Cenozoïsche formaties grotendeels is weggeërodeerd. Meer dan 50% van het oppervlak van het vanggebied bestaat uit Paleozoïsche gesteenten met een dunne regolietbedekking, overwegend bestaande uit slecht doorlatende schalies en zandstenen. Alleen aan de randen van het vanggebied komen nog plateauresten met gesteenten voor van voldoende bergingscapaciteit (Formatie van Gulpen en in het noordwesten van het stroomgebied Maasafzettingen). In het algemeen is de bergingscapaciteit van het systeem dus gering. Het overgrote deel van de neerslag wordt snel via het sterk vertakte drainagestelsel van de Berwine afgevoerd, terwijl gedurende droge perioden de afvoer snel terugloopt.

- Het Plateau van Margraten heeft als hydrologische basis de naar het noordwesten wegduikende, geplooide, Paleozoische ondergrond. De aquifer bestaat uit de discordant daarop liggende Mesozoische kalkgesteenten van de Formaties van Gulpen en van Maastricht. De dikte van de kalksteencomplexen varieert van circa 25 m in het zuiden tot ongeveer 200 m bij de Geul. De kalkgesteenten zijn zwak verkit en als gevolg daarvan anisotroop; voor de permeabiliteit worden k-waarden geschat tussen 0.5 en 10 m/etmaal. De uitgestrektheid van het plateau (ca. 160 km^2), de dikte van de aquifer en de gunstige porositeit (30-40%) betekenen dat het plateau regionaal een belangrijk grondwaterreservoir is. Midden op het plateau bevindt de grondwaterspiegel zich op een diepte tussen 30 en 60 m beneden maaiveld. Als gevolg van de diepe grondwaterstand zijn de dalen op het plateau droog. Langs de randen van het plateau is de dikte van de onverzadigde zone geringer. Aan de westzijde wordt de phreatische aquifer gedraineerd door Maasafzettingen van het Laagterras. Het radiale isohypsenpatroon van het plateau vertoont duidelijke insnoeringen bij de dalen van Geul en Gulp en onderstreept aldus de drainerende werking van deze diep ingesneden dalen. Het karakter van afvoercurven

van Geul (locatie Meerssen) en Gulp (locatie Gulpen) duidt op hoge basisafvoeren (percentages base flow tussen 60 en 80%). Van de totale hoeveelheid nuttige neerslag (ca. 50 milj. m^3) wordt ongeveer 50% door deze rivieren (met inbegrip van de Voer) gedraineerd. Ongeveer 20% stroomt in westelijke richting af naar de Maas en ca. 30% wordt afgevangen door een aantal pompstations die de westelijk en noordwestelijk gerichte grondwaterstroming onderscheppen.

- Het plateau van Schimmert (oppervlakte circa 104 km^2) wordt gescheiden van het Plateau van Margraten door de Geul. Doordat dit noordelijker gelegen plateau minder sterk is opgeheven zijn hier de jongere, Tertiaire afzettingen gedeeltelijk gespaard voor erosie. Deze vormen, vaak samen met de Pleistocene Maasafzettingen, een hydrostratigrafische eenheid boven de, ook hier aanwezige kalksteenaquifer. Deze laatste is door de ingesloten, slecht doorlatende lagen van het bedekkend pakket grotendeels "confined". Het bovenste watervoerend pakket bestaat uit een serie overwegend fijne zanden en kleien en kan beschouwd worden als een "multi-layered" aquifer. Door de aanwezigheid van de fijnkorrelige Tertiaire afzettingen die over een groot gedeelte van het plateau voorkomen, wordt een belangrijk deel van de nuttige neerslag via beeksystemen als oppervlaktewater afgevoerd. Het debiet van de uittredende bronnen bedraagt circa 12 miljoen m^3/jaar (dit is circa 70% van de nuttige neerslag). Een netwerk van beken voert het water af naar de Geul, de Maas en de noordelijk gelegen Geleenbeek. De resterende 30% stroomt ondergronds af op de Maas. Door de geringere laagdikte van het bovenste watervoerend pakket is de reservoirfunctie van het plateau minder uitgesproken dan die van het Plateau van Margraten; de grondwaterspiegel ligt in het algemeen op geringere diepte (0 - 20 m). De kalksteenaquifer wordt gevoed op het Massief van Ubachsberg, waar de Tertiaire bedekking ontbreekt. Een groot deel van de nuttige neerslag wordt al snel afgevangen door pompstation Roodborn en andere pompstations die o.a. de gemeente Heerlen van water voorzien. Van het water dat in westelijke richting afstroomt wordt nog water onttrokken door de pompstations Waterval en Geulle. De rest van het water uit de kalksteenaquifer stroomt op grotere diepte onder de Maas door in westelijke richting.

- Het gebied van Heksenberg, het deelgebied tussen Beek en Sittard, dat landschappelijk veel gelijkenis vertoont met het Plateau van Schimmert, verschilt echter door een minder vertakt systeem van oppervlakkige drainage en door het voorkomen van

meerdere breuken in de ondergrond. Het gebied is lithologisch gekenmerkt door het overwegend voorkomen van de Miocene Formatie van Heksenberg, een complex van zilverwitte, kleiarme zanden met tussengeschakelde bruinkoollagen. Een groot deel van de neerslag wordt ondergronds geborgen in deze matig doorlatende zanden; isohypsen van het grondwater duiden op een afstroming in noordwestelijke richting. De noordgrens van het deelgebied, dat een oppervlakte heeft van ca. 81 km^2 wordt gevormd door de Feldbiss. In het overgangsgebied naar de Roerdalslenk liggen een aantal markante, diep ingesneden droogdalsystemen. Aanwijzingen voor een eventuele stuwende werking van de breukzone (Feldbiss) op de grondwaterstroming in het eerste watervoerende pakket konden alleen geconstateerd worden tussen Sittard en Born. Nader onderzoek hiernaar is gewenst.

- Het deelgebied van de Roerdalslenk, tussen Sittard/Born en Maasbracht, ligt landschappelijk op een duidelijk lager niveau. Het reliëf is veel minder uitgesproken dan in de eerder genoemde, zuidelijk van de Feldbiss gelegen, gebieden. In dit deelgebied spelen de Tertiaire afzettingen, door hun ligging op grotere diepte in de slenk, geen noemenswaardige rol bij de ondergrondse voeding van de Maas. Het eerste watervoerend pakket, gevormd door Pleistocene afzettingen van Maas (Formatie van Kreftenheye) en Rijn (Formatie van Kedichem en Kiezeloöliet Formatie) wordt, behalve door de directe neerslag op het gebied, ook gevoed vanuit het oosten. Door het geringe relief, de gunstige permeabiliteit en de relatief kleine drainagedichtheid bestaan in dit deelgebied goede mogelijkheden voor ondergrondse berging en toestroming naar de Maasvallei.

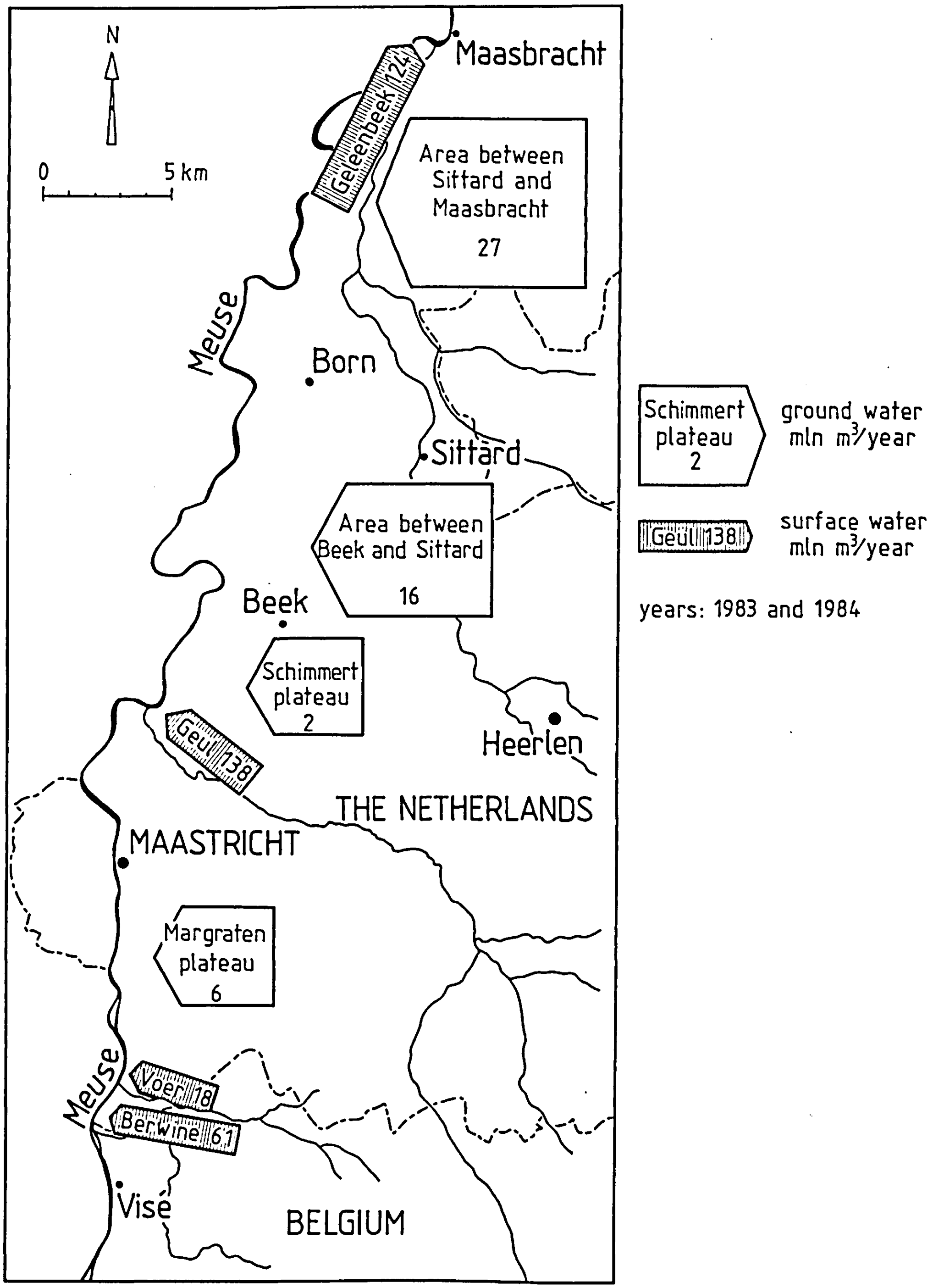


Figure 2 Simplified map to show the various contributions to the inflow of water to the river Meuse

3 KWANTIFICERING

Voor ieder van de deelgebieden is een berekening gemaakt van de hoeveelheden grondwater en oppervlaktewater die toestromen naar de Maas. Dit is geschied op basis van de grondwaterbalans; voor de beide noordelijke deelgebieden is de grondwatertoevoer tevens berekend door toepassing van de wet van Darcy. De resultaten zijn gebaseerd op neerslag- en afvoergegevens van de jaren 1983 en 1984 (Table 1 en Figure 2). Zoals ook eerdere auteurs gesteld hebben (Paulissen 1973, Meulenberg 1986), is de bijdrage aan de voeding van de Maas door directe ondergrondse toestroming als base flow vanuit de aangrenzende aquifers relatief gering.

Table 1 Approximate inflow of water to the river Meuse by the various hydrogeological systems; east bank between Visé (B) and Maasbracht (1983/1984).

System	Quantity (mln m3/year)	per km
Groundwater:		
- Margraten Plateau	6	0.46
- Schimmert Plateau	2	0.23
- Heksenberg Area (between Beek and Sittard)	16	2.08
- Roervalley Graben (between S. and Maasbracht)	27	2.00
Total groundwater supply	51	
Surface water:		
- Berwine	61	
- Voer	18	
- Geul	138	
- Geleenbeek	124	
- Vlootbeek	6	
Total surface water supply	347	
Total water supply of the river Meuse	398	

Het grootste deel van de voeding van de Maas tussen Visé en Maasbracht geschiedt via oppervlaktewater. Uit tabel 1 blijkt dat het grondwateraandeel van de voeding in dit traject 10-15% van de totale voeding bedraagt. De geringe ondergrondse toestroming vanuit de plateaus wordt veroorzaakt door de sterk drainerende werking van de diep ingesneden beken (zoals Berwine, Geul en in mindere mate Geleenbeek). De directe toestroming van grondwater naar de Maas is het grootst in het (deel)gebied tussen de Feldbiss (Sittard) en Maasbracht doordat, als gevolg van het geringere reliëf, de drainerende werking van de zijdalen van de Maas hier veel kleiner is.

LITERATUUR

MEULENBERG, M.; 1986. Het oppervlaktewatersysteem van de Grensmaas tussen Borgharen en Maasbracht. Commissie voor Hydrologisch Onderzoek T.N.O., rapport no. 15.

NOTA, D.J.G., et al.; 1987. A hydrogeological study in the basin of Gulp Creek. Part 3: Chemistry of surface and groundwater. Agricultural University Wageningen Papers 87-7.

PAULISSEN, E.; 1973. De morfologie en de kwartairstratigrafie van de Maasvallei in Belgisch Limburg. Verhandelingen van de Kon. Vlaamse Academie voor Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten van België, klasse der Wetenschappen, jaargang xxxv, no.127.

RAVE, J.M.M. en SCHURINGA, L.; 1987, Dorenmalen, P.H.A. van, Inckel, M.S., Ligeon, H.R. en Richters, P.H.J.A., 1988; Jessen, G.R.M. en Willekens, E.L.M., 1989; Verhagen, F.T., 1990; Mulder, R.T. en Sijtsma, B.R., 1991. Scripties Landbouwuniversiteit, afstudeervak Hydrogeologie; Oostoever Maas.

BIJDRAGE TOT DE STUDIE VAN DE WATERBALANS VAN DE MAAS; DE OPPERVLAKTEWATERS TUSSEN LUIK EN BORGHAREN

K. Mombers en W. Bauwens

SAMENVATTING

De waterbalans van de Maas in het gebied Luik-Maastricht tijdens de droge zomer van 1979 wordt bestudeerd vanuit het oogpunt van de oppervlaktewaters. Hierbij wordt rekening gehouden met de bemeten en onbemeten debieten van de Maas en haar bijrivieren en met de voeding van de kanalen in het gebied. Aanvullend worden ook de verdamping, de toevoer ten gevolge van neerslag in het eigen stroomgebied, waterontrekkingen, lozingen en de verandering van de berging in beschouwing genomen.

1 INLEIDING

De Maas is voor België en Nederland een belangrijke verkeersader voor goederentransport. Tussen Luik en Maasbracht staat de rivier in verbinding met een aantal kanalen die de Maas verbinden met het Scheldebekken en de havens langs de Noordzee en/of een economische oplossing bieden aan het probleem van het lange traject en grote verval van de Maas in het gebied. Andere vragen naar Maaswater komen van de industrie (industriewater, koelwater), de landbouw (irrigatie) en van de inwoners (drinkwater, recreatie). Ook dient rekening te worden gehouden met milieu-eisen. Tijdens droge periodes is het niet steeds mogelijk om aan al deze vragen te voldoen. Voor een operationeel beheer is het dan van belang om zowel de vraag als het aanbod van water, zoals uitgedrukt in een waterbalans, te kennen.

In 1979 werd daarom een gezamenlijk Belgisch-Nederlands onderzoek aangevat naar de waterbalans van de Maas in het grensgebied Luik-Maasbracht, in het kader van de activiteiten van de Technische Maas Commissie (TMC). Het onderzoek spitste zich toe op de droge periode van 2 juli tot 27 november 1979, tijdens dewelke bijzondere aandacht werd besteed aan de verzameling van gegevens.

De volgende (deel-)balansen werden door de TMC bestudeerd: Luik-Borgharen, Luik-Eysden, Luik-Maaseik en Borgharen-Maaseik. De studie beperkte zich oorspronkelijk tot een analyse van de gemeten afvoeren (Anoniem, 1985 a en 1985 b). In een aanvullende nota (Anoniem, 1985 c) wordt gepoogd de restterm van de balans in te verklaren. In de marge van dit onderzoek werd door de Dienst voor Hydrologisch Onderzoek (DIHO) van het Ministerie van Openbare Werken een gedetailleerd en operationeel model ontwikkeld voor de analyse van de waterbalans in het gebied Luik-Maastricht (Laurent et al., 1986).

In 1986 werd de Stuurgroep voor het Wetenschappelijk Onderzoek van de Maas (SWOM) opgericht, evenals de werkgroepen Oppervlaktewater (WOMO) en Grondwater (WOMG). De SWOM stelt zich tot doel het bilateraal onderzoek van de Maas te stimuleren en te coördineren. Het is in het kader van de activiteiten van de SWOM dat het onderzoek naar de waterbalans van de droge zomer van 1979 werd voortgezet. Hierbij legde de werkgroep WOMO zich toe op het uitdiepen van de balans voor wat betreft de oppervlaktewaters, terwijl de werkgroep WOMG een gedetailleerde analyse uitvoerde van de grondwaterstroming in het gebied. Om een vertekening van de onderzoekresultaten te vermijden werden de beide onderzoeken onafhankelijk van mekaar uitgevoerd. Voor wat betreft de oppervlaktewaters werd het gebied opgesplitst in twee deelgebieden, respectievelijk Luik-Eysden en Borgharen-Linne. Dit laatste gebied werd bestudeerd door de TU-Delft (Van Dansik, 1988) en wordt hier niet behandeld.

2 HET STUDIEGEBIED

Als meest opwaartse grens van het studiegebied geldt de stuw van Ampsin-Neuville (Figuur 1). Het Maaswater verlaat het studiegebied via de Maas te Borgharen of via één van de volgende kanalen:

- het Albertkanaal (Genk);
- het kanaal Briegden-Neerharen (Neerharen);
- de Zuid-Willemsvaart (Smeermaas);
- het Julianakanaal (Bunde).

Een deel van het debiet van het verbindingskanaal tussen de Maas en de Zuid-Willemsvaart verlaat het studiegebied langs de overstort van Bosscheveld en vervoegt de Maas, afwaarts van het meetpunt te Borgharen.

Het Albertkanaal, de Zuid-Willemsvaart en het Julianakanaal staan in vrije verbinding met de Maas. Het Albertkanaal is bovendien verbonden met de Maas via drie schutkanalen (Monsin, Visé en Lanaye) en met de Zuid-Willemsvaart via het kanaal van Briegden-Neerharen.

In het studiegebied wordt de Maas gevoed door de zijrivieren de Ourthe, de Berwinne, de Voer en de Jeker.

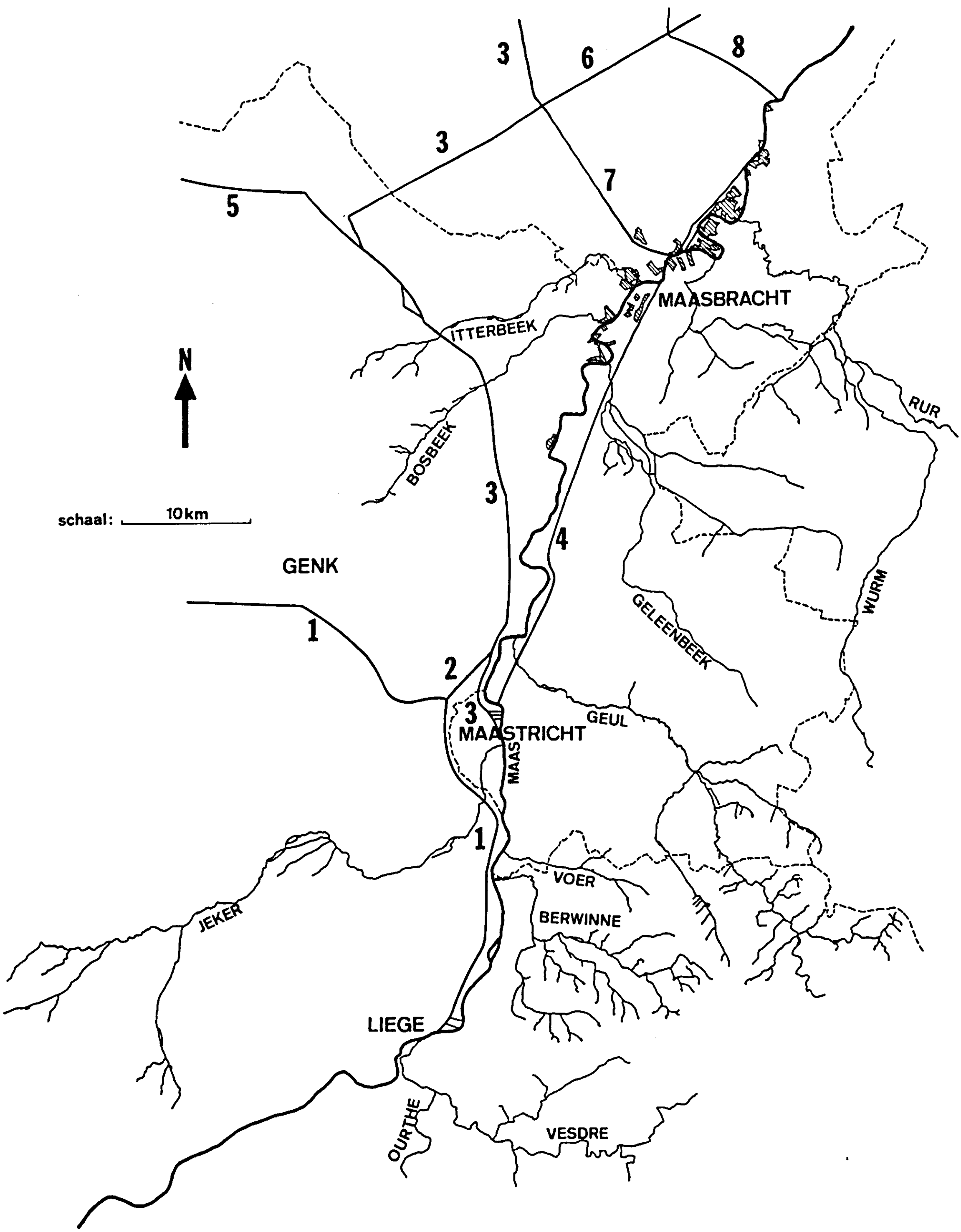
3 DE TERMEN VAN DE WATERBALANS

De waterbalans wordt uitgedrukt door de continuïteitsvergelijking

$$\frac{\partial S}{\partial t} = Q_{toe} - Q_{uit}$$

met ∂S : de verandering van berging;
∂t : de balansperiode;
Q_{toe} : de toegevoerde debieten;
Q_{uit} : de uitgaande debieten.

De toegevoerde debieten omvatten de opwaartse afvoer van de Maas en van haar zijrivieren in het gebied, de neerslagafvoer van het eigen stroomgebied van de Maas en de kunstmatige lozingen.



Figuur 1 Schema van het studiegebied

Tabel 1 De termen van de waterbalans van de Maas tijdens de droge zomer van 1979

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	84.0	17.7	0.9	0.6	60.1	1.3	16.6	9.2	15.6	0.9	-0.6	-3.4	0.6	0.0	0.0	0.5	0.7	3.3	-2.6
2	82.9	23.2	1.4	0.7	72.6	1.1	15.5	8.1	16.5	0.6	-6.2	0.3	0.5	0.6	0.7	6.1	0.7	1.2	-4.9
3	68.2	16.6	1.0	0.6	54.4	1.6	14.4	6.7	16.5	0.5	-7.5	-2.3	0.5	0.1	0.1	0.5	0.7	-4.5	-1.0
4	55.0	17.5	1.1	0.7	41.7	1.8	14.1	7.5	16.4	0.6	-7.8	-0.6	0.7	0.1	0.4	1.9	0.7	-4.7	-3.4
5	69.5	21.2	1.4	0.9	47.0	1.8	14.5	7.9	15.9	0.8	4.9	-2.0	0.6	0.6	0.4	4.0	0.7	12.0	2.1
6	69.5	30.2	2.2	1.4	69.4	1.4	16.6	7.5	16.0	0.9	-8.4	-1.5	0.5	1.0	1.3	10.5	0.7	6.1	-4.5
7	60.3	21.5	1.3	0.7	50.6	1.9	16.1	6.7	15.9	0.8	-8.2	-4.6	0.5	0.3	0.3	2.2	0.7	-0.4	-3.6
8	65.0	19.0	1.2	0.6	47.6	1.5	16.2	8.8	14.1	1.2	-3.6	0.4	0.4	0.3	0.4	5.2	0.7	2.2	-0.1
9	53.7	18.8	1.1	0.5	36.3	1.4	16.8	8.9	13.2	1.1	-3.8	1.0	0.6	0.1	0.4	1.4	0.7	-2.8	-0.2
10	51.7	15.9	1.6	0.7	38.0	2.7	15.6	8.7	15.1	0.9	-11.1	-3.9	0.5	1.2	0.8	6.6	0.7	1.6	-6.2
11	43.9	12.4	1.8	0.9	22.1	1.7	16.8	7.8	15.2	0.8	-5.4	-2.1	0.4	0.0	0.0	0.4	0.7	-2.6	-1.1
12	47.0	11.9	1.1	0.5	15.1	1.5	16.4	7.7	16.0	0.8	3.0	-0.9	0.4	0.0	0.0	0.2	0.7	4.4	-0.7
13	40.8	10.8	1.1	0.6	13.3	2.3	17.1	7.9	16.3	0.9	-4.6	-2.2	0.3	0.0	0.0	0.3	0.7	-1.7	-1.3
14	36.8	10.5	1.1	0.6	12.0	2.9	16.7	7.5	16.2	1.0	-7.4	1.1	0.3	0.1	0.1	0.7	0.7	-7.3	-4.6
15	43.6	10.8	1.3	0.6	21.9	1.4	15.9	8.0	16.4	0.9	-8.2	0.8	0.3	0.5	0.6	4.8	0.7	-2.6	-6.5
16	56.6	14.7	1.3	0.7	38.4	1.9	15.9	7.5	16.3	0.7	-7.3	2.1	0.2	0.2	0.1	0.7	0.7	-7.8	-3.6
17	41.2	10.9	1.1	0.5	13.0	1.8	14.3	8.1	16.0	0.9	-0.3	1.2	0.2	0.0	0.1	0.5	0.7	-0.4	2.3
	57.0	16.7	1.3	0.7	38.4	1.8	15.9	7.9	15.7	0.9	-4.9	1.0	0.4	0.3	0.4	2.7	0.7	-0.2	-2.3

Legende :

1	Week		7	Bosscheveld	(5263)	13	toename van de berging	19	sluitfout
2	Ampsin-Neuville	(7131+7138+7139)	8	Julianakanaal	(5394)	14	evaporatie	20	sluitfout TMC
3	Ourthe	(5811)	9	Albertkanaal	(5711+5716)	15	neerslag op vrij wateroppervlak		
4	Jeker	(5511)	10	Zuid-Willemsvaart	(5351)	16	afvoer stedelijk gebied		
5	Berwinne	(5611*1.13)	11	Briegden-Neerharen	(5781)	17	afvoer ruraal gebied		
6	Borgharen	(5311)	12	Balanstermen 2..11		18	lozing - onttrekking		

De referentienummers in de legende duiden op de referentie van de tijdreeks bij de Dienst voor Hydrologisch Onderzoek, M.O.W.

De uitgaande debieten bestaan uit het debiet van de Maas te Borgharen, de debieten van de kanalen, de verdampingsverliezen en uit de kunstmatige wateronttrekkingen.

De bergingsterm houdt rekening met het feit dat de hoeveelheid water die in het gebied wordt geborgen verschillend kan zijn bij de aanvang en op het eind van de balansperiode.

Zoals voorheen gemeld, werd bewust geen onderzoek verricht naar de grondwaterstroming aan de grenzen van het gebied.

De balansperiode voor het onderzoek bedraagt één week, teneinde de invloed van incidentele meetfouten - e.g. fouten veroorzaakt door de invloed van de scheepvaart - minimaal te houden.

Tenzij anders vermeld, werden de basisgegevens voor de berekening van de waterbalans verstrekt door de DIHO (zie ook Tabel 1).

Het debiet van de Maas te Ampsin-Neuville:

Bij debieten lager dan 300 m^3/s wordt het debiet berekend als de som van de debieten langs de vier turbines van de hydro-elektriciteitscentrale en van de twee schutsluizen.

Er wordt hierbij opgemerkt dat verschillende debiettijdreeksen voor dit station in omloop zijn. Zo is het gemiddeld debiet over de studieperiode bij de studie van de TMC ongeveer 3 m^3/s lager dan blijkt uit onderhavig onderzoek.

De auteurs beschikken over onvoldoende gegevens om een grondige analyse van de nauwkeurigheid van deze debieten uit te voeren.

Het debiet van de Maas te Borgharen:

Het debiet van de Maas te Borgharen omvat het debiet in de natuurlijke bedding van de Maas en het debiet ter hoogte van de overstort Bosscheveld.

Het debiet in de natuurlijke bedding wordt bepaald aan de hand van de ijkingsrelatie voor de limnigraaf te Borgharen-dorp. De dagelijkse afvoer wordt door Rijkswaterstaat berekend met behulp van de gemiddelde etmaalstand, op basis van vijf-minuten-waarnemingen.
Het debiet over de overstort wordt berekend aan de hand van de overstortformule voor brede overlaten, gebruikmakend van het stuwpeil Borgharen om 08.00 uur.

Het debiet van het Albertkanaal te Genk:

Het debiet van het Albertkanaal te Genk wordt berekend aan de hand van het aantal schuttingen en tappingen van de 2000 ton sluizen. Hierbij wordt opgemerkt dat met de tapdebieten geen rekening werd gehouden in de balans van de TMC.

De basisgegevens werden verstrekt door de Dienst voor de Scheepvaart te Hasselt en verwerkt door de DIHO.

De stochastische fout op het debiet wordt geraamd op ca. 0.25 m^3/s (De Weerd, 1982). Een systematische fout treedt op door de onzekerheid op het kolkvolume (Mombers, 1988) en als gevolg van lekverliezen. Deze laatste worden door De Weerd geraamd op 0.8 m^3/s.

Het debiet van het Kanaal Briegden-Neerharen:

Het debiet wordt bepaald, rekening houdend met het aantal schuttingen.

De stochastische fout op het debiet wordt geraamd op ca. 0.1 m^3/s (De Weerd, 1982). Een systematische fout treedt op door de onzekerheid op het kolkvolume (Mombers, 1988) en als gevolg van lekverliezen. Deze laatste worden geschat op 0.3 m^3/s (De Weerd, 1982).

Het debiet van de Zuid-Willemsvaart en van het Julianakanaal:

De debieten van deze kanalen worden bepaald aan de hand van akoestische debietmeters, respectievelijk te Smeermaas en te Bunde.

De meetnauwkeurigheid van de metingen bedraagt 1 tot 2 m^3/s (Van Mazijk, 1978 en Van Leeuwen, 1983).

Het debiet van de Ourthe:

Het debiet wordt bepaald aan de hand van een ijkingsrelatie, ter hoogte van de stuw van de "Grosses Battes".

Het meetstation is weinig gevoelig voor debietsvariaties bij lage waterpeilen.

Het debiet van de Berwinne:

Het peil van de Berwinne wordt gemeten te Berneau (bekkenoppervlakte 124 km^2) en omgerekend naar een debiet aan de hand van een ijkingsrelatie. Een correctiefactor van 1.13 wordt toegepast om de afvoer van het volledige bekken (140 km^2) te berekenen.

Het debiet van de Voer:

De voer werd in 1979 nog niet bemeten.
De DIHO (Laurent, 1986) stelt voor het debiet van de Voer te berekenen aan de hand van de debieten van de Berwinne, en van de verhouding van de oppervlakte van de beide bekkens (0.48). Een analyse van recente gegevens (Mombers, 1988) toont dat de verhouding van de verhouding van de dagelijkse afvoeren schommelt tussen 0.36 en 0.49, met een gemiddelde van 0.44.

In de voorgestelde balans wordt de Voer als (onbemeten) tussenbekken beschouwd.

Het debiet van de Jeker:

Het debiet van de Jeker wordt bepaald aan de monding van de Maas te Maastricht-Nekum, met behulp van een ijkingsrelatie.

De neerslag in het studiegebied:

Bij de berekening van de toevoer onder invloed van de neerslag in het gebied werd rekening gehouden met het vrij wateroppervlak (14 km²), met de verstedelijkte gebieden Luik en Maastricht (30 km²) en met een rurale zone (540 km²). De afvoercoefficiënten voor deze zones bedragen respectievelijk 1, 0.5 en 0.07.

Bij de berekening van de afvoerdebieten (Tabel 1) wordt rekening gehouden met de ruimtelijke spreiding van de neerslag. Hiertoe werd gebruik gemaakt van de dagelijkse neerslagwaarden van het K.M.I. (11 stations) en van het K.N.M.I. (1 station).

De verdamping:

De verdamping van het vrij wateroppervlak van de Maas en het kanaalstelsel wordt berekend, gebruikmakend van de formule van Penman en op basis van de hydrometeorologische gegevens van het station Bierset van het K.M.I.

De talrijke thermische lozingen langsheen de Maas veroorzaken een toename van de natuurlijke temperatuur van het Maaswater, en bijgevolg van de verdamping. Daarentegen heeft de Ourthe - met een gemiddelde temperatuur die 2°C lager is dan deze van de Maas - een gunstig effect op het thermisch regime van de Maas.

Een correctie wordt toegepast op de Penman-waarden van de verdamping, waarbij rekening wordt gehouden met de warmtefluxen als gevolg van de thermische lozingen (Mombers, 1988). Hierbij wordt verondersteld dat ca. 50% van de aanvullende warmteflux wordt gedissipeerd door evaporatie (Smitz, 1975).

De temperatuurstijging van het Maaswater tijdens de studieperiode en voor de karakteristieke laagwater vermogens van de thermische centrales bedraagt 3 tot 4°C. Een supplementaire verdamping van 0.1 m³/s stemt hiermee overeen.

De wateronttrekkingen:

Wateronttrekking van oppervlaktewater gebeurt in het gebied voornamelijk voor industriële doeleinden. Het industrieel verbruik van oppervlaktewater in het Luikse wordt geschat op 1.5 m^3/s (Laurent et al., 1986).

De lozingen:

Het water voor huishoudelijk en industrieel gebruik is afkomstig van buiten het studiegebied of van grondwateronttrekkingen in het studiegebied. Aangezien het grondwater niet wordt beschouwd als een componente van het systeem, dienen de lozingen in de beide gevallen als een bronterm in de balans te worden beschouwd.

Nauwkeurige gegevens over dit verbruik waren voor het onderzoek niet beschikbaar. Voor het huishoudelijk verbruik werd rekening gehouden met een lozingsdebiet van 180 l per dag en per inwoner en met een inwonersaantal van 600 000. De geschatte waarde van 500 000 inwonersekwivalent, aangewend in het onderzoek van de TMC (Anoniem, 1985 b), werd aangehouden voor de berekening van de industriële lozingen. Het totale lozingsdebiet bedraagt aldus ca. 2.2 m^3/s.

De variatie van de berging:

De variatie van de berging houdt rekening met het verschil in geborgen watervolume in het bestudeerde gebied over de balansperiode. Bij de berekening wordt rekening gehouden met de oppervlakte van de panden - in totaal ca. 14 10^6 m^2 - en met de waterpeilen te Ampsin-Neuville, Ivoz-Ramet, Angleur, Monsin en Maastricht.

Bij een peilverhoging van e.g. 0.1 m wordt een aanvullend volume van 1.4 10^6 m^3 geborgen in het systeem. Een eenvoudige berekening toont aan dat hiertoe een gemiddeld inkomend debiet vereist is van 2.3 m^3/s gedurende 1 week of 0.14 m^3/s gedurende 17 weken (zijnde de totale duur van de bestudeerde periode).

4 DE BALANSBEREKENINGEN

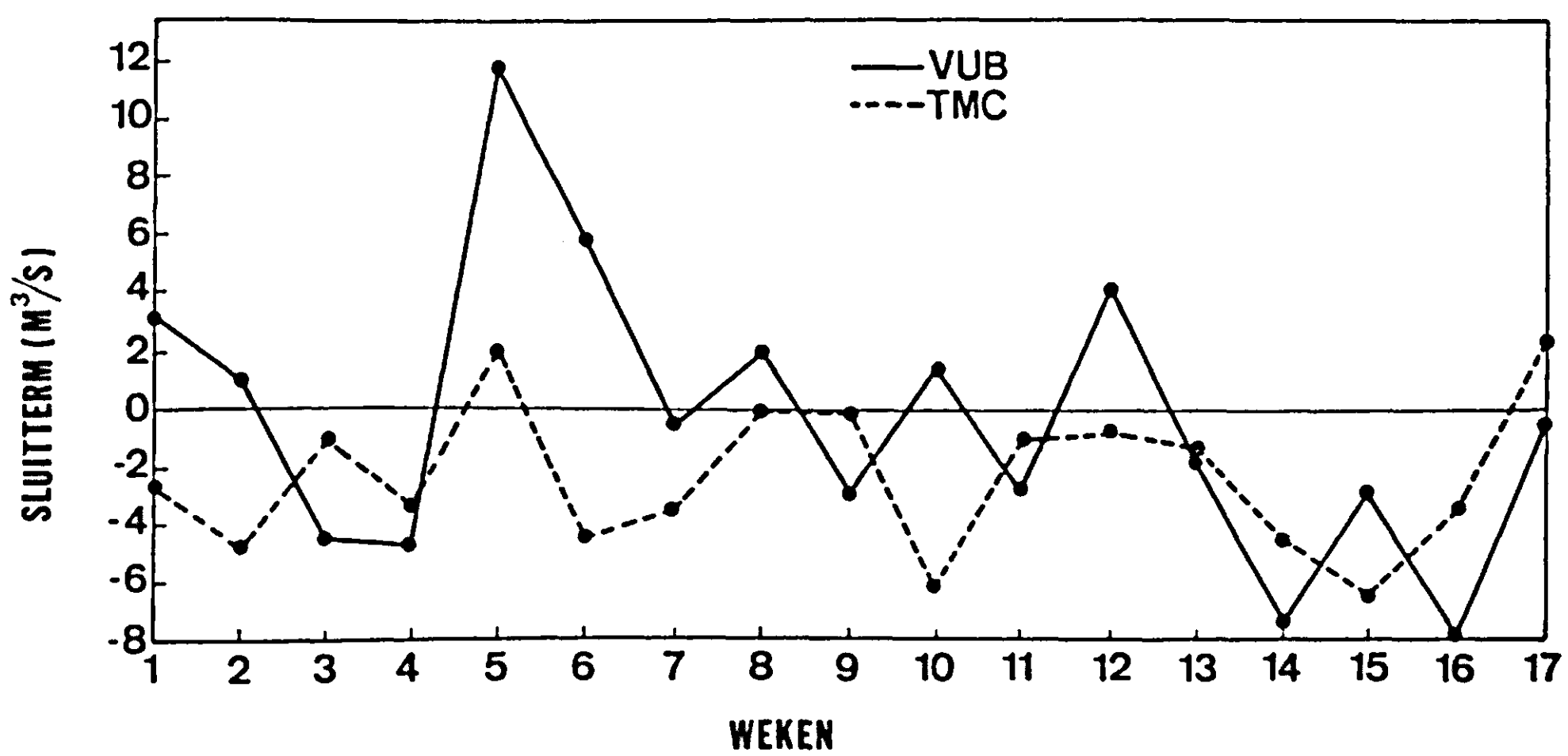
De sluitfout op de waterbalans wordt gedefinieerd als:

$$r = Q_{toe} - Q_{uit} - \frac{\partial S}{\partial t}$$

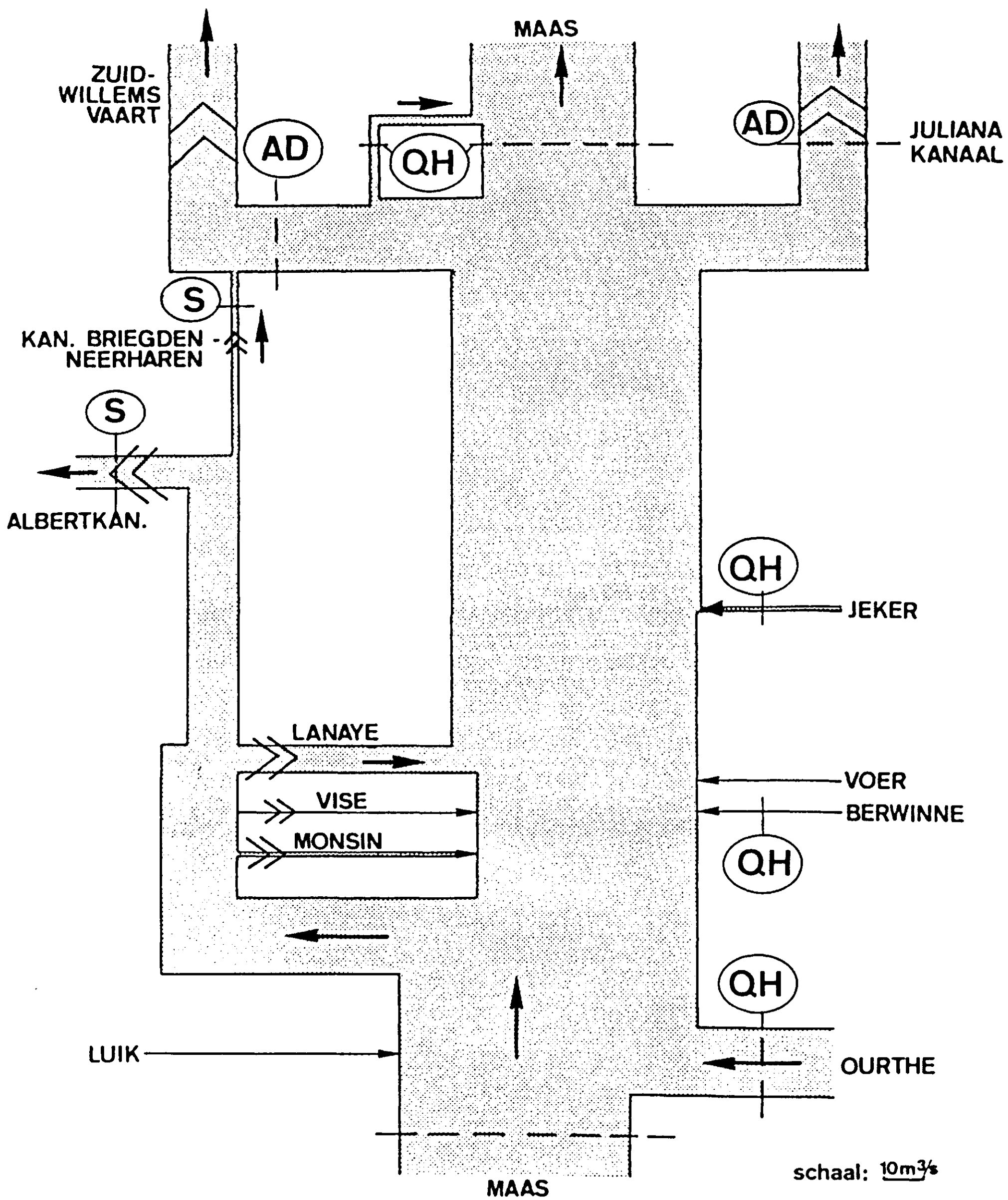
Uit Tabel 1 blijkt dat indien enkel rekening wordt gehouden met de bemeten debieten, de gemiddelde sluitfout over de globale periode -4.9 m^3/s bedraagt. Indien ook de aanvullende balanstermen in aanmerking worden genomen, reduceert de sluitfout tot -0.2 m^3/s, hetzij gemiddeld -1% van de bemeten toegevoerde debieten.

Dit resultaat betekent een verbetering van de TMC balans, waar de sluitfout -2.3 m^3/s bedroeg.

Bij de analyse van de wekelijkse waarden (Figuur 2) valt de relatief grote spreiding van sluitfouten op, i.c. van -7.8 tot 12.0 m^3/s, wat resulteert in een standaardafwijking van 5.0 m^3/s. Uitgedrukt ten opzichte van de bemeten toegevoerde debieten bedraagt de standaardafwijking 6%, met extremen van 13.1 en -14.5%.



Figuur 2 De evolutie van de sluitfout bij de verschillende waterbalansstudies



Figuur 3 Schematische voorstelling van het gebied en gemiddelde debietsverdeling tijdens de studieperiode

Het in acht nemen van de aanvullende balanstermen leidt niet tot een reductie van de spreiding in vergelijking met de standaardafwijking op de sluitfout van de bemeten debieten (4.3 m^3/s).

In vergelijking met de wekelijkse sluitfouten van de TMC balans wordt een toename van de standaardafwijking vastgesteld (5.0 t.o.v. 2.6 m^3/s). Daarentegen vertoont de spreiding van de nieuwe sluitfouten rond het gemiddelde een meer toevallig karakter.

Aan de hand van regressie-analyses werd bovendien aangetoond dat de correlatie tussen de sluitfout enerzijds en het Maasdebiet te Luik, de variatie van dit debiet, de neerslag en de variatie van de berging anderzijds niet significant is. Deze analyse bevestigt het toevallige karakter van de sluitfout.

Een overzicht van de gemiddelde debietsverdeling in het gebied over de studieperiode wordt gegeven in Figuur 3.

5 BESLUITEN

Het in rekening brengen van de aanvullende, onbemeten termen van de waterbalans leidt tot een lichte verbetering van de balans over de globale studieperiode. Indien echter ook rekening wordt gehouden met de spreiding van wekelijkse sluitterm, dan dient te worden gesteld dat de verbetering statistisch niet significant is.

Door de beschouwing van de aanvullende balanstermen worden bepaalde trends die merkbaar waren bij de resultaten van de studie van de TMC opgeheven en vertoont de sluitfouten-tijdreeks een meer toevallig karakter.

Hiermee rekening houdend - en verwijzend naar de relatieve grootte van de sluitfouten ten opzichte van de bemeten debieten - kan worden gesteld dat de verklaring van de restterm hoogst waarschijnlijk dient te worden gezocht bij de toevallige meetfouten op de debieten.

DANKWOORD

De auteurs wensen hierbij de Dienst voor Hydrologisch Onderzoek van het Ministerie van Openbare Werken en het Koninklijk Meteorologisch Instituut te bedanken voor het ter beschikking stellen van de basisgegevens noodzakelijk voor het onderzoek. Onze dank gaat ook uit naar de Dienst voor Scheepvaart te Hasselt en naar Rijkswaterstaat, Directie Limburg, voor de aanvullende informatie die we van hen verkregen. Tenslotte danken we J. Van Dansik voor de inlichtingen die hij verschafte over zijn deel van het onderzoek, als thesisstudent aan de TU-Delft.

REFERENTIES

ANONIEM; 1985 a. Waterbalans Luik-Borgharen; Interim rapport, Subwerkgroep waterkwantiteit van de Technische Maascommissie, Maastricht.

ANONIEM; 1985 b. Verder onderzoek ten behoeve van de verklaring van de sluitfouten in de waterbalansen Luik-Maastricht, zomer 1979, Rapport van de Werkgroep Waterkwantiteit van de Technische Maascommissie.

ANONIEM; 1985 c. Waterbalansen; Analyse van de sluitfout, Subwerkgroep Waterkwantiteit van de Technische Maascommissie, Maastricht.

GOPPEL, J.M.; 1985. De waterbalans van de Maas tussen Luik en Maastricht in de zomer van 1979: verder onderzoek naar de verklaring van het gemiddeld verschil, Interne nota, Rijkswaterstaat, Directie Limburg.

LAURENT, J.; J. HEYNDERICKX en Y. DEWORM; 1986. La Meuse et le système Mosan entre Liège et Maasbracht, in: Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik-Maasbracht, Commissie voor Hydrologisch Onderzoek, TNO, Rapporten en Nota's nr. 15, pp. 67-94.

MOMBERS, K.; 1988. Bijdrage tot de studie van de waterbalans van het Maasbekken in het gebied Luik-Venlo, Thesis. Bijzondere Licentie in de Hydrologie, VU-Brussel, 76 pp.

SMITZ, J.; 1975. Modèle thermique de rivière: temperature naturelle et rejets thermiques; Application à la Meuse Liegeoise, Recherche et Technique au service de l'environnement.

VAN DANSIK, J.; 1988. De waterbalans voor het stuwpand Linne op de Maas tijdens de droge periode van 1979. Afstudeerverslag, Faculteit der Civiele Techniek, TU-Delft, 51 pp.

VAN LEEUWEN, J.; 1983. Toetsing akoestische debietmeter te Bunde, Rijkswaterstaat, WW, Afdeling Maas.

VAN MAZIJK, A.; 1978. Akoestische debietmeter nabij Smeermaas in de Zuid-Willemsvaart; Meetopstelling en uitgevoerde controlemetingen, Rijkswaterstaat, WW, Afdeling Maas.

WESSELING, J.W.; 1981. Stuwpand Maasbracht, Waterbalans en sluitfout-berekening, Waterloopkundig Laboratorium Delft, R1619, 32 pp.

EVALUATIE WATERBALANS

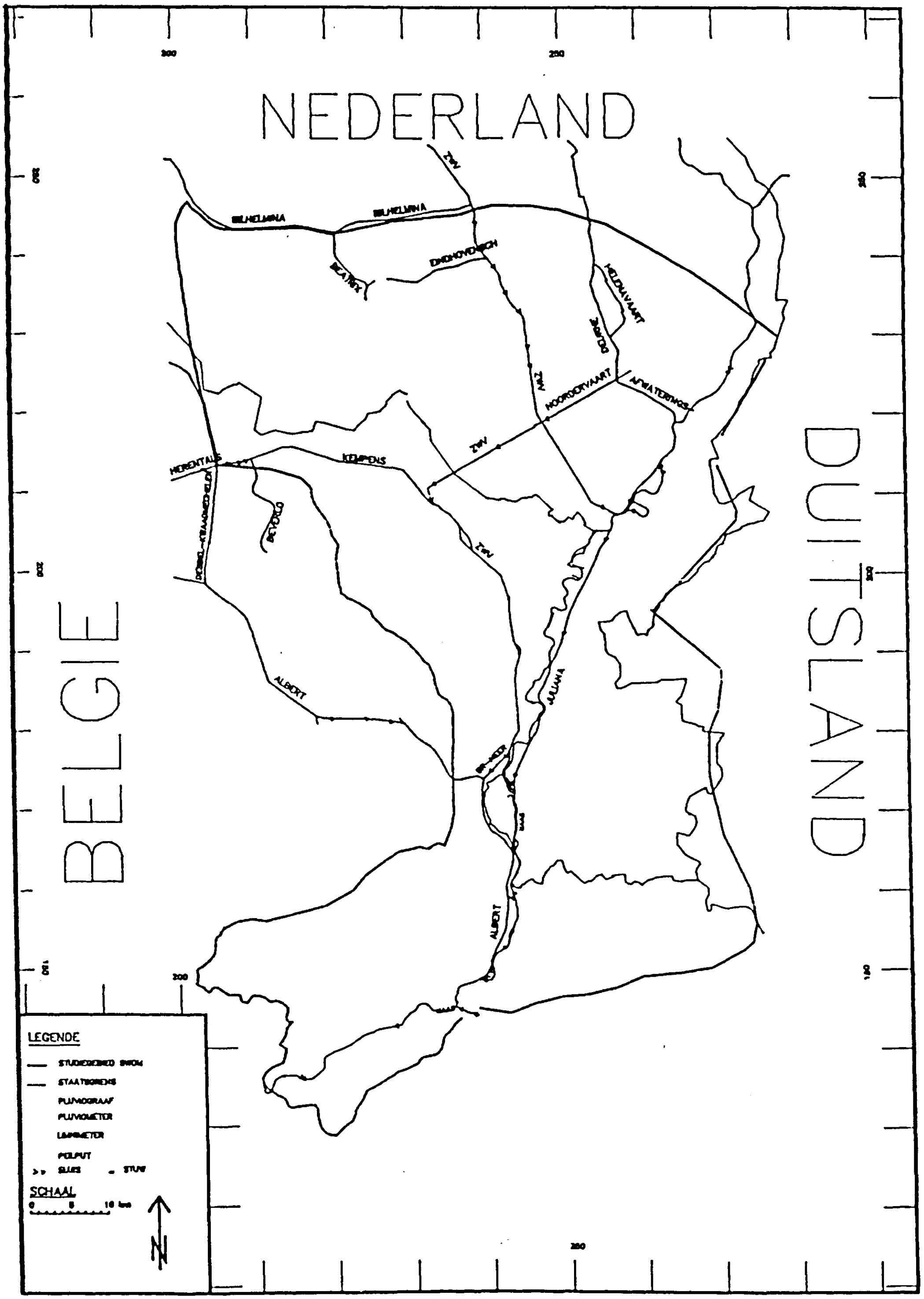
J.C. van Dam

ABSTRACHT

This paper contains an overview of the different components of the water balance as they have been estimated by the SWOM working groups on surface water and groundwater. Some comments are given on the margins in accuracy of the components. At the end general conclusions are drawn on the reliability of the water balances presented and some recommendations for investigations and measuring are given.

1 INLEIDING EN SYSTEEMBEGRENZING

Aan het begin van dit artikel zij reeds opgemerkt dat de hierin verwerkte informatie mij op zeer bereidwillige en efficiënte wijze werd aangereikt door de heren Ir. A.W. Dollee en Ir. W.J. de Lange, beiden van RIZA van Rijkswaterstaat te Lelystad. Ik ben hen daarvoor zeer erkentelijk. Op hun beurt hebben zij zich gebaseerd op een veelheid van rapporten die zijn uitgebracht sedert de 5^{e} CHO-studiebijeenkomst op 13 december 1985 te Maastricht. In het bijzonder zijn dat de rapporten van Mombers (1988) voor het bovenstroomse, grotendeels in België gelegen, deel en van Van Dansik (juni 1988) voor het benedenstroomse deel. De gebieden sluiten op elkaar aan bij Borgharen. De beide rapporten geven een nadere analyse en een aanvulling, gebaseerd op meer gegevens van met name het grondwater, op het Rapport van de Werkgroep Waterkwantiteit van de Technische Maascommissie, gedateerd 1985. De resultaten van Mombers en van Dansik werden, met andere studies,



Figuur 1 Studiegebied

voor het eerst gepresenteerd op een bijeenkomst van de Stuurgroep Wetenschappelijk Onderzoek Maas (SWOM) met haar werkgroepen "grondwater" en "oppervlaktewater" in oktober 1988 te Châtelet. Dollee heeft vervolgens in de daaropvolgende vergadering van de SWOM te Maastricht in enkele schema's een duidelijke compilatie daarvan gepresenteerd. Zijn schema's liggen ten grondslag aan deze voordracht. Ze zijn, in overleg met hem, bijgesteld op grond van enkele recentere onderzoeksresultaten van met name de grondwatertoestroming.

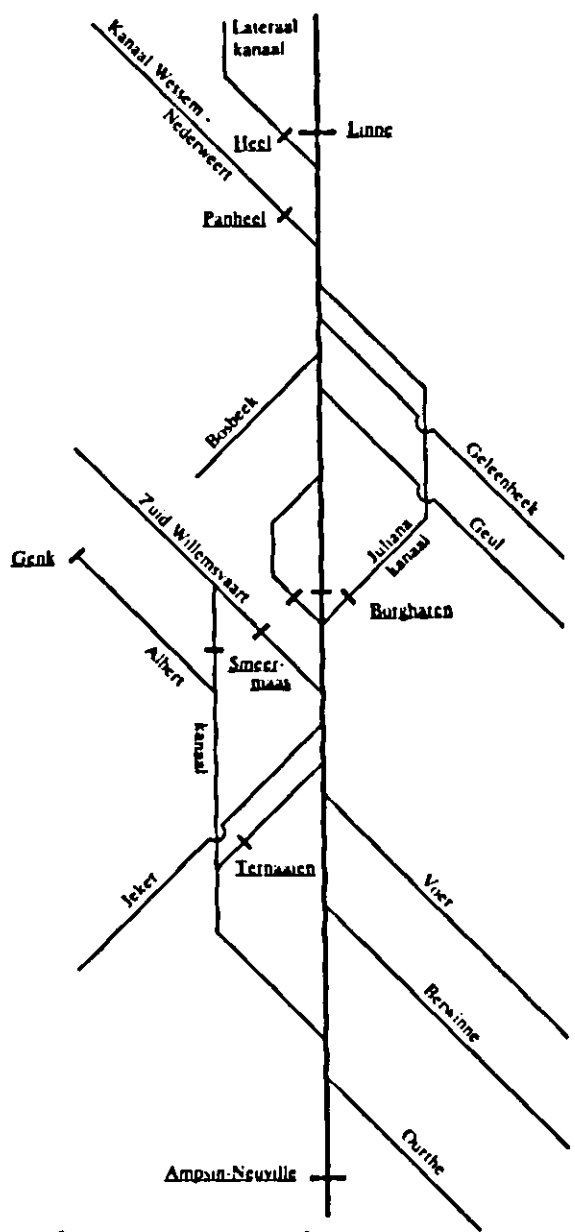
Bij de evaluatie van een waterbalans past allereerst een specificatie van de systeemgrenzen in ruimte en tijd.

De begrenzing van het studiegebied is weergegeven in figuur 1.

De waterbalans is opgesteld voor het systeem bestaande uit de rivier de Maas tussen Ampsin - Neuville, juist bovenstrooms van Luik, en de stuw met schutsluis bij Linne, enkele kilometers benedenstrooms van Maasbracht, en de met de Maas in open verbinding staande grindgaten en kanaalpanden of -toegangen, voorzover daardoor water uit het systeem kan worden afgevoerd (c.q. aan het systeem worden toegevoerd), dat zijn:

- in België:
  - het Albertkanaal tot de schutsluis bij Genk en de aftakking daarvan naar de Zuid Willemsvaart tussen Briegden en Neerharen.
- in Nederland:
  - de toegang tot de Zuid Willemsvaart met een schutsluis bij Smeermaas;
  - de toegang tot het kanaal Wessem - Nederweert met een gemaal en een schutsluis bij Panheel;
  - de toegang tot het Lateraal Kanaal met een schutsluis bij Heel nabij Linne.

Dit systeem is schematisch weergegeven in figuur 2, met vermelding van de relevante geografische namen.



Figuur 2 Het systeem Maas tussen Ampsin - Neuville en Linne

Het Julianakanaal past niet in bovenstaande opsomming omdat dat geheel binnen het systeem valt. Het bij Borgharen aan de Maas onttrokken schutwater komt er bij Maasbracht weer in terug. Hetzelfde geldt voor de schutsluizen tussen het Albertkanaal en de Maas te Monsin, Visé en Ternaaien (= Lanaye).

De lengte van het systeem van Ampsin - Neuville tot Linne is in vogelvlucht ca. 80 km.; de ontwikkelde lengte van de Maas bedraagt op dit traject zeker meer dan 100 km.

Het hiervoor beschreven systeem ontvangt water van de volgende zijrivieren en beken, in stroomafwaartse richting:

- Ourthe (rechts, B)
- Berwinne (rechts, B)
- Voer (rechts, Nl)
- Jeker (links, Nl)
- Geul (rechts, Nl)
- Geleenbeek (rechts, Nl)
- Bosbeek, Itterbeek en Abeek (links, B, Nl)

Overige inkomende termen zijn:

- neerslag op het wateroppervlak van het systeem en de direct daarop afwaterende aangrenzende gebiedjes;

- lozingen door aanliggende steden (Luik en Maastricht), dorpen en industrie;
- toestromend grondwater.

Behalve de waterafvoer naar de, bij de systeembeschrijving genoemde, op het systeem aansluitende kanalen zijn er nog de volgende uitgaande termen:
- verdamping van het wateroppervlak van het systeem en de direct daarop afwaterende aangrenzende gebiedjes;
- onttrekking door gebruikers.

Uiteraard sluit een waterbalans met een bergingsterm.

Aangezien het hiervoor beschreven systeem erg lang is en er bovendien, ongeveer in het midden ervan, een doorsnijding te maken viel op een plaats waar de debieten redelijk goed bekend zijn, is het systeem, ter controle, onderverdeeld in een bovenstrooms en een benedenstrooms gedeelte. De tussengrens ligt bij Borgharen, waar de totale afvoer bestaat uit de volgende drie componenten:
- de afvoer over de stuw te Borgharen;
- de afvoer over de overlaat Bosscheveld;
- de toevoer naar het Julianakanaal door de schutsluis te Bunde.

Voor de begrenzing in de tijd is een droge periode gekozen, omdat de interesse in het bijzonder daarnaar uitging. Mede gelet op de beschikbaarheid van de daarvoor benodigde gegevens werd daarvoor gekozen de periode van 2 juli 1979 t/m 28 oktober 1979, zijnde 17 weken of 119 dagen. Deze periode was droog, maar niet uitzonderlijk droog.

2 BALANSEN

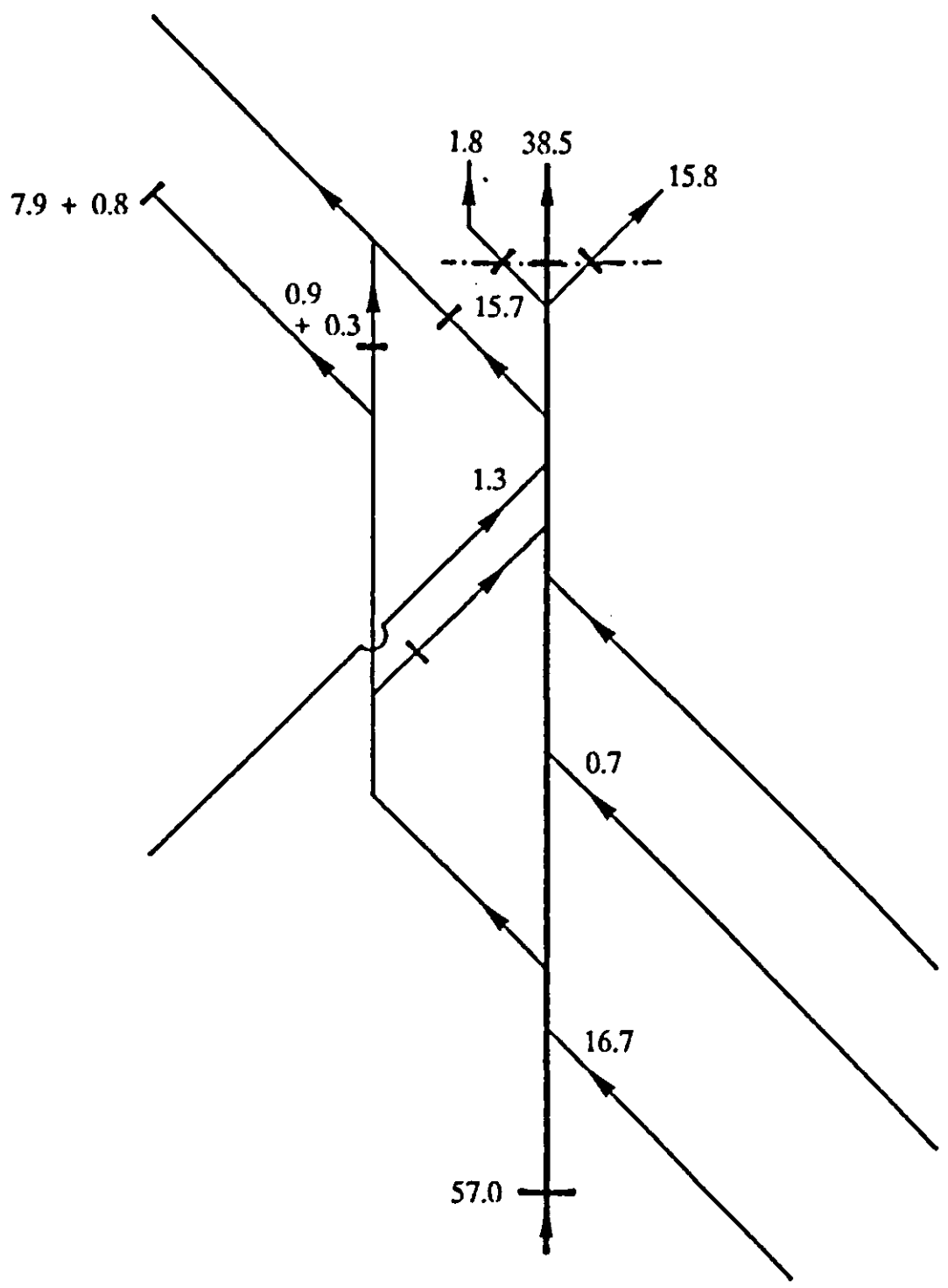
De hieronder vermelde getallen zijn ontleend aan een groot aantal rapporten, verslagen en nota's, deels verricht door studenten als afstudeerwerk aan verschillende Nederlandse en Belgische universiteiten en alle vermeld in de "Referenties" aan het einde van dit artikel. Bij de getallen wordt, waar nodig, verwezen naar deze bronnen. De getallen zijn niet alleen van verschillende herkomst, ze betreffen veelal ook slechts deelgebieden en hebben soms betrek-

king op verschillende perioden, met name voor het grondwater. Desondanks is het mijn, in de inleiding genoemde, informanten gelukt tot redelijk sluitende waterbalansen voor de beide deelgebieden te komen.

De getallen, eigenlijk volumina gedurende de balansperiode, worden gepresenteerd in m^3/s, derhalve als gemiddelden over de balansperiode. In deze wijze van presenteren past ook een bergingsterm uitgedrukt in m^3/s.

Voor de terugrekening naar volumina voor de gehele balansperiode moeten de hierna te presenteren getallen worden vermenigvuldigd met een factor groot 119 d x 86.400 s/d = 10,28 x 10^6 s.

Het bovenstroomse deelsysteem, Ampsin - Neuville / Borgharen, zie figuur 3.



Figuur 3 In- en uitgaande termen van het bovenstroomse deelsysteem Ampsin - Neuville/Borgharen

In:		
Maas te Ampsin - Neuville		57,0 m^3/s
Ourthe te Angleur		16,7 m^3/s
Berwinne		0,7 m^3/s
Jeker		1,3 m^3/s
neerslag + Voer		4,6 m^3/s
lozingen		2,2 m^3/s
grondwater, inclusief de achterloopsheid van de stuwen Ampsin - Neuville en Angleur		3,4 m^3/s
Totaal		85,9 m^3/s
Uit:		
Albertkanaal te Genk		7,9 m^3/s
lek te Genk		0,8 m^3/s
naar Zuid Willemsvaart te Neerharen		0,9 m^3/s
lek te Neerharen		0,3 m^3/s
naar Zuid willemsvaart te Smeermaas		15,7 m^3/s
stuw Borgharen		38,5 m^3/s
overlaat Bosscheveld		1,8 m^3/s
Julianakanaal		15,8 m^3/s
verdamping		0,4 m^3/s
onttrekking		1,5 m^3/s
Totaal		83,6 m^3/s
Bergingstoename	-/-	1,0 m^3/s

Opmerking 1: De neerslag en de verdamping hebben betrekking op het wateroppervlak. De bij de neerslag opgetelde afvoer van de, niet bemeten, Voer is verkregen door de neerslag op dat stroomgebied te vermenigvuldigen met een afvoercoëfficiënt, afgeleid uit de wel bemeten stroomgebieden van de Berwinne en de Jeker. Daarmee is de verdamping in het stroomgebied van de Voer reeds verrekend. Dit verklaart het lage cijfer voor de verdamping (0,4 m^3/s) ten opzichte van de term "neerslag + Voer" (4,6 m^3/s).

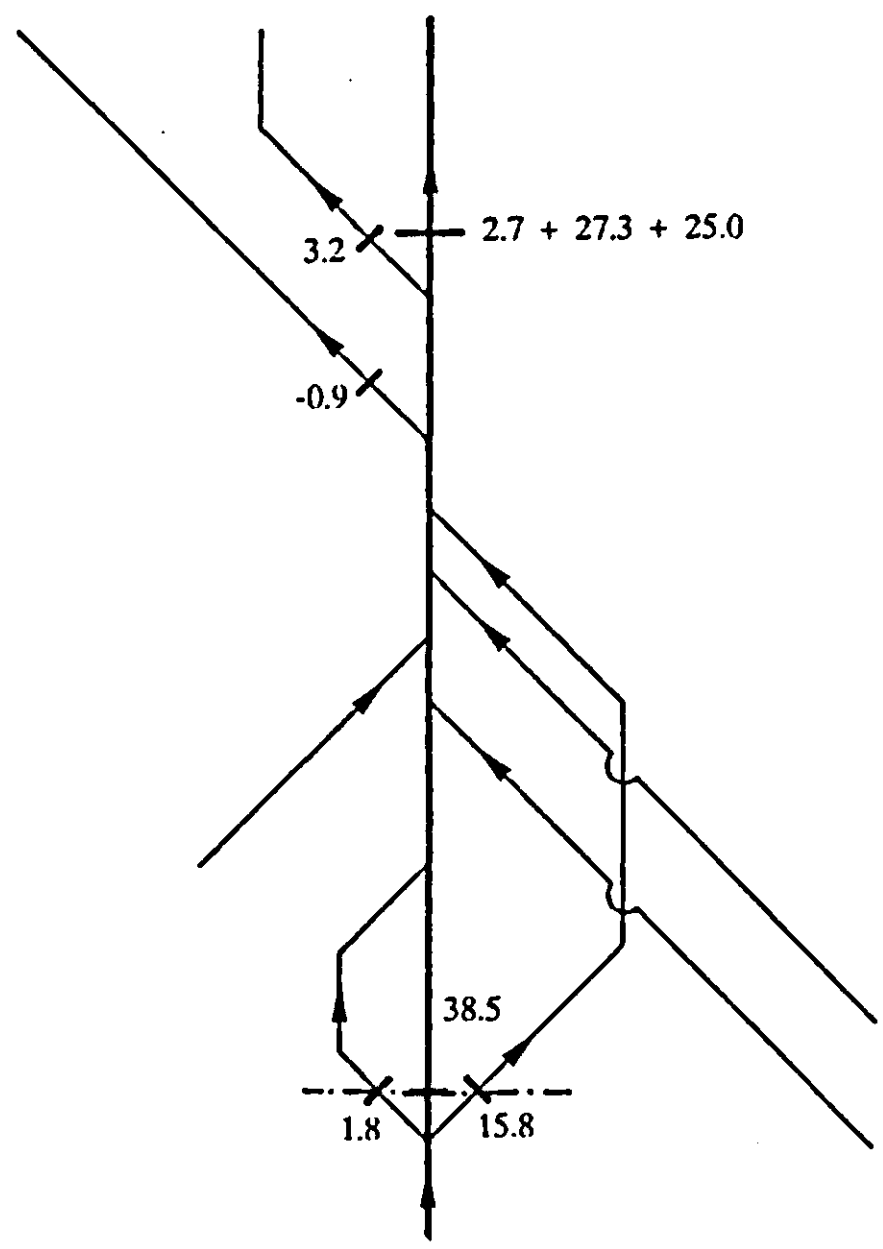
Opmerking 2: De bergingstoename, - 1,0 m^3/s, ofwel - 10,28 x 10^6 m^3, op een oppervlakte van 1400 ha (Mombers, blz.28) zou overeen komen met een daling van de waterstand van 73 cm over de balansperiode.

De sluitfout bedraagt: in - (uit + berging) = 85,9 - (83,6 - 1,0) = 3,3 m^3/s

Ter verklaring van deze sluitfout zijn de volgende onzekerheden aan te voeren:

- toestroming van grondwater naar het Albertkanaal of inzijging van water uit het kanaal (deze term is nog niet bepaald);
- de grootte van de verliezen te Genk;
- meet- en modelfouten (daarover meer in een volgende paragraaf).

Het benedenstroomse deelsysteem, Borgharen / Linne, zie figuur 4.



Figuur 4 In- en uitgaande termen van het benedenstroomse deelsysteem Borgharen/Linne

In:		
stuw Borgharen		38,5 m^3/s
overlaat Bosscheveld		1,8 m^3/s
Julianakanaal		15,8 m^3/s
sluis Panheel		0,9 m^3/s
neerslag + Geul + Geleenbeek + Bosbeek Itterbeek en Abeek		5,3 m^3/s
grondwater (Kempisch Plateau en Grote Slenk)		3,1 m^3/s
Totaal		65,4 m^3/s
Uit:		
gemaal Panheel		p.m.
sluis Heel		3,2 m^3/s
sluis Linne		2,7 m^3/s
stuw Linne		27,3 m^3/s
lek stuw Linne		25 m^3/s
verdamping		0,3 m^3/s
Totaal		58,5 m^3/s
Bergingstoename	-/-	0,2 m^3/s

Opmerking 3: Ook voor dit deelsysteem geldt dat de neerslag en de verdamping betrekking hebben op het wateroppervlak. In de bij de neerslag opgetelde afvoeren van de overigens, grotendeels, wel bemeten stroomgebieden van de Geul, Geleenbeek en Bosbeek, Itterbeek en Abeek en enkele kleinere direct op de Maas afwaterende niet bemeten gebiedjes is de verdamping in de stroomgebieden reeds verdisconteerd door directe meting van de afvoeren of door toepassing van een afvoercoëfficiënt. Dit verklaart ook hier het lage cijfer van de verdamping (0,3 m^3/s) ten opzichte van de term "neerslag + Geul + Geleenbeek + Bosbeek, Itterbeek en Abeek" (5,3 m^3/s).

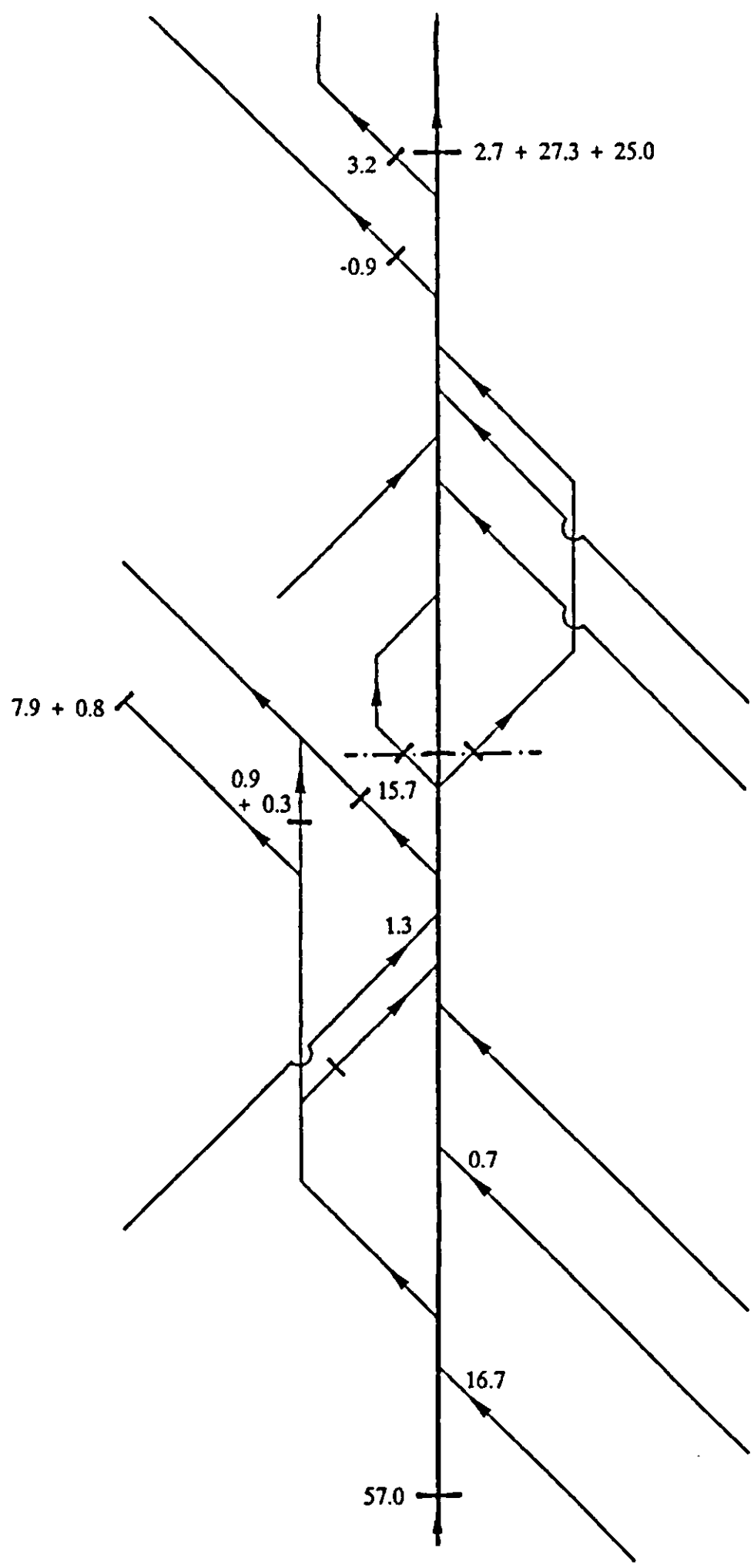
Opmerking 4: De bergingstoename, - 0,24 m^3/s, ofwel - 2,47 x 10^6 m^3 , op een oppervlakte van 1379,2 ha (van Dansik, bijlage B1) zou overeenkomen met een daling van de waterstand van 18 cm over de balansperiode.

De sluitfout bedraagt: in - (uit + berging) = 65,4 - (58,5 - 0,2) = 7,1 m^3/s.

Ter verklaring van deze sluitfout zijn de volgende onzekerheden aan te voeren:

- de uitzonderlijk grote lek van de stuw te Linne en de grote mogelijke fout daarin;
- meet- en modelfouten (daarover meer in een volgende paragraaf).

Het gehele systeem Ampsin - Neuville / Linne, zie figuur 5.



Figuur 5 In- en uigaande termen van het gehele systeem Ampsin - Neuville/Linne

In:	
Maas te Ampsin - Neuville	57,0 m^3/s
Ourthe te Angleur	16,7 m^3/s
Berwinne	0,7 m^3/s
Jeker	1,3 m^3/s
sluis Panheel	0,9 m^3/s
neerslag + Voer + Geul + Geleenbeek + Bosbeek, Itterbeek en Abeek en enkele direct op de Maas afwaterende gebieden	9,9 m^3/s
lozingen	2,2 m^3/s
grondwater	6,5 m^3/s
Totaal	95,2 m^3/s
Uit:	
Albertkanaal te Genk	7,9 m^3/s
lek te Genk	0,8 m^3/s
naar Zuid Willemsvaart te Neerharen	0,9 m^3/s
lek te Neerharen	0,3 m^3/s
naar Zuid Willemsvaart te Smeermaas	15,7 m^3/s
gemaal Panheel	p.m.
sluis Heel	3,2 m^3/s
sluis Linne	2,7 m^3/s
stuw Linne	27,3 m^3/s
lek stuw Linne	25 m^3/s
verdamping	0,7 m^3/s
onttrekking	1,5 m^3/s
Totaal	86,0 m^3/s
Bergingstoename	-/- 1,2 m^3/s

De sluitfout bedraagt: in - (uit + berging) = 95,2 - (86,0 - 1,2) = 10,4 m^3/s.
Ter verklaring van deze sluitfout zijn als onzekerheden aan te voeren alle hiervoor voor de beide deelsystemen afzonderlijk vermelde onzekerheden:

- toestroming van grondwater naar het Albertkanaal of inzijging van water uit het kanaal (deze is nog niet bepaald);
- de grootte van de verliezen te Genk;
- de uitzonderlijk grote lek van de stuw te Linne en de grote mogelijke fout daarin;
- meet- en modelfouten (daarover meer in een volgende paragraaf).

3 OPMERKINGEN BETREFFENDE HET GRONDWATER

De toestroming van grondwater naar het bovenstroomse deelsysteem is volgens een notitie, gebaseerd op het grondwatermodel van Dassargues in 1990, als volgt opgebouwd:

- uit het Krijt aan de westzijde van de Maas		1 m^3/s
- uit de kalksteen van Visé aan de oostzijde van de Maas		0,5 m^3/s
- uit alle andere aan de Maas grenzende heuvels		1,5 m^3/s
- uit het Albertkanaal		2,7 m^3/s
- opgepompt grondwater	-/-	0,4 m^3/s
Totaal		5,3 m^3/s

Deze opsomming is correct voor wat betreft het grondwatermodel. In de waterbalans voor het bovenstroomse deelsysteem past de term 2,7 m^3/s "uit het Albertkanaal" evenwel niet omdat dit een interne component is (van het Albertkanaal naar de Maas waar deze min of meer evenwijdig verlopen. Resteert derhalve 2,6 m^3/s. Overigens geldt dit cijfer nu. In de balans is, betrekkelijk willekeurig 3,4 m^3/s opgevoerd, zijnde het gemiddelde van 2,6 m^3/s en de eerder door Dollee opgegeven waarde van 4,2 m^3/s.

De toestroming van grondwater naar het benedenstroomse deelsysteem is als volgt opgebouwd:

- aan de oostzijde van zuid naar noord: (Verhagen, 1990)	
- plateau van Margraten	0,19 m^3/s
- plateau van Schimmert	0,06 m^3/s
- deelgebied tussen Beek en Sittard	0,51 m^3/s
- deelgebied tussen Sittard en Maasbracht	0,86 m^3/s
- aan de westzijde van zuid naar noord:	
- uit het Kempisch plateau tot de Nederlands - Belgische grens	1,10 m^3/s
- uit de Grote Slenk (Kok, 1988)	0,4 m^3/s
Totaal	3,1 m^3/s

In hoeverre de toestand in de onderzochte droge periode in 1979 hiervan verschilde, valt moeilijk te zeggen. Enerzijds is de natuurlijke aanvulling van het grondwater toen gering,

wellicht zelfs negatief, geweest. Anderzijds moeten de verhangen van het grondwater naar de Maas met de lage waterstanden groot geweest zijn. Welk effect het sterkst was valt zeker nu niet meer te achterhalen.

De informatie, vervat in een notitie d.d. 31.01.90 van prof. Monjoie, dat een voorstudie zou aangeven dat er uit het Kempisch plateau wel 30 m^3/s zou kunnen toestromen, maar overigens nog door nader onderzoek bevestigd zou moeten worden, lijkt onwaarschijnlijk hoog en is hier derhalve niet overgenomen.

4 MEET- EN MODELFOUTEN

Elke meting, van bijvoorbeeld een waterstand, kan behept zijn met een fout. Deze fout kan bestaan uit twee componenten, een systematische en een toevallige fout. Een systematische fout kan bijvoorbeeld ontstaan door een te hoge of te lage stand van een peilschaal; een toevallige fout kan ontstaan door onnauwkeurige aflezing.

Modelfouten bij de debietsbepaling kunnen ontstaan door het gebruik van een onnauwkeurige of niet meer van toepassing zijnde Q-h kromme. Berekende grondwatertoestromingen kunnen een modelfout bevatten, bijvoorbeeld door het gebruik van onnauwkeurige waarden voor het doorlaatvermogen (de kD-waarde).

Voorts dient gewaakt te worden tegen dubbeltellingen en hiaten. Twee voorbeelden volgen hier:

1 Onttrokken hoeveelheden kunnen, na gebruik, buiten het systeem worden afgevoerd ofwel, geheel of gedeeltelijk, in het systeem worden teruggevoerd. Omgekeerd kan water dat buiten het systeem is onttrokken, bijvoorbeeld als grondwater, in het systeem worden geloosd.

2 De wijze waarop het neerslagoverschot in de kleinere op de Maas afwaterende stroomgebieden is verantwoord, vraagt zorgvuldige analyse. Voor zover dit neerslagoverschot door de bodem afstroomt, kan dit ook ten dele rechtstreeks naar de Maas geschieden. Een zorgvuldige bepaling van de grondwaterscheiding is derhalve vereist. Het is de vraag in hoeverre dit in het afgesloten onderzoek is gedaan of kon worden gedaan.

5 CONCLUSIES

- De waterbalans van het bovenstroomse deelsysteem heeft een sluitfout van 3,3 m^3/s (meer in dan uit + berging), dat is 3,8 %.
- De waterbalans van het benedenstroomse deelsysteem heeft een sluitfout van 7,1 m^3/s (meer in dan uit + berging), dat is 10,9 %.
- De onderzoekers Mombers en van Dansik bezigen dezelfde cijfers voor de grootte van de debieten over de grens van de beide deelsystemen bij Borgharen, te weten de som van de afvoeren over de stuw te Borgharen, de overlaat Bosscheveld en de toevoer naar het Julianakanaal. Daarover bestaat blijkbaar overeenstemming.
- De waterbalans van het gehele systeem heeft een sluitfout van 10,4 m^3/s (meer in dan uit + berging), dat 10,9 %.
- De stroming van water van of uit het bovenstroomse deelsysteem is nog niet volledig in de waterbalans ingevuld; met name is de stroming naar of van het Albertkanaal tot Genk nog niet ingevoerd.
- Als gevolg van grondwaterwinning in de Nederlandse Maasvallei treedt mogelijk plaatselijk enige oeverinfiltratie langs de Maas of in de grindgaten op. Dit is een uitgaande term.
- De bij de conclusies 1, 2 en 4 berekende sluitfouten zijn wetenschappelijk bezien teleurstellend. Het is echter niet doenlijk daarin nu, ruim 11 jaar nadien, nog verbetering aan te brengen.

6 HOE VERDER?

Op grond van de laatste conclusie verdient het aanbeveling een nieuw onderzoek te verrichten in een komende droge periode, waarbij overigens ongetwijfeld weer andere getallen van toepassing zullen zijn, met name waar menselijke ingrepen (bijvoorbeeld toegenomen grondwaterwinning) in het geding zijn. Daarbij ware allereerst en vooraf lering te trekken uit de opgedane ervaringen voor wat betreft de te verzamelen gegevens, de mogelijke en de vereiste nauwkeurigheid daarvan. Dit geldt in het bijzonder voor de verliezen te Genk en de afvoer te Linne.

Voor de vaststelling van het debiet tussen het bovenstroomse en het benedenstroomse deelsysteem dat nu uit drie componenten bij Borgharen bestaat kan beter iets zuidelijker een akoustische debietmeter (ADM) geplaatst worden. Inmiddels is er blijkens informatie een ADM geplaatst bij Sint Pietersberg.

REFERENTIES

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO; 1986. Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik - Maasbracht. Rapporten en Nota's No. 15. Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO, 's Gravenhage.

DANSIK, J. VAN.; 1988. De waterbalans voor het stuwpand Linne op de Maas tijdens de droge periode van 1979, Afstudeerverslag. Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.

DORENMALEN, N. VAN, INCKEL, M., LIGEON, H., en RICHTERS, P.; 1988. De bijdragen van het plateau van Margraten en het plateau van Schimmert aan de voeding van de Maas. Verslag van een doctoraalonderzoek bij de vakgroep Bodemkunde en Geologie van de Landbouwuniversiteit Wageningen.

JESSEN, G. en WILLEKENS, E.; 1989. Voeding van de Maas in Midden-Limburg. Sectie Hydrogeologie, Vakgroep Bodemkunde en Geologie, Landbouw Universiteit Wageningen.

KOK, W.J.M.; 1988. Een hydrologische systeemanalyse in het stroomgebied van de Maas in het gebied Midden-Limburg. Vrije Universiteit Amsterdam.

MOMBERS, K.; 1987-1988. Bijdrage tot de studie van de waterbalans van het Maasbekken in hetgebied Luik - Venlo. Vrije Universiteit Brussel.

RAVE, J.M.M. en SCHURINGA, L.; 1987. Een hydrogeologische systeemverkenning van de bijdrage van de aquifers aan de Maasafvoer in het traject tussen Beek en Born. Vakgroep Bodemkunde en Geologie, Landbouw Universiteit Wageningen.

STOEPKER, K.E., VISSER, A. en LANGE, W.J. de.; 1989. Groundwater Modelling of the Kempian plateau and the Meuse valley. Free University, Amsterdam and Institute for Inland Watermanagement and Wastewater Research, Lelystad.

VAERENBERGH, W. VAN.; 1989. Studie van de regionale grondwaterstroming in het Kempisch Plateau en de Limburgse Maasvallei. Proefschrift Vrije Universiteit Brussel.

VERHAGEN, F.; 1990. Voeding van de Maas vanuit de aquifers (Oostelijke Maasoever zuidelijk Limburg). Vakgroep Bodemkunde en Geologie, Landbouw Universiteit, Wageningen.

WERKGROEP WATERKWANTITEIT VAN DE TECHNISCHE MAASCOMMISSIE (TMC); 1985. Verder onderzoek t.b.v. de verklaring van de sluitfouten in de waterbalansen Luik - Maastricht en Maastricht - Maaseik, zomer 1979.

Het hydrologisch onderzoek in het grensgebied Luik-Maasbracht; onderzoekresultaten 1985-1990
Rapporten en Nota's No. 26 van de CHO-TNO

METHODOLOGY AND OPERATIONAL USE OF THE REAL-TIME FLOOD FORECASTING MODEL OF THE BELGIAN PART OF THE RIVER MEUSE

D. Van Erdeghem, P.A. Troch and F.P. De Troch

ABSTRACT

In cooperation with the Ministry of Public Works, the Laboratory of Hydrology of the State University of Ghent has developed a real-time flood forecasting model for the river Meuse in Belgium. The flood forecasting model is based on hourly precipitation and discharge data, gathered in real-time by the telemetered data acquisition network, managed by the Ministry of Public Works. The mathematical frame of the forecasting model is of a modular kind: several hydrological models are linked by means of a hydraulic flood routing model. The hydrological (sub-)models incorporate the rainfall-runoff relationships for the major subcatchments of the river Meuse. Based on considerations concerning the available real-time data, the rainfall-runoff process is described by means of a linear lumped stochastic black-box modelling technique, yielding what is known as the transfer function noise model. The hydraulic flood routing model simulates the one-dimensional unsteady flow in open channels and is based on the complete de St.-Venant equations. This set of partial differential equations is solved using the finite difference method. Several types of boundary conditions and internal conditions, such as branched channels, reservoirs, tributaries and lateral inflow, can be taken into account. The (full) forecasting model (flood routing model with integrated rainfall-runoff models) has been tested on several historical flood events. Off-line forecasts of discharge for the river Meuse are made up to 12 hours ahead with a high accuracy.

1 INTRODUCTION

The river Meuse is one of the major rivers in Belgium. Rising in France, the river Meuse flows through Belgium (in the Ardennes) to the Netherlands and finally discharges into the North Sea. Important tributaries (subcatchments) who discharges into the Belgian part of the river Meuse are the Lesse, Sambre, Ourthe, Amblève and Vesdre. The river Meuse can be classified as a rain river: the water of the river can rise to a high level in a very short time due to heavy rainfall. During the past decades, several extreme floods in the catchment of the Meuse have occurred. A lot of the damage caused by flooding could have been avoided if these extreme floods would have been forecasted, in due time.

The efforts made by the Belgian Ministry of Public Works to improve flood control management of the river Meuse include structural as well as non-structural protecting measures. Several structural measures were carried out, such as enlargement and calibration of the cross-sections, modernization of the weirs, the development of a real-time hydrometric data monitoring system, etc.

To enhance these structural measures with non-structural measures, the Ministry has commissioned a research programme to the Laboratory of Hydrology of the State University of Ghent. This research programme includes the development of a real-time flood forecasting model (of the Belgian part of the river Meuse) and the implementation of the software on computer.

The flood forecasting model is based on hourly precipitation and discharge data, gathered in real-time by the data acquisition network managed by the Ministry of Public Works. The density of the monitoring network is such that the whole catchment of the river Meuse can be divided into subcatchments represented in the model by different modules. Each module consists of a mathematical model describing the dynamic relationship between the hydrological variables in the considered subcatchment.

In the following sections the forecasting model is described. It consists of two parts: a hydrological and a hydraulic part. The hydrological part incorporates the rainfall-runoff relationship for the main tributaries of the river Meuse. The hydraulic part routes the contributions of these tributaries using hydraulic flood routing.

2 HYDROLOGICAL FORECASTING MODELS

In general, developing a hydrological model for a catchment means a complete description of physical phenomena such as rainfall, evapotranspiration, infiltration, runoff, storage, groundwater flow,... In this flood study of the river Meuse, the hydrological models only incorporate the rainfall-runoff relationships for the main subcatchments.

Based on the available hydrological data in real-time and on the aim of the hydrological models, a linear lumped stochastic black-box modelling technique was chosen (Troch, Spriet and De Troch, 1988). In a first approach time-invariant transfer function noise models are developed to represent the rainfall-runoff process.

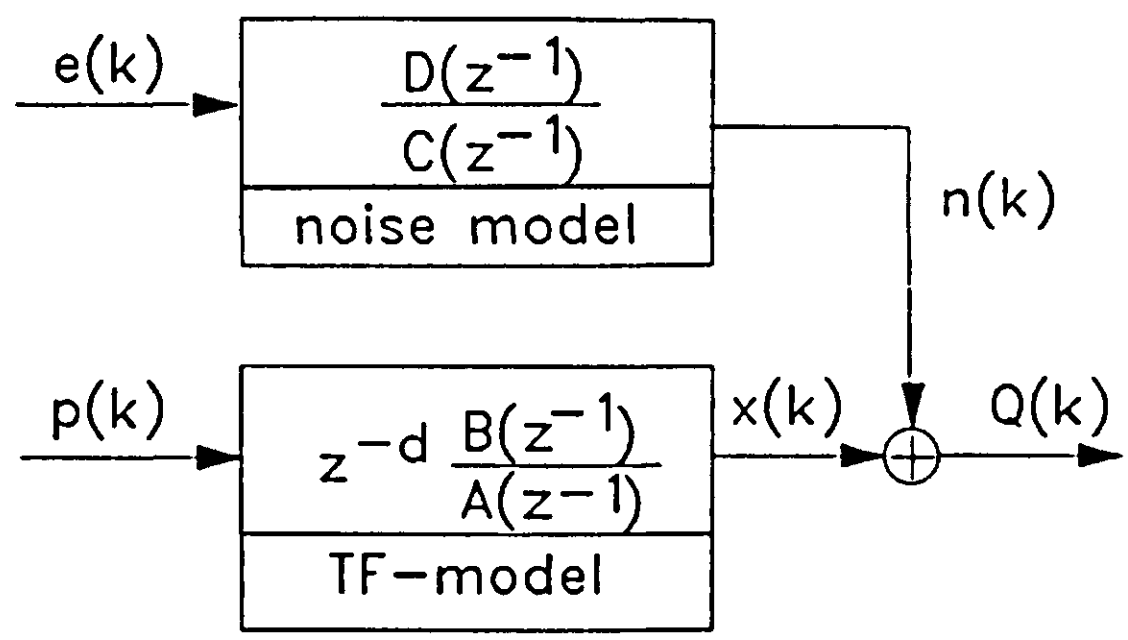


Figure 1 Blockscheme of the discrete transfer function noise model

As shown in figure 1, the transfer function noise (TFN) model consists of a deterministic part (TF model) and a stochastic part (noise model). The stochastic output $Q(k)$ can be written as:

$$Q(k) = x(k) + n(k)$$

or

$$Q(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} p(k-d) + \frac{D(z^{-1})}{C(z^{-1})} e(k) \qquad (1)$$

with: k = k-th time step

$Q(k)$ = discharge (measurable stochastic output)

$x(k)$ = deterministic output (free of noise)

$n(k)$ = noise component

$p(k)$ = precipitation (measurable input)

d = dead time (time delay)

z^{-1} = backward shift operator.

The polynomials A, B, C and D are of the form:

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + \ldots + a_{na} z^{-na} \\ B(z^{-1}) &= b_o + b_1 z^{-1} + \ldots + b_{nb} z^{-nb} \\ C(z^{-1}) &= 1 + c_1 z^{-1} + \ldots + c_{nc} z^{-nc} \\ D(z^{-1}) &= 1 + d_1 z^{-1} + \ldots + d_{nd} z^{-nd} \end{aligned} \tag{2}$$

with orders na, nb, nc and nd and parameters a_i, b_i, c_i and d_i.

The dead time d gives an idea about the (time) delay between rainfall and runoff.

The most important advantages of the choice of TFN models in hydrological modelling are:

- a limited number of parameters;
- the last known precipitation and discharge data are taken into account;
- the errors in the past are modelled by the noise model;
- extension to adaptive (time-variant) modelling is possible;
  (Troch, De Troch and Van Hyfte, 1989).

The main problem (disadvantage) is the identification procedure of the TFN models, which is rather complex. For this, a general useful methodology was developed by Troch, Spriet and De Troch (1988). Model identification includes structure characterization, parameter estimation and validation of the model.

Model structure is characterized by statistical analysis (cross-correlation) and using an objective automatic selection criterion, called BIC (Bayesian Information Criterion). The model parameters are estimated using the IV-AML (Instrumental Variable - Approximate Maximum Likelihood) algorithms. We refer to Young (1984); Spriet, Troch and De Troch (1987); Troch, Spriet and De Troch (1988) for more details.

Transfer function noise (TFN) models are identified for each of the main subcatchments. An important parameter in the TFN models is the dead time. The value of this time delay depends on the geomorphological characteristics of each subcatchment. Further, the dead time directly influences the lead time (forecasting horizon) of the forecasting model.

When forecasting up to the dead time "d", predictions can be completely made, based on known rainfall data. If however we want to generate forecasts ahead of the dead time, a quantitative rainfall prediction is required. To extend the lead time, the application of rainfall scenarios or some kind of rainfall modelling is necessary. For this reason, weather radar could be very useful in hydrological forecasting (De Troch et al., 1989).

TFN models are very suitable to calculate forecasts of discharge. Some results of forecasts generated by the TFN models are shown in figure 2. In this case forecasts ahead of the dead time are made with the help of a rainfall scenario which assumes: future precipitation is linear increasing (or decreasing) from the instantaneous (hourly) value to the mean precipitation.

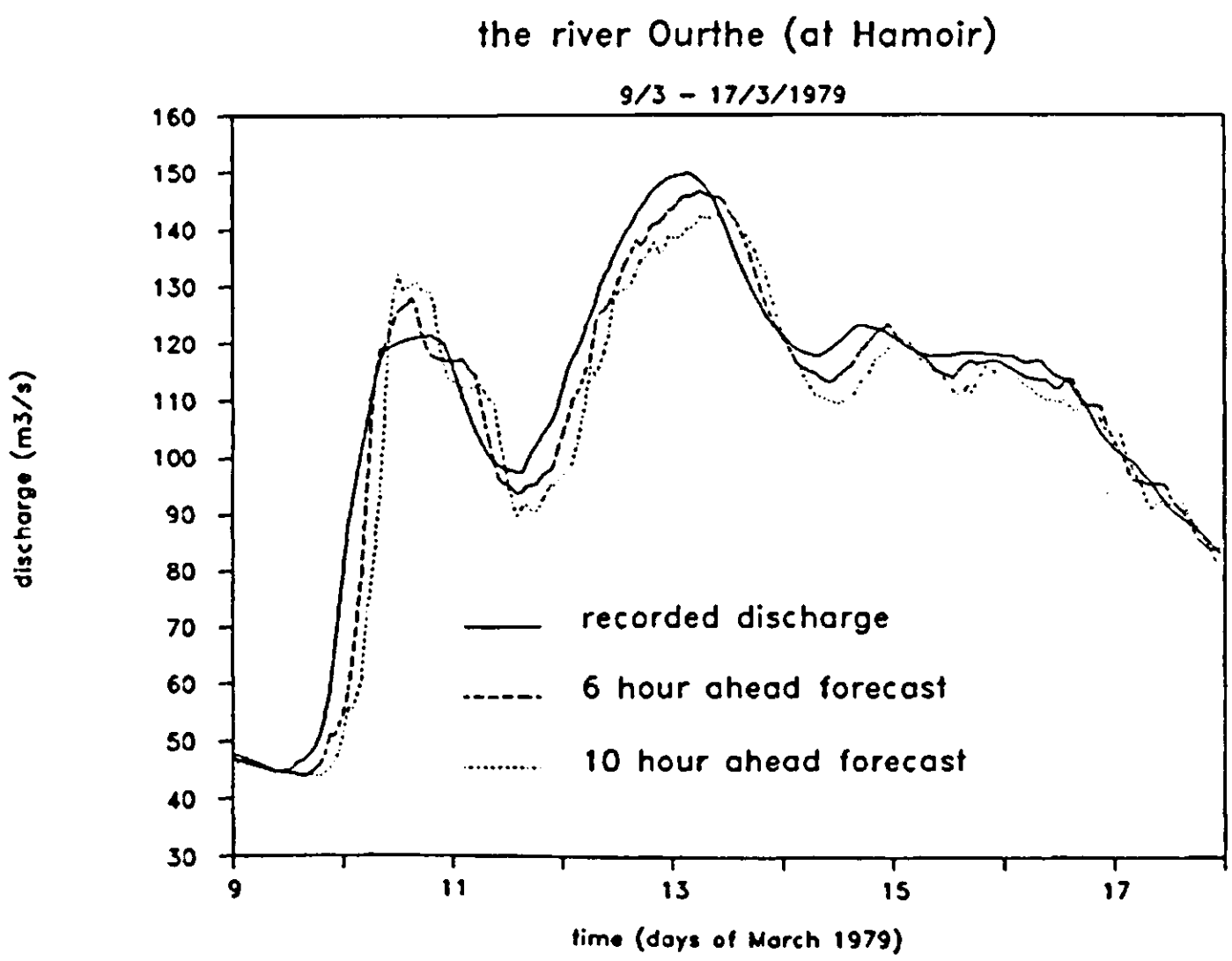


Figure 2 Six - and ten hours ahead forecasts of the discharge of the river Ourthe

3 HYDRAULIC FLOOD ROUTING

The hydraulic part of the flood forecasting model describes the water flow through the river channel. Governing equations expressing the one-dimensional unsteady flow in open channels are the de St.-Venant equations:

equation of continuity:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B}\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{q}{B} = 0 \tag{3}$$

equation of motion:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{QB}{A}\frac{\partial z}{\partial t} + \alpha\frac{Q}{A}\frac{\partial Q}{\partial x} - \alpha\left(\frac{Q}{A}\right)^2\frac{\partial A}{\partial x} + gA\frac{\partial z}{\partial x} + gA\frac{Q|Q|}{K^2} - \frac{Q}{A}q = 0 \tag{4}$$

with:

z = water level (m)
Q = discharge (m3/s)
x = distance along the river thalweg (m)
t = time (s)
A = area of the cross-section (m^2)
B = width of the cross-section (at water surface) (m)
q = lateral inflow (m^3/s.m)
α = Coriolis coefficient
K = conveyence factor
g = 9,81 m/s^2

This set of partial differential equations is solved using the finite difference method. The four-point implicit Preissmann-scheme was chosen (Mahmood and Yevjevich, 1975). Using the Preissmann scheme leads to a set of 2(N-1) algebraic equations with 2N unknowns (N = number of nodes). Two additional equations are supplied by the (exterior) boundary conditions. The resulting 2N equations are solved using the double sweep algorithm (Abramov and Andrieyev, 1963).

Assuming that subcritical flow occurs, two boundary conditions on each side (up- and downstream) of the river reach are required. Three types of boundary conditions can be used:

- water stages in function of time: $z = f(t)$;
- discharges in function of time: $Q = f(t)$;
- a rating curve: $Q = f(z)$ (not as an upstream condition).

Further, several internal conditions can be taken into account:

- (contributed discharges of) tributaries;
- lateral inflow;
- branched river channels;
- storage reservoirs, lateral weirs, ...

To start the flood routing model (at time t=0), initial conditions have to be known. The initial values of the variables in each node can be approximated by the equations for steady flow conditions. Simple methods like the Standard Step-method (Ven Te Chow, 1959) can be used.

4 FLOOD ROUTING APPLIED TO THE RIVER MEUSE

The Belgian part of the river Meuse is modelled using the above described technique. The ultimate choice of the section between which the flood routing is applied, depends on the availability of gauging stations which can be chosen as (up- and downstream) boundary condition. In this case, the hydrograph (observed in real-time) at the gauging station at Chooz (near the French-Belgian border) and the rating curve at the gauging station at Maaseik (Belgian-Dutch border) were taken as upstream and downstream boundary conditions, respectively.

All the major subcatchments for which real-time discharge data are available and discharging into the river Meuse between Chooz and Maaseik are taken into account as tributaries. These subcatchments contain the rivers: Houille, Hermeton, Lesse, Molignée, Bocq, Méhaigne, Ourthe, Amblève, Vesdre and Jeker. Exception is made for the river Sambre.

Instead of modelling it as a tributary, flood routing itself is applied to the river Sambre. This results in a branched network: one reach of the river Sambre and one reach of the river Meuse (Figure 3). Input and output from the man-made canals (see Figure 3) are also taken into account.

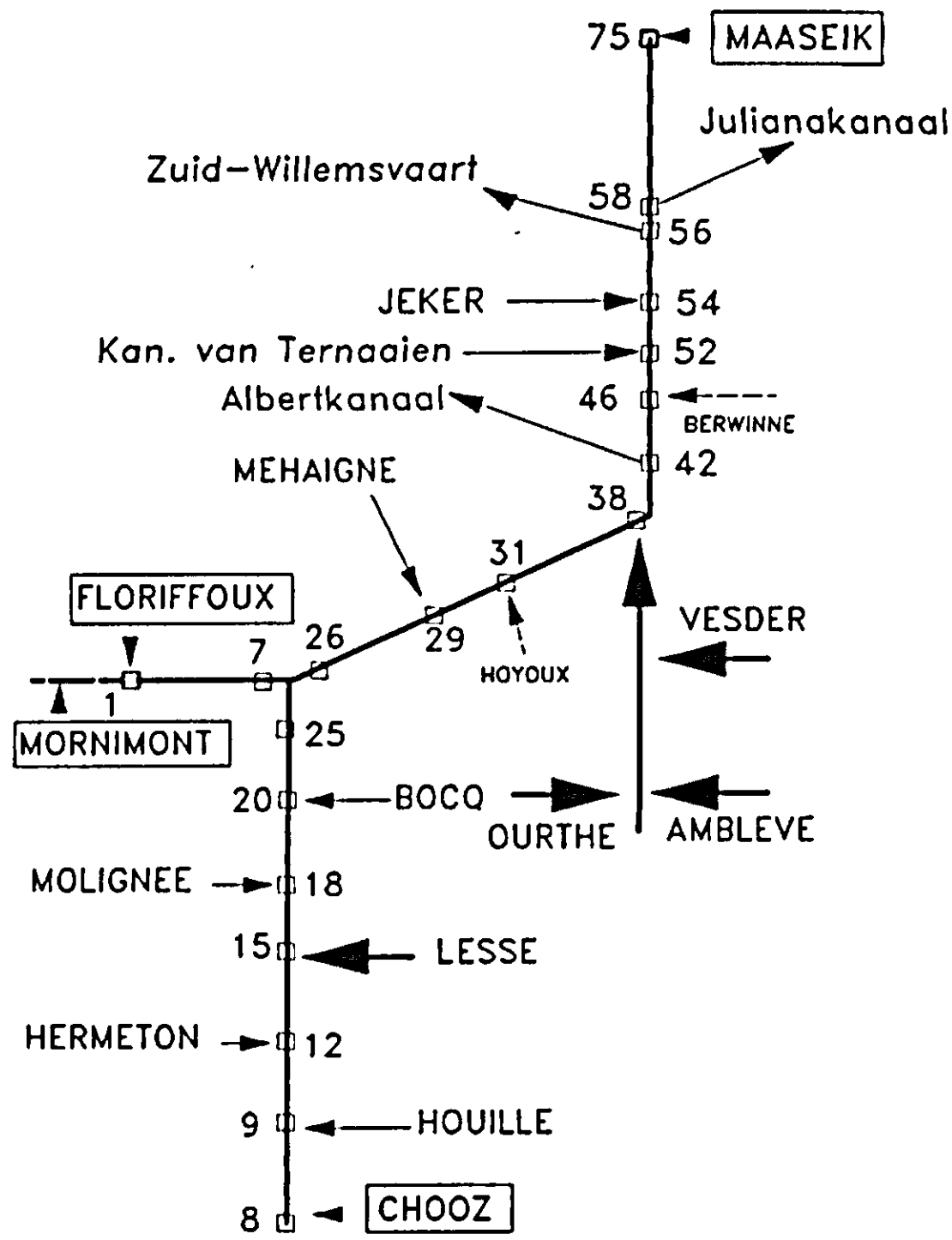


Figure 3 Schematization of the branched network (with 75 nodes) for flood routing

The discharge of the Sambre reach "Mornimont-Floriffoux" is taken as upstream boundary condition of the Sambre branch. This discharge is assessed by calculating the water surface profiles from 2 water stages (at Mornimont and Floriffoux). In future studies, the modelling of the Sambre branch will be expanded (to upstream), taking into account several (small) subcatchments.

Small subcatchments in the valley of the river Meuse, which are not measured in real-time, are taken into account as lateral inflow, modelled as a variable in time and space. The size of the lateral inflow is inferred from known discharges of representative measured subcatchments.

The calibration of the flood routing model consists in an appropriate geometrical description of the river channel and in defining the roughness coefficients. The roughness characteristics are determined in such a way that the computed discharges agree with the observed discharges as near as possible. To define the roughness coefficients quantitatively, the application of a criterion such as the minimization of the squared errors (between computed and observed discharges) is recommended (Haghi-Khatibi, Williams and Wormleaton, 1988).

5 THE FORECASTING MODEL

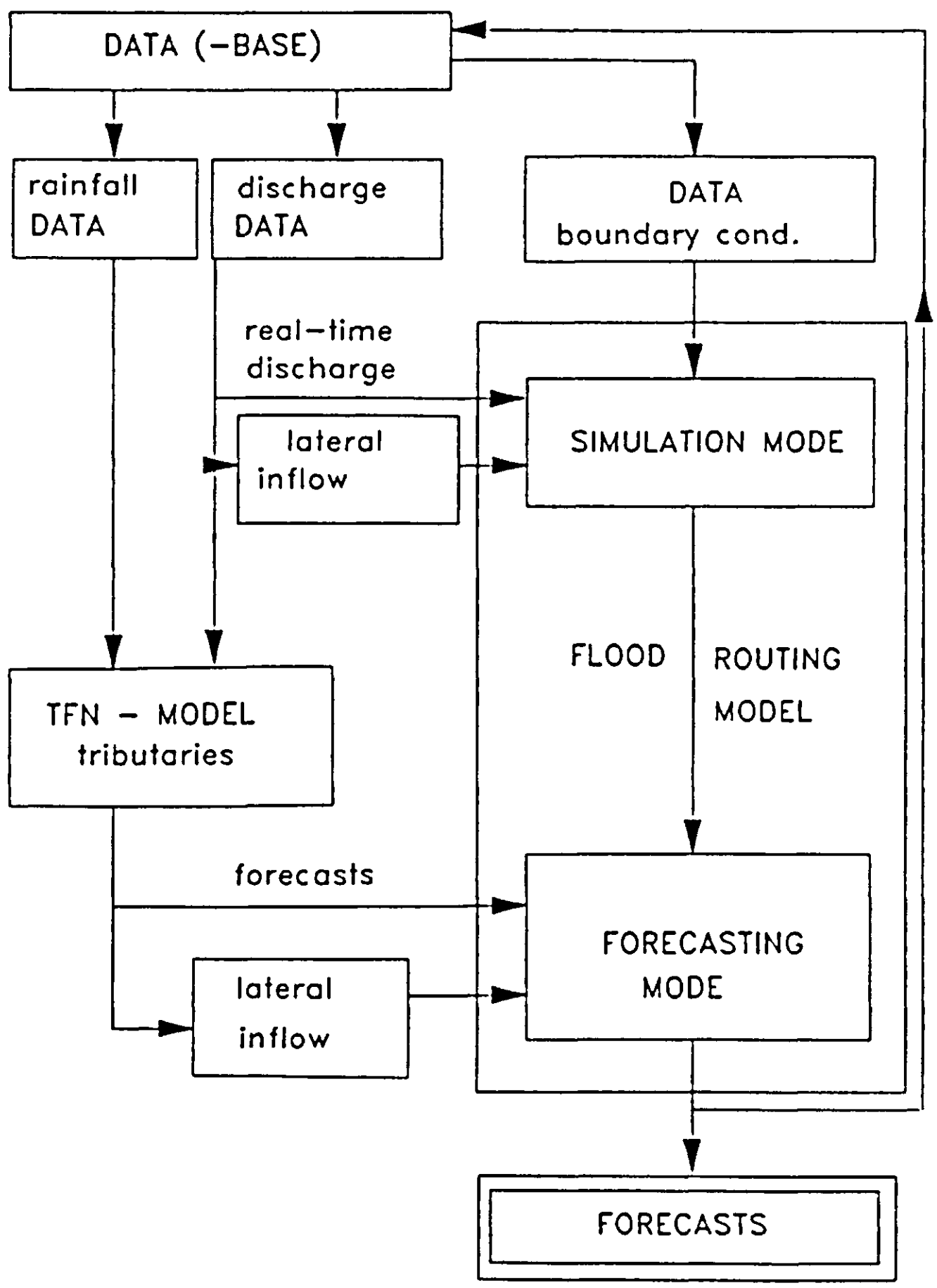


Figure 4 Flow chart representing the full forecasting model of the River Meuse

The rainfall-runoff models, developed for the main subcatchments are integrated into the flood routing model. This means that the mathematical frame of the (full) forecasting model is of a modular kind: several transfer function noise models for the main subcatchments are linked by the hydraulic flood routing model.

The forecasting model is working in two modes: a simulation mode and a forecasting mode (Figure 4). During the simulation mode, the measured discharges of the tributaries are taken into account. This means that the discharge of the river Meuse is simulated. During the forecasting mode, the forecasted discharges of the tributaries are taken into account and this means that the discharge of the river Meuse is forecasted.

The forecasting model has been tested on several historical flood events. Results of the forecasting of the flood event of July 1980 are shown in figures 5 and 6. Forecasts for the river Meuse are made up to 12 hours ahead with a satisfying accuracy. Figure 7 shows the performance of the forecasting model during the flood of February 1984 at Maaseik, the downstream boundary of the model.

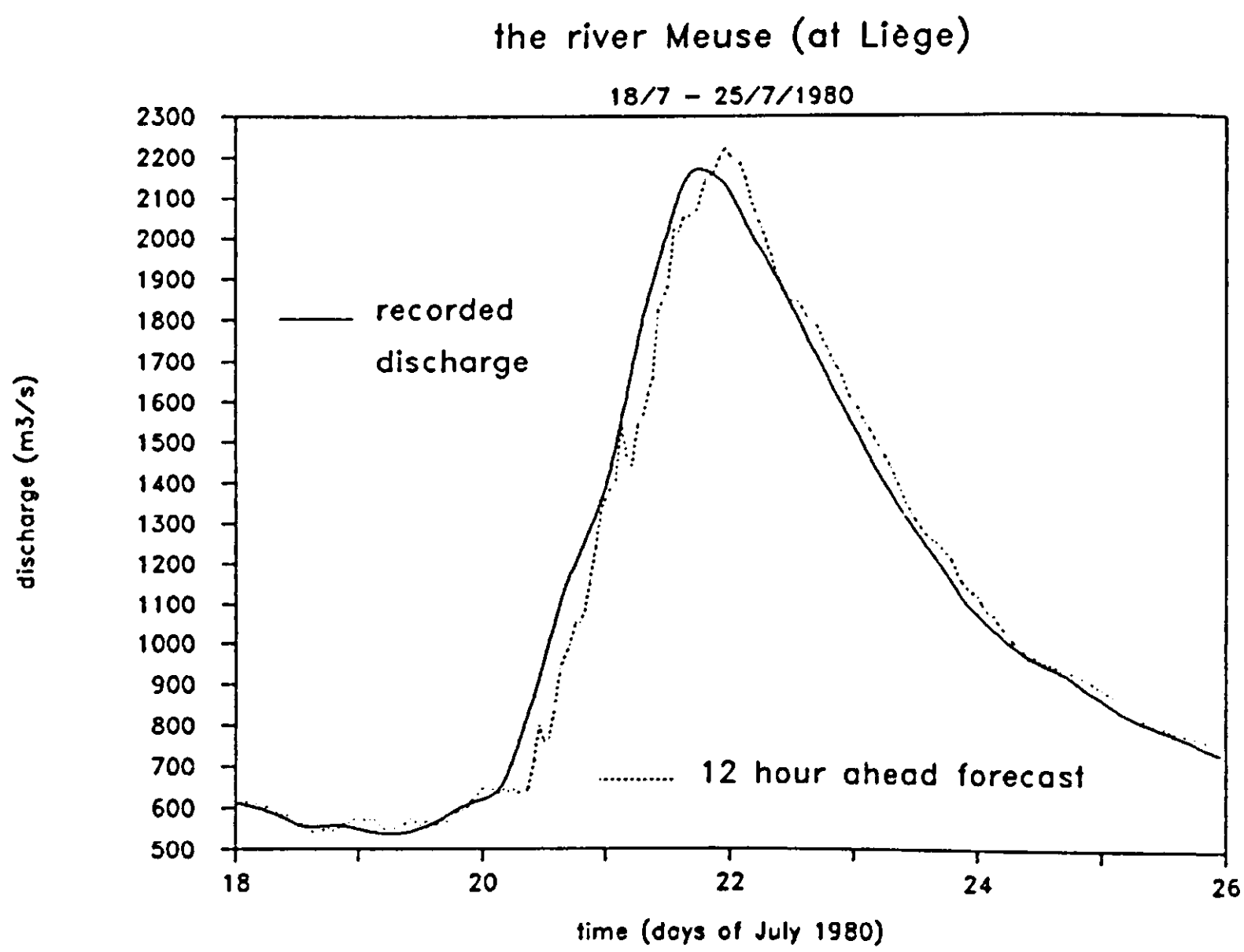


Figure 5 Forecasting the discharges of the river Meuse up to 12 hours ahead

Future research will concentrate on:

- taking into account the position of the movable weirs of the river Meuse in the flood routing model (for low and moderate high flow regimes);
- incorporating weather radar information into the real-time flood forecasting model (using forecasted rainfall amounts);
- taking into account the measured discharge at Maaseik to improve forecasting accuracy;
- quality control on real-time hydrological information.

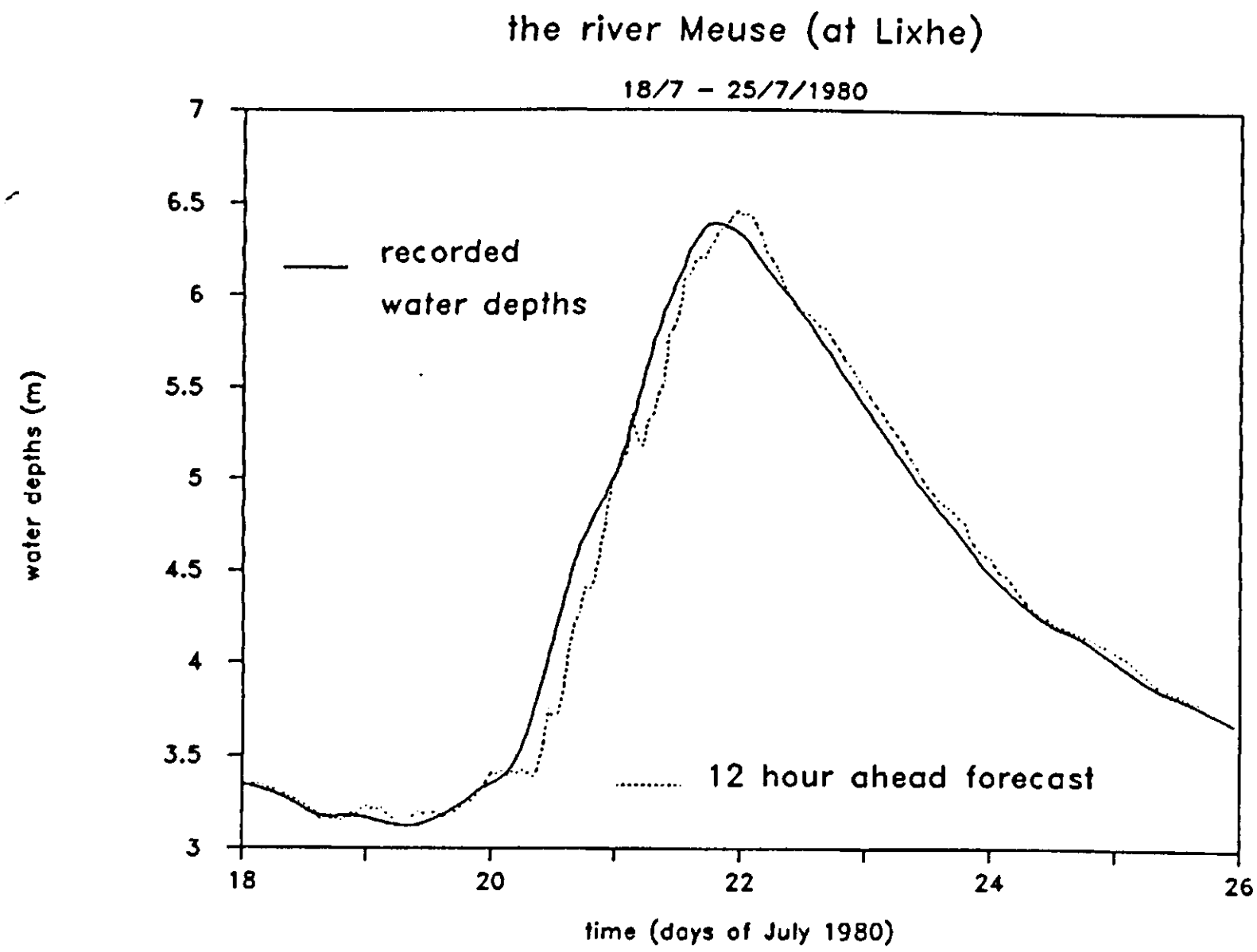


Figure 6 Forecasting the water depths of the river Meuse up to 12 hours ahead

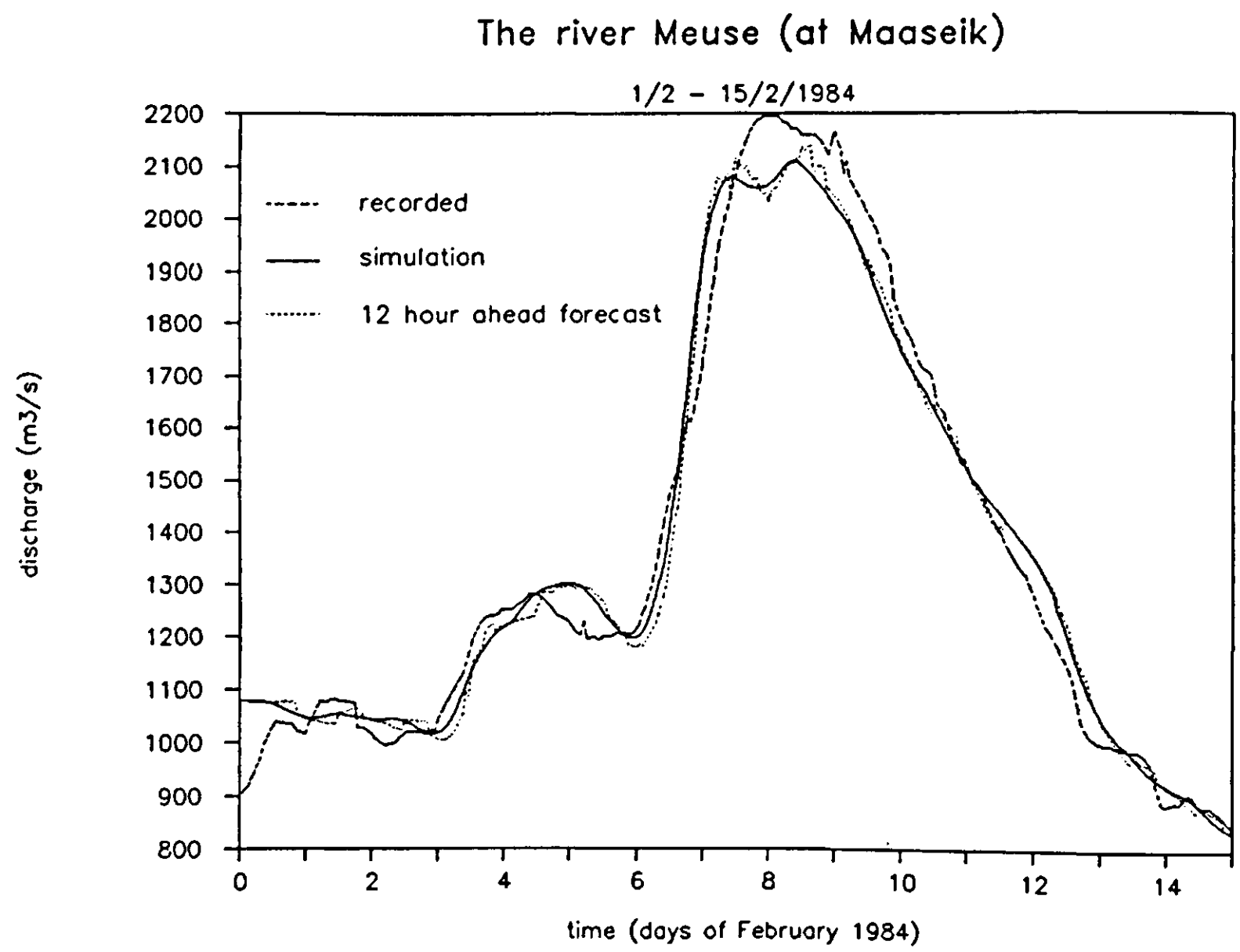


Figure 7 Forecasting the discharges of the river Meuse up to 12 hours ahead for the city of Maaseik

6 OPERATIONAL USE

The real-time hydrometric data monitoring system developed by the Belgian Ministry of Public Works is implemented on a MODCOMP computer with operating system MAX4. The software of the forecasting model of the River Meuse is developed for the DOS operating system running on most personal computers. Therefore, the need existed for a real-time link between the MODCOMP computer and an IBM PS/2 machine on which the forecasting model is implemented. This machine was chosen for its graphical possibilities and for its commonly known operating system. The real-time link between the two computers consists of a serial cable with appropriate software (Figure 8).

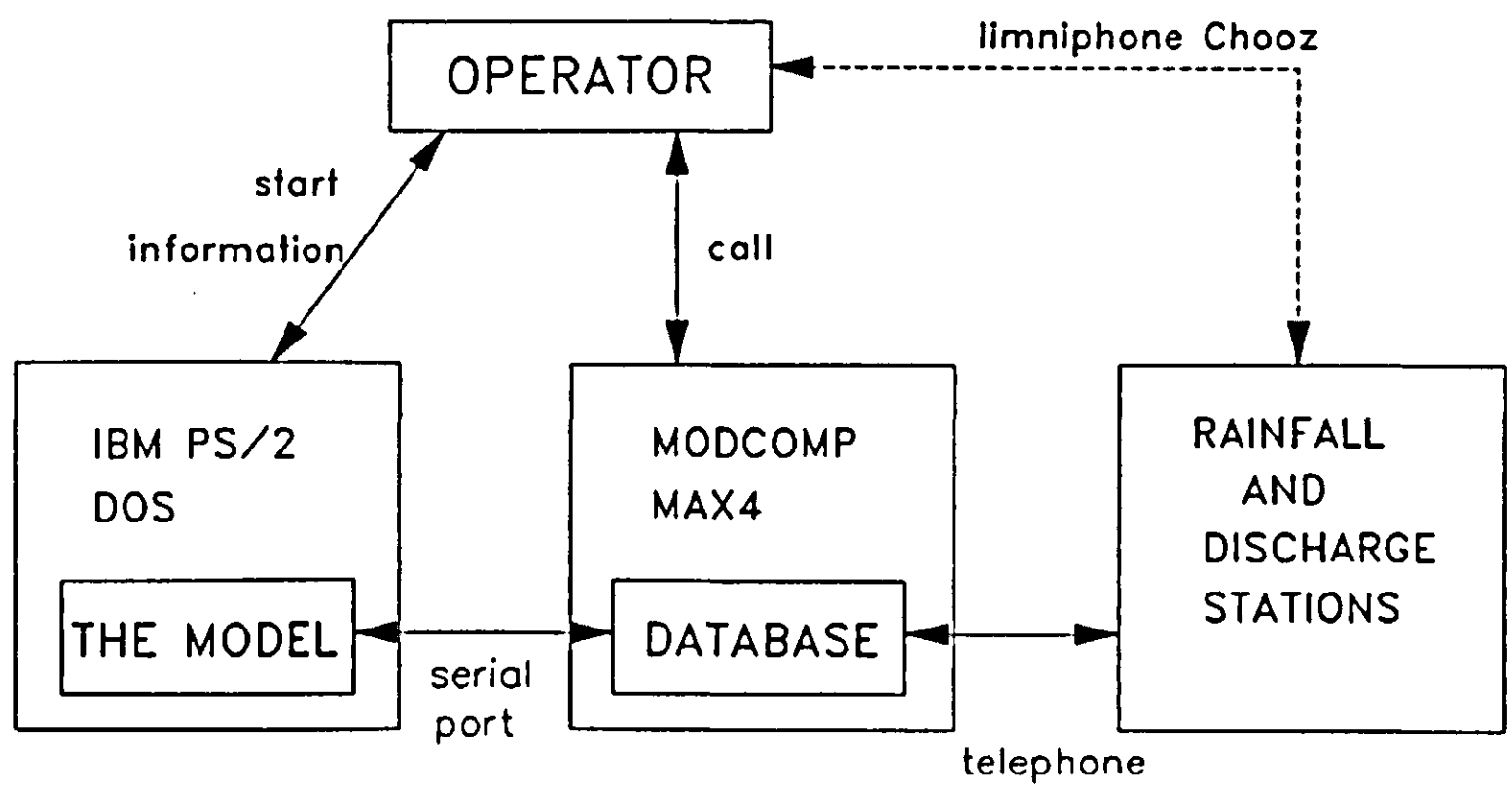


Figure 8 Data transmission during operation of the forecasting model

Figure 8 shows schematically the operation of the forecasting model in real-time. The operator starts up the model on the IBM PS/2 computer. Then, the MODCOMP computer starts a query to collect hourly discharge, water level and precipitation data. It should be noted that the station at Chooz (the upstream boundary condition) cannot be called automatically since there is no real-time link. The operator has to introduce the information about this station manually after consulting the limniphone at Chooz. These data are then transferred to the personal computer which starts the calculations. Tables 1 and 2 give an overview of the real-time stations used during forecasting mode. In case of missing data, the operator is asked to supply the necessary information. Results of the calculations (12 hours

ahead forecasts for the Meuse and its tributaries) are displayed using graphics and tables. In case of severe flooding danger, the operator can take the necessary precautions.

Table 1 Water level stations used during forecasting mode

Station	Station number (DiHO)	Type of data
Mornimont	73370111	water level
Floriffoux	73230111	water level
Chooz	89220102	discharge
Felenne	87410102	discharge
Hastière	81810102	discharge
Gendron	82210102	discharge
Warnant	81610102	discharge
Yvoir	81310102	discharge
Moha	72110102	discharge
Hamoir	58810102	discharge
Martinrive	66210102	discharge
Chaudfontaine	62210102	discharge
Kanne	55310102	discharge

Table 2 Rainfall stations used during forecasting mode

Station	Station number (DiHO)	Type of data
Perwez	G148	rainfall (mm/hour)
St.-Truiden	G183	rainfall (mm/hour)
Jalhay	G621	rainfall (mm/hour)
Ouffet	G649	rainfall (mm/hour)
Robertville	G662	rainfall (mm/hour)
Ortho	G690	rainfall (mm/hour)
Silenrieux	G784	rainfall (mm/hour)
Senzeilles	G785	rainfall (mm/hour)
Ciney	G817	rainfall (mm/hour)
Feschaux	G856	rainfall (mm/hour)
Libin	G892	rainfall (mm/hour)
Vresse	G943	rainfall (mm/hour)
Bouillon	G953	rainfall (mm/hour)
Fratin	G981	rainfall (mm/hour)
Kanne	T549	rainfall (mm/hour)
Battice	T607	rainfall (mm/hour)
Sart-Lez-Spa	T614	rainfall (mm/hour)
Sprimont	T651	rainfall (mm/hour)
Marche	T679	rainfall (mm/hour)
Bastogne	T697	rainfall (mm/hour)
Modave	T718	rainfall (mm/hour)
Mornimont	T748	rainfall (mm/hour)
Rochefort	T871	rainfall (mm/hour)
Daverdisse	T879	rainfall (mm/hour)
Nassogne	T882	rainfall (mm/hour)
Carlsbourg	T887	rainfall (mm/hour)
Maissin	T888	rainfall (mm/hour)
Sankt-Vith	T991	rainfall (mm/hour)

7 CONCLUSION

This paper describes the real-time flood forecasting model for the river Meuse, Belgium. This model combines both hydrological and hydraulic modelling techniques. The rainfall-runoff relationships for the most important subcatchments are modelled using linear stochastic black-box techniques. The propagation of a flood wave in the main channel of the river Meuse is modelled based on the complete de St.Venant equations and taking into account tributaries and lateral inflow. The forecasting model links the transfer function noise models representing the main tributaries with the hydraulic flood routing model.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Ir. J. Demoen of the Waterways Division; Ir. J. Heynderickx, Ir. Y. De Worm and Ir. J.F. Roland of the Service for Hydrological Studies

of the Belgian Ministry of Public Works for their continuing support and cooperation and for supplying hydrological data and the Royal Meteorological Institute of Belgium for supplying precipitation data.

REFERENCES

ABRAMOV, A.A. and ANDRIEYEV, V.B.; 1963. Application of the double-sweep method, Journ. of Appl. Meth. and Math., Vol. 3, nr. 2 (in Russian).

BOX, G. and JENKINS, G.; 1971. Time series analysis, forecasting and control, 2nd ed., Holden-Day, San Francisco, 533 p.

CHOW, V.T.; 1959. Open channel hydraulics, Mc Graw-Hill, New-York.

CUNGE, J.A.; HOLLEY, F.M. and VERWEY, A.; 1980. Practical aspects of computatio nal river hydraulics, Pitman Adv. Publ. Program, Boston, 415 p.

DE TROCH, F.P.; HEYNDERICKX, J.; TROCH, P.A. and VAN ERDEGHEM, D.; 1989. On the usefulness of weather radar data in real-time hydrological forecasting in Belgium, Seminar on Weather Radar Networking, COST 73, Sept. 1989, Brussels (in press).

HAGHI-KHATIBI, R.; WILLIAMS, J.J.R. and WORMLEATON, P.R.; 1988. The effect of data errors in the optimization of the Saint-Venant flood routing equations, Intern. Confer. on Computer Methods and Water Resources: Computational Hydraulics, eds. Ouazar et al., Morocco, 1988, Springer-Verlag, Berlin.

HIPEL, K.W.; 1990. Philosophy of model building, Proc. of the NATO-ASI on Stochastic Hydrology in Water Resources Systems, Peñiscola, Spain, Sept. 1989, (in press).

MAHMOOD, K. and YEVJEVICH, V.; 1975. Unsteady flow in open channels, Water Resources Publ., Fort Collins, Colorado, Vol. I, 484 p.

SPRIET, J.A.; TROCH, P.A. and DE TROCH, F.P.; 1987. Comparison of characterization methods for river catchment modelling, Proc. of UKSC Conference on Computer Simulation, Sept. 1987, pp. 202-208.

TROCH, P.A.; SPRIET, J.A. and DE TROCH, F.P.; 1988. A methodology for real-time flood forecasting using stochastic rainfall-runoff modelling, Intern. Confer. on Computer Methods and Water Resources: Computational Hydrology, eds. Ouazar et al., Morocco, 1988, Springer-Verlag, Berlin.

TROCH, P.A.; DE TROCH, F.P. and VAN HYFTE, J.; 1989. Modelling the time dependent nature of the rainfall-runoff relationship using on-line identification, Intern. Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, Salford, August 1989, (in press).

YOUNG, P.; 1984. Recursive estimation and time series analysis - An introduction, Springer-Verlag, Berlin, 300 p.

Het hydrologisch onderzoek in het grensgebied Luik-Maasbracht; onderzoekresultaten 1985-1990
Rapporten en Nota's No. 26 van de CHO-TNO

HOOGWATERVOORSPELLING VOOR DE NEDERLANDSE MAAS

H.E.J. Berger

ABSTRACT

In this article a flood forecasting model of the river Meuse in the Netherlands is presented. The model can be divided in two parts: first the forecast of the frontier-station of Borgharen-Dorp, and secondly the forecast of the downstream part of the Meuse, using the forecasts of Borgharen-Dorp as an input. The geomorphological system of the river upstream of Borgharen-Dorp is, in the view of flood-forecasting, complex, as many important tributaries discharge near the frontier and react relatively fast to rainfall. Therefore several types of hydrological models are included in the model. This led to a relatively great data demand. This paper describes how subdivision took place and how modelling was done. It is shown which practical problems have been encountered, and how they were solved. In the paper a link is made between modelling and the real-time data transmission system. The first experiences in real-time are described.

1 INLEIDING

Hoogwaters op de Maas kunnen grote schade veroorzaken. De schade kan beperkt worden indien van te voren bekend is welke waterstand wanneer zal optreden. Hiertoe is een hoogwatervoorspelling noodzakelijk. Deze dient op tijd bij de belanghebbenden bekend te zijn in verband met de te nemen maatregelen. In de praktijk is een voorspeltijd (lead-time)

van 12 uur een minimum, en is een tijd van 24 uur gewenst.

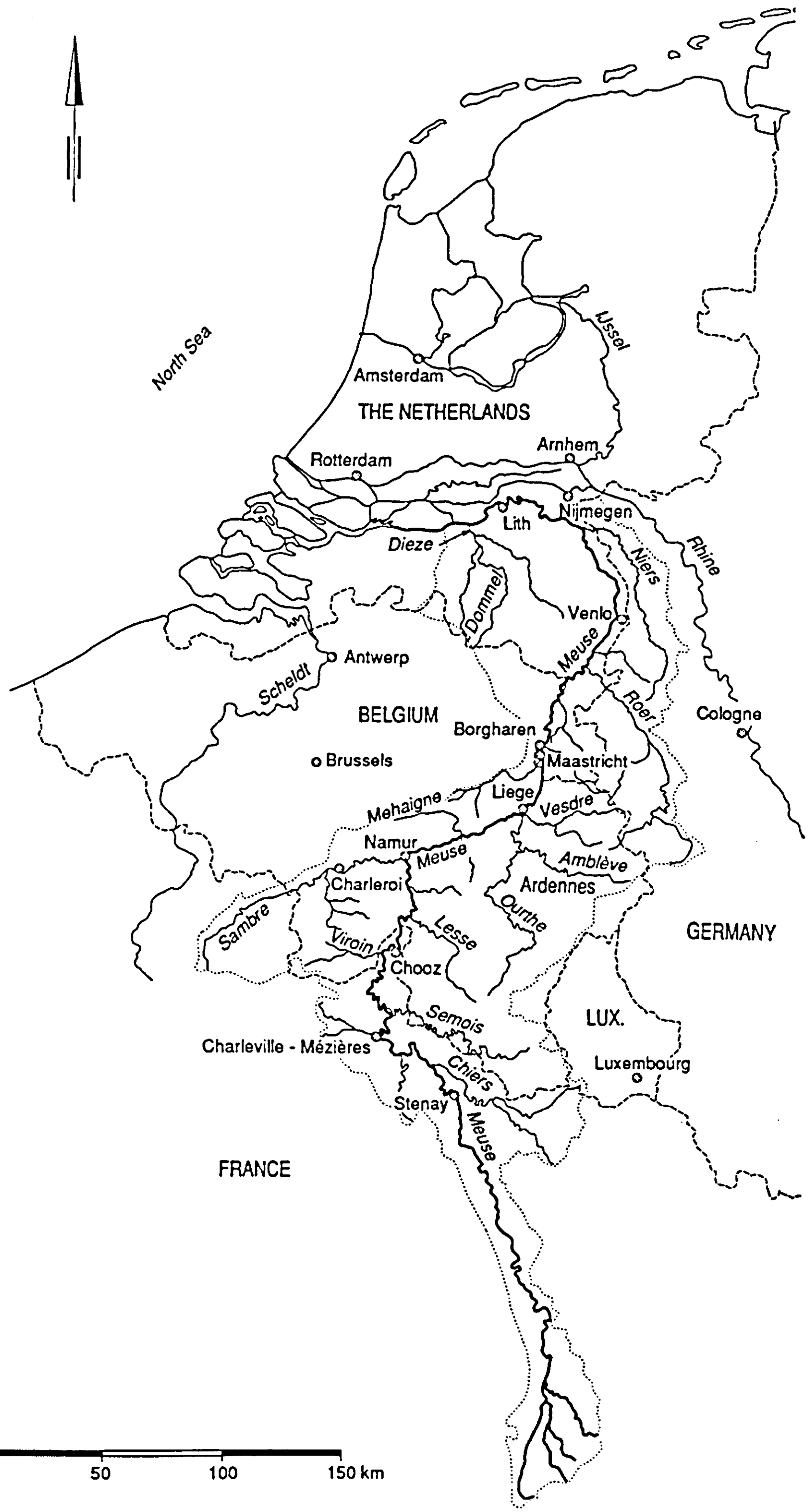
In Nederland wordt de Maas gezien als een lastige rivier met betrekking tot de afvoervoorspelling. Oorzaak vormt de geomorfologische opbouw van het stroomgebied. Er is bovenstrooms de Nederlandse grens geen afvoermeetpunt aan te wijzen waarlangs het leeuwedeel van de afvoer stroomt en dat een looptijd van 24 uur tot de grens kent. In het verleden zijn verschillende studies naar hoogwatervoorspellingsmodellen gedaan, maar de resultaten konden teleurstellend genoemd worden. Twee oorzaken zijn daarvoor aan te wijzen: Ten eerste was het hydrologische systeem van het stroomgebied van de Maas dat in het buitenland ligt onvoldoende bekend, en ten tweede was de hoeveelheid gegevens die gebruikt kon worden beperkt. In de hier gepresenteerde studie naar de ontwikkeling van een nieuw hoogwatervoorspellingsmodel is begonnen met het uitvoeren van een onderzoek naar het hydrologische systeem van de Maas, resulterend in een systeemanalyse. Daarna is het hoogwatervoorspellingsmodel ontwikkeld, waarbij dankbaar gebruik is gemaakt van de kennis uit de systeemanalyse. Het ontwikkelde hoogwatervoorspellingsmodel blijkt een grotere gegevensbehoefte te hebben dan voorgaande modellen.

Overigens is naast dit hoogwatervoorspellingsmodel ook een laagwatervoorspellingsmodel ontwikkeld (Korsten, 1988), waarvan de beschrijving buiten het kader van dit artikel valt.

2 DE MAAS TIJDENS HOOGWATERS

De verschillen in hydrologische eigenschappen in het stroomgebied van de Maas treden bij een hoogwater duidelijk aan het licht.

Het meest bovenstroomse gedeelte, de Lotharingse Maas (de rivier bovenstrooms van Stenay, zie Figuur 1) kenmerkt zich door een smal stroomgebied, een winterbed dat kilometers breed kan zijn, en een relatief flauw verhang. Hoogwater golven planten zich daar relatief langzaam voort. Het komt vaak voor dat de top van de afvoergolf van de Lotharingse Maas pas in Nederland gemerkt wordt, wanneer het Nederlandse hoogwater al lang over zijn top heen is.



Figuur 1 Het stroomgebied van de Maas

Benedenstrooms van Stenay begint de Ardense Maas, die loopt tot aan de Nederlandse grens. Hier is het verhang relatief groot, en is met name in het Belgische deel het winterbed smal. Er vindt dus weinig hoogwaterberging in de rivier plaats, wat van invloed is op de looptijd en golfafvlakking. De meest belangrijke zijrivieren van de Maas, althans met betrekking tot hoogwaters, monden in de Ardense Maas uit, zoals de Ourthe en de Sambre. Door de slecht doorlatende ondergrond en het heuvelachtige karakter van het landschap reageren deze zijrivieren snel op de gevallen regen.

Vanaf de Nederlandse grens verandert het karakter van de rivier. Het verhang wordt kleiner, het winterbed wordt breder, en de zijrivieren die in de Maas uitmonden hebben een geringe afvoer. Alleen de Roer levert een belangrijke bijdrage aan de afvoer; die van de Niers en de Dieze zijn veel kleiner.

3 DE SYSTEEMANALYSE

In de systeemanalyse is onderzocht hoe de hydrologische kringloop in het stroomgebied van de Maas functioneert, welke onderdelen daarbij van belang zijn voor de hoogwatervoorspelling, welke gegevens noodzakelijk en gewenst zijn en welke gegevens beschikbaar zijn en wat de betrouwbaarheid daarvan is. Bij de uitvoering van het werk is contact geweest met diverse onderzoeksinstanties en beheerders. Het blijkt dat veel informatie slecht of niet schriftelijk is vastgelegd.

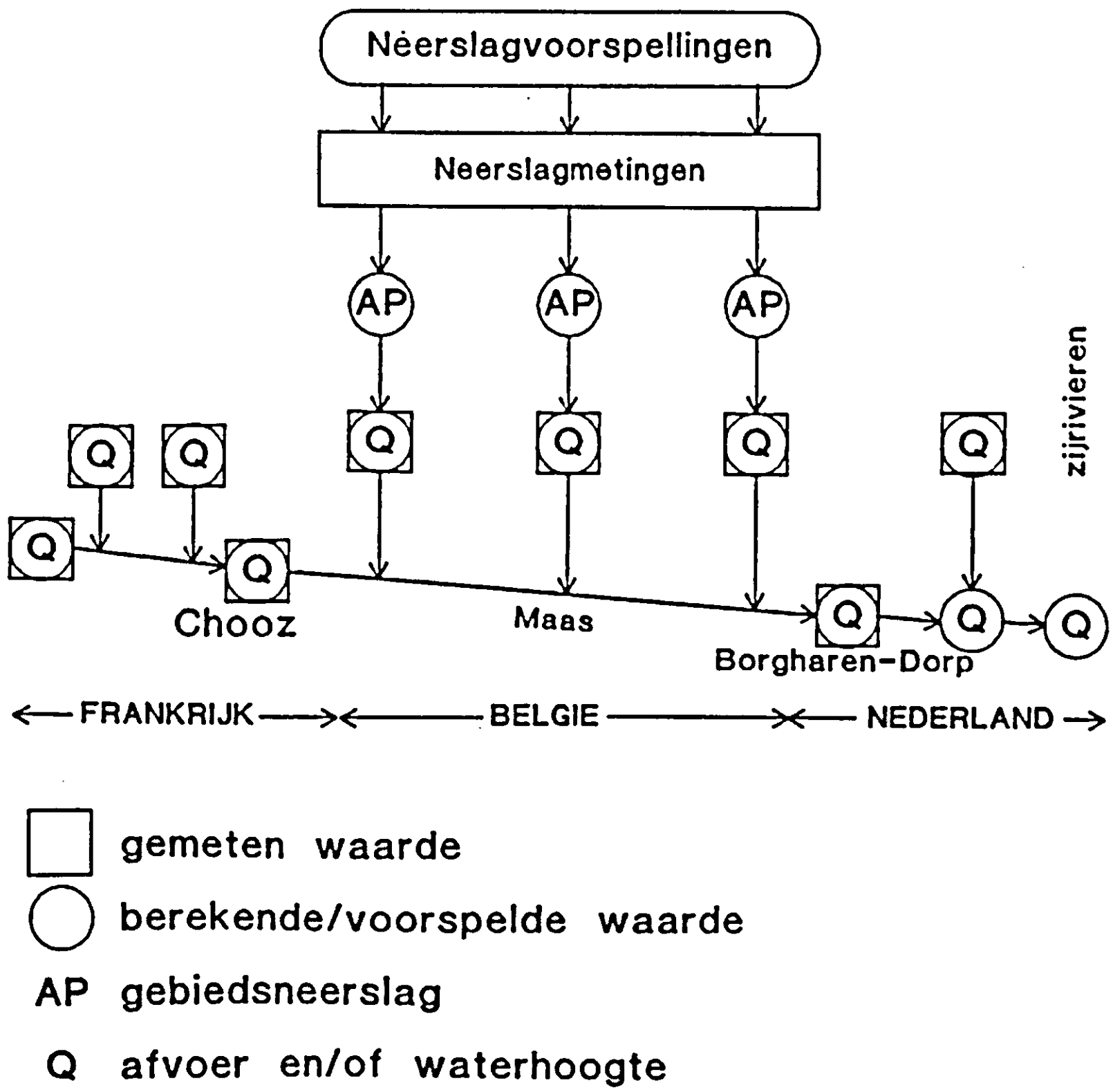
Uit de hydrologische systeembeschrijving kan worden afgeleid waar het water van de afvoergolf vandaan komt, en welke delen van het proces nog wel en welke delen niet meer gemodelleerd moeten worden voor een 24-uursvoorspelling van Borgharen-Dorp. Zo blijkt ook een gedeelte van de Franse Maas gemodelleerd te moeten worden en zijn voor de Ardennen neerslagvoorspellingen onontbeerlijk. Voor de ontwikkeling van het hoogwatervoorspellingsmodel zijn ook de onderzoeken naar niet-natuurlijke invloeden op de afvoergolf van belang geweest (bijvoorbeeld stuwmeren).

Het stroomschema van het uiteindelijk ontwikkelde model is weergegeven in Figuur 2. Ter vereenvoudiging is in het schema geen onderscheid gemaakt tussen waterhoogten en afvoeren. In de meeste gevallen zijn de afvoeren bepaald door middel van waterhoogten en

afvoerkrommen.

Bij het stroomschema kunnen de volgende opmerkingen geplaatst worden:

- De voorspellingen voor Borgharen-Dorp zijn veel complexer van aard dan voor de overige punten van de Nederlandse Maas.
- De overgang van het ene modeltype naar het andere bevindt zich vaak nabij een landsgrens. Dit is geen toeval: het karakter van de Maas en haar zijrivieren verandert, maar ook de beschikbare tijdreeksen en de gegevens van het stroombed, alsmede de looptijd van de golf tot de Nederlandse grens.
- Bij het opstellen van het stroomschema is rekening gehouden met de gegevensinwinning in real-time.
- Neerslagvoorspellingen zijn alleen van belang voor de Ardennen, omdat deze dicht bij het grensmeetstation Borgharen-Dorp liggen en snel op regen reageren.



Figuur 2 Vereenvoudigde weergave van het stroomschema van het hoogwatervoorspellingsmodel

4 DE FUNCTIONALITEIT VAN HET MODEL

Reeds bij de ontwikkeling dient uitgebreid aandacht te worden besteed aan de functionaliteit van het model. Onder functionaliteit wordt hier verstaan het geheel van aspecten in onderlinge samenhang dat een succesvol gebruik van het model mogelijk maakt. De functionaliteit van het systeem wordt in belangrijke mate bepaald door de zwakste schakel. Ook de te bereiken nauwkeurigheid behoort tot de functionaliteit.

De functionaliteit van een real-time voorspellingsmodel wordt vergroot, indien:

- alleen real-time gegevens gebruikt worden, die met grote zekerheid ook in real-time te verkrijgen zijn;
- ook betrouwbare uitkomsten worden verkregen indien bepaalde gegevens ontbreken;
- de rekentijd beperkt is. Een voorspelling van een aantal uren vooruit, met een rekentijd die even groot is, is weinig zinvol. Overigens spelen ook de tijd benodigd voor data-acquisitie, interpretatie van uitkomsten en de tijd voor het verspreiden van de voorspellingen een rol in de lead-time van de hoogwatervoorspelling;
- de hoeveelheid benodigde gegevens in real-time zo gering mogelijk is. Een te grote hoeveelheid invoergegevens vergroot de complexiteit van het model en dientengevolge de kans op storingen, en verkleint het enthousiasme van de voorspeller om het model te gebruiken;
- het model gebruikersvriendelijk is. Dit geldt zowel voor de invoer als de uitvoer van het model,
- de voorspellers goed met het model weten om te gaan en zijn uitkomsten op waarde weten te schatten; en
- de gegevens op elk moment van de dag zeer recent zijn. Voor het Maasgebied is hier nog winst te behalen. De real-time gegevens zijn voor een belangrijk deel afkomstig van externe organisaties. Rijkswaterstaat is van hun meetprogramma afhankelijk voor de gegevens.

Opgemerkt wordt dat deze lijst niet uitputtend is.

De invloeden van de in de lijst genoemde aspecten op de nauwkeurigheid van de voorspelling kunnen eenvoudig door de lezer kwalitatief worden ingeschat. De nauwkeurigheid van de voorspellingen is overigens moeilijk vooraf te kwantificeren. Niet alleen de betrouwbaarheid van de gemeten afvoeren en afvoervoorspellingen is van belang,

maar ook de looptijd van het meetstation waarvoor de voorspelling wordt gemaakt tot de Nederlandse Maas, en de onderlinge correlatie van de fouten in de afvoervoorspellingen van de zijrivieren. Echter, de nauwkeurigheden van afvoervoorspellingen van de zijrivieren zijn weer afhankelijk van de nauwkeurigheden van de neerslagmetingen, enzovoort.

5 DE MODULES VOOR DE HOOFDTAK VAN DE RIVIER

Nederlandse Maas:

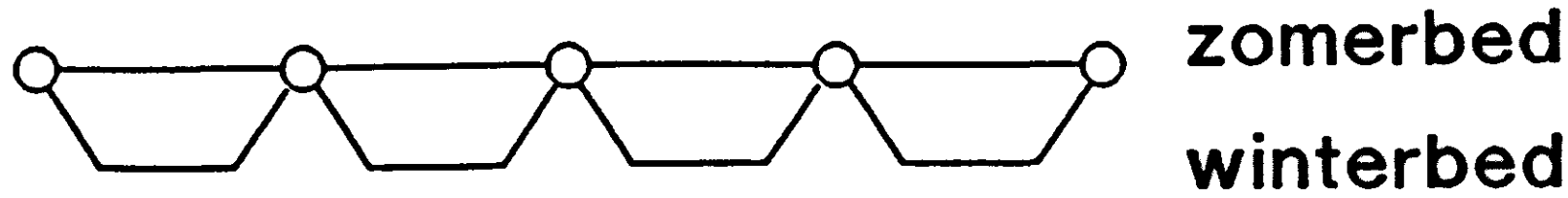
Voor de modellering van de Nederlandse Maas is een hydraulisch één-dimensionaal hydrodynamisch stromingsmodel gebruikt (ZWENDL). Deze keuze maakt het mogelijk de verschillen in eigenschappen van zomerbed en winterbed in het model te onderscheiden. Er worden 3 vormen van stroming (en stilstand) onderscheiden:

a stroming in het zomerbed;

b stroming in het winterbed;

c stilstand in het winterbed.

Door deze keuze kan niet volstaan worden met een enkelvoudige aaneensluiting van knopen en vakken, maar is een parallelbaan in de schematisatie noodzakelijk (Figuur 3). Daarbij is één baan gereserveerd voor het zomerbed, en één voor het winterbed (zowel stroming als berging). Het model is hierdoor veranderd in een 1^+-dimensionaal model.



Figuur 3 Schematische weergave van de ligging van knopen en vakken voor de Nederlandse Maas

Er is overwogen om ook de uitwisseling van water tussen zomerbed en winterbed via de zomerkade in aparte vakken te modelleren, maar de merkwaardige afmetingen van deze vakken (zeer kort en zeer breed) veroorzaken problemen met betrekking tot de stabiliteit van de berekening. Het apart modelleren van linker- en rechteroever is achterwege gelaten wegens de beperkte geheugen capaciteit van het model, de grotere rekentijd en de verwachte

geringe verbetering in vergelijking met één parallelbaan.

Zoals bij iedere modellering van een hydrodynamisch stromingsmodel is begonnen met de situering van de knopen. Deze zijn gelegd bij meetstations, aftakkingen, voor en achter stuwen, op plaatsen met belangrijke veranderingen in het profiel en, teneinde de vaklengte beperkt te houden, ook nog op enkele andere plaatsen. Uiteindelijk is voor het ca. 200 km lange traject een schematisatie met ca. 200 vakken en 100 knopen ontwikkeld. Bovenstroomse randvoorwaarde vormt de afvoer bij Borgharen-Dorp, benedenstrooms de waterstand ver benedenstrooms van Lith. Lith is het meest stroomafwaartse punt waarvoor waterstanden worden voorspeld.

Het zomerbed van de rivier kan relatief eenvoudig worden gemodelleerd met behulp van dwarsprofielen van de rivier. Daarbij vormt de grote hoeveelheid beschikbare gegevens overigens eerder een obstakel dan een voordeel. Belangrijke vraag is dan ook hoe al deze gegevens gerepresenteerd zouden moeten worden in het kleine aantal data dat het model ZWENDL voor een vak toelaat. Met behulp van een geschikte rekenprocedure is, uitgaande van de bodemprofielen en rekening houdend met de verhanglijn van de bodem, de ZWENDL-schematisatie vastgesteld.

De modellering van het winterbed is minder eenvoudig. Allereerst is de stroomlengte van het winterbed niet eenduidig. Bij lagere waterstanden stroomt het water in het winterbed vaak over een ander traject en dus een andere lengte dan bij hogere. Ook kunnen er verschillen in stroomlengte optreden tussen linker- en rechteroever. In het model ZWENDL mag echter slechts 1 lengte voor een bepaald vak worden opgegeven. Omdat deze lengte niet eenduidig te bepalen is, is in de meeste gevallen de lengte gelijk verondersteld aan die van het zomerbed. De bergende breedte werd bepaald door het bergend oppervlak (bepaald voor niveaus parallel aan het bodemniveau van het zomerbed) te delen door de lengte van het winterbed. De stroomsnelheden in het winterbed kunnen sterk variëren. In ZWENDL wordt echter slechts onderscheid gemaakt in een wel en een niet meestromend deel. Met behulp van WAQUA-kaarten (die een gedetailleerd beeld van de stroming geven, Bastings, 1989) is een geschikte onderverdeling gemaakt.

Indien de afvoer laag is, zal zich in het prototype geen water bevinden in het winterbed. Dit levert bij de simulatie problemen op in verband met de stabiliteit van de berekening, met name op het moment dat het winterbed begint bij te dragen aan de afstroming. Teneinde instabiele berekeningen te voorkomen wegens het ontbreken van water in bepaalde vakken, zijn in alle winterbedvakken smalle gootjes aangelegd. Deze gootjes, die enkele meters breed zijn en reiken van het laagste punt in het winterbed tot het niveau van de bodem van het zomerbed, hebben een verwaarloosbare invloed op de totale stroming, maar dragen sterk bij tot de stabiliteit van de berekening. Aan de bovenzijde van de gootjes is enige afronding noodzakelijk om al te grote veranderingen van het profiel in de hoogte te vermijden. De hydraulische straal is berekend zonder de gootjes in beschouwing te nemen.

Tijdens hoge afvoeren zijn de stuwen in Nederland buiten bedrijf. Deze zijn in de modellering dan ook standaard opgenomen als geheel geopend.

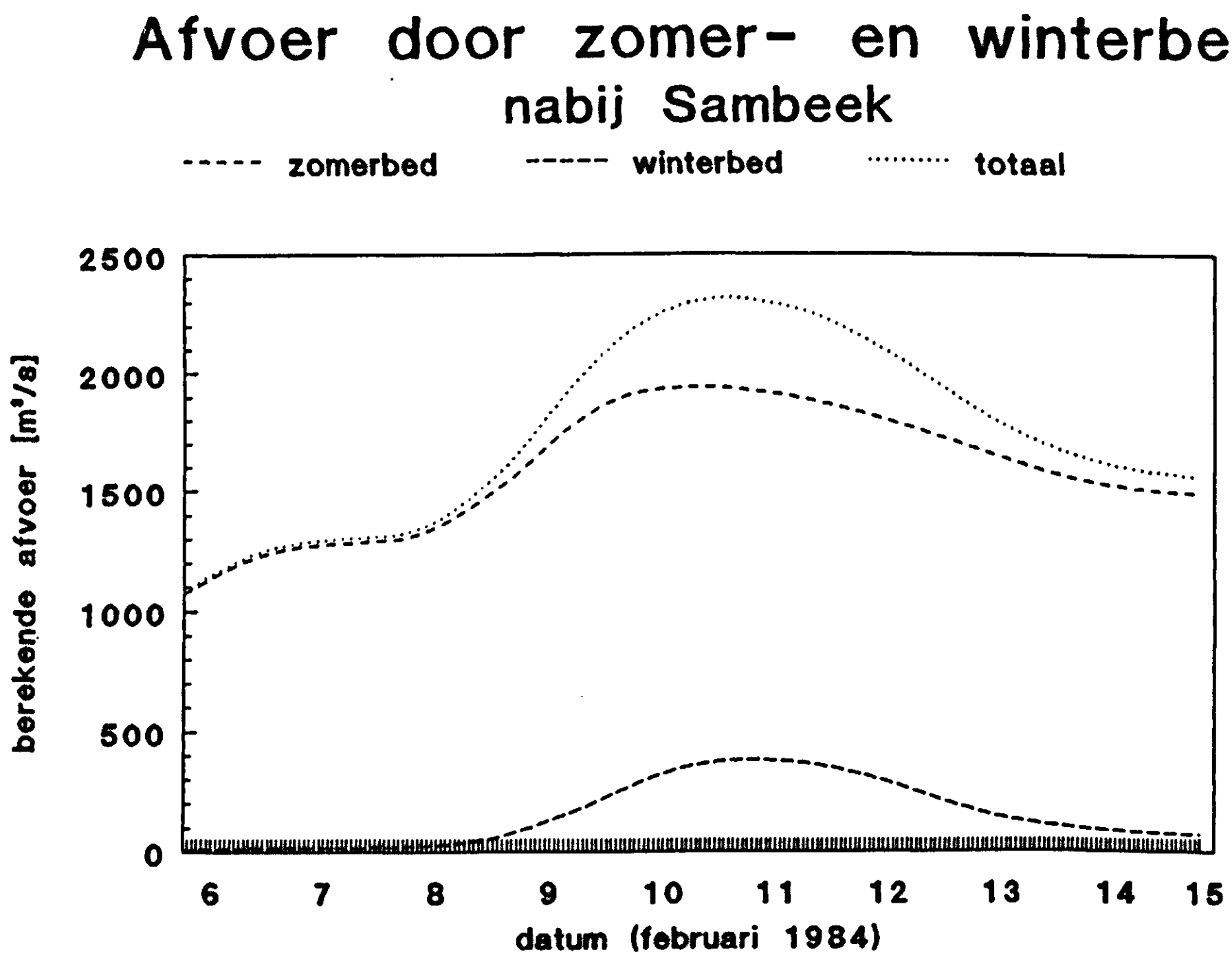
De kalibratie heeft plaatsgevonden op waterstanden door middel van het aanpassen van de ruwheden. Het blijkt dat de ruwheid van het winterbed slechts weinig invloed heeft op de lokale waterhoogte, dit in tegenstelling tot de ruwheid van het zomerbed. De looptijd van de hoogwatergolf kan door de ruwheidsparameter maar weinig worden beïnvloed.

In Figuur 4 is een voorbeeld gegeven van de berekening van de afvoer door zomer- en winterbed gedurende het hoogwater van februari 1984. Duidelijk zijn de wezenlijk verschillende bijdragen te zien. In vergelijking met eerdere schematisaties zijn met name de berekende looptijden verbeterd.

Belgische Maas:

De Belgische Maas heeft een ander karakter dan de Nederlandse. Dit wordt veroorzaakt door de vorm van het zomerbed, het feit dat veel stuwen tijdens afvoergolven nog functioneren en de geringe invloed van het winterbed op de stroming. In de afgelopen decennia zijn veel werkzaamheden verricht aan de Belgische Maas, resulterend in een ander profiel en andere stuwen. De werkzaamheden zijn nog niet afgerond. Dit, en het feit dat geen uitgebreide verzameling gegevens van afvoeren en waterstanden ter beschikking stond, heeft geleid tot de keuze van het één-dimensionaal hydrodynamisch stromingsmodel ZWENDL, waarbij op basis van dwarsprofielen gewerkt kon worden. De profielgegevens zijn alleen in grafische vorm beschikbaar, waarbij in het lengteprofiel regelmatig trapezium-

vormige dwarsprofielen zijn getekend. Omdat de invloed van het winterbed zeer klein is, is dit niet gemodelleerd.



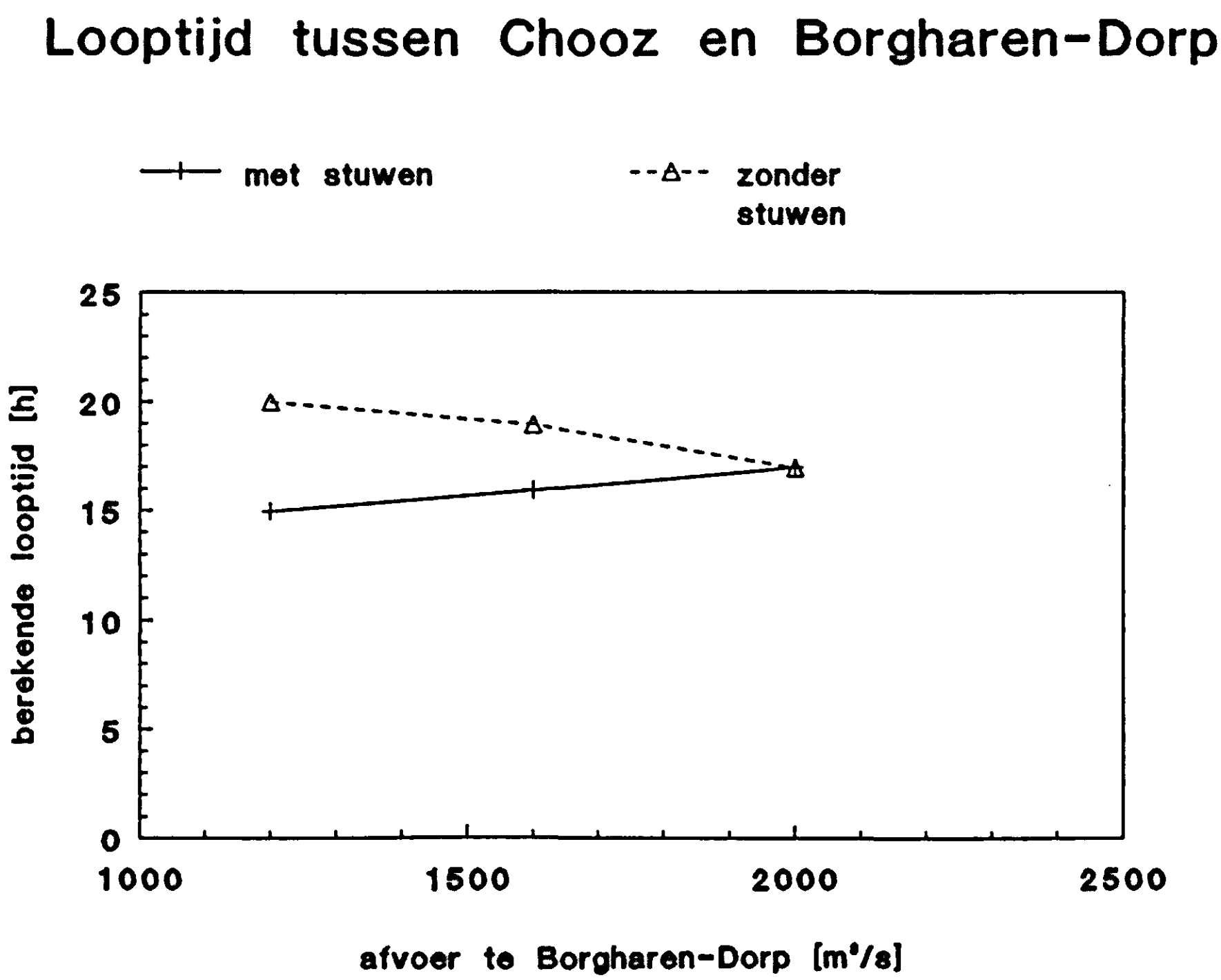
Figuur 4 Afvoerverdeling tussen zomer- en winterbed

Invoer is de afvoer te Chooz, alsmede de afvoeren van diverse zijrivieren, uitvoer is de afvoer bij Borgharen-Dorp.

Kalibratie heeft, om voornoemde redenen, niet op basis van recente hoogwaters kunnen plaatsvinden. In de schematisatie zijn ruwheden gebruikt die bepaald zijn met behulp van strijkdebieten van stuwen en ervaringscijfers. Er is een gevoeligheidsanalyse naar de invloed van de ruwheid uitgevoerd. In Figuur 5 is de invloed van stuwen op de looptijd weergegeven. De waterstanden aan de bovenstroomse zijden van de stuwen zijn constant gehouden. Uit de figuur blijkt dat de looptijd door de aanwezigheid van stuwen wordt verkleind.

Franse Maas:

De looptijd tussen het benedenstroomse punt van de Franse Maas en Borgharen-Dorp is relatief groot (Figuur 5). Voor de Franse Maas zijn geen dwarsprofielen bekend, zodat een hydrodynamisch model minder geschikt is. Gekozen is voor een meervoudig lineair regressiemodel, met als invoer de afvoeren van Montcy-Notre-Dame (bij Charleville-Mézières) en Chooz (beide aan de Maas), Haulmé (aan de Semois), Treignes (aan de Viroin) en als uitvoer een voorspelling van de afvoer te Chooz. Bij de calibratie bleek dat de gemeten afvoer van Chooz voor de nauwkeurigheid van de voorspelling van groot belang is.



Figuur 5 Invloed van de stuwen op de looptijd van de afvoergolf

6 DE MODULES VOOR DE ZIJRIVIEREN

Nederlandse zijrivieren:

De meeste zijrivieren van de Maas in Nederland liggen in een vlak gebied. Belangrijkste uitzondering hierop vormt de Roer, waarvan de bron in de Hoge Venen in de Ardennen

ligt. De Roer draagt ca. 10% bij in de hoogwaterafvoer van de Maas. Echter, door het geringe verhang van de Roer in het benedenstroomse deel, reageert zij vrij traag en is de afvoergolf relatief vlak. Dit heeft gunstige consequenties voor de modellering. Het blijkt dat met een eenvoudig lineair regressiemodel op basis van de gegevens van het Nederlandse station De Drie Bogen een vrij nauwkeurige afvoervoorspelling tot 24 uur vooruit kan worden gemaakt. Opvallend genoeg kan deze voorspelling verbeterd worden door ook de gemeten en voorspelde afvoeren van Borgharen-Dorp in het deelmodel op te nemen.

De afvoer van de Niers kan als een percentage van de afvoer van de Roer voldoende nauwkeurig benaderd worden.

De afvoer van de Dieze is in deze studie niet van belang, aangezien de Dieze uitmondt stroomafwaarts van Lith uitmondt.

De afvoeren van de Belgische zijrivieren van de Maas zijn van groot belang in de afvoervoorspelling van Borgharen-Dorp. De afvoeren worden niet alleen bepaald door de neerslag, maar ook door het smelten van sneeuw, de evapotranspiratie, het beheer van stuwmeren, infiltratie, enzovoort. Hoewel achteraf veel van deze gegevens bepaald (kunnen) worden, zijn in real-time alleen neerslag- en afvoergegevens met een voldoende hoge frequentie beschikbaar. Vandaar dat gekozen is voor een voorspellingsmodel op basis van de neerslag-afvoer-relatie. Dit geeft ook de mogelijkheid neerslagvoorspellingen in het model op te nemen.

De analyse van de neerslagafvoerrelatie is gestart met de bepaling van de gebiedsneerslag. Door de grote afstanden tussen de neerslagstations en het heuvelachtige karakter van het gebied blijkt een geavanceerde methode als Kriging niet bijzonder geschikt, aangezien niet voldaan wordt aan de daarvoor geldende veronderstellingen. Uiteindelijk is de Thiessen-methode gebruikt.

De neerslag-afvoerrelatie is onderverdeeld in twee stappen waarbij de effectieve neerslag het tussenresultaat vormt. Onder effectieve neerslag wordt hier verstaan de neerslag die oppervlakkig of via interflow tot afstroming komt. De effectieve neerslag wordt berekend met behulp van een (tijdsafhankelijke) parameter voor het potentieel verlies. Bewust is gekozen voor slechts één tijdsafhankelijke parameter om de effectieve neerslag te

modelleren, omdat de grootte van dergelijke parameters operationeel moeilijk is vast te stellen, zeker als de informatievoorziening niet volledig is. De afvoer wordt berekend aan de hand van de effectieve neerslag en een Nash-cascade.

Één van de oorzaken van hoogwaters op de Maas is sneeuwsmelt. Voor de bepaling van sneeuwsmelt zijn een aantal parameters, zoals de momentane sneeuwhoogte, van belang. De sneeuwhoogten in de Ardennen worden echter slechts eenmaal per dag doorgegeven aan het KNMI. Bovendien geeft de sneeuwhoogte slechts een indicatie van de hoeveelheid water die geborgen is in het stroomgebied, omdat: ten eerste niet bekend is wat het waterequivalent is van een bepaald sneeuwdek (dit varieert van 5% voor sommige vormen van verse sneeuw tot 50% voor sneeuw in de dooifase, Bauwens (1987)) en ten tweede de hoeveelheid sneeuw ook in het stroomgebied sterk afhankelijk is van de hoogteligging, de oriëntatie van de heuvels en de bebossingsgraad van het gebied. Gezien de beschikbare operationele gegevens en de duur van het smeltproces is gekozen om de bijdrage van de sneeuwsmelt voor de duur van korte-termijn voorspelling constant te veronderstellen.

Er is in de praktijk niet zo zeer een behoefte om de afvoer te kunnen simuleren, maar wel om, uitgaande van een gemeten afvoer, de afvoer in de nabije toekomst zo goed mogelijk te kunnen voorspellen. Het is daarom voldoende om de verandering van de afvoer in de tijd goed te kunnen voorspellen. Er is getracht om de fouten in de verandering van de afvoer in de tijd zo klein mogelijk te laten zijn, door het minimaliseren van:

$$\sum_i \left(\tilde{Q}_{i+6} - \tilde{Q}_i - (Q_{i+6} - Q_i)\right)^2 \qquad (1)$$

waarin:

$\tilde{Q}_i$ = berekende afvoer gebruikmakend van het model op tijdstip i [m^3s^{-1}]

Q_i = gemeten afvoer op tijdstip i [m^3s^{-1}]

i = tijd [h]

De tijdstap van zes uur is vastgesteld met behulp van de gemiddelde lead-time, waarvoor een voorspelling van de afvoer van de zijrivier wenselijk is. Door deze wijze van kalibreren wordt geen waarde voor de constant veronderstelde basisafvoer bepaald, dus het uiteindelijke neerslag-afvoermodel berekent alleen een oppervlakte-afvoerbijdrage.

De afvoervoorspelling in real-time wordt berekend met:

$$\hat{Q}_{i+h} = \tilde{Q}_{i+h} + Q_i - \tilde{Q}_i \qquad (2)$$

waarin:

$\hat{Q}_{i+h}$	=	modelvoorspelling voor het tijdstip i+h	$[m^3s^{-1}]$
h	=	lead-time	[h]

Indien afvoergegevens slechts incidenteel beschikbaar komen kan toch een voorspelling worden gemaakt. De kwaliteit van de voorspelling is significant verbeterd door een ARIMA-correctie op de fouten toe te passen.

Uiteindelijk zijn 6 deelstroomgebieden gemodelleerd. De andere deelstroomgebieden en de direct op de Maas afwaterende gebieden tussen Chooz en Borgharen-Dorp zijn toegedeeld aan deze 6 deelstroomgebieden op basis van overeenkomstige hydrologische eigenschappen.

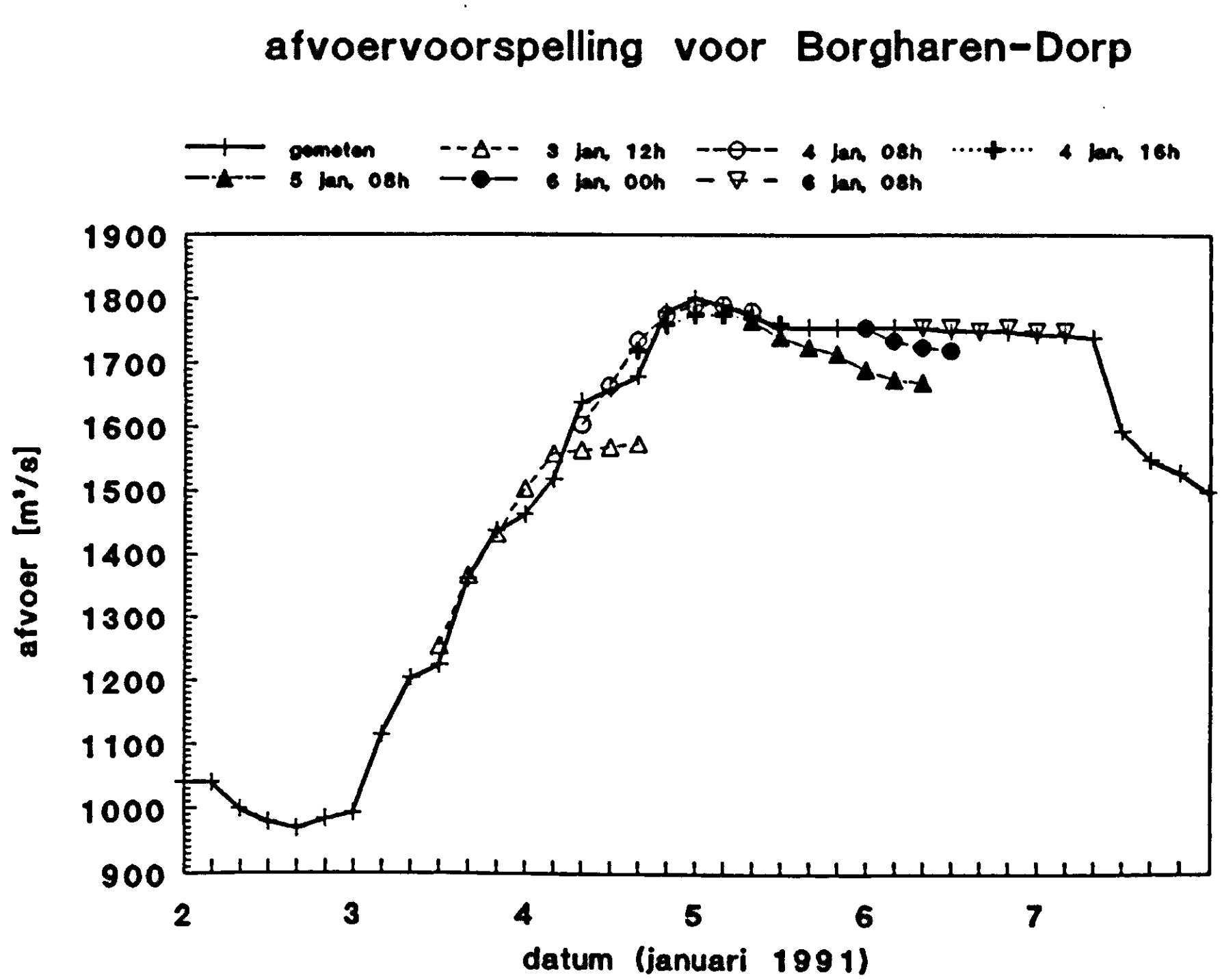
Voor de snel reagerende deelstroomgebieden zijn, ten behoeve van een 24-uursvoorspelling van Borgharen-Dorp, ook neerslagvoorspellingen nodig. Omdat het hier meer een meteorologische specialiteit betreft dan een hydrologische, wordt dit onderdeel verzorgd door het KNMI.

Franse zijrivieren:
Het belang van de afvoervoorspelling van de zijrivieren die in de Franse Maas uitmonden is voor de hoogwatervoorspelling van Borgharen-Dorp veel kleiner. Een extrapolatie van enkele uren volstaat voor een voorspelling van Borgharen-Dorp voor 24 uur vooruit. Een ARIMA (1,1,0) model toegepast op de afvoeren van deze zijrivieren blijkt voldoende nauwkeurig te zijn. Overigens bleek het vergroten van het aantal parameters in het ARIMA-model geen substantiële verbetering van de voorspelling van de afvoeren van de zijrivieren te geven.

7 DE VOORSPELLING VAN DE AFVOER VAN BORGHAREN-DORP EN DE NEDERLANDSE MAAS

In voorgaande twee paragrafen zijn de belangrijkste onderdelen van de voorspelling van de afvoeren van Borgharen-Dorp behandeld. Bij het maken van de voorspelling wordt voor zover mogelijk uitgegaan van gemeten afvoeren, en anders van voorspelde of geschatte afvoeren. De uitkomsten van de module voor de Belgische Maas zijn echter nog niet gelijk aan de uiteindelijke voorspelde afvoer van Borgharen-Dorp. Enkele oorzaken zijn:

- Modelfouten.
- Verschillen in de afvoerbepaling. Een duidelijk voorbeeld is te vinden bij de Nederlands-Belgische grens, waar in geval van hoogwater de Belgische afvoerwaarden ca. 10% hoger zijn dan de Nederlandse.
- Stuwbeheer in België. In Figuur 6 kan men in het gemeten afvoerverloop duidelijk kleine fluctuaties waarnemen door het stuwbeheer. Deze fluctuaties zijn met de huidige informatievoorziening nog niet te voorspellen.



Figuur 6 Gemeten en voorspelde afvoer tijdens het hoogwater van januari 1991. De tijd in de legenda duidt het moment van maken van de voorspelling aan.

Voor de uiteindelijke voorspelling van de afvoer van Borgharen-Dorp wordt gebruik gemaakt van een model analoog aan vergelijking (2). Met de afvoerfluctuaties wordt rekening gehouden door het smoothen van de gemeten afvoeren. Dit wordt gedaan met behulp van het gemiddelde van het verschil tussen de gemeten en voorspelde afvoeren gedurende de laatste acht uur. Acht uur wordt beschouwd als de minimum lengte om één fluctuatie op te vangen. Voor de Nederlandse Maas zijn de oorzaken van fouten gedeeltelijk van andere aard. Een voorbeeld hiervan vormt het verplaatsen van een meetpunt, waardoor kalibratie op basis van zeer weinig hoogwatergolven moet plaatsvinden.

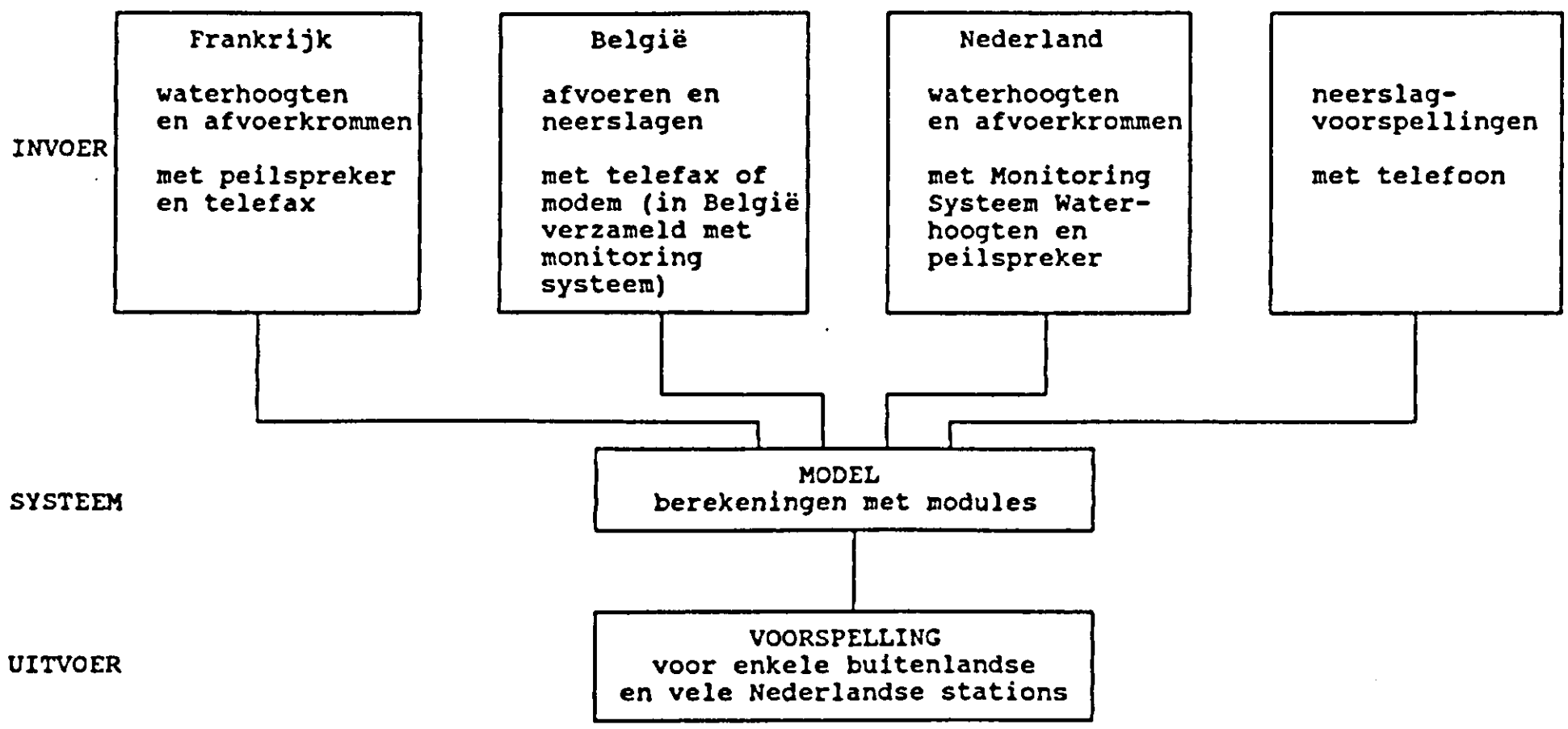
Voordat de voorspellingen de buitenwereld worden ingezonden, worden deze eerst op mogelijke fouten gecontroleerd door de verantwoordelijke voorspellers (RIZA en de Directie Limburg, beide van Rijkswaterstaat). De controle voor de Nederlandse Maas vindt onder meer plaats met behulp van zogenaamde betrekkingslijnen, waarin de relatie tussen de topstand bij Borgharen-Dorp en die bij andere meetstations is vastgelegd met behulp van eerder opgetreden hoogwaters, maar waarin de golfvorm en de bijdragen van zijrivieren niet expliciet zijn opgenomen.

8 DE INFORMATIESTROMEN

Het model vraagt een grote hoeveelheid tijdreeksen vanwege de geomorfologische opbouw van het stroomgebied. De benodigde gegevens zijn nog eens schematisch weergegeven in Figuur 7. Opgemerkt wordt dat ook hier geen verschil wordt gemaakt tussen waterhoogten en afvoeren.

Het is wenselijk dat de grote hoeveelheid gegevens zo veel mogelijk wordt ingevoerd zonder menselijke tussenkomst. Hieraan wordt momenteel gewerkt. Toch zullen in alle gevallen de gegevens geverifieerd moeten worden. Dit kan gedeeltelijk automatisch gebeuren, maar een visuele controle blijft altijd wenselijk.

Als invoer vraagt het model gemeten afvoeren bij meetpunten in Nederland, België en Frankrijk, en gemeten neerslagen in het Belgische deel van het stroomgebied. Voor de Ardennen is tevens een neerslagvoorspelling nodig.



Figuur 7 Schema van de informatiestromen

9 EERSTE RESULTATEN

Een nadeel van een kalamiteitenmodel, zoals een hoogwatervoorspellingsmodel, ten opzichte van andere modellen is dat de mogelijkheden voor het testen van het model in real-time veel beperkter zijn. In feite moet er gewoon gewacht worden op een calamiteit.

Een hoogwatercalamiteit deed zich voor in januari 1991. Dit was net na afloop van de kalibratie, maar nog voor de formele ingebruikname van het model.

De golf was vrij vlak van vorm. Een relatief groot deel van de afvoer was afkomstig uit Frankrijk. Daar sprak men dan ook van het hoogwater van de eeuw, terwijl het hoogwater in Nederland een overschrijdingsfrequentie had van gemiddeld eenmaal per vijf jaar.

De aandacht die tijdens de calibratie aan een mogelijke onvolledige gegevensvoorziening is gegeven bleek nu waardevol. Voor het Franse deel van het stroomgebied waren nog niet voldoende afvoerkrommen beschikbaar, waterstandsgegevens werden wel regelmatig per fax aangeleverd. Vanuit België werden door capaciteitsproblemen niet alle gegevens geleverd die voor een optimale voorspelling nodig waren. De waterstandsgegevens van de Roer waren nog niet per peilspreker oproepbaar, waardoor ook hier met een geringe hoeveelheid gegevens moest worden volstaan. De gegevenslevering door het KNMI verliep geheel volgens de afspraken. Geconcludeerd moest worden dat een model dat informatie nodig heeft uit zoveel bronnen flexibel dient te zijn voor invoer van gegevens.

Een aantal voorspellingen voor Borgharen-Dorp zijn grafisch weergegeven in Figuur 6. De nauwkeurigheid van de voorspelling was naar tevredenheid: de afwijkingen in de waterstand waren in de orde van grootte van een decimeter of kleiner. Dat goede resultaten bereikt konden worden bij een onvolledige informatievoorziening wordt voor een deel geweten aan het feit dat sneeuwsmelt tijdens dit hoogwater geen rol speelde en een belangrijk deel van de afvoer uit Frankrijk kwam.

De voorspelling benedenstrooms van Borgharen-Dorp was minder goed. Afwijkingen tot 18 cm kwamen voor. Oorzaak zou kunnen zijn de bijzondere vorm van de golf, de bijdrage van Roer en Niers, recente veranderingen in de ligging van meetpunten, meetfouten, etcetera. Een evaluatie wordt momenteel voorbereid.

10 CONCLUSIES

In dit artikel is verslag gedaan van de studie betreffende de ontwikkeling van het hoogwatervoorspellingsmodel voor de Nederlandse Maas. De studie is begonnen met een uitgebreide systeemanalyse. Informatie opgedaan tijdens deze systeem-analyse bleek succesvol toepasbaar bij de keuze van de te gebruiken modellen als bij de modellering zelf.

Door de onderverdeling van het model in verschillende modules bleken de specifieke eigenschappen van het afstromingsproces in het Maasbekken geschikt gemodelleerd te kunnen worden, waarbij optimaal gebruik kon worden gemaakt van de beschikbare data.

De eerste resultaten van het voorspellingsmodel in real-time bleken voor Borgharen-Dorp goed te zijn, voor de benedenstroomse stations waren sommige voorspellingen wat minder goed. Onderzoek naar de oorzaken van de kwaliteit van de resultaten zal nog worden uitgevoerd.

De gegevens-overdracht in internationaal verband is gevoeliger voor storingen dan die in nationaal verband.

Het is zinvol gebleken om vanaf het begin van de modellering rekening te houden met een mogelijke onvolledige informatievoorziening in real-time.

11 AANBEVELINGEN

- De ontwikkeling van het hoogwatervoorspellingsmodel is bij de formele invoering ervan nog niet afgelopen. Door het beschikbaar komen van meer en nieuwere gegevens, en door veranderingen in het stroomgebied dient men altijd kritisch te blijven met betrekking tot het in gebruik zijnde voorspellingsmodel, en zal men indien nodig het model moeten aanpassen.
- Bij het onderzoek naar de afvoervoorspelling zijn gegevens uit diverse bronnen gebruikt. Het blijkt dat elke instantie een eigen methode van gegevensopslag kent, waardoor gegevens onderling slecht uitwisselbaar zijn. Als voorbeeld worden de kalibratiereeksen genoemd: Nederland bewaart vooral waterstandsreeksen op uurbasis (hoewel van veel zijrivieren alleen gemiddelde dagafvoeren bekend zijn), België vooral afvoerreeksen op uurbasis en Frankrijk niet-equidistante waterstands- en afvoerreeksen. Alle formats zijn verschillend. Het is wenselijk ten behoeve van toekomstig (gezamenlijk) onderzoek tot een internationale Maasstandaard voor hydrologische gegevens te komen. Elk instituut zou deze standaard moeten gebruiken of conversieprogramma's moeten ontwikkelen voor de omzetting van zijn gegevens naar deze internationale standaard en vice versa.
- Het is wenselijk de afvoervoorspellingen uit te wisselen tussen de verschillende instituten, omdat hierdoor de kwaliteit van de voorspellingen alsmede de internationale samenwerking wordt verbeterd. Goede afspraken over de te volgen procedures tijdens hoogwaters zijn gewenst.
- Er dient meer internationale overeenstemming te komen in de afvoerbepaling nabij de landsgrenzen.
- Meer internationale samenwerking is wenselijk om ook van de niet-schriftelijk vastgelegde kennis op de hoogte te zijn.

DANKWOORD

De auteur dankt Rijkswaterstaat, het waterschap Roer en Overmaas, het Ministerie van Openbare Werken van België, de Service de la Navigation in Nancy, het KNMI en het KMI van België voor de verstrekking van hydrologische en meteorologische gegevens, en het RIZA voor de ondersteuning van dit onderzoek.

LITERATUUR

BAUWENS, W.; 1987. Hydrologische modellen voor dooi-afvoer simulaties. Dienst Hydrologie en Centrum voor Statistiek en Operationeel Onderzoek, Vrije Universiteit Brussel. 1

BASTINGS, A.; 1989. Samenvatting van de hoogwaterberekeningen voor de Maas met het 2-dimensionale WAQUA-model. Rijkswaterstaat Directie Limburg, Maastricht.

KORSTEN, G.B.M.; 1989. Laagwatervoorspelling Maas. Rijkswaterstaat Dienst Binnenwateren/RIZA, Lelystad.

SAMENVATTING VAN DE DISCUSSIE - RÉSUMÉ DE LA DISCUSSION

* De discussie wordt voorgezeten door M. Peters; deze stelt twee onderwerpen ter discussie voor:

1. Het probleem van de fouten bij metingen of berekeningen en hun invloed op de waterbalans (dit punt houdt verband met de uiteenzetting van M. van Dam);
2. De tijdsfactor verschillend voor oppervlakte- en grondwater; dit punt is belangrijk in het algemeen voor de keuze van stationaire of niet-stationaire modellen.

* M. Bultot vraagt het woord om opmerkingen en suggesties te formuleren.

Hij feliciteert de sprekers voor het hoog peil van de uiteenzettingen en herinnert dat deze dag het resultaat is van gemeenschappelijke initiatieven van de Belgische en Nederlandse IHP-comité's.

De onderzoekresultaten werden verkregen met modellen geijkt op verschillende perioden (juli 1989 voor sommige modellen, juli tot november 1979 voor andere). Hij stelt de vraag of deze perioden voor het onderzoek naar de waterbalans als normaal mogen worden beschouwd? Hij wenst alzo het statistisch

* M. Peters préside la discussion; il suggère deux sujets:

1. Le problème des erreurs de mesure ou de calcul et leurs influence sur le bilan (ce point est à mettre en relation avec l'exposé de M. van Dam);
2. Le facteur temps, très différent pour les eaux souterraines et pour les eaux de surface (ce point est important pour le choix des modèles stationnaires ou non stationnaires).

* M. Bultot demande la parole pour formuler des remarques et des suggestions.

Il félicite les orateurs pour la qualité des exposés et rappelle que cette journée est le résultat d'initiatives communes des comités Belges et Néerlandais du PHI.

Les résultats des recherches ont été obtenus avec des modèles calibrés sur des périodes différentes (juillet 1989 pour certains modèles, juillet 1979 à novembre 1979 pour d'autres). Il pose la question de savoir si ces périodes peuvent être considérées comme "normales" et désire ainsi introduire l'aspect statistique des régimes hydrologiques, notamment le

aspect van het hydrologisch regime in te voeren, onder andere het meerjarig karakter van het regime van het grondwater.

Hij vindt dat het spijtig zou zijn de werkzaamheden van de werkgroepen te moeten stoppen, nu men op de goede weg is; er moet een vervolg komen!

M. Bultot stelt het probleem van de financiering van de toekomstige onderzoeken en vindt het nodig de politieke overheid erop te wijzen; er moet een voorstel komen om de ontwikkelde modellen in de toekomst toe te passen op langere perioden.

Hij beschouwt het belangrijk dat de S.W.O.M. aanbevelingen zou formuleren voor toekomstige activiteiten, zoals speciale metingen aan beide zijden van de grens, en modellering. Ook moet er gestart worden met een inventarisatie en beschrijving van metingen en gegevens nodig voor de modellering.

* M. Gerretsen merkt op dat er voor 1979 sprake is van een gemiddelde toestand. Hij stelt de vraag of het model bijvoorbeeld geldig is in een droog jaar zoals 1990.

* M. Laurent herinnert dat 1979 werd

caractère inter-annuel du régime des eaux souterraines.

Il considère par ailleurs qu'il serait dommage d'arrêter en si bon chemin les activités des groupes de travail et estime qu'il faudrait poursuivre, assurer un suivi!

M. Bultot pose le problème du financement des recherches futures et juge nécessaire d'alerter et de sensibiliser les autorités politiques en leur proposant, dans le futur, une exploitation sur de plus longues périodes, des modèles mis au point.

Il trouve important que le groupe S.W.O.M. puisse formuler des recommandations pour les activités futures, comprenant les campagnes de mesures et la modélisation, et qu'il faudrait commencer par établir l'inventaire des données et des mesures nécessaires à la modélisation.

* M. Gerretsen signale que l'année 1979 pouvait être considérée comme normale. Il pose la question de savoir si le modèle est applicable à une année très sèche comme 1990.

* M. Laurent rappelle que l'année 1979 a été choisie parce que relativement sèche et parce qu'on disposait d'un maximum de

gekozen omdat het tamelijk droog was en omdat er meer gegevens voorhanden waren. Hij vindt dat de berekening ook zou moeten worden gedaan voor het jaar 1990, vrij droog, omdat de methodologie geldig is.

Hij beschouwt dat de Belgische en Nederlandsche metingen van 1979 coherent zijn en dat het voor de waterbalans zinloos is te discussieren over 1 m^3/s.

M. Laurent vraagt aan Prof. Van Dam van welke betekenis de bergingsterm is voorgesteld in zijn uiteenzetting, rekening houdend met de lengte van de gebruikte periode?

Volgens hem moet de berging alleen worden beschouwd voor een waterbalans berekend over een korte tijdspanne en voor lange panden (zoals deze van Ivoz-Ramet tot Genk). Voor langere episodes speelt dit geen rol.

* Van Dam antwoordt dat het bergingsvolume in de oppervlaktewateren, overeenstemmend met 1 m^3/s, ongeveer 10 miljoen m^3 bedraagt.

* M. Meulenberg merkt op dat dit overeenstemt met een niveauverschil van 80 cm, wat te hoog lijkt, en dat het debiet dus van de grootte-orde van 0,1 m^3/s

mesures. Il faut recommencer l'exercice avec des mesures de 1990, particulièrement sèche, car la méthodologie est valable.

Il estime que les mesures Belges et Néerlandaises de 1979 sont cohérentes et qu'il est inutile d'ergoter pour 1 m^3/s dans les bilans.

M. Laurent demande au Prof. Van Dam quelle est la signification du terme de stockage présenté dans son exposé, en particulier si on considère la longueur de la période considérée?

Selon son expérience, le stockage ne doit être pris en considération que pour des bilans sur des courtes durées et pour de longs biefs (comme par exemple de Ivoz-Ramet à Genk). Pour de longues durées, ce phénomène ne joue aucun rôle.

* M. Van Dam répond que le stockage dans les eaux superficielles de 1 m^3/s correspond pour la période considérée à un volume de 10 millions de m^3.

* M. Meulenberg fait remarquer que ceci correspondrait à un relèvement des eaux de 80 cm, ce qui est improbable, et il en conclut que le débit correspondant serait plutôt de l'ordre de 0,1 m^3/s.

moet zijn.

* M. Dollee merkt op dat het debiet 1 m^3/s afkomstig is van het rapport van Van Dansik.

* M. van Erdeghem herinnert dat ook Mevr. Mombers 1 m^3/s opgeeft, alleen is de vraag op basis van welke periode?

* M. van Dam stelt voor dit na te kijken.

* M. Bauwens zal het eveneens controleren en ook de breedte van de Maas, gebruikt in de berekeningen. Hij vraagt zich ook af of rekening werd gehouden met de berging in de grindputten?

* M. Hiver vindt dat niet alle termen van de waterbalans moeten worden onderzocht, maar alleen deze die aanleiding kunnen geven tot de grootste fouten.

* M. Meulenberg maakt opmerkingen betreffende de fouten:

- in balans noordelijk deel zit lek van stuw Linne; die is niet goed bekend;
- in het Albertkanaal van Ternaaien naar Genk kan juist nog een belangrijk lek door infiltratie ontstaan omwille van de hoge waterstanden in het kanaal t.o.v. het omliggend ter-

* M. Dollee signale que le débit cité de 1 m^3/s provient du rapport de M. Van Dansik

* M. van Erdeghem rappelle que Mme. Mombers avait aussi cité le chiffre de 1 m^3/s, mais se demande pour quelle période?

* M. van Dam propose de contrôler ces chiffres

* M. Bauwens vérifiera aussi dans le travail de Mme Mombers. Il suggère de contrôler aussi la largeur de la Meuse utilisée pour les calculs et se demande s'il a été tenu compte du stockage dans les gravières.

* M. Hiver estime qu'il ne faut pas examiner tous les termes du bilan, mais uniquement les plus sensibles, ceux pouvant donner lieu à l'erreur la plus grande.

* M. Meulenberg remarque au sujet des erreurs possibles que:

- pour le bilan de la partie Nord,les pertes de l'écluse de Linne sont très mal connues;
- dans le canal Albert de Ternaaien à Genk, des pertes par infiltration dans les eaux souterraines peuvent être importantes du fait du niveau élevé

rein.

- de waterverliezen in de Kempische kanalen werden niet met voldoende nauwkeurigheid berekend.

* M. van der Beken onderstreept dat de post van de waterbalans bij Genk aan de hand van schuttingen niet nauwkeurig kan worden bepaald.

* M. Monjoie meldt dat, betreffende de kanalen, er twee jaar geleden een project werd ingediend in samenwerking met M. van der Beken om de lekken te bestuderen. Dit project beschouwde zowel het grondwater als het oppervlaktewater. Het is niet doorgegaan omwille van de gewestvorming in België. Hijzelf schat deze verliezen op enkele m^3/s.

* M. Laurent denkt dat nieuwe gezamenlijke studies van het systeem Albertkanaal + Maas moeten worden aanbevolen.

Hij vraagt nadere bijzonderheden over de debieten gevonden met het model van M. Dassargues.

* M. Dassargues geeft de volgende cijfers: 3 m^3/s komen van de deelbekkens, 2,7 m^3/s komen van het Albertkanaal, 5,3 m^3/s stromen naar de Maas, 0,14 m^3/s stromen door de alluviale vallei en het

du canal par rapport aux terrains environnants;

- les pertes en eau dans les canaux de Campine n'ont pas été comptabilisés avec une précision suffisante.

* M. van der Beken précise que le terme de bilan correspondant aux éclusages dans la région de Genk n'est pas précis.

* M. Monjoie informe l'assemblée qu'un projet d'étude commun sur ces pertes avait été introduit il y a deux ans avec M. Van der Beken auprès du Ministère des Travaux Publics belge. Ce projet, combinant les eaux souterraines et de surface, n'a pas abouti à cause de la régionalisation. Il estime personnellement ces pertes à quelques m^3/s.

* M. Laurent pense qu'il faut recommander des études intégrant la Meuse et le canal Albert entre Monsin et Lanaye.

Il demande des précisions concernant les débits trouvés par le modèle de M. Dassargues.

* M. Dassargues donne les valeurs suivantes: 3 m^3/s viennent des bassins versants, 2,7 m^3/s viennent du Canal Albert, 5,3 m^3/s rejoignent la Meuse, 0,14 m^3/s s'écoulent par la plaine alluviale et le reste est pompé de celle-ci.

overige wordt uit deze laatste gepompt.

* M. Monjoie beveelt de grootste voorzichtigheid in de schatting van de balansen; onderscheid moet worden gemaakt tussen de onnauwkeurigheden afkomstig van de gebruikte methodologie, van de metingen en van de toepassing van de modellen.

M. Monjoie vraagt uitleg aan M. van Dam over de waterbalansposten. Hij herinnert aan de verschillende tijdschalen: looptijden van dagen, maanden of jaren al naar gelang het deel beschouwd in het systeem. De binnenkomende debieten worden bepaald te Ampsin-Neuville op de Maas en te Angleur op de Ourthe, maar we moeten ook de 5,3 m^3/s beschouwen die vanuit de alluviale vlakte naar de Maas vloeien.

M. Monjoie ondervraagt verder M. van Dam over het tekort in de balansen; 3,3 m^3/s voor de balans "zuid" en 7,7 m^3/s voor de balans "noord", waarbij men het oppervlakte- en het grondwater integreerd. Hoe kan men deze verliezen uitleggen? Hoe kan men een verlies uitleggen aan de uitgang van het systeem als de inkomende grondwaterdebieten zeker onderschat worden? Op deze vraag moet een antwoord komen!

* M. Monjoie recommande la plus grande prudence dans l'évaluation des bilans, distinguant entre les imprécisions provenant des méthodologies utilisées, des mesures et de l'application des modèles.

M. Monjoie demande des explications à M. van Dam au sujet des bilans. Il rappelle aussi les échelles des temps différentes: temps de parcours de jours, mois ou années suivant la composante du système considérée. Les débits d'entrée proviennent des mesures sont prises à Ampsin sur la Meuse et à Angleur sur l'Ourthe, mais on doit considérer les 5.3 m^3/s d'apport vers la Meuse venant de la plaine alluviale.

M. Monjoie questionne M. Van Dam aussi au sujet des déficits dans les bilans; 3,3 m^3/s pour le bilan "sud" et 7,7 m^3/s pour le bilan "nord", en intégrant les eaux de surface et les eaux souterraines. Qu'est-ce qui explique les pertes ? Comment expliquer une perte à la sortie alors que les débits souterrains à l'entrée sont certainement sous-estimés? Il faudrait arriver à répondre à cette question!

* M. van der Ven soulève le problème de la modélisation. Quelle est la sensibilité aux conditions aux limites? Les modèles utilisés sont stationnaires! Dans quelle mesure peuvent-ils reproduire les

* M. van der Ven stelt het probleem van de modelberekeningen. Hoe gevoelig zijn deze voor de randvoorwaarden? Er is gewerkt met stationaire modellen! In hoeverre kunnen ze niet-stationaire situaties beschrijven? Hij richt deze vraag aan Engelen en Dassargues. Samengevat: wat is de verantwoording voor het gebruik van een stationair model als het niet-stationair karakter van de fenomenen bewezen is?

* M. Dassargues stelt voor de modellen toe te passen op een winter-situatie om een idee te verkrijgen van hun toepassingsmogelijkheden. Het ideale zou erin bestaan een analyse uit te voeren in niet-stationair regime, maar dit zou piëzometrische metingen vergen in functie van de tijd.

* M. Laurent vindt de huidige bespreking nutteloos, daar we ons alleen maar moeten inlaten met de zomersituaties, dus met de lage afvoeren.

In deze omstandigheden moeten we ons over het overige niet bekommeren. De grondwaterstromingen kunnen worden beschreven met stationaire modellen, representatief voor de beschouwde periode.

* M. Engelen vindt dat de invloed van de

phénomènes non stationnaires? Il adresse sa question à M. Engelen et à M. Dassargues. En ·résumé: comment justifier l'utilisation de modèles stationnaires si le caractère non stationnaire des phénomènes est démontré?

* M. Dassargues suggère d'appliquer les modèles à une situation hivernale pour obtenir une idée des possibilités d'application. L'idéal serait de faire une analyse en régime transitoire, mais cela nécessiterait des mesures piézométriques en fonction du temps.

* M. Laurent considère cette discussion inutile puisqu'on ne s'intéresse qu'à la situation d'étiage, donc aux petits débits.

Dans ces conditions, le reste nous intéresse beaucoup moins. Les écoulements souterrains peuvent être modélisés par des modèles stationnaires, représentatifs pour la période considérée.

* M. Engelen estime que l'influence des eaux souterraines sur le bilan en période sèche est faible; seul les fluctuations saisonnières sont sensibles. Mais d'autres problèmes se posent, notamment pour les captages dans les gravières et pour la qualité des eaux. Alors il est bon de travailler avec des valeurs moyennes sur l'année.

grondwaterstromingen op de balans gering is in een droge periode; alleen de seizoengebonden veranderingen zijn waarneembaar. Maar er doen zich andere problemen voor, onder andere in verband met de waterwinningen in de grindputten. Ook dan is het goed om met jaargemiddelde cijfers te werken.

* M. van der Beken stelt dat, voor de afvoer van de rivier Voer waarvan de bijdrage niet werd bepaald, het niet-stationair karakter een rol kan spelen. Hier zou heel wat fluctuatie kunnen optreden. In een droge zomer is de verdamping zeer groot. Bij het diepe grondwater speelt dit niet.

M. van der Beken herinnert aan de inspanningen geleverd om een beter inzicht te krijgen in de werking van het systeem en meer bepaald door de metingen in het Albertkanaal. De zeker uitzonderlijke opgedane kennis en ervaring is van groot belang; dit is niet elders beschikbaar. Men heeft aangetoond dat het bijna onmogelijk is in het Albertkanaal een goede debietmeting uit te voeren in deze niet-stationaire toestand.

* M. Stuurman vraagt om meer uitleg over de stroming van het Kempisch plateau richting Centrale Slenk. M. Loy laat zien dat grens van de breuk niet

* M. van der Beken signale que pour la rivière Voer, dont la quote-part dans le bilan n'a pas été mesurée, le caractère non stationnaire peut jouer un rôle. Il pourrait y avoir des fluctuations, même lors d'un été sec, lorsque l'évaporation est élevée. Celle-ci influence peu les eaux souterraines profondes.

M. van der Beken rappelle les efforts pour acquérir une meilleure connaissance du système et plus particulièrement les mesures effectuées sur le canal Albert. Une grande expérience, sans doute unique, a été acquise et a permis de montrer la difficulté d'effectuer une bonne mesure des débits dans l'écoulement non-stationnaire du canal.

* M. Stuurman demande des explications au sujet des écoulements du plateau de Campine en direction de la region Centrale Slenk. M. Loy montre que la faille n'est pas complètement fermée, alors que la recherche de MM. Varenberg et De Smedt considère que la faille est complètement fermée par de l'argile. Comment expliquer cela?

* M. van der Beken remarque que M. F. De Smedt est absent, mais signale que la modélisation a été assez grossière et que tous les détails n'ont pas été reproduits à cause des mailles très larges.

helemaal dicht is.
In het verhaal van de heren Varenberg en De Smedt is de breuk helemaal dicht met klei!
Hoe zit dat ?

* M. van der Beken merkt op dat M. de Smedt afwezig is, maar legt uit dat de modellering een eerste benadering was en dat alle details niet in beeld werden gebracht. Het mazen-net was zeer grof.

* M. Loy, in samenspraak met M. Laga, beschouwt dat de breuk zelf geen waterdichtheid geeft. Deze is afhankelijk van de samenstelling van de geologische lagen. Dit onderzoek is dus een verbetering t.o.v. het voorgaande.

* M. Peters vat de discussie in grote lijnen samen:

1. het lijkt belangrijk de klimatologische variabiliteit in rekening te brengen;
2. het is belangrijk de modellen toe te passen op andere perioden;
3. de balansen stellen verder nog vragen, onder andere betreffende de bergingsterm van het oppervlaktewater;
4. men zou de modellen moeten testen op hun gevoeligheid voor de verschillende variabelen;
5. het probleem van de niet-stationariteit zou nader moeten worden onderzocht,

* M. Loy, en accord avec M. Laga, estime que ce n'est pas la faille qui provoque l'étanchéité, mais la composition des couches. La recherche en cours est donc une amélioration par rapport à la précédente.

* M. Peters résume dans ses grandes lignes la discussion:

1. il parait important de prendre en considération la variabilité climatique;
2. il apparait nécessaire d'appliquer les modèles à d'autres périodes;
3. les bilans continuent de poser des questions, notamment concernant le terme de stockage dans les eaux superficielles;
4. il faudrait faire l'examen de la sensibilité des variables considérées dans les modèles;
5. le problème de la non-stationnarité devrait être examiné de plus près en considérant les mesures plus complètes que requièrent leurs applications des modèles non-stationnaires;
6. il faudrait étudier plus en détail la sensibilité des modèles aux conditions aux limites.

M. Peters remercie les participants pour leur contribution et passe la parole à M. Monjoie.

met méér volledige metingen die de toepassing van deze niet-stationaire modellen zal vergen;

6. de gevoéligheid van de modellen aan de randvoorwaarden zou meer in detail moeten worden bestudeerd.

M. Peters bedankt de deelnemers voor hun bijdrage en laat het woord aan M. Monjoie.

* M. Monjoie trekt de les uit deze studiedag en schetst toekomstperspectieven voor verdere samenwerking tussen de nationale comités van het I.H.P.

De voorbije samenwerking heeft vooral aandacht besteed aan kwantitatieve aspecten en aan de perioden van lage debieten. Methodes werden opgesteld. De gronwatermodellen kunnen in niet permanent regime worden toegepast.

Er bestaat een consensus dat de modellen verder zouden moeten worden gebruikt en dat balansen voor andere perioden moeten worden opgesteld. De opvolging van het onderzoek en van de correcte toepassing van de modellen moet verzekerd worden.

De meetsecties moeten zorgvuldig gekozen worden en de fouten onderzocht. De "verborgen" bijdragen van de balansen moeten meer aandacht krijgen omdat het

* M. Monjoie tire les leçons de la journée d'étude et dessine les perspectives d'avenir pour une collaboration future entre les comités nationaux du P.H.I.

La collaboration passée s'est surtout intéressée aux aspects quantitatifs et aux périodes d'étiage. Les méthodes ont été mises au point. Les modèles d'eaux souterraines peuvent être utilisés en régime non permanent.

Il y a un consensus sur la nécessité de poursuivre l'application des modèles et d'établir des bilans pour d'autres périodes. Il faut assurer le suivi de la recherche et une application correcte des modèles.

Les sections de mesures doivent être choisies avec soin et les erreurs doivent être examinées. Les apports "occultes" dans les bilans doivent recevoir plus d'attention parce que la recherche passée a démontré leur importance, notamment les transferts entre bassins.

Nous devrons accorder plus d'attention, à l'avenir, aux problèmes en rapport avec les sédiments et à la qualité. Ce genre de recherche nécessite cependant des ressources financières plus grandes. Nous ne pouvons oublier les aspects biologiques, écologiques et de l'environnement.

afgelopen onderzoek hun belang heeft aangetoond, onder andere bij het transport tussen bekkens.

We moeten in de toekomst meer aandacht besteden aan de problemen in verband met sediment en kwaliteit. Dit soort onderzoek vergt echter belangrijke financiële middelen. Biologische aspecten, milieu en ecologie mogen niet vergeten worden.

De volgende stuurgroep zal op dit gebied beslissingen nemen en zorgen dat de financiële middelen beschikbaar worden gesteld.

Le comité directeur suivant devra prendre en ce domaine des décisions et s'assurer que les moyens financiers soient rendus disponibles.

J.J. Peters

BIJLAGE

Programma Studiebijeenkomst

HET HYDROLOGISCH SYSTEEM IN HET GRENSGEBIED LUIK - MAASBRACHT; ONDERZOEKRESULTATEN 1985 - 1990.

9e Studiebijeenkomst van de Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO georganiseerd met:
- Nationaal IHP Comité België
- Nationaal IHP Comité Nederland
- Contactgroep Hydrologie van het Nationaal Fonds Wetenschappelijk Onderzoek

Datum: 9 januari 1991
Plaats: Universiteit van Luik
Auditorium 202 Physique
Parking 42
Campus Universitaire du Sart Tilman
Luik
België

09.00 uur	Ontvangst en koffie
09.30 uur	Opening door de dagleider, Prof. dr. ir. A. Monjoie, Universiteit van Luik
09.35 uur	Overzicht van de activiteiten van de Stuurgroep Wetenschappelijk Onderzoek van de Maas (SWOM), Prof. dr. ir. A. van der Beken, Vrije Universiteit Brussel
10.00 uur	Hydrologisch systeem onderzoek van de Nederlandse westoever, Prof. dr. G.B. Engelen, Vrije Universiteit Amsterdam
10.30 uur	Modellering van het Alluviaal watervoerend pakket van de Maas, stroomafwaarts van Luik, Ir. A. Dassargues, Universiteit van Luik
11.00 uur	Koffie
11.30 uur	Hydrogeologische data van het Kinrooi gebied, Prof. dr. W. de Loy, Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening Brussel
11.45 uur	Simulatie van de regionale grondwaterstroming in het Kempisch plateau en het Maasdal in België, Prof. dr. ir. F. de Smedt, Vrije Universiteit Brussel
12.00 uur	De grondwatertoevoer naar de Maas langs de oostelijke oever tussen Visé en Maasbracht; onderzoek door de Landbouwuniversiteit Wageningen, Dr. D.J.G. Nota/Ing. B. van der Weerd
12.30 uur	Lunch
14.00 uur	Oppervlaktewater; waterbalans Luik-Eysden, Prof. dr. ir. W. Bauwens, Vrije Universiteit Brussel
14.30 uur	Evaluatie waterbalans, Prof. dr. ir. J.C. van Dam, Technische Universiteit Delft
15.00 uur	Thee
15.30 uur	Discussie o.l.v. Prof. ir. J.J. Peters
16.30 uur	Samenvatting discussie, Prof. ir. J.J. Peters
17.00 uur	Blik naar de toekomst en sluiting door de dagleider, Prof. dr. ir. A. Monjoie

BIJLAGE

Lijst deelnemers

Bastings, A.	Rijkswaterstaat	Maastricht
Bauwens, W.	VU Brussel Dienst Hydrologie	Brussel
Beken, A. van der	VU Brussel Dienst Hydrologie	Brussel
Berger, H.E.J.	RIZA	Lelystad
Berlamont, J.	KU Leuven Laboratorium voor Hydraulica	Heverlee
Biron, J.P.	Société Wallone des Distributions d'Eau	Brussel
Bleichrodt, G.	Rijkswaterstaat, Directie Limburg	Maastricht
Bultot, F.	Institut Royale Metéorologique	Bruxelles
Cardoen, F.	Min. v.d. Vlaamse Gemeenschap A.R.O.L. - Dienst Natuurbehoud	Hasselt
Clause, R.	Ministère Regional des Travaux Publics	Angleur
Colenbrander, H.J.	Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO	Delft
Dam, J.C. van	TU, Faculteit der Civiele Techniek	Delft
Dassargues, A.	Université de l'Etat de Liège	Liège
Dautrebande, S.	Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux	Gembloux
Dewil,	Ministère Wallon de l'Equipement et des Transports	Bruxelles
Dollee, A.W.	RIZA	Lelystad
Engelen, G.B.	VU Amsterdam	Hengelo
Erdeghem, D. Van	RU Gent Laboratorium voor Hydrologie	Gent

Gerretsen, J.	Rijkswaterstaat, Directie Limburg	Maastricht
Gevaerts, W.	LISEC	Genk
Hammenecker, J.	Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening	Brussel
Hiver,	Ministère des Travaux Publics	Châtelet
Hodiaumont, A.	C.I.L.E.	Liège
Hoof, F. van	Antwerpse Waterwerken	Rumst
Hooghart, J.C.	Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO	Delft
Janssens, P.	Min. v.d. Vlaamse Gemeenschap Bestuur voor Leefmilieu Dienst Water- en Bodembeleid	Brussel
Juhász-Holterman, Mw. M.H.A.	N.V. Waterleiding Maatschappij Limburg	Maastricht
Klaassen, G.J.	Waterloopkundig Laboratorium	Emmeloord
Korevaar, Mw. M.	Provincie Limburg afdeling Water en Landinrichting	Maastricht
Laga, P.	Belgische Geologische Dienst	Brussel
Lange, W. de	RIZA	Lelystad
Laurent, J.	Ministère Wallon de l'Equipement et des Transport	Bruxelles
Lebbe, L.	RU Gent Geologisch Instituut	Gent
Libotte, J.L.	Office de la Navigation	Liège
Lourtie, E.	Université Catholique de Louvain	Louvain-la-Neuve
Lox, A.	INIEX	Liège
Loy, W.	Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening	Brussel
Meulenberg, M.	Rijkswaterstaat, Directie Limburg	Maastricht
Monjoie, A.	Université de l'Etat de Liège	Liège
Nihant,	Région Wallonne	Liège

Nieuwenhuyzen, M.	Rijkswaterstaat, Directie Limburg	Maastricht
Nota, D.J.G.	Landbouw Universiteit Wageningen	Wageningen
Peters, J.J.	Ministère Wallonne de l'Equipment et des Transports	Châtelet
Pierlot, A.	Region Wallonne	Liège
Poucke, L. Van	Rijksuniversiteit Gent Laboratorium voor Hydraulica	Gent
Roenen, Fr.	Region Wallonne-Meuse Liégeoise	Liège
Rooijen, P. van	Rijks Geologische Dienst	Heerlen
Segeren, A.G.	Waterschap Roer en Overmaas	Sittard
Smedt, F. de	VU Brussel Dienst Hydrologie	Brussel
Smedt, P. de	Vlaamse Maatschappij voor Watervoorziening Bescherming en Leefmilieu	Brussel
Smitz, J.	Université de l'Etat de Liège	Liège
Stoepker, K.E.	IWACO	Boxtel
Silva, W.	RIZA	Lelystad
Sohet, N.	Service de la Politique Générale de l'Eau	Namur
Stuurman, R.J.	Instituut voor Grondwater en Geo-Energie	Delft
Swartenbroekx, P.	VU Brussel Dienst Hydrologie	Brussel
Swinnen, S.	Université de l'Etat de Liège	Liège
Troch, F. De	RU Gent Laboratorium voor Hydrologie	Gent
Troch, P.	RU Gent Laboratorium voor Hydrologie	Gent
Vandewiele, G.L.	VU Brussel	Brussel

Veelen, C.J. van	Rijkswaterstaat, Directie Limburg	Maastricht
Ven, F.H.M. v.d.	RIZA	Lelystad
Verhoeven, R.	RU Gent Laboratorium voor Hydraulica	Gent
Volker, A.	Nationaal Comité IHP	Pijnacker
Water, M. de	Rijkswaterstaat, Directie Limburg	Maastricht
Weerd, B. v.d.	Landbouw Universiteit Wageningen	Wageningen
Wemaere,	Service Geologique de Belgique	Bruxelles
Wery, B.	Université Catholique de Louvain	Louvain-la-Neuve
Wollast, R.	Université Libre de Bruxelles	Bruxelles

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO

RAPPORTEN EN NOTA'S

No. 1. Tweede rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Archivering en Automatische Verwerking van hydrologische gegevens TNO.
Januari 1977.

No. 2. Verslag en aanbevelingen
van de ad hoc-Groep Grondwatermodellen en Computerprogrammatuur TNO.
Juli 1978.

No. 3. De droogte in 1976.
Een samenvatting en overzicht van de over de droogte van 1976 verschenen literatuur - P.K.M. v.d. Heijde.
Augustus 1978.

No. 4. Nederlandse activiteiten in internationaal hydrologisch verband.
Lezingserie, gehouden op 25 april 1978 te Delft, aangevuld met (schematische) overzichten van internationale organisaties en een overzicht van hun vertegenwoordigers in Nederland.
Augustus 1978.

No. 5. Waterkwaliteit in grondwaterstromingsstelsels.
Verslag van de Workshop op 1 en 2 april 1980 te Wageningen, aangevuld met discussiebijdragen en een inventarisatie van het onderzoek in Nederland - (red. J.C. Hooghart).
Augustus 1980.

No. 6. Derde rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Archivering en Automatische verwerking van hydrologische gegevens TNO.
Februari 1981.

No. 7. Overzicht van de wensen van hydrologen en waterbeheerders ten aanzien van het operationele regenwaarnemingennet van het KNMI - J.C. Hooghart.
Oktober 1981.

No. 8.*) Verklarende Hydrologische Woordenlijst van de Gespreksgroep Hydrologische Terminologie.
8a. I Water in de onverzadigde zone
II Water in de verzadigde zone
Januari 1982.
8b. III Atmosferisch water
Juni 1983.
8c. IV Oppervlaktewater
Maart 1985.

*) Verouderd: vervangen door Rapporten + Nota's no. 16.

No. 9. Waterkwaliteit en waterkwantiteit in het IJsselmeergebied.
Verslag van de 2e CHO-studiebijeenkomst op 2 en 3 november 1981, De Eemhof, Zuidelijk Flevoland, aangevuld met discussiebijdragen - (red. J.C. Hooghart).
Februari 1982.

No. 10. Rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Grondwatermodellen, CHO-TNO.
April 1982.

No. 11. Inventarisatie Grondwaterkwaliteitsmodellen.
L.J.M. Boumans.
Oktober 1982.

No. 12. Grondwaterkwaliteit in relatie met onderzoek en beleid.
Verslag van de 3e CHO-studiebijeenkomst op 15 maart 1983 te Wageningen, aangevuld met discussiebijdragen - (red. J.C. Hooghart).
Juni 1983.

No. 12a. Voorlopig overzicht van inventarisaties waarin grondwater(kwaliteits)modellen voorkomen of hiermee in verband staan.
J.C. Hooghart.
Januari 1984.

No. 13. Vergelijking van modellen voor het onverzadigd grondwatersysteem en de verdamping.
Verslag van de 4e CHO-studiebijeenkomst op 24 oktober 1984, georganiseerd in samenwerking met de Studiegroep Hupselse Beek - (red. J.C. Hooghart).
Maart 1985.

No. 14.*) Meten, meetnetten en optimale meetnetontwerpen ten dienste van het waterbeheer.
Verslag van:
- Voorjaarsbijeenkomst van de KIvI Sectie Waterbeheer:
  "Meten voor waterbeheer", mei 1984.
- Colloquium van de Studiegroep Statistiek in de hydrologie CHO-TNO:
  "Meetontwerp en optimalisatie", november 1984.
  (red. P. v.d. Kloet en J.C. Hooghart).
  Januari 1986.

*) Uitverkocht.

No. 15. Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik-Maasbracht.
Le système hydrologique dans la région frontalière Liège- Maasbracht.
Verslag van de 5e CHO-studiebijeenkomst op 13 december 1985, georganiseerd in samenwerking met de Nationale IHP-comités van België en Nederland en de Contactgroep Hydrologie van het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek uit België.
(red. J.C. Hooghart).
April 1986.

No. 16. Verklarende Hydrologische Woordenlijst van de Gespreksgroep Hydrologische Terminologie, waarin opgenomen de hoofdstukken:
I Algemene termen
II Atmosferisch Water
III Water in de onverzadigde zone
IV Water in de verzadigde zone
V Oppervlaktewater
Oktober 1986, hernieuwde uitgave.

No. 17.*) Duurzaamheid rioolleidingen; een literatuurstudie naar aantastingsmechanismen.
R.B. Polder.
Februari 1987.

*) Uitverkocht.

No. 18. Ruimtelijke variabiliteit van bodem en water.
Verslag van de 6e CHO-studiebijeenkomst op 22 oktober 1986.
(red. J.C. Hooghart).
Februari 1987.

No. 19. Van Penman naar Makkink; een nieuwe berekeningswijze voor de klimatologische verdampingsgetallen.
Eindrapport van de KNMI-Projectgroep en de CHO-Begeleidingsgroep Verdampingsberekeningen.
(red. J.C. Hooghart en W.N. Lablans).
December 1988.

No. 20. Tijdreeksen in bodem en water.
Inleidingen van de lezingendag op 25 januari 1989 van de NRLO-Werkgroep Ruimtelijke variabiliteit van bodem en water en de Studiegroep Statistiek in de Hydrologie van de CHO-TNO.
December 1988.

No. 21. Neerslagmeting en -voorspelling; toepassing van moderne technieken, zoals radar- en satellietwaarnemingen.
Verslag van de 7e CHO-studiebijeenkomst, georganiseerd in samenwerking met SAMWAT, op 16 november 1988.
(red. J.C. Hooghart).
Februari 1989.

No. 22. Integraal Waterbeheer in het Gooi/Utrechts stuwwallen- en plassengebied.
Verslag van de op 7 april 1989 in Bussum gehouden themadag, georganiseerd door het Zuiveringschap Amstel en Gooiland en de Provincie Utrecht, in samenwerking met de CHO-TNO.
(red. L. van Liere, R.M.M. Roijackers en P.J.T. Verstraelen).
Augustus 1989.

No. 23. Bodemwaterkwaliteit in wisselwerking met biologische, chemische en hydrologische processen.
Verslag van de 8e CHO-studiebijeenkomst op 8 mei 1990.
(red. J.C. Hooghart)
September 1990.

No. 24. Ruimtelijke statistiek van bodem en water.
Inleidingen van de lezingendag op 24 januari 1991 van de NRLO-werkgroep Ruimtelijke variabiliteit van bodem en water en de Studiegroep Statistiek in de Hydrologie van de CHO-TNO.
(red. J.C. Hooghart)
Januari 1991.

No. 25. Geo-informatie in Nederland.
Inleidingen van de lezingendag op 2 mei 1991 in samenwerking met het Samen werkingsverband Aardkundige Gegevensverstrekkende Instituten (SAG II).
(red. J.C. Hooghart)
Mei 1991.

No. 26 Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik-Maasbracht; onderzoekresultaten 1985-1990. Le système hydrologique dans la région frontalière Liège-Maasbracht; résultats des recherches 1985-1990.
Verslag van de 9e CHO-studiebijeenkomst op 9 januari 1991, georganiseerd in samenwerking met de Nationale IHP-comité's van België en Nederland en de Contactgroep Hydrologie van het Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek uit België.
(red. J.C. Hooghart).
Augustus 1991.

No. 27 Richtlijnen voor computerprogrammatuur in de hydrologie.
Eindrapport van de CHO-Werkgroep Richtlijnen computerprogrammatuur hydrologie.
(red. J.C. Hooghart, K. Kovar en J.M.P.M. Peerboom) (in bewerking).

Voor bestellingen en informatie: CHO-TNO
Postbus 6067
2600 JA DELFT
Telefoon: 015 - 69 69 00