

LANDELIJK GRONDWATER MODEL;
CONCEPTUELE MODELBESCHRIJVING

10

Omslagontwerp: Anne-Claire Alta bNO

Productie : Studio RIVM

Druk : RIVM; 1993

RIVM-rapport nr. 714305004

ISBN nr: 90-6960-026-9

**LANDELIJK GRONDWATERMODEL;
CONCEPTUELE MODELBESCHRIJVING**

ir. M.J.H. Pastoors RIVM

november 1992

Deelrapport in kader van het project "Effecten Grondwaterwinning" dat is uitgevoerd als basisstudie ten behoeve van het Beleidsplan Drink- en Industrierwatervoorziening en bijbehorend Milieu-effectrapport.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Directoraat- Generaal Milieubeheer; Directie Drinkwater, Water, Landbouw; Afdeling Drink- en Industrierwatervoorziening in het kader van het project Infrastructuur Drink- en Industrierwatervoorziening. (projectnr. 719106, deelprojectnr 714305).

VERZENDLIJST

nummer

- 1 - 2 Hoofd van de Hoofdafdeling Drinkwater en Milieukwaliteit van de Directie Drinkwater, Water, Landbouw van het Directoraat-Generaal Milieubeheer van het Ministerie van VROM
- 3 - 13 Hoofd van de Afdeling Drink- en Industrierwatervoorziening van VROM/DGM/DWL
- 14 Directeur-Generaal Milieubeheer van het Ministerie van VROM
- 15 Plv. Directeur-Generaal Milieubeheer, hoofddirecteur Ketenbeheer en Milieuzorg
- 16 Plv. Directeur-Generaal Milieubeheer, hoofddirecteur Milieukwaliteit en Emissiebeleid
- 17 Plv. Directeur-Generaal Milieubeheer, hoofddirecteur Algemeen Milieubeleid
- 18 Directie RIVM
- 19 Directeur sector 7, RIVM
- 20 Directeur sector 4, RIVM
- 21 HID/DX RWS/RIZA
- 22 RWS/RIZA, Hoofdafdeling WS
- 23 RWS/RIZA, Hoofdafdeling AO
- 24 RWS/RIZA, Hoofdafdeling BX
- 25 RWS/RIZA, Hoofdafdeling IO
- 26 RWS/RIZA, Hoofdafdeling RA
- 27 - 28 RWS/RIZA; vestiging Arnhem
- 29 RWS/RIZA; archief
- 30 Hoofddirectie van de Waterstaat, Hoofdafdeling C
- 31 - 37 Bibliotheek RWS/RIZA; vestiging Lelystad
- 38 - 39 Bibliotheek RWS/RIZA; vestiging Dordrecht
- 40 Bibliotheek RIVM
- 41 Bureau Projecten- en Rapportenregistratie RIVM
- 42 Hoofd Voorlichting en Public relations RIVM
- 43 LBG-depot bibliotheek RIVM
- 44 - 70 Auteurs
- 71 CHO-STOWA
- 72 Uitgeverij Spectator (t.a.v. dhr.Kretzschmar)
- 73 Depot van Nederlandse publikaties en Nederlandse bibliografie

VERZENDLIJST (vervolg)

nummer

- 74 - 75 Rijks Planologische Dienst
- 76 - 77 Planbureau VEWIN
- 78 Staring Centrum, bibliotheek
- 79 Landbouwwuniversiteit Wageningen, bibliotheek
- 80 Technische Universiteit Delft, bibliotheek
- 81 Vrije Universiteit Amsterdam, Faculteit Biologie, bibliotheek
- 82 Universiteit Amsterdam, Faculteit Biologie, bibliotheek
- 83 Universiteit Utrecht, Faculteit Biologie, bibliotheek
- 84 Universiteit Groningen, Faculteit Biologie, bibliotheek
- 85 Universiteit Leiden, Faculteit Biologie, bibliotheek
- 86 Katholieke Universiteit Nijmegen, Faculteit Biologie, bibliotheek
- 87 Nederlandse Hydrologische Vereniging
- 88 - 112 Reserve exemplaren
- 113 - 212 Bijlage bij Beleidsplan Drink- en Industrierwatervoorziening en MER

VOORWOORD

Al sinds de introductie van grootschalige grondwaterwinningen wordt onderkend, dat deze activiteit op lokale schaal nadelige effecten heeft op de natuur en het produktievermogen van landbouwgronden. Het fenomeen verdroging is dus, met uitzondering van de naamgeving, die van recente datum is, bepaald niet nieuw. Tot op zekere hoogte werd die verdroging als een min of meer onvermijdelijk effect van de winning van grondwater beschouwd.

Parallel aan de toenemende onttrekking van grondwater voor de drink- en industriewatervoorziening zijn ten behoeve van de landbouw vergaande ontwateringsmaatregelen uitgevoerd, waarvan de effecten niet beperkt bleven tot het gebied waarin ze werden uitgevoerd. Ook de verbeterde ontwatering heeft een substantiële bijdrage aan de verdroging geleverd.

Inmiddels is uit gericht onderzoek gebleken dat de natuur in grote delen van Nederland te lijden heeft van te lage grondwaterstanden en te geringe hoeveelheden kwelwater. Door de toenemende vermessing en verzuring worden de effecten van verdroging nog eens extra versterkt.

Dit heeft geleid tot het besef, dat het er met de "natte" natuur in Nederland slecht voor staat.

Één van de vele vragen die zich thans voordoet is of de grenzen aan de groei van de winning van grondwater uit het oogpunt van duurzaamheid zo langzamerhand zijn bereikt.

Er is een nog immer groeiende behoefte aan goed en betrouwbaar drinkwater. De kwaliteit van het oppervlaktewater laat, ondanks alle inspanningen op dat gebied, nog veel te wensen over, zodat grondwater als bron voor de openbare drinkwatervoorziening nog de voorkeur krijgt. De vraag is echter of het huidige onttrekkingsniveau, rekening houdend met het spanningsveld tussen grondwaterwinning en natuurbehoud en -ontwikkeling, nog voor uitbreiding in aanmerking kan komen of dat de grenzen inderdaad zijn bereikt. Of anders gezegd, op welke wijze kan de drinkwatervoorziening voor de komende 25 à 30 jaar worden veilig gesteld, rekening houdend met de natuurbelangen.

Deze en andere vragen zijn voor het Directoraat-Generaal Milieubeheer (DGM) van het ministerie van VROM aanleiding het Beleidsplan Drink- en Industriewatervoorziening (BPDIV) op te stellen, waarin de uitgangspunten en hoofdlijnen van het beleid ten aanzien van de openbare watervoorziening voor de lange termijn worden vastgelegd. Overeenkomstig het Besluit Milieu-effectrapportage van de Wet Algemene Bepalingen Milieuhygiëne (thans Wet Milieubeheer) is de in het BPDIV voorgestelde uitbreiding van de infrastructuur voor de watervoorziening m.e.r.-plichtig. Ter onderbouwing van zowel de Milieu-effect rapportage (MERDIV) als het BPDIV is landsdekkend onderzoek uitgevoerd.

De opdracht voor dit onderzoek, die het ministerie van VROM in 1990 aan het RIVM verstrekke, omvatte het ontwikkelen en toepassen van een instrument waarmee de effecten van (wijzigingen in de) grondwaterwinning op landsdekkende schaal zichtbaar kunnen worden gemaakt. In het bijzonder diende daarbij aandacht te worden besteed aan de bepaling van effecten op de natuur.

De realisatie van een al langer aanwezige behoefte van het RIVM om een ecohydrologisch voorspellingsmodel ter beschikking te hebben, werd vanaf dat moment urgent. Bij het RIZA bestond de behoefte het voor de 3^e Nota Waterhuishouding ontwikkelde Dosis Effect Model Natuur Terrestrisch (DEMNAT) verder te ontwikkelen. Eind 1990 besloten RIVM en RIZA de verdere ontwikkeling van DEMNAT (versie 2) gezamenlijk ter hand te nemen. Hieruit is een intensieve en vruchtbare samenwerking tussen RIVM, RIZA, het Centrum voor Milieukunde Leiden (CML), de Landbouwuniversiteit Wageningen (LUW) en het Rijksherbarium/Hortus Botanicus (RHHB) te Leiden voortgekomen. Dankzij de synthese van een aantal zeer verschillende disciplines is binnen een relatief kort tijdsbestek een aantal unieke produkten tot stand gebracht.

Een treffend voorbeeld daarvan is FLORBASE-0, een bestand van vindplaatsen van de wilde flora in Nederland. In dit bestand zijn ca 3,5 miljoen vondsten in de periode 1975 - 1990 met een resolutie van één km² opgenomen. Ondanks de grote verschillen in de wijze waarop de gegevens waren verzameld en opgeslagen is het bestand in een periode van ca 1,5 jaar samengesteld uit gegevens van 22 bronhouders. Met FLORBASE-0 zijn voor het eerst landsdekkend recente gegevens over wilde planten uit vele bronnen samengebracht en voor velerlei toepassingen beschikbaar gekomen. De aanleiding voor de opdracht aan het RHHB om FLORBASE-0 te vervaardigen, was de behoefte aan een bestand waarmee de actuele toestand van de natuur kan worden beschreven, zodat met behulp van een dosis-effectmodel voorspeld kan worden welke effecten te verwachten zijn van toekomstige ingrepen in de waterhuishouding, bijvoorbeeld door aanpassingen in de grondwaterwinning. In DEMNAT-2 zijn de laatste inzichten op het gebied van de interactie tussen bodem, water en vegetatie verwerkt. Bij de ontwikkeling van DEMNAT-2 is gebruik gemaakt van gegevens, die zijn verzameld in het kader van het project "Landschapsecologische Kartering Nederland (LKN)" van de Rijksplanologische Dienst (RPD), de Directie Natuur, Bos, Landschap en Fauna (NBLF) van het ministerie van LNV en het DGM.

CML, LUW, RHHB, RIVM en RIZA hebben elk vanuit hun eigen deskundigheid een bijdrage geleverd aan DEMNAT-2.

Verder wordt een belangrijke plaats binnen het onderzoek ingenomen door de ontwikkeling van het Landelijke Grondwater Model (LGM) door het RIVM. Hiermee zijn veranderingen in grondwaterstanden, grondwaterstijghoogten en kwel/infiltratie onder invloed van diverse grondwaterwinscenario's bepaald.

Het RIZA heeft de daardoor geïntroduceerde veranderingen in de hoeveelheid systeemvreemd water berekend met het landelijke model voor de onverzadigde zone DEMGEN. De aldus berekende veranderingen vormen de doses voor DEMNAT-2 en zijn derhalve de grondslag voor de voorspelde effecten op de natuur.

Over de verschillende aspecten van het onderzoek is uitvoerig verslag uitgebracht in een zestiental rapporten. De overige vijftien rapporten zijn in de literatuurlijst van dit rapport vermeld.

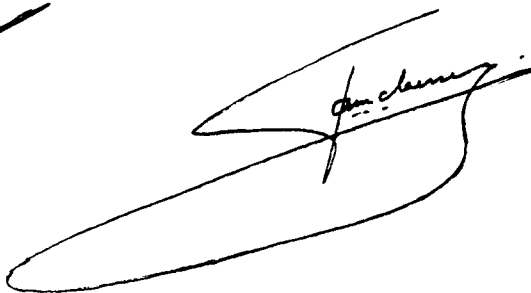
De projectleider,

ir. J.H.C.Mülschlegel

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

De projectleider DEMNAT-2,

drs. F.A.M.Claessen

A handwritten signature in black ink, featuring a large, sweeping loop on the left and a more complex, scribbled structure on the right.

INHOUDSOPGAVE.

Verzendlijst	v
Voorwoord	vii
Inhoudsopgave	xi
Lijst van bijlagen	xiii
Summary	xv
Samenvatting	xvii
1. Inleiding	1
2. Probleemstelling : doel en opzet van het onderzoek	3
2.1 Probleemstelling	3
2.2 Concretisering van de doelstellingen; gewenste resultaten	4
2.3 Opzet en lijn van het onderzoek	5
3. Hydrologische beschrijving van het onderzoeksgebied	7
3.1 Algemeen	7
3.2 Geologie	7
3.3 Geohydrologie	9
3.4 De topografische en waterhuishoudkundige situatie	11
3.5 De bodemkundige situatie	13
3.6 Bodemgebruik	14
3.7 Grondwaterstanden en stijghoogten	15
3.8 De ligging van het freatisch vlak	17
4. Het onderzoek van het hydrologische systeem	19
4.1 Keuze van het hydrologische systeem	19
4.2 Deelsysteem grondwater	21
4.2.1 De systeemvergelijking	21
4.2.2 De aangehouden geohydrologische schematisering	22
4.2.3 De bepaling van de waarden van de grondconstanten	22
4.2.3.1 Het doorlaatvermogen van watervoerende pakketten	23
4.2.3.2 De weerstand van slechtdoorlatende lagen	24
4.2.3.3 De weerstand van de slechtdoorlatende afdekkende laag	25
4.3 Deelsysteem grondwateraanvulling	26
4.4 Deelsysteem grote waterlopen	29
4.5 Deelsysteem polder	31
4.6 Deelsysteem vrij afwaterende gebieden	33
4.7 Grondwateronttrekkingen	35
5. Gebruikte rekenprogramma's	39

6.	Simulatie 1988	43
6.1	Algemeen	43
6.2	Referentieperiode	43
6.3	Berekening van de gemiddelde grondwaterstijghoogte van 1988	47
6.4	Berekening van de gemiddelde kwel/infiltratie van 1988	56
7.	Conclusies	59
8.	Aanbevelingen	61
9.	Literatuurlijst	63
9.1	Geraadpleegde literatuur	63
9.2	Rapporten, uitgebracht in kader van onderzoek "Effecten Grondwaterwinning"	65

Appendix

LIJST VAN BIJLAGEN.

1. Overzicht geohydrologische profielen.
2. Dikte van de afdekkende slechtdoorlatende laag.
3. Geologische eenheden behorende tot de eerste slechtdoorlatende laag.
4. Dikte van de eerste slechtdoorlatende laag.
5. Diepte bovenkant van de eerste slechtdoorlatende laag.
6. Geologische eenheden behorende tot de tweede slechtdoorlatende laag.
7. Dikte van de tweede slechtdoorlatende laag.
8. Diepte bovenkant van de tweede slechtdoorlatende laag.
9. Geologische eenheden behorende tot de derde slechtdoorlatende laag.
10. Dikte van de derde slechtdoorlatende laag.
11. Diepte bovenkant van de derde slechtdoorlatende laag.
12. Geologische eenheden behorende tot de geohydrologische basis.
13. Diepte bovenkant van de geohydrologische basis.
14. Overzicht van de droogtegevoeligheidsklassen.
15. Grondwatertrappenkaart.
16. Overzicht van het bodemgebruik in 1988.
17. Overzicht doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket.
18. Overzicht doorlatendheid van het tweede watervoerende pakket.
19. Overzicht doorlatendheid van het derde watervoerende pakket.
20. Overzicht doorlatendheid van het vierde watervoerende pakket.
21. Overzicht doorlaatvermogen (kD-waarde) van het eerste watervoerende pakket.
22. Overzicht doorlaatvermogen (kD-waarde) van het tweede watervoerende pakket.
23. Overzicht doorlaatvermogen (kD-waarde) van het derde watervoerende pakket.
24. Overzicht doorlaatvermogen (kD-waarde) van het vierde watervoerende pakket.
25. Waarden van de verticale weerstand van de eerste slechtdoorlatende laag.
26. Waarden van de verticale weerstand van de tweede slechtdoorlatende laag.
27. Waarden van de verticale weerstand van de derde slechtdoorlatende laag.
28. Verbreiding van het basisveen binnen de afdekkende laag, verdeeld in eenheden voor de berekening van de weerstand.
29. Waarden van de verticale weerstand van de slechtdoorlatende afdekkende laag.
30. Grondwateraanvulling binnen het modelgebied [mm/dag].
31. Gemodelleerde waterlopen.
32. Gemiddelde peilen van polders en van boezemwateren.
33. Lokaties van grondwaterwinplaatsen binnen modelgebied van LGM (industriële onttrekking > 50000 m³/jaar); situatie 1988.
34. Deelgebieden van het LGM t.b.v. BPDIV en MER.
35. Gebieden met kwel of infiltratie, berekend met het LGM (gemiddelde situatie 1988).

SUMMARY

The main goal of this study, carried out in support of the Dutch National Policy Plan for Drinking Water and Industrial Water Supply, was to elaborate on the effects of groundwater abstraction on terrestrial ecosystems (the latter not considered in this report).

Two areas, a "study area" and a "model area", were distinguished. The study area was the area in which the selected groundwater abstractions were varied, while the model area was the area modelled to quantify the effects of the groundwater abstractions. The model area was larger than the study area. Modelling was carried out in 10 model areas covering 75% of the land surface of the Netherlands.

The RIVM Groundwater Model for the Netherlands (LGM) was developed in the preparation of the National Policy Plan to assess the effect of changes in groundwater abstractions on the geohydrological system. This effect is expressed in terms of hydrological variables: the changes in phreatic water level, groundwater heads in deeper aquifers, fluxes between the upper boundary of the geohydrological system and the first aquifer, and fluxes across the aquitards. Eight scenarios describing decreasing/increasing several types of groundwater abstractions were distinguished.

The subsoil of the Netherlands is schematized into a system of four aquifers, separated by three semi-pervious layers (aquitards). The bottom layer of the deepest aquifer is assumed to be impervious. The first aquifer is assumed to be locally overlaid by the so-called top layer. This schematization is based on present knowledge of the extent of geological formations especially the semi-pervious layers.

LGM consists of a linked system of computer program packages AQ-FEM and a Geographic Information System (GIS). Two environments are distinguished: AQ-FEM and GIS. The AQ-FEM environment comprises the system of AQ-FEM program packages, utility programs and procedures. The main task of the GIS environment is the storage, processing and visualization of spatial data, including the modelling results. The communication between the two environments is based on ASCII files. The AQ-FEM computer programs are based on the numerical technique of finite elements, triangles and quadrilaterals. The geohydrological system consists of a series of aquifers separated by aquitards. The flow in the system is assumed to be quasithree-dimensional. This means that the flow in aquifers is assumed to be two-dimensional and horizontal and the flow in aquitards vertical. Though the AQ-FEM program package can also handle transient conditions, they are currently used to simulate steady-state flow only.

The model covers about 26,000 km² (75%) of the land surface of the Netherlands. Because of the presence of brackish and saline groundwater, the western part of the country was not modelled. The resolution of the model is about 1 km². About 90% of the total groundwater abstractions carried out by the drinking-water companies in the Netherlands takes place inside the modelled area.

The current version of LGM, developed within the framework of this study, proved to be an efficient and versatile tool in calculating the hydrological effects of changes in groundwater abstractions. These were used as input for the ecohydrological modelling (the latter not considered in this paper).

Most attention has been given to calculating the seepage between the upper boundary of the geohydrological system and the first aquifer and the groundwater head in the first aquifer. Assuming a stationary flow in the system, the calculated groundwater heads in the first aquifer were compared with the measured values.

The geographical information system proved to be an efficient tool in modelling large areas, characterized by many spatially distributed parameters. Once the data is available, it is relatively simple to make a new model of an area. Only a new finite element network needs to be generated and input data for the network nodes.

Further development of LGM will take place in the framework of other environmental studies. The collection of additional (geo)hydrological data, guided by the accuracy requirements, is especially important for the use of the LGM in more local or regional-related studies. The LGM will be expanded with a module to calculate the travel time of groundwater. The model will then also be used to predict solute transport in the groundwater. The western part of the Netherlands has not yet been modelled because of the presence of brackish and saline groundwater. A module will have to be developed in the future which takes into account the effects of fresh/saline groundwater.

SAMENVATTING

Ten behoeve de onderbouwing van het Beleidsplan Drink- en Industriewatervoorziening (BPDIV) en bijbehorende MER is een onderzoek Effecten Grondwaterwinning uitgevoerd. Als onderdeel hiervan is het Landelijk Grondwater Model (LGM) ontwikkeld, waarmee de geohydrologische gevolgen van veranderingen in de bestaande grondwateronttrekkingen zijn berekend.

In het onderzoek ging het om het verwerven van inzicht in de globale effecten van bepaalde beleidsvoornemens op de grondwaterstand en op de natuur. De studie kenmerkt zich door een aantal scenario's die op hun merites worden beoordeeld ten opzichte van een referentie situatie. Er is derhalve volstaan met een mate van detail, die aansluit op de doelstelling van het onderzoek, te weten het landsdekkend berekenen van hydrologische effecten, waarvan de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid voldoende groot moeten zijn om te worden gebruikt voor het uitvoeren van ecologische effectberekeningen.

In het onderzoek is onderscheid gemaakt tussen onderzoeksgebied en modelgebied. Het onderzoeksgebied is het gebied waarbinnen de geselecteerde grondwateronttrekkingen zijn gevarieerd. Het modelgebied is het gebied dat gemodelleerd is om de effecten van veranderingen in de grondwateronttrekkingen te kwantificeren. Dit gebied is groter dan het onderzoeksgebied omdat de hydrologische randvoorwaarde op de randen van het modelgebied geen invloed mogen uitoefenen op de als gevolg van de verandering in de grondwateronttrekking berekende effecten binnen het modelgebied.

De opslag en bewerking van data geschieden met het Geografisch Informatie Systeem ARC/INFO. Het oplossen van het grondwaterstromingsprobleem gebeurt met het rekenprogramma AQ-FEM, dat op de eindige elementenmethode is gebaseerd.

Uit overwegingen van doelmatigheid met betrekking tot het verzamelen van de geohydrologische gegevens is uiteindelijk gekozen voor een schematisatie van de ondergrond van Nederland in vier watervoerende pakketten, gescheiden door slechtdoorlatende lagen. Het bovenste watervoerende pakket is afgedekt met een slechtdoorlatende (dek)laag. De slechtdoorlatende lagen mogen ontbreken. Voor deze landelijke schematisatie is gebruik gemaakt van bestaande kennis over parameterwaarden en inzichten in de verbreiding van watervoerende pakketten en slechtdoorlatende lagen.

In het onderzoek is gestreefd naar een elementgrootte van ca. 1 km². Op basis van hydrologische karakteristieken is Nederland in te delen in verschillende deelgebieden. De huidige versie van het LGM omvat tien deelmodellen die elkaar gedeeltelijk overlappen.

Het totale modelgebied beslaat ca. 28000 km², waarvan ca. 26000 km² in Nederland ligt. Dit is ruim 75 % van het vasteland van Nederland.

De vraagstelling van het hydrologische onderzoek is voornamelijk gericht op het vaststellen van de hydrologische effecten van ingrepen in de grondwateronttrekking. Deze effecten dienen als doses voor het ecologisch effectmodel DEMNAT-2. Bij het modelleren is de meeste aandacht besteed aan het berekenen van de kwel naar het topsysteem en de grondwaterstijghoogte in het eerste watervoerende pakket. Omdat het gaat om de lange termijn effecten is uitgegaan van een stationaire grondwaterstroming. Voor de tijdsafhankelijke parameters is de gemiddelde waarde van 1988 ingevoerd.

De berekende grondwaterstijghoogten in het eerste watervoerende pakket zijn getoetst aan gemeten, over 1988 gemiddelde, grondwaterstijghoogten. Aan de berekening van de grondwaterstijghoogten in de dieper gelegen watervoerende pakketten is slechts in zeer beperkte mate aandacht besteed.

Het GIS is een zeer bruikbaar instrument bij het modelleren van grote gebieden, waarbij veel ruimtelijk verdeelde parameters een rol spelen. Het GIS biedt mogelijkheden om snel en efficiënt invoer gegevens te controleren, berekende en gemeten waarden met elkaar te vergelijken, en berekeningsresultaten uit verschillende scenario's met elkaar te vergelijken. Het maken van een nieuw model voor een gebied waarvan de data al beschikbaar zijn is relatief eenvoudig. Het genereren van een nieuw netwerk, waaraan de modeldata moeten worden toegekend, is voldoende. Het LGM is dermate flexibel dat ook andere toepassingen (scenario's, lokale detaillering) zonder omvangrijke ingrepen in de modelstructuur mogelijk zijn.

De ontwikkeling van het LGM is echter nog niet voltooid. Het LGM zal ook worden ingezet bij het voorspellen van de ontwikkeling van de grondwaterkwaliteit en de daarmee samenhangende ruwwaterkwaliteit op grondwaterwinplaatsen. Het wordt daartoe uitgebreid met een moduul, waarmee transport van opgeloste stoffen in het grondwater kan worden berekend.

Bij de verdere ontwikkelingen van het LGM is meer ruimte gereserveerd voor een gestructureerde analyse van de betrouwbaarheid van de berekeningsresultaten. Op deze wijze kunnen gemaakte aannamen, zoals de schematisering, vereenvoudiging, gebruikte parameterwaarden e.d., worden getoetst.

Verder zal het LGM worden uitgebreid met de mogelijkheid om de effecten van zoet/zout grondwater in rekening te kunnen brengen, zodat ook berekeningen kunnen worden uitgevoerd waarbij deze effecten een rol kunnen spelen (bijv in de kuststreken van Nederland).

1. INLEIDING

In 1990 bracht het Directoraat Generaal Milieubeheer (DGM) van het Ministerie van Volksgezondheid, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer de nota "Naar een glasheldere toekomst" uit (VROM, 1990). Hierin maakte het DGM het voornemen kenbaar tot het opstellen van een Beleidsplan Drink- en Industrie Watervoorziening (BPDIV), waarin het DGM de hoofdlijnen van het beleid voor de lange termijn (30 jaar) vastlegt voor een goede drink- en industriewatervoorziening.

Ter onderbouwing van het beleidsplan was onderzoek noodzakelijk. Daarvoor heeft het DGM in 1990 het RIVM de opdracht verleend een methodiek te ontwikkelen, waarmee de vraag kan worden beantwoord wat de effecten zouden zijn van de (verandering in de) grondwaterwinning op andere belangen, in het bijzonder op de terrestrische natuur.

Een belangrijk onderdeel van de studie vormde de berekening van de geohydrologische effecten van ingrepen in de grondwaterwinning. Deze effecten zijn berekend met het Landelijk Grondwater Model (LGM). Een belangrijke reden voor de ontwikkeling van het LGM was onder meer dat de resultaten niet alleen landsdekkend ter beschikking moesten komen, maar ook qua nauwkeurigheid en betrouwbaarheid in verschillende delen van Nederland vergelijkbaar moesten zijn. Dit verklaart mede waarom niet is uitgegaan van een compilatie van resultaten uit regionale onderzoeken die in grote delen van Nederland in de afgelopen decennia zijn verricht. Daarnaast dienden de resultaten ecologisch relevant te zijn, hetgeen om een relatief kleinschalige modellering vroeg.

Ook de geohydrologische data en de termijn waarop ze landsdekkend beschikbaar konden komen leverden voorwaarden op voor het modelonderzoek. Bij het ontwikkelen van deze versie van het Landelijk Grondwater Model (LGM) is daarom gekozen voor een geohydrologische schematisering met maximaal vier watervoerende pakketten en in het horizontale, tweedimensionale vlak een oplossend vermogen van gemiddeld 1 km².

Het voorliggende rapport beschrijft het toegepaste modelconcept en de voor het model benodigde gegevens. De resultaten van de met het LGM uitgevoerde berekeningen voor een aantal scenario's, vertaald in de hydrologische doses voor het ecologische effectmodel DEMNAT-2, zijn beschreven in (Pastoors, 1992).

Het rapport is op de volgende wijze opgebouwd.

Hoofdstuk 2 beschrijft het doel en de opzet van het onderzoek.

Hoofdstuk 3 geeft een hydrologisch gerichte beschrijving van het onderzoeksgebied. Achtereenvolgens worden behandeld de geologische situatie, waarbij met name aandacht wordt besteed aan de verbreiding van de slechtdoorlatende lagen, de geohydrologie, de

topografie en de waterhuishoudkundige situatie, het bodemgebruik en de bodemkundige situatie en tenslotte de grondwaterstanden en grondwaterstijghoogten in het modelgebied.

In hoofdstuk 4 worden het gekozen hydrologische systeem, de deelsystemen en de verschillende parameters besproken.

Hoofdstuk 5 geeft een beknopte beschrijving van de gebruikte rekenprogramma's.

Hoofdstuk 6 behandelt de resultaten van de simulatie van de "huidige situatie", waarvoor het jaar 1988 is aangehouden.

In hoofdstuk 7 zijn conclusies geformuleerd.

Tenslotte worden in hoofdstuk 8 aanbevelingen gegeven bij de verdere ontwikkeling van het Landelijk Grondwater Model.

2. PROBLEEMSTELLING; DOEL EN OPZET VAN HET ONDERZOEK

2.1 Probleemstelling

Grondwater is in Nederland een zeer belangrijke bron voor de openbare drinkwatervoorziening en voor de industrie. Ongeveer 65% van het drinkwater wordt bereid uit grondwater. Daarnaast onttrekt de industrie grondwater als proces- of koelwater, terwijl ook de landbouw grondwater gebruikt ten behoeve van de beregening van landbouwgronden.

De mogelijkheden voor de winning van grondwater zijn naast de technische aspecten afhankelijk van een belangenafweging. Een belangrijk aspect hierbij is de problematiek van de verdroging.

De grondwaterwinning van 1 à 1,5 miljard m³ per jaar is één van de oorzaken van verdrogingsverschijnselen in van oorsprong natte en vochtige natuur- en bosgebieden, die afhankelijk zijn van (ondiepe) grondwaterstanden. In het BPDIV zal het rijksbeleid voor de lange termijn (30 jaar) worden vastgelegd met betrekking tot een duurzame veiligstelling van de drink- en industriewatervoorziening. Daarvoor is het noodzakelijk zo goed mogelijk te onderbouwen welke inzet van grondwater als bron voor de openbare watervoorziening (nog) mogelijk is. In het Milieu-effectrapport (MER) worden de uitgangssituatie en een aantal scenario's met betrekking tot de toekomstige drink- en industriewatervoorziening vanuit het grondwater beschreven. Ten behoeve van het BPDIV en MER is aan het RIVM gevraagd een methode te ontwikkelen, waarmee de schade aan en het herstel van de terrestrische natuur als gevolg van veranderingen in de waterhuishouding c.q. grondwateronttrekking op landelijke schaal zichtbaar kan worden gemaakt. Voor het onderzoek ten behoeve van het BPDIV en MER is in dit verband relevant aan te geven in welke mate de toename in de grondwateronttrekking (op landelijke schaal) verdere nadelige effecten zal opleveren voor de terrestrische natuur en in hoeverre een vermindering van de grondwateronttrekking een bijdrage kan leveren aan het herstel, behoud en/of ontwikkeling van de terrestrische natuur.

Op basis van hydrologische karakteristieken is Nederland in drie typen gebieden in te delen, die bij het berekenen van de hydrologische gevolgen van een grondwaterwinning om een verschillende aanpak vragen. Deze gebieden zijn: hoge zandgebieden, poldergebieden en vrij-afwaterende gebieden.

Door hun hoge ligging en de goede doorlatendheid van de ondergrond zijn de hoge zandgebieden infiltratiegebieden. Natuurlijke waterlopen worden in deze gebieden niet aangetroffen. De hydrologische effecten zullen met name in de kwetsbare gebieden langs de randen van de hoge zandgebieden van belang zijn. Dit zijn van oudsher de gebieden

waar het afstromende grondwater opkwelde en via een afwateringsstelsel buiten het gebied werd gebracht. Zowel waterhuishoudkundige ingrepen (versnelde afvoer van water), alsmede de toename van de grondwaterwinning in het zandgebied hebben de grondwaterstroming langs de randen van de hoge zandgebieden beïnvloed.

In poldergebied is de situatie wezenlijk anders. Hierin is meestal een dicht slotenstelsel aanwezig, dat goed op peil kan worden gehouden. Meestal bevinden zich weerstandbiedende lagen in de ondergrond die voor wat betreft de hydrologische effecten van grondwaterwinning een spreidende en dempende werking hebben. De grondwaterstroming naar het oppervlaktewater (de kwel) is in deze gebieden een belangrijke component voor de terrestrische en (semi-)aquatische vegetatie.

Als laatste zijn de vrij afwaterende gebieden onderscheiden, gebieden waarin de afvoer van het water in de waterlopen gekoppeld is aan de hoogte van de grondwaterstand. In het zomerhalfjaar, bij lage grondwaterstanden, vallen delen van het afwateringsstelsel droog om in het winterhalfjaar weer aan de afwatering te gaan deelnemen. Hiertoe behoren o.a. de overgangsgebieden tussen de heuvelruggen en de poldergebieden.

Het onderzoek ten behoeve van het BPDIV beperkt zich tot grondwateronttrekkingen ten behoeve van de openbare drinkwatervoorziening en de eigen winningen van de industrie en de COAR (Commercieel, Openbaar, Agrarisch met uitzondering van de beregening, en Recreatief verbruik) met een onttrekking van meer dan 50.000 m³ per jaar. Andere hydrologische ingrepen die de natuur beïnvloeden (polderpeilveranderingen, versnelde afvoer van oppervlaktewater, etc), zijn niet in dit onderzoek meegenomen.

Winning van grondwater is een ingreep in het hydrologische systeem, waarbij hydrologische effecten optreden, die gevolgen hebben voor andere bij het grondwater betrokken belangen. Het hydrologische onderzoek neemt derhalve een centrale plaats in in het onderzoek ten behoeve van het BPDIV en MER.

2.2 Concretisering van de doelstellingen; gewenste resultaten

De doelstelling van het hydrologische onderzoek ten behoeve van het BPDIV en MER is:
het aangeven van de hydrologische effecten die optreden als gevolg van een verandering in de grondwaterwinning in de vorm van veranderingen in de freatische grondwaterstand en in de grondwaterstroming naar het topsysteem.

Vanuit het RIVM is als subdoelstelling geformuleerd:

het ontwikkelen van een grondwatermodel, waarmee ingrepen in het hydrologische systeem kunnen worden doorgerekend voor verschillende milieuthema's.

Het onderzoek moet de volgende produkten opleveren:

- een kwantitatieve beschrijving van het hydrologische systeem, gericht op landelijke toepassing;
- een rekenmodel, dat de processen die in het hydrologische systeem plaatsvinden, simuleert, zowel voor wat betreft de referentie situatie als voor de voor het onderzoek relevante veranderingen van de grondwateronttrekking;
- de hydrologische effecten die optreden als gevolg van veranderingen in de grondwaterwinningen.

Voor het verkrijgen van een landelijk beeld gaat het in eerste instantie om het verwerven van inzicht in de globale effecten op het grondwater van bepaalde beleidsvoornemens. Dergelijke studies kenmerken zich doorgaans door een aantal varianten c.q. scenario's die op hun merites moeten worden beoordeeld ten opzichte van een referentie situatie of die onderling worden vergeleken. Dat wil zeggen dat in eerste instantie kan worden volstaan met een bescheiden mate van detail in en de wijze waarop de hydrologische processen in de modelstudie worden meegenomen.

Er is gewerkt met gegevens, die bij aanvang van het onderzoek beschikbaar waren. Gegevens die in de loop van het onderzoek beschikbaar zijn gekomen, zijn, voor zover mogelijk, verwerkt.

2.3 Opzet en lijn van het onderzoek

De lijn, volgens welke het hydrologische modelonderzoek heeft plaatsgevonden, is als volgt:

1. het kwalitatief beschrijven van het hydrologische systeem.
 - hydrologische kenmerken (topografie, (geo)hydrologie, etc);
 - welke deelsystemen spelen een rol;
 - beschrijven van de processen in het deelsysteem (o.a. welke parameters spelen een rol).
2. hydrologische schematisering.
 - bepaald door de (kennis van de) werkelijke situatie en de doelstelling van het onderzoek.
3. modelkeuze.
 - mathematische schematisering en formulering van het gedrag van het systeem;
 - keuze uit beschikbare rekenprogramma's, zonodig aanpassen, c.q. ontwikkelen van deze programma's.
4. verzamelen en invoeren van de gegevens.
 - modelgericht gegevensverzamelen.

5. modelverifikatie.

- simulatie van gemeten situaties (controle berekening, testen).

6. berekenen van de hydrologische effecten.

- doorrekenen van de scenario's met betrekking tot veranderingen in het onttrekkingsregime op de winplaatsen.

3. HYDROLOGISCHE BESCHRIJVING VAN HET ONDERZOEKSGBIED

3.1 Algemeen

Omdat het hydrologische systeem een belangrijke plaats inneemt in de onderhavige problematiek wordt in dit hoofdstuk een beschrijving gegeven van het onderzoeksgebied, gericht op de componenten die een rol spelen bij de beweging van het grondwater in het gebied.

Achtereenvolgens komen aan bod: de geologische situatie, de geohydrologie, waarbij met name aandacht wordt besteed aan de stijghoogten van het grondwater, de topografie, de waterhuishoudkundige en bodemkundige situatie en het bodemgebruik.

Het onderzoeksgebied omvat de provincies Groningen, Friesland (met uitzondering van de Waddeneilanden), Drenthe, Overijssel, Gelderland, Utrecht, Flevoland, Noord Brabant en het noordelijke deel van Limburg. Daarnaast zijn kleine delen van de provincies Noord-Holland ('t Gooi) en Zuid-Holland (oostelijke deel) bij het modelonderzoek betrokken. Het totale modelgebied in Nederland beslaat ca. 26000 km². Dit is ruim 75% van het vasteland van Nederland.

3.2 Geologie.

De geologische afzettingen, die van belang zijn voor het hydrologische model van het onderzoeksgebied dateren uit het Boven-Tertiair en het Kwartair. De ondergrond is geënclassificeerd naar lithostratigrafische eenheden, waarbij in het bijzonder is geëncoken naar de ontstaanswijze. Hierbij is in eerste instantie onderscheid gemaakt in:

- a. afzettingen gevormd ten gevolge van het landijs.
- b. afzettingen van lokale herkomst, waarbij in het bijzonder genoemd worden afzettingen onder permafrostcondities.
- c. afzettingen van grote rivieren (Rijn, Maas, rivieren uit het Noordduitse laagland).
- d. afzettingen in zee en bij de kust (mariene afzettingen).

In figuur 3.1 zijn de afzettingen uit het Boven-Tertiair en Kwartair gerangschikt naar ouderdom en genese weergegeven. Bij de indeling naar genese zijn soms afzettingen van geheel uiteenlopende samenstelling binnen één formatie gebracht (grind, grof zand, fijn zand, klei, veen).

Aan het Instituut voor Grondwater en Geo-Energie TNO (IGG-TNO) is gevraagd een compilatie te maken van de geologische opbouw van de ondergrond van Nederland, met uitzondering van de Waddeneilanden en Zuid-Limburg. Een groot deel van de beschikbare informatie is afkomstig uit de Grondwaterkaart van Nederland.

Figuur 3.1: Boven-tertiaire en kwartaire formaties, gerangschikt naar ouderdom en genese (RGD, 1975)

Chronostratigrafie			Afzettingen in verband met landijs		Afzettingen van lokale herkomst		Afzettingen van grote rivieren		Afzettingen in zee en bij de kust	
			N	Z	N	Z	N	Z	N	Z
KWARTAIR	HOLOCEEN				Formatie van Kootwijk E		Betuwe Formatie		Westland Formatie	
					Formatie van Singraven B		R + M			
	PLEISTOCEN	Boven			Formatie van Twente E + V + P + B		Formatie van Kreftenheye			
					Formatie van Asten V		R + M		Eem Formatie	
	Midden	Weichselien*								
		Eemien								
		Saalien*	F. v. Drente							
		Holsteinien			Formatie van Eindhoven E + P		Formatie van	Formatie van	***	
		Elsterien*	F. v. Peelo		B + V		Urk R	van Veghel M	***	
		Cromerien complex**								
	Onder	Menapien*					Form. van Kedicem (ten dele) B + P + V	Formatie van Sterksel R + M		
		Waalien					Formatie van Enschede O	Formatie van Kedicem R + M		
		Eburonien*					Harderwijk O			
		Tiglien					Formatie van Tegelen R + M		Formatie van Maassluis	
		Praetiglien*								
TERTIAIR	PLIOCEN	Boven (Reuverien)					Form. van Scheemda O	Kiezel-oöliet Form R + M	Formatie van Oosterhout	
		Onder (Brunssumien)								
	MIOCEEN	Boven								
		Midden					Form. van Heksenberg		Formatie van Breda (ten dele)	
		Onder								

E = eolische afzettingen
P = periglaciaire afzettingen
B = beekafzettingen
V = veen

R = Rijn
M = Maas
O = oostelijke noordduitse rivieren en voorlopers

*koude tijd
**complexe eenheid bestaande uit tenminste 4 warme en 3 koude tijden
***nog onbenoemd, voorlopig bij Formatie van Urk

Uit de beschikbare gegevens zijn tien geohydrologische profielen (6 in de richting oost-west en 4 in noord-zuid richting) samengesteld, die tot grotere diepte (boven-Kwartair) informatie geven over de geologische opbouw van de ondergrond in Nederland. De ligging van de profielen is weergegeven op bijlage 1. Tevens zijn horizontale begrenzingen van hydrologisch belangrijke formaties aangegeven. In genoemde Grondwaterkaart van Nederland is de informatie voornamelijk gepresenteerd in kaartvorm en een voor dat gebied specifieke schematisering. Dit rapport volstaat met een samenvatting van de geologische informatie, voorzover deze betrekking heeft op het onderzoeksgebied en voorzover deze van belang is voor de hiernavolgende beschouwing ten aanzien van de geohydrologische opbouw van de ondergrond.

3.3 Geohydrologie.

Uitgaande van de lithologische kenmerken is de ondergrond van Nederland geohydrologisch geschematiseerd tot vier watervoerende pakketten, gescheiden door en/of afgedekt met slechtdoorlatende lagen. Opgemerkt moet worden dat de grenzen tussen lithologische eenheden niet noodzakelijkerwijs overeenkomen met de stratigrafische indeling. Deze schematisatie is een compromis bij de inzet van het grondwatermodel in de milieuonderzoeken.

In delen van Nederland doet een opdeling in vier watervoerende pakketten overdreven aan omdat slechtdoorlatende lagen niet of nauwelijks aanwezig zijn (bijvoorbeeld het gebied van de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe). In dit geval zou volstaan kunnen worden met een opdeling in twee watervoerende pakketten. In andere delen zou een onderverdeling in meer dan vier watervoerende pakketten noodzakelijk zijn (Centrale Slenk). Vaak is de schematisatie gebaseerd op lokale onderzoeken. Bij onderzoeken op regionale schaal is de aanwezigheid en de invloed van één van deze watervoerende pakketten en/of slechtdoorlatende lagen van secundair belang.

Bij modellen, waarvan de rekenprogramma's zijn gebaseerd op de eindige elementen methode of eindige differentie methode, wordt de ondergrond veelal geschematiseerd tot een aantal (horizontaal uitgestrekte) opeengestapelde, watervoerende lagen (de watervoerende pakketten), gescheiden door slechtdoorlatende lagen. Om de noodzakelijke flexibiliteit tussen het verwerken van de geohydrologische gegevens en het genereren van het model te garanderen is het aantal watervoerende pakketten voor alle modelgebieden hetzelfde genomen.

Uit overwegingen van doelmatigheid met betrekking tot het verzamelen van de geohydrologische gegevens is uiteindelijk gekozen voor een schematisatie van de ondergrond van Nederland in vier watervoerende pakketten.

Uit de tien geohydrologische profielen zijn kaarten gemaakt waarop de horizontale verbreiding van de geologisch belangrijke formaties zijn aangegeven en waarin de klei- en veenlagen voorkomen die tot één van de drie slechtdoorlatende lagen zijn gerekend. Van deze lagen zijn de dikte en de diepteligging ten opzichte van NAP gekarteerd. Van de bovenste afdekkende slechtdoorlatende laag is naast de dikte ook het voorkomen van Basisveen gekarteerd. Van de slechtdoorlatende laag die de basis vormt van het geohydrologische systeem is zowel de diepteligging als de verbreiding van de formaties die behoren tot de basis bepaald. Ten aanzien van de slechtdoorlatende lagen kan het volgende worden opgemerkt:

1. De afdekkende slechtdoorlatende laag (c_0 -laag) bestaat grotendeels uit Holocene afzettingen. De overwegend uit klei en veen opgebouwde afzettingen vormen als geheel een aan verticale grondwaterstroming weerstand biedende laag. Plaatselijk kan de weerstand van de afdekkende laag gereduceerd zijn door bijvoorbeeld zandige stroomgordels, die een directe verbinding vormen met het ondiepe grondwater. Of deze stroomgordels zijn verwerkt in de diktekaart van het afdekkende pakket is afhankelijk van de regionale verbreiding van een dergelijke stroomgordel. In een deel van het onderzoeksgebied komt in de afdekkende laag een laag Basisveen voor. Deze zeer compacte veenlaag heeft ondanks de beperkte dikte een hoge hydraulische weerstand. Het voorkomen van deze laag is aangegeven in bijlage 2. De dikte van de afdekkende slechtdoorlatende laag is weergegeven op bijlage 2.
2. De eerste slechtdoorlatende laag (c_1 -laag) wordt gevormd door afzettingen van de Formaties van Kedichem, Tegelen, Drente, Urk (Holstein), de Eemformatie of de Venlo (Venloklei), voor zover die uit klei, veen en slibhoudende zanden bestaan. Plaatselijk bestaat deze slechtdoorlatende laag uit afzettingen van twee of meer van die formaties. Bijlage 3 geeft de verbreiding van de slechtdoorlatende afzettingen uit deze formaties weer. De dikte en de diepteligging zijn weergegeven op de bijlagen 4 en 5. In gebieden waar de eerste slechtdoorlatende laag ontbreekt is om modeltechnische redenen gewerkt met een fictief grensvlak.
3. De tweede slechtdoorlatende laag (c_2 -laag) bestaat uit afzettingen van de Formaties van Drente, Urk (Cromerklei), Kedichem, Tegelen, Enschede, Harderwijk, Maassluis, Belfeld, de Potklei of Kiezeloöliet Formatie (bovenste Brunssum klei). De verbreiding van deze slechtdoorlatende laag is weergegeven op bijlage 6. Ook hier bestaat deze slechtdoorlatende laag plaatselijk uit afzettingen van twee of meer van die formaties. De bijlagen 7 en 8 geven inzicht in de dikte en de diepteligging van deze laag.
4. De derde slechtdoorlatende laag (c_3 -laag) is hoofdzakelijk in het midden en westen van Nederland en een groot deel van de Centrale Slenk onderscheiden. De laag bestaat uit de Formaties van Harderwijk, Tegelen, Scheemda, Maassluis, Oosterhout (Kallo en Reuver) of Kiezeloöliet Formatie (de onderste Brunssum klei).

De verbreiding is samengevat op bijlage 9. Plaatselijk zijn de afzettingen van twee of meer formaties samengevoegd. De bijlagen 10 en 11 geven respectievelijk de dikte en diepteligging van de betreffende laag weer.

5. Als basis voor het beschouwde grondwatersysteem komen afzettingen in aanmerking, waarvan mag worden aangenomen dat ze geen wezenlijke bijdrage leveren aan de beschouwde grondwaterstroming. De bovenzijde van deze lagen vormt in geohydrologisch oogpunt de ondoorlatende basis voor het grondwatersysteem.

Voor het overgrote deel van Nederland vormt de Formatie van Oosterhout de ondoorlatende basis. In het oostelijke en zuidelijke gedeelte van Nederland behoort de Formatie van Breda tot de basis, in Zeeland de Formatie van Rupel.

Bijlage 12 laat de verbreiding van de formaties zien, die behoren tot de geohydrologische basis. De diepteligging van de basis ten opzichte van N.A.P. is weergegeven op bijlage 13.

3.4 De topografische en waterhuishoudkundige situatie.

De topografische en de waterhuishoudkundige situatie spelen een belangrijke rol bij de stroming van oppervlakte- en grondwater. Hydrologisch zijn drie gebieden te onderscheiden te weten

- hoge zandgronden (infiltratie);
- poldergebieden (kwel en infiltratie);
- vrij afwaterende gebieden (drainage-afvoer);

Hoge zandgronden.

Eén van de belangrijkste hydrologische kenmerken van de hoge zandgronden i.c. de heuvelruggen, is de afwezigheid van oppervlaktewater. Door de hoge ligging en de goede doorlatendheid van de ondergrond zijn deze gronden infiltratiegebieden. De gebieden kenmerken zich door diepe grondwaterstanden waardoor, in samenhang met de goede doorlatendheid, oppervlaktewater ontbreekt. Het gedeelte van de neerslag dat niet verdampst, stroomt door de plaatselijk meer dan 10 meter dikke onverzadigde zone, waarna het de verzadigde zone bereikt als aanvulling van het grondwater. De nuttige neerslag is echter niet gelijkmatig verdeeld over het jaar. In de wintermaanden is de verdamping gering. De nuttige neerslag is in deze periode min of meer gelijk aan de neerslag. Dit in tegenstelling tot de zomermaanden waarin de potentiële verdamping groter is dan de neerslag. In de nuttige neerslag is dus een seizoensfluctuatie aanwezig.

Door de stroming in de onverzadigde zone zal het geïnfiltreerde water vertraagd de verzadigde zone van het grondwater (het freatisch vlak) bereiken. Hierdoor treedt er ook een afvlakking op in de grondwateraanvulling.

Beide processen zijn in belangrijke mate afhankelijk van de dikte van de onverzadigde zone. Bij een grote dikte van de onverzadigde zone is de seizoensinvloed minder duidelijk herkenbaar. Door de niet gelijkmatige aanvulling van het grondwater vertoont de grondwaterstand een fluctuatie. De grondwaterstandsverschillen zullen afhankelijk zijn van veranderingen in de grootte van de grondwateraanvulling.

Het op de stuwwal geïnfiltreerde water stroomt, indien aanwezig, naar de putten van de grondwateronttrekkingen en naar de lager gelegen delen rondom de infiltratiegebieden.

Poldergebied.

Als tweede type gebied zijn de poldergebieden onderscheiden, zoals die o.a. in het westelijke deel van Nederland voorkomen. Het zijn gebieden, waarin een polderpeil wordt gehandhaafd dat is aangepast aan de behoefte van de grondgebruiker. Teneinde de wateraan- en afvoer te kunnen regelen en grondwaterstanden in de hand te kunnen houden zijn watergangen gegraven (en soms ontwateren drains bepaalde percelen binnen een polder).

Sinds de met wateroverlast kampende veen-weidegebieden worden bemalen is een voortdurende daling van het maaiveld als gevolg van oxydatie en inklinking van de veenlagen opgetreden. Dit is veelal de oorzaak dat het maaiveld in het midden van het poldergebied lager ligt dan aan de randen.

Het gebied, vooral in West Nederland, is doorsneden met zandige stroomgordels (oeverwallen van rivieren). Deze stroomgordels liggen veelal hoger dan de omgeving (de komgronden), omdat ze niet zijn meegedaald met de rest van de polder.

Vrij afwaterend gebied.

Als derde zijn de vrij afwaterende gebieden onderscheiden. Afvoer van grondwater vindt plaats naar sloten en beken, via grofzandige afzettingen. Vanwege de ongelijkmatige verdamping over een jaar verlopen de hydrologische processen, net als bij de infiltratiegebieden, niet steeds met dezelfde intensiteit. In het zomerhalfjaar overtreft de verdamping de neerslag waardoor de grondwaterstand in het watervoerende pakket daalt. De grondwaterstand kan zodoende beneden de ontwateringsbasis van de beken (drainagebasis) komen te liggen waardoor deze droogvallen.

In het winterhalfjaar daarentegen is de verdamping gering waardoor een neerslagoverschot ontstaat. Dit wordt allereerst gebruikt om de grondwaterberging aan te vullen, hetgeen gepaard gaat met een stijging van de grondwaterstand. Hierdoor kunnen de drooggevallen beken weer water gaan voeren en aan het afvoerproces deelnemen. Het gebied kenmerkt zich door een minder regelmatig stelsel van waterlopen.

Het verschil tussen de hoogteligging van het maaiveld en de drainagebasis is belangrijk voor het modelleren van de drainage afvoer. Daarnaast bepaalt de hoogteligging van het maaiveld in dit onderzoek de dikte van het eerste watervoerende pakket. Een goede basiskaart van de hoogteligging van het maaiveld is (nog) niet in digitale vorm beschikbaar. Als tijdelijke oplossing is gekozen voor de maaiveldshoogten zoals deze bij de waarnemingspunten van de grondwaterstand beschikbaar zijn. Hieruit is, op basis van ca. 7500, niet gelijkmatig over het modelgebied verdeelde waarnemingspunten, een provisorische maaiveldskaart geconstrueerd.

3.5 De bodemkundige situatie.

De bodemkundige eigenschappen zijn gebruikt voor de berekening van de verdampingsreductie in hoofdstuk 4.3. De bodemopbouw speelt een belangrijke rol bij het vochttransport naar de vegetatie. Bij de bepaling van de gewasverdamping kan daarmee rekening worden gehouden. Ten behoeve van de ontwikkeling van een methodiek om de landbouwschade te berekenen (Grakist et al., 1992) zijn de kaartenheden van de bodemkaart 1:250.000 ingedeeld in 9 klassen van gevoeligheid van droogteschade, zogenaamde droogtegevoeligheidsklassen (DGK). De 260 op de Bodemkaart onderscheiden bodemtypen zijn in een tabel verzameld en weergegeven in appendix 1. Tevens staat in deze tabel vermeld tot welke droogtegevoeligheidsklasse de bodemtype behoort. Met de gegevens van de Bodemkaart en de toekenning van de droogtegevoeligheidsklasse aan de bodemtypen is een bestand gemaakt met de dominante droogtegevoeligheidsklasse per vierkant van 500 m bij 500 m. Bijlage 14 geeft een overzicht van de ruimtelijke verbreiding van de droogtegevoeligheidsklassen over Nederland.

Eveneens van belang voor het beoordelen van de bodemkundige situatie zijn de grondwaterstanden en de fluctuaties daarvan, die mede bepalend zijn voor de water- en luchthuishouding in de bodem. In de bodemkunde karakteriseert de grondwatertrap het verloop van de grondwaterstand. In een grondwatertrap (Gt) geven de gemiddelde hoogste (GHG) en de gemiddelde laagste (GLG) grondwaterstand het niveau en de fluctuatie van de grondwaterstand aan ten opzichte van maaiveld (tabel 3.1). De in het onderzoek gebruikte grondwatertrappen zijn afkomstig uit de Bodemkaart van Nederland 1:50.000. Voor elk vierkant van 500 m bij 500 m is de dominante Gt bepaalt. Deze dominante grondwatertrappen zijn op bijlage 15 aangegeven. Binnen het modelgebied was voor kaartblad 26 West (nog) geen Gt-kaart beschikbaar. Voor dit gebied is een Gt geschat op grond van de overige kaartbladen van Flevoland.

Tabel 3.1

Geschematiseerd grondwaterstandsverloop (in cm - m.v.) bij de diverse grondwatertrappen.

Grondwatertrap	GHG	GLG
I	-	< 50
II	-	50 - 80
II*	> 25	50 - 80
III	< 40	80 - 120
III*	25 - 40	80 - 120
IV	> 40	80 - 120
V	< 40	> 120
V*	25 - 40	> 120
VI	40 - 80	> 120
VII	80 - 140	> 120
VII*	> 140	> 120

3.6 Bodemgebruik.

Voor een juiste benadering van de verdamping dient, naast de bodemgesteldheid, ook het bodemgebruik bekend te zijn. De verdamping is sterk afhankelijk van het bodemgebruik. Voor het vaststellen van het bodemgebruik zijn 2 bestanden geraadpleegd. Van het zandgebied van Nederland waren satelliet beelden (Landsat-TM en Spot) beschikbaar, waaruit voor vierkanten van 500 m bij 500 m het dominante bodemgebruik is afgeleid. Bij de interpretatie van de satellietbeelden zijn 17 verschillende vormen van het landgebruik onderscheiden. In dit onderzoek zijn ze verder geschematiseerd tot 7 groepen, te weten:

- stedelijke bebouwing, wegen en glastuinbouw;
- (oppervlakte)water;
- gras;
- maïs;
- bouwland (aardappelen, bieten, granen, overige landbouwgewassen en bollenteelt);
- loofbos (ook fruitbomen, boomkwekerijen);
- naaldbos.

Deze gegevens zijn gebaseerd op opnamen van 1986.

In het overige deel van Nederland, het noord-westelijk deel van Groningen, Friesland, Noord- en Zuid-Holland, West Utrecht en Zeeland, is het bodemgebruik ontleend aan de bodemstatistiek van het CBS. In dit bodemgebruiksbestand is per vierkant van 500 m bij 500 m het areaal landbouwgrond, bos, natuur en verschillende vormen van stedelijk grondgebruik weergegeven. De gebruikte bodemstatistiek heeft betrekking op de situatie in het jaar 1985. In deze delen van Nederland zijn de landbouwgronden hoofdzakelijk als graslanden in gebruik. Het areaal landbouwgrond is ondergebracht bij het bodemgebruikstype gras. Het areaal bos, waarbinnen de bodemstatistiek geen onderscheid maakt tussen naald- en loofbos, is als aparte bodemgebruiksgroep toegevoegd.

Er zijn in het modelonderzoek uiteindelijk 8 bodemgebruiksgroepen onderscheiden. Bijlage 16 geeft een overzicht van het dominante bodemgebruik per vierkant van 500 * 500 m.

3.7 Grondwaterstanden en stijghoogten.

De gegevens van de grondwaterstijghoogten zijn afkomstig uit het archief van grondwaterstanden van IGG-TNO. Ze hebben betrekking op het jaar 1988. De waarnemingspunten zijn geselecteerd op grond van de volgende criteria:

- datum waarnemingsperiode van 1 jan 1988 t/m 31 dec 1988;
- filterlengte is kleiner dan 3 meter;
- het type van de put (geen peilschaal of welput);
- het aantal waarnemingen in 1988 is groter of gelijk aan 12.

Per geselecteerde waarnemingsfilter zijn de navolgende attributen verzameld:

- kaartblad;
- type filter;
- lokatienummer (volgens het archief van IGG-TNO);
- filternummer;
- aantal filters in de waarnemingsput;
- x- en y-coördinaat;
- maaiveldhoogte (t.o.v. N.A.P.);
- meetpunthoogte (t.o.v. N.A.P.);
- diepte boven- en onderkant waarnemingsfilter (t.o.v. N.A.P.);
- gemiddelde grondwaterstijghoogte 1988;
- standaarddeviatie grondwaterstijghoogte 1988;
- aantal waarnemingen waarop de gemiddelde grondwaterstijghoogte en de standaarddeviatie zijn gebaseerd;
- minimale en maximale grondwaterstijghoogte in 1988;
- grondwaterstijghoogte op of rond 28 april 1988;

Het beschouwde bestand van grondwaterstijghoogten voor heel Nederland omvat 14230 waarnemingsfilters. Van 152 filters is de ligging ten opzichte van het maaiveld niet bekend. De waargenomen grondwaterstijghoogte is hierdoor niet om te rekenen naar een stand ten opzichte van NAP. Van de overblijvende waarnemingen hebben er bijna 4500 betrekking op een meetpunt met één filter. Ruim 3000 meetpunten hebben twee of meer filters.

De waarnemingsfilters dienen toegekend te worden aan één van de vier watervoerende pakketten. Hiervoor is een apart rekenprogramma geschreven, dat de geologische informatie, opgeslagen in het GIS, gebruikt voor het berekenen van de geohydrologische opbouw ter plaatse van de grondwaterstandsbuis (Lieste et al., 1992). Van de 14230 waarnemingsfilters blijven er uiteindelijk 12118 over, waarvan het filter in één van de watervoerende pakketten is gelegen. Binnen het onderzoeksgebied zijn dit 8700 waarnemingsfilters. De verdeling van de waarnemingsfilters over de vier watervoerende pakketten is in tabel 3.2 weergegeven. Het betreft hier het totaal aantal waarnemingsfilters binnen het onderzoeksgebied. Het kan voorkomen dat van één meetpunt twee of meer filters in hetzelfde watervoerende pakket liggen.

Tabel 3.2

Aantal waarnemingsfilters per watervoerend pakket.

	aantal filters
watervoerende pakket 1	4749
watervoerende pakket 2	2272
watervoerende pakket 3	1286
watervoerende pakket 4	393

Als gevolg van het geringe aantal waarnemingsputten met filters in het vierde watervoerende pakket zijn er onvoldoende gegevens beschikbaar om een isohypsenkaart van dit pakket voor het gehele onderzoeksgebied samen te stellen. Het vierde watervoerende pakket staat, als gevolg van de geringe verbreiding van de derde slechtdoorlatende laag, over grote gebieden in rechtstreeks contact met het derde watervoerende pakket. De stijghoogten in beide pakketten zijn daar praktisch aan elkaar gelijk. Daarom zijn, waar dat nodig en mogelijk was, de waarnemingen uit het derde en soms wel uit het tweede watervoerende pakket gebruikt en overgenomen, ter completering van het isohypsenbeeld van het vierde watervoerende pakket.

3.8 De ligging van het freatisch vlak

De freatische grondwaterstand geeft de hoogte weer van de vrije grondwaterspiegel. Deze is bepalend voor de bovenste randvoorwaarde van het grondwatersysteem. De hoogteligging en de vorm van het freatisch vlak worden ondermeer bepaald door de bodemeigenschappen, de weerstand van de slootbodems, het peil in de waterlopen, de afstand tussen de waterlopen en de af te voeren hoeveelheid water (neerslag).

In de zandgebieden van Nederland komt de freatische grondwaterstand in het algemeen overeen met de grondwaterstijghoogte in het eerste watervoerende pakket. Plaatselijk kunnen in deze gebieden schijnspiegels voorkomen. Dit is een grondwaterlichaam binnen de onverzadigde zone, dat zich vormt boven een (zeer) slechtdoorlatende laag met een lokale verbreiding. Het verticale transport van water door deze laag is zeer gering. Bij voldoende aanvulling vormt zich boven die laag een grondwaterspiegel. Het grondwater kan horizontaal afstromen naar het verzadigde grondwater of naar het oppervlaktewater.

In de polders is veelal het doorlaatvermogen van het bodemprofiel, eigenlijk de afdekkende laag, zo gering dat er weinig of geen horizontale stroming van grondwater in deze laag plaats vindt. De freatische grondwaterstand stijgt en daalt veelal als een nagenoeg horizontaal vlak. Het aantal beschikbare grondwaterstandsbuizen in poldergebieden is meestal te gering om een betrouwbare kaart te kunnen samenstellen van de freatische grondwaterstand.

Het freatisch vlak wordt sterk beïnvloed door plaatselijk geldende hydrologische eigenschappen. In een dergelijke situatie is dan ook grote voorzichtigheid geboden bij het toekennen van een representativiteit aan een waarneming in een grondwaterstandsbuis voor een groter gebied.

Eenvoudigheidshalve kan de ligging van het freatisch vlak in het poldergebied worden ontleend aan de polderpeilenkaart.

4. HET ONDERZOEK VAN HET HYDROLOGISCHE SYSTEEM

4.1 Keuze van het hydrologische systeem

De keuze van het hydrologische systeem is afhankelijk van de vraag welke hydrologische processen een rol spelen in de problematiek. Zowel de hydrologische karakteristieken in het onderzochte gebied alsmede de doelstelling van het onderzoek bepalen deze selectie. Hierbij komt zowel de keuze van de deelsystemen die in beschouwing worden genomen als de wijze waarop ze in het onderzoek moeten worden meegenomen aan de orde.

Het grondwater dat door een grondwaterwinning aan de ondergrond wordt onttrokken, is in het algemeen afkomstig van drie "bronnen", te weten:

- vermindering van de berging in de ondergrond;
- vermindering van de gewasverdamping;
- vermindering van de afvoer naar en/of een verhoogde infiltratie vanuit het oppervlaktewater.

De hydrologische situatie bepaalt van geval tot geval het aandeel van elk van de drie bronnen. Hierbij zijn de volgende onderling samenhangende onderdelen van belang:

- het deel van de ondergrond dat met grondwater is verzadigd (grondwaterstroming);
- het oppervlaktewater (oppervlaktewaterstroming);
- de onverzadigde zone (vochttransport);
- de vegetatie (vochttransport).

De deelsystemen zijn op te vatten als reservoirs waar water doorheen stroomt en waarin water is opgeslagen. Een ingreep in één van de deelsystemen heeft invloed op alle onderdelen van het totale systeem, die met dat deelsysteem samenhangen. Omgekeerd hebben deze effecten weer invloed op de grootte van de veranderingen in het deelsysteem waar de ingreep plaatsvindt. Daarom moet voor een ingreep, zoals peilveranderingen, wijzigingen van de grondwaterwinningen e.d., in een bepaald deelsysteem het totale systeem worden doorgerekend. In het onderzoek ten behoeve van het BPDIV en MER zijn alleen de grondwateronttrekkingen (qua grootte) de variabelen, waarmee de toestand van het systeem kan worden gewijzigd.

Dit onderzoek richt zich op de lange termijn effecten (enkele decennia) van veranderingen in de grondwateronttrekking op de natuur. Dit impliceert dat korte termijn effecten mogen worden verwaarloosd. Een korte termijn effect is de bergingsverandering. Bij de start van een grondwateronttrekking, en dus ook bij een vergroting ervan, zal door de verlaging van de grondwaterstand water vrijkomen uit de berging.

Dit water komt als een éénmalige voeding ten goede aan de onttrekking. Hetzelfde maar in

teggestelde richting vindt plaats bij een vermindering van de grondwateronttrekking. In de toestand, waarin de grondwaterstand als gevolg van de onttrekking niet verder verandert (de stationaire toestand) treedt er geen bergingsveranderingen meer op. De voeding vanuit de berging is dan gelijk aan nul.

Het onderzoek voor het BPDIV en de MER richt zich op deze stationaire toestand. In het model is derhalve geen rekening gehouden met het water dat afkomstig is uit de bergingsverandering in de ondergrond.

Bij de verdamping treedt een ander effect op. Een gewas verdampt potentieel, wanneer het optimaal van water wordt voorzien. In het algemeen is het niet mogelijk een optimale watervoorziening te realiseren. De plant zal daardoor minder water verdampen (de actuele verdamping). De actuele verdamping is ondermeer afhankelijk van het vochtleverend vermogen van de bodem. De hoeveelheid vocht die in de onverzadigde zone wordt getransporteerd naar de wortelzone van de plant hangt o.a. af van de grondwaterstand en de fysische eigenschappen van de onverzadigde zone. Een verandering van de grondwateronttrekking veroorzaakt een grondwaterstandsverandering die gepaard zal gaan met een verandering in de hoeveelheid bodemvocht. Dit leidt tot een verandering van het transport van bodemvocht in de onverzadigde zone.

Ook de gewasverdamping verandert hierdoor. Het verschil tussen de gewasverdamping voor en na de verandering van de grondwaterwinning is de hoeveelheid water, die in de verzadigde zone blijft en zo een deel van het onttrokken grondwater compenseert.

Deze "bron", waaruit het onttrokken grondwater afkomstig is, vergt een iteratief rekenproces tussen de deelsystemen grondwateraanvulling en verzadigd grondwater.

Het verschil tussen de gewasverdamping voor en na de ingreep van de grondwateronttrekking heeft in het algemeen slechts een geringe invloed op de totale grondwaterstandsverlaging. In het kader van het onderzoek voor het BPDIV en de MER is de compensatie van het onttrokken grondwater uit het verschil in gewasverdamping voor en na de ingreep in de omvang van de grondwaterwinningen verwaarloosd. De hierdoor gemaakte fouten zijn gering.

De compensatie van een verandering in de hoeveelheid grondwater, dat aan de ondergrond wordt onttrokken, vindt verder nog plaats uit een verminderde afvoer naar en/of een verhoogde infiltratie vanuit het oppervlaktewater. In het model is onderscheid gemaakt in drie typen oppervlaktewater:

- grote waterlopen, waarvan het peil niet wordt beïnvloed door de grondwateronttrekking;
- polders, waarin het peil in de watergangen op een gewenst niveau wordt gehandhaafd;

- vrij afwaterende gebieden, d.w.z. gebieden waarin het peil in de watergangen afhankelijk is van de grondwaterstand.

Deze onderdelen zijn in het deelsysteem oppervlaktewater nader uitgewerkt.

Het peil in de grote waterlopen of in de polders zal niet of nauwelijks veranderen door de grondwateronttrekking. Daarom behoeft de stroming van het oppervlaktewater op zich niet in het hydrologisch onderzoek te worden betrokken en kan worden volstaan met een beschrijving van de stroming vanuit of naar het grondwater.

Aldus resteert een te onderzoeken hydrologische systeem dat is opgebouwd uit de volgende, onderling samenhangende deelsystemen

- grondwater;
- grondwateraanvulling;
- oppervlaktewater, onderscheiden in de subsystemen:
 - * grote waterlopen;
 - * polders;
 - * vrij afwaterende gebieden.

4.2 Deelsysteem grondwater.

4.2.1 De systeemvergelijking.

Om de hydrologische effecten te kunnen berekenen moet de stroming van het grondwater in de verzadigde zone (het deelsysteem grondwater) worden beschreven. Omdat het doel van dit onderzoek zich beperkt tot de berekening van grondwaterstijghoogten en verlagingen daarvan, kan worden gewerkt met de filtersnelheid van het grondwater en hoeft niet te worden gerekend met de werkelijke snelheid van het grondwater. De filtersnelheid is een hypothetische snelheid, gedefinieerd als het debiet gedeeld door het totale oppervlak van poriën en vaste stof. De werkelijke snelheid van het grondwater is bijvoorbeeld wel van belang bij problemen waarin de verplaatsing van bepaalde in het water opgeloste stoffen aan de orde is.

De differentiaalvergelijking die de stationaire, tweedimensionale horizontale grondwaterstroming in een isotroop watervoerend pakket beschrijft, is weergegeven in formule 4.1.

Via de term $Q_{(x,y)}$ is het mogelijk om grondwatersystemen door te rekenen waarin meerdere watervoerende pakketten, gescheiden door slechtdoorlatende lagen, voorkomen. Hierbij wordt aangenomen dat in deze slechtdoorlatende lagen alleen verticale grondwaterstroming plaatsvindt. Door middel van de term $Q_{(x,y)}$ kunnen eveneens de grondwateronttrekkingen en de relaties met de deelsystemen oppervlaktewater en grondwateraanvulling in

de berekening worden meegenomen.

$$\frac{\partial}{\partial x}(kD_{(x,y)}\frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(kD_{(x,y)}\frac{\partial \phi}{\partial y}) = Q_{(x,y)} \dots\dots\dots 4.1$$

waarin :

$kD_{(x,y)}$ = het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket in het punt (x,y) [m²/dag],

ϕ = de stijghoogte van het grondwater [m],

$Q_{(x,y)}$ = de hoeveelheid water die aan het watervoerende pakket wordt toegevoegd of onttrokken [m/dag].

Door de gecompliceerdheid van het hydrologische systeem en de onderling van elkaar afhankelijke relaties, is het gebruik van numerieke oplossingstechnieken onmisbaar. Dit is zeker het geval als het onderzoek een groot gebied omvat. Voor het deelsysteem grondwater is daarom een dergelijke oplossingstechniek gebruikt, enerzijds vanwege de voorkomende variaties van de van belang zijnde parameters in de ruimte en anderzijds vanwege de toegepaste geohydrologische schematisering van de ondergrond.

4.2.2. *De aangehouden geohydrologische schematisering*

Om met grondwaterstromingsmodellen, die met de differentiaalvergelijking (4.1) worden beschreven, te kunnen werken, moet de ondergrond worden geschematiseerd tot watervoerende pakketten en slechtdoorlatende lagen. De schematisering volgt grotendeels uit de geologische opbouw van het onderzoeksgebied, waarbij de contrasten in doorlatendheid van de lagen maatgevend zijn voor de watervoerende pakketten c.q. slechtdoorlatende lagen.

Zoals in paragraaf 3.2 met betrekking tot de geohydrologische opbouw van de ondergrond reeds is aangegeven zijn vier watervoerende pakketten onderscheiden. De watervoerende pakketten zijn gescheiden door slechtdoorlatende lagen. Een slechtdoorlatende deklaag dekt het eerste watervoerende pakket af.

4.2.3. *De bepaling van de waarden van de grondconstanten*

De richting van de grondwaterstroming in het horizontale vlak kan worden afgeleid uit het isohypsenbeeld. De eventuele stroming in verticale richting (door slechtdoorlatende lagen) volgt uit het potentiaalverschil dat over een slechtdoorlatende laag aanwezig is. Naast de grondwaterstijghoogten is inzicht nodig in de hydraulische eigenschappen van de grondlagen, waar het grondwater doorheen stroomt.

Bij de toegepaste modellering zijn de navolgende grondeigenschappen van belang:

k_h : de horizontale doorlatendheid van de watervoerende pakketten [m/dag];

k_v : de verticale doorlatendheid van de slechtdoorlatende laag [m/dag];

Gecombineerd met de dikte van de betreffende laag, ontleend aan de geologische beschrijving van de ondergrond, kunnen de benodigde parameterwaarden worden bepaald:

- het doorlaatvermogen ($kD = k_h * D$) van de watervoerende pakketten [m^2/dag]
- de hydraulische weerstand (c-waarde = d/k_v) van de slechtdoorlatende lagen [dagen]

Om berekeningen met betrekking tot het grondwater te kunnen uitvoeren, zullen de ter plaatse geldende waarden van de geohydrologische parameters bekend moeten zijn.

De waarden van de parameters kunnen op verschillende manieren worden bepaald. Gangbare methoden zijn put- en pompproeven. Daarnaast bieden regionale grondwaterstromingsmodellen een mogelijkheid om, middels een modelijking, parameterwaarden te bepalen. Verder bestaan verschillende schattingsmethoden, waarbij gebruik wordt gemaakt van vastgestelde correlaties tussen geohydrologische parameters en kenmerken van de betreffende lagen of pakketten (lithologie, dikte, diepteligging e.d.)

Het verzamelen van de informatie is uitbesteed aan IGG-TNO. Voor de watervoerende pakketten is gevraagd een kaart te vervaardigen waarop de doorlatendheid is weergegeven. Voor de slechtdoorlatende laag daarentegen is gevraagd om per geologische eenheid de hydraulische weerstand als functie van de dikte weer te geven.

4.2.3.1 Het doorlaatvermogen van watervoerende pakketten.

Het doorlaatvermogen van de watervoerende pakketten is afgeleid uit pomp- en putproeven verkregen waarden. Ter plaatse van de proeflokatie is uit het berekende doorlaatvermogen (kD -waarde) en de daarbij behorende dikte (D) van het betreffende watervoerende pakket de gemiddelde horizontale doorlatendheid (k_h) van dit pakket bepaald. Uit onderzoeken blijkt dat de gemiddelde horizontale doorlatendheid per onderscheiden geologische formatie en gebied slechts aan betrekkelijk geringe variaties onderhevig is. Uitgaande van het deze waarden van de doorlatendheid, is het verloop ervan binnen de onderscheiden watervoerende pakketten bepaald. De bijlagen 17 t/m 20 geven per watervoerende pakket de doorlatendheid weer.

In het model is het doorlaatvermogen berekend door de dikte van het desbetreffende watervoerende pakket te vermenigvuldigen met de doorlatendheid. De dikte is per knooppunt van het eindige elementen netwerk berekend door interpolatie van de top- en diktekaarten van de slechtdoorlatende lagen. Daar waar het eerste watervoerende pakket freatisch water bevat, is de dikte van de verzadigde zone van dit pakket berekend (freatische grondwaterstand minus bovenkant eerste slechtdoorlatende laag).

De doorlatendheid is per knooppunt bepaald uit interpolatie van de isolijnen in de kaart

van de k_h -waarden. Het doorlaatvermogen per watervoerende pakket is weergegeven op de bijlagen 21 t/m 24.

4.2.3.2 De weerstand van slechtdoorlatende lagen.

De weerstand van de slechtdoorlatende lagen tegen verticale grondwaterstroming kan met een aantal methoden worden bepaald.

In de eerste plaats is bij de interpretatie van de uitgevoerde pompproeven, waarvan de toegepaste schematisering een slechtdoorlatende laag bevat, ook een waarde van de weerstand tegen verticale grondwaterstroming van de slechtdoorlatende laag berekend.

Een analyse van een regionaal of lokaal grondwaterstromingsbeeld (waterbalans, modelijking) biedt eveneens mogelijkheden een waarde van de weerstand te berekenen.

In dit onderzoek is een benaderingswijze toegepast waarbij de weerstand is geschat op grond van lithologische kenmerken, dikte en diepteligging van de laag.

De weerstand van een kleilaag kan worden gelijk gesteld aan het quotiënt van de dikte d [m] en de verticale doorlatendheid k_v [m/dag] van de slechtdoorlatende laag. De doorlatendheid van de afzettingen in de slechtdoorlatende laag (klei, veen) hangt hoofdzakelijk af van de aanwezige poriën. De vorm ervan wordt weer voor een deel bepaald door de mate waarin de kleilaag in de loop der tijd is samengedrukt. Een maat voor de samendrukking (klink) is de in de slechtdoorlatende laag heersende korrelspanning. Ervan uitgaande dat er een relatie is tussen de verticale weerstand c en de dikte (d) van de slechtdoorlatende laag is de navolgende relatie afgeleid (RID, 1978) :

$$c = H * d * (h + \frac{d}{2}) \dots\dots\dots 4.2$$

waarin,

- c = verticale weerstand [dagen],
- d = de dikte van de slechtdoorlatende laag [m],
- H = een evenredigheidsconstante [dag/m²],
- h = de diepteligging van het midden van de slechtdoorlatende laag ten opzichte van het maaiveld [m].

De grootte van de evenredigheidsconstante H is afhankelijk van de aard van de slechtdoorlatende laag en is empirisch voor elke laag bepaald. De door onderzoek (pompproeven, waterbalansonderzoek, modelijking e.d.) verkregen waarden van de verticale weerstand vormen daarbij een bruikbaar hulpmiddel. Met behulp van de constante H en met de dikte van de slechtdoorlatende lagen is voor het onderzoeksgebied een schatting gemaakt van de verticale weerstand van de slechtdoorlatende lagen.

De daarbij gebruikte evenredigheidsconstanten zijn afhankelijk van de geologische formaties. De waarden staan vermeld in tabel 4.1.

Tabel 4.1

Evenredigheidsconstante H voor de verschillende geologische formaties.

Keileem	5	Eem	15
Holstein	2,5	Glaciale bekkenklei	100
Kedichem	2,5	Tegelen	2,5
Venlo	50	Belfeld	50
Reuver	50	Oosterhout	4
Kallo	5	Brunssum	100

Voor de afzettingen van Peelo en Cromerklei worden, in afwijking van de bovengenoemde formule, de navolgende weerstandswaarden gehanteerd (Provincie Drenthe, 1985) :

c-waarde 'Peeloklei'	: $c = 500 * d$
c-waarde 'Cromerklei'	: $c = 290 * d$

Op grond van bovengenoemde formules is aan de hand van de diktekaart van de slechtdoorlatende lagen de verticale weerstand van de slechtdoorlatende lagen berekend. Deze waarden zijn ingevoerd in het LGM. Op bijlagen 25, 26 en 27 is per slechtdoorlatende laag de ruimtelijke verdeling van de weerstand weergegeven. Er heeft geen aanpassing plaatsgevonden van de c-waarden op grond van een vergelijking van de modelresultaten met de gemeten grondwaterstijghoogten.

4.2.3.3 De weerstand van de slechtdoorlatende afdekkende laag (c_0 -waarde).

Ook voor de verticale weerstand van de afdekkende laag is gekozen voor een benadering waarbij de waarde ondermeer afhankelijk is van de dikte van de laag. Zoals in hoofdstuk 3.3 vermeld speelt de aanwezigheid van het basisveen een belangrijke rol in de grootte van de weerstand. Er is daarom onderscheid gemaakt tussen verschillende eenheden van de deklaag op grond van het wel of niet voorkomen van het basisveen. Op bijlage 28 is aangegeven hoe in de verschillende gebieden in eerste instantie de c_0 -waarde bepaald is. Deze methode leverde in bepaalde delen van het modelgebied grote verschillen op met 'gangbare' weerstandswaarden. Met name in west Utrecht traden aanzienlijke verschillen op met in eerder onderzoek gevonden c-waarden (Heij, 1975).

Binnen het modelgebied is in afwijking van de op bijlage 28 beschreven benadering uitgegaan van de volgende relaties :

- daar waar basisveen aanwezig is, is de weerstand : $c_0 = 2000 + 100 * d$
- daar waar geen basisveen aanwezig is is de weerstand : $c_0 = 100 * d$

waarin d = dikte afdekkend pakket [m] en c_0 in dagen.

De gehanteerde c_0 -waarden in dit onderzoek zijn op bijlage 29 weergegeven.

4.3 Deelsysteem grondwateraanvulling.

Bij dit onderzoek is de berekening van de grondwateraanvulling uitgevoerd op basis van de meteorologische gegevens uit 1988 en de lokale omstandigheden met betrekking tot het grondgebruik (gewastypen), de bodemopbouw en de grondwaterstandsdiepte. Per knooppunt van het modelgrid wordt de grondwateraanvulling bepaald volgens de volgende formule:

$$q_N = N - f * E_r * (1 - r * f_z) \dots \dots \dots 4.3$$

waarin:

- q_N = grondwateraanvulling [mm/d],
- N = neerslag [mm/d],
- E_r = Makkink referentieverdamping [mm/d],
- f = gewasfactor voor het hele jaar [-],
- f_z = gewasfactor in het zomerhalfjaar [-],
- r = verdampingsreductiefactor [-].

Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) publiceert de neerslag (N) en de (Makkink) referentieverdamping van haar 15 hoofdweerstations, die elk een district representeren. Voor de neerslag (N) is de jaarsom van 1988 gehanteerd. De gegevens zijn weergegeven in tabel 4.2.

De gewasfactoren f en f_z zijn voor de Makkink referentieverdamping (E_r) als jaargemiddelde afgeleid op basis van:

- gewasfactoren f per decade in het groeiseizoen;
- gemiddelde waarden van de Penmanverdamping voor open water (E_0) en de Makkink referentieverdamping (E_r) voor het winter en zomerseizoen;
- de verdamping van kale grond in de zomer- (140 mm) en winterhalfjaar (60 mm), zoals bepaald met de lysimeterproef te Castricum;
- de aanname dat bouwland zich in de winter gedraagt als kale grond.

Over de maximaal mogelijke verdamping in de winter, en de daaruit af te leiden gewasfactoren, is nog weinig bekend.

Tabel 4.2

Neerslag en referentieverdamping van 1988 per KNMI-district.

Nummer district	N [mm/jaar]	E _r [mm/jaar]
1. Wadden, Den Helder	899	551
2. Friesland	974	519
3. Groningen, N.O. Drenthe	989	491
4. Noord-Holland (boven Noordzee Kanaal)	952	541
5. IJsselmeerpolders	934	541
6. Zuid Drenthe, Salland en Twente	904	497
7. Zuid-Holland (excl. Goeree Overflakkee), Noord-Holland (onder Noordzee Kanaal) en West Utrecht	979	533
8. Utrecht, Gelderse Vallei, Veluwe en het Gooi	938	506
9. Achterhoek (Gelderland)	869	494
10. Betuwe (Gelderland)	921	518
11. Zeeland en Goeree Overflakkee	919	561
12. Westelijk Noord-Brabant	962	531
13. Oostelijk Noord-Brabant	937	519
14. Noord Limburg	853	507
15. Zuid Limburg	867	531

Metingen in lysimeters geven aan dat bij aerodynamisch ruwe gewassen (bos en heide) ook 's winters een verdamping kan optreden, die de berekende Penmanverdamping (E_0) overtreft. Vooral naaldbos heeft dan een groot oppervlak vanwaar opgevangen mist en regen verdampen kan. De wind, in feite de aanvoer van droge lucht, is de drijvende kracht van de verdamping in de winter. De verdampingsformule van Makkink gaat in dat geval niet op, omdat deze alleen de invloed van de straling beschrijft.

Als ruwe benadering is voor het winterhalfjaar gekozen voor een gewasfactor van 1 voor grasland, 1,25 voor bos en 0,4 voor kale grond (bouwland), waarmee de verdamping waarschijnlijk nog steeds is onderschat. De factor voor bos is geschat uit de maximale gewasverdamping ($E_{\max}$), die in het Grondwaterplan van Utrecht staat vermeld.

De waarden van de gewasfactoren zijn weergegeven in tabel 4.3.

Tabel 4.3

De waarden van de gewasfactoren f en f_z

gewas	f	f_z
gras	1,00	0,80
mais	0,85	0,90
bouwland	0,75	0,90
loofbos	0,95	0,80
naaldbos	1,10	0,80

De grootte van de verdampingsreductiefactor (r) is afhankelijk van de volgende factoren :

- bodemtype en bodemfysische eigenschappen van de grond;
- grondwaterstand beneden maaiveld.

De bodemtypen van de bodemkaart zijn voor dit doel, zoals vermeld in paragraaf 3.5 geaggregeerd tot 9 zogenaamde droogtegevoeligheidsklassen (DGK) met dominante droogtegevoeligheidsklasse per vierkanten van 500 m bij 500 m.

Het grondwaterstandsverloop gedurende het groeiseizoen is een belangrijke factor bij de berekening van het vochttekort. Voor het geven van een globaal inzicht in het grondwaterstandsverloop in de tijd is de grondwatertrappen kaart (Gt-kaart) gebruikt. De fluctuatie van de grondwaterstand en het niveau van de fluctuatie kan men karakteriseren door de gemiddeld hoogste en laagste grondwaterstand (GHG resp. GLG). Daarnaast onderscheidt men nog de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG).

Voor het bepalen van de verdampingsreductiefactor is gebruik gemaakt van de zogenaamde HELP-tabellen. De HELP-tabellen zijn ontwikkeld om de gevolgen van geplande ingrepen in de waterhuishouding bij landinrichtingsprojecten te evalueren. In de tabel is voor een bodemtype de relatie tussen de grondwaterstand en de opbrengstdepressie weergegeven.

Voor de onderbouwing van de in de HELP-tabellen genoemde depressiepercentages ten gevolge van het vochttekort, zijn modelberekeningen uitgevoerd (LAMOS, Rueling 1983). Op basis van meteorologische, bodemkundige en hydrologische gegevens is met het model o.a. het eventueel optredende vochttekort berekend. Voor de meteorologische gegevens is gebruik gemaakt van neerslag- en verdampingscijfers van de Bilt over een periode van 30 jaar. In de HELP-tabellen is per HELP-bodemtype en de bijbehorende grondwatertrap het vochttekort weergegeven in mm/jaar. Gecombineerd met de maximale verdamping in het groeiseizoen is de verdampingsreductiefactor uit te rekenen ($r = V_0/E_{\max, \text{zomer}}$).

De HELP-tabellen zijn samengevoegd tot 9 tabellen, waarin de relatie tussen de GLG en de opbrengstdepressie is weergegeven (Grakist et al., 1992).

Voor de droogtegevoeligheidsklassen is vervolgens voor elke grondwatertrap een waarde van de verdampingsreductiefactor (r) afgeleid uit het vochttekort bij de betreffende grondwatertrap. In tabel 4.4 zijn de waarden weergegeven.

Tabel 4.4

Waarden van de verdampingsreductiefactor r per droogtegevoeligheidsklasse (DGK) en grondwatertrap G_r .

DGK	G_{r-2}	G_{r-2}^*	G_{r-3}	G_{r-3}^*	G_{r-4}	G_{r-5}	G_{r-5}^*	G_{r-6}	G_{r-7}	G_{r-7}^*
1	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,07	0,14
2	0,02	0,02	0,05	0,06	0,06	0,11	0,13	0,17	0,22	0,26
3	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,10	0,16	0,24
4	0,02	0,03	0,06	0,07	0,08	0,16	0,18	0,24	0,32	0,32
5	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08	0,09	0,11	0,15	0,20
6	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,06	0,12	0,22
7	0,04	0,06	0,13	0,14	0,15	0,22	0,24	0,29	0,34	0,34
8	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,05	0,08	0,13	0,22	0,36
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

In het grondwatermodelonderzoek is uitgegaan van een stationaire situatie, hetgeen betekent dat de grondwateraanvulling een constante, gemiddelde waarde over 1988 heeft, uitgedrukt in [mm/dag]. Bijlage 30 geeft een overzicht van de ruimtelijke verdeling van de grondwateraanvulling binnen het modelgebied.

4.4 Deelsysteem grote waterlopen.

Onder het deelsysteem waterlopen vallen die waterlopen, die van invloed zijn op de regionale grondwaterstroming. Verder moet de afvoer van deze waterlopen zodanig groot zijn dat een (verandering in de) grondwateronttrekking geen noemenswaardige invloed heeft op het peil in deze waterloop.

De relatie tussen deze waterlopen en het grondwater is weergegeven in formule 4.4.

$$Q_r = \frac{(R_p - \varphi_1)}{c_r} * R_{opp} \dots\dots\dots 4.4$$

waarin:

- Q_r : de infiltratie uit of de kwel naar de waterloop [m^3/dag],
- R_p : het peil in de waterloop [m],
- φ_1 : de gemiddelde grondwaterstijghoogte in het eerste watervoerende pakket ter plaatse van de waterloop [m],
- c_r : de weerstand tegen verticale grondwaterstroming door de bodem van de waterloop en/of van de slechtdoorlatende lagen eronder [dagen],
- R_{opp} : het oppervlak waardoor de infiltratie c.q. de kwel plaatsvindt [m^2], i.c. de natte breedte maal de lengte van de waterloop.

De waterlopen zijn geschematiseerd tot één of meer rechte lijnstukken.

IGG-TNO heeft van de individuele waterlopen per lijnstuk waarden van de navolgende parameters verzameld:

- natte breedte van de waterloop [m];
- zomer en winterpeil [m] t.o.v. NAP;
- de weerstand tegen verticale grondwaterstroming uit (intreeweerstand) c.q. naar (uittreeweerstand) de waterloop [dagen];
- type waterloop;
- herkomst van de gegevens.

In het model is het gemiddelde peil van 1988 ingevoerd. Waar onderscheid is gemaakt tussen tussen zomer- en winterpeil zijn deze waarden gemiddeld. Als niet bekend is of het peil betrekking heeft op de winter- danwel de zomersituatie zijn het zomer- en het winterpeil aan elkaar gelijk gesteld. Bij de getijdewateren is een gemiddelde zomer- en een gemiddelde winterstand bepaald.

Het is niet altijd eenvoudig de juiste peilen te achterhalen. Geschat wordt dat de onzekerheid in de opgegeven peilen enkele decimeters bedraagt, lokaal mogelijk oplopend tot een halve meter.

Van de intree- danwel de uittreeweerstand zijn niet veel gegevens uit onderzoek voor handen. Bij de bepaling daarvan is ondermeer van belang of de waterloop een eventueel aanwezige slechtdoorlatende laag doorsnijdt. In de meeste gevallen reiken de waterlopen tot in het eerste watervoerende pakket. In het geval dat de waterloop niet reikt tot in het eerste watervoerende pakket is mede de hydraulische weerstand van (gedeelten van) de slechtdoorlatende laag van belang.

Met uitzondering van het Amsterdam-Rijnkanaal en het Lekkanaal, waarvan bekend is dat delen in de afdekkende laag zijn gelegen, is de weerstand van de meeste waterlopen gelijk gesteld aan 2 dagen. Hierbij is geen onderscheid gemaakt in kwel- danwel infiltratiesitua-

ties. Om eventuele aanpassing van de intreeweerstand te vergemakkelijken zijn (delen van) de waterlopen gecodeerd. Met behulp van dit zogenaamde attribuut zijn de verschillende (delen van) waterlopen te selecteren, waarna een nieuwe waarde aan de intreeweerstand kan worden toegekend.

De waterlopen zijn onderscheiden in de navolgende typen:

- "grote" rivier;
- rivier, beek;
- kanaal, vaart;
- waterlopen, behorende tot het boezemwater van een waterschap.

De gegevens met betrekking tot de breedte en het peil zijn afkomstig van de waterschappen, Rijkswaterstaat en/of de provincies. Van sommige waterlopen zijn de gegevens van verscheidene bronnen afkomstig. De in het modelgebied ingevoerde waterlopen zijn aangegeven op bijlage 31.

4.5 Deelsysteem polder.

In het deelsysteem polder is er van uitgegaan, dat de slootpeilen op het gewenste niveau kunnen worden gehandhaafd. In feite wordt dus verondersteld dat het freatisch vlak niet verandert, waardoor de aanvulling van het deelsysteem grondwater vanuit het oppervlaktewater niet aan beperkingen is gebonden. Deze onbeperkte aanvulling is slechts mogelijk als boven de afdekkende deklaag overal oppervlaktewater aanwezig zou zijn, dat ook nog onbeperkt kan worden aangevuld. In poldergebieden met een dicht slotenstelsel (slootafstand < 100m) en een grote beschikbaarheid aan oppervlaktewater zal de aanname van een vast freatisch vlak de werkelijkheid dicht benaderen. Uiteraard is de weerstand van de deklaag tegen verticale grondwaterstroming hierbij eveneens van belang. Is deze weerstand groot dan zullen de effecten op de freatische grondwaterstand en de stroming door het afdekkende pakket over een groter gebied worden gespreid en ook worden gedempt. In gebieden met een geringe weerstand van de deklaag, is de aanname van een vast freatisch vlak minder juist, met name als er sprake is van grote slootafstanden (> 100m). In dat geval zullen de berekende veranderingen in de grondwaterstijghoogte te gering en de grondwaterstromingen te groot zijn.

Bij het deelsysteem polder is de deklaag beschouwd als een homogene weerstandslaag met een weerstand c_0 . De formule die in dit geval de stroming door de deklaag beschrijft is weergegeven in formule (4.5).

$$q_0 = \frac{(\varphi_1 - PP)}{c_0} \dots\dots\dots 4.5$$

waarin :

- q_0 = de verticale grondwaterstroming door de deklaag [m/dag],
- φ_1 = de grondwaterstijghoogte in het eerste watervoerende pakket [m t.o.v. NAP],
- PP = het (gewenste) peil in de polder [m t.o.v. NAP],
- c_0 = de weerstand tegen verticale grondwaterstroming door de deklaag [dagen].

IGG-TNO heeft de polders gedigitaliseerd van de Waterstaatskaart van Nederland, vijfde editie. Voor het noordelijk gedeelte van Nederland, waarvan deze editie nog niet is verschenen, is de vierde editie gebruikt.

Het polderpeil is in klassen van 50 cm ingedeeld.

Het polderbestand bevat polygonen met polderpeilen (winterpeilen) in meters ten opzichte van NAP. Als waarde voor een klasse is het klasse-midden aangehouden. Een polder met een peil van 1,20 m, valt in de klasse van 1,00 tot 1,50 m; in het model is in dat geval een polderpeil van 1,25 m ingevoerd. Verder is in het bestand het item "commentaar" opgenomen waarin de volgende informatie staat weergegeven :

- bebouwing;
- oppervlaktewater;
- buitendijks gebied;
- hoge gronden, bijvoorbeeld duinen;
- zomerpeil, indien alleen dit peil bekend is.

In bijlage 32 is de ruimtelijke verbreiding van de poldergebieden aangegeven. Tevens zijn in deze bijlagen de poldergebieden onderscheiden naar polderpeilklassen.

Niet alle op de Waterstaatskaart voorkomende en gedigitaliseerde polders zijn in het modelonderzoek als polders meegenomen. Een belangrijke reden hiervoor is dat in gebieden met een grote drooglegging ($Gt \geq 4$) de slootafstand in het algemeen ook groot zal zijn (> 100 m). Veelal is in deze gebieden de deklaag minder goed ontwikkeld. De sloten kunnen de deklaag doorsnijden. In combinatie met een lage weerstand van de deklaag, is in dergelijke gebieden vanuit het model gezien geen sprake van een poldersituatie. Het wel of niet toepassen van de polderoptie is daarom afhankelijk gesteld van de grondwatertrap in het gebied. In gebieden, die een grondwatertrap van vier en hoger hebben en die zijn aangemerkt als polder, is afgezien van het gebruik van de polderoptie. Deze gebieden zijn met een grondwaterstands-afvoerrelatie (zie par. 4.6) in het model meegenomen als min of meer vrij afwaterende gebieden.

Voor Flevoland is een uitzondering gemaakt. Het overgrote deel van de polder heeft een grondwatertrap van 6, 7 of 7*. De afvoer van water vindt voor een belangrijk deel plaats via de drains, die in de percelen zijn aangebracht. In feite vervangen de drains de kleinere sloten en greppels. In combinatie met het slotenstelsel wordt hier de gewenste drooglegging nagestreefd. Flevoland is derhalve wel als polder gemodelleerd.

4.6 Deelsysteem vrij afwaterende gebieden.

Het waterhuishoudkundige systeem is in vrij afwaterende gebieden gericht op een zo goed mogelijke watervoorziening van de landbouwpercelen. Daarbij is onderscheid te maken tussen infiltratie en drainage vanuit het afwateringsstelsel. Hoewel beide situaties, zowel in ruimte als tijd, naast elkaar voorkomen treedt infiltratie vooral in de zomerperiode, en drainage overwegend in de winterperiode op. Om vochttekort in de onverzadigde zone te voorkomen wordt in de zomerperiode het peil in de watergangen opgezet. In de winterperiode daarentegen zal bij een te verwachten wateroverlast door middel van lage peilen worden getracht zoveel mogelijk water te draineren en af te voeren.

In de vrij afwaterende gebieden (beken, sloten, greppels) varieert het peil in de watergangen met de hoeveelheid af te voeren water (het drainagedebiet). Een daling van de grondwaterstand, van nature of door een kunstmatige ingreep, leidt tot een vermindering van de afvoer uit het stroomgebied van de waterloop. Als de grondwaterstand daalt tot onder de bodem van de waterloop, vindt er geen afvoer meer plaats. De waterloop is dan droog komen te staan. De grootte van de grondwaterstroming van of naar dit deelsysteem vanuit het verzadigde grondwater is dus gelimiteerd.

Per knooppunt wordt de de grondwaterstroming van of naar de waterlopen (het drainagedebiet) en het verschil tussen het gemiddelde freatsich vlak en de ontwateringsbasis (de opbolling tussen de waterlopen) beschreven door:

$$q_d = \frac{(\varphi_0 - DB)}{\gamma} \dots \dots \dots 4.6$$

waarin,

- q_d = drainagedebiet [m/dag],
- φ_0 = gemiddelde freatische grondwaterstand tussen de watergangen [m],
- DB = ontwateringsbasis [m],
- γ = drainageweerstand [dagen].

De drainageweerstand γ kan beschreven worden met formule (4.7) (Ernst, 1962).

Zoals uit de formule blijkt bepaalt de afstand tussen de sloten (L) in hoge mate de waarde van de drainageweerstand (γ).

$$\gamma = L * w + \frac{L^2}{8 * kD_0} \dots\dots\dots 4.7$$

waarin:

- L = de slootafstand [m],
- kD₀ = het doorlaatvermogen van de afdekkende toplaag [m²/dag],
- w = de slootweerstand, samengesteld uit de radiale en de intreeweerstand [dag/m].

De grondwatertrap geeft een beeld omtrent de ontwatering van de gronden. Zo is bijvoorbeeld in gebieden met diepe grondwaterstanden de slootafstand groter. Omdat er echter geen ruimtelijke gegevens van drainageweerstand en drainagebasis beschikbaar waren is aangenomen dat er een relatie is tussen grondwatertrap en drainageweerstand. De waarden van de parameters, die in de grondwaterstands-afvoerrelatie voorkomen, zijn afkomstig uit de rapportage over het geohydrologisch onderzoek dat is uitgevoerd voor een industriële grondwaterwinning nabij Tilburg (Iwaco, 1990). De waarden ervan zijn weergegeven in tabel 4.5

Tabel 4.5
Koppeling grondwatertrap aan drainageweerstand.

grondwatertrap	wateraanvoergebied			niet-wateraanvoergebied		
	infiltratie- weerstand [dagen]	drainage- basis [m-mv]	drainage- weerstand [dagen]	infiltratie- weerstand [dagen]	drainage- basis [m-mv]	drainage- weerstand [dagen]
Gt-1	100	0,30	100	∞		
Gt-2, Gt-2*	200	0,30	150	∞	0,40	150
Gt-3, Gt-3*	300	0,60	250	∞	0,80	250
Gt-4	400	0,90	350	∞	1,00	350
Gt-5, Gt-5*, Gt-6	550	1,10	500	∞	1,20	500
Gt-7, Gt-7*	750	1,70	700	∞	1,70	700
stedelijk gebied	5000	1,80	1500	∞	1,80	5000

In een aantal gebieden bestaat de mogelijkheid dat het oppervlaktewater op peil wordt gehouden, c.q. wordt aangevuld (wateraanvoergebieden). Deze voeding kan bestaan uit toevoer van water vanuit een ander deel van het stroomgebied of vanuit het deelsysteem grote waterlopen. In deze situatie gaat de afvoer van de waterloop over in infiltratie.

De gemiddelde freatische grondwaterstand tussen de waterlopen ligt dan onder de drainagebasis van de waterloop. Er is wederom verondersteld dat er een lineaire relatie (zie formule 4.6) bestaat tussen, in dit geval, de infiltratie uit de waterloop en het verschil tussen de drainagebasis van en de gemiddelde freatische grondwaterstand tussen de waterlopen. De infiltratieweerstand van de slootbodem, die het water ondervindt bij de stroming vanuit de waterloop, hoeft niet gelijk te zijn aan de drainageweerstand. Deze waarden zijn eveneens afkomstig uit (Iwaco, 1990) en staan vermeld in tabel 4.5.

4.7 Grondwateronttrekkingen.

IGG-TNO heeft ook de informatie over alle grondwaterwinningen, waarvan de grondwateronttrekking in 1988 groter dan of gelijk aan 50.000 m³ per jaar was, verzameld.

Per winning zijn de navolgende gegevens verzameld:

- de x- en y-coördinaat van de grondwateronttrekkingslokatie als gemiddelde van het puttenveld;
- de diepte van boven- en onderkant van het pompfilter ten opzichte van NAP.
Het puttenveld is hierbij geschematiseerd tot één onttrekkingslokatie met een filterstelling, die representatief is voor de pompputten van het puttenveld;
- de grootte van onttrekking, cq infiltratie van de grondwaterwinning in 1988;
- type winning, onderscheiden in:
 - * grondwateronttrekkingen ten behoeve van de openbare drinkwatervoorziening;
 - * grondwaterwinningen door industrie exclusief de koelwaterwinningen (meer dan 50 % van het opgepompte grondwater wordt als koelwater gebruikt);
 - * koelwater winningen;
 - * bemalingen (tijdelijk);
 - * overig;
- waterkwaliteit van het opgepompte water (zoet/zout grondwater);
- aantal putten, dat tot de inrichting behoort.

In tabel 4.6 is het aantal grondwaterwinningen, verdeeld naar type winning, opgenomen dat binnen het modelgebied is gelegen met de totale onttrekking cq infiltratie over 1988. Op bijlage 33 zijn de lokaties van de grondwaterwinningen binnen het modelgebied aangegeven, verdeeld naar type winning. Voor de openbare drinkwatervoorziening gaat het om 197 van de ca. 220 in Nederland aanwezige grondwaterwinningen.

De informatie over (tijdelijke) bemalingen is verre van compleet. Hierdoor zal de grootte van deze grondwaterwinningen zijn onderschat.

Tabel 4.7 geeft een indruk omtrent de verdeling van de winningen naar grootte van de onttrekking. De winningen t.b.v. de openbare drinkwatervoorziening zijn geringer in aantal, maar de omvang van de winningen is veelal groter.

Tabel 4.6

Type winning, aantal (N), onttrekking en infiltratie in 1988.

type winning	Aantal		onttrekking		infiltratie	
	N	[%]	[10 ⁶ m ³ /jr]	[%]	[10 ⁶ m ³ /jr]	[%]
drinkwater	197	24	730	72	7	54
industrie	289	34	124	12	1	8
koelwater(> 50 %)	237	28	124	12	3	23
bemaling (tijdelijk)	68	8	16	2	0	0
overig	49	6	17	2	2	15
totaal	840	100	1011	100	13	100

Tabel 4.7

Aantal grondwateronttrekkingen, verdeeld naar grootte en type.

klasegrootte ont- trekking [in 10 ⁶ m ³ /jr]	aantal grondwateronttrekkingen t.b.v.				
	drinkwater- voorziening	industrie	koelwater	bemaling	overig
Q ≥ 10	11	0	0	0	0
10 < Q ≤ 5	40	1	3	0	0
5 < Q ≤ 2	67	10	8	1	1
2 < Q ≤ 1	44	17	18	1	3
1 < Q ≤ 0,5	18	35	32	4	4
0,5 < Q ≤ 0,05	17	226	176	62	41

Elke grondwateronttrekking is in het model toegekend aan één of meer van de vier watervoerende pakketten. In de gevallen waarbij een pompfilter is gelegen in meerdere watervoerende pakketten is het debiet per pakket berekend naar ratio van het produkt van de doorlatendheid in de watervoerende pakketten en de lengte van het pompfilter in het watervoerende pakket (form 4.8). Hierbij is aangenomen dat ter plaatse van slechtdoorlatende lagen geen pompfilter aanwezig is maar een zogenaamd blind stuk. Omdat de geologische informatie is geïnterpoleerd naar de onttrekkingslokatie kan de geohydrologische opbouw ter plaatse van de pompput, waaronder de dikte van de slechtdoorlatende laag, afwijken van de werkelijke situatie ter plaatse van de pompput.

$$Q_i = \frac{k_i * l_i}{\sum_{i=1}^4 k_i * l_i} * Q \dots\dots\dots 4.8$$

waarin:

- Q_i = grootte onttrekking uit het watervoerende pakket i,
- Q = grootte van de totale onttrekking,
- k_i = doorlatendheid van het watervoerende pakket i,
- l_i = lengte van putfilter in watervoerend pakket i.

5. GEBRUIKTE REKENPROGRAMMA'S

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van het instrumentarium, dat ten behoeve van het geohydrologische deelonderzoek binnen het onderzoek Effecten Grondwaterwinning in het kader van het BP-DIV en MER is ontwikkeld. Binnen het LGM zijn twee verschillende werkomgevingen onderscheiden:

- een data-omgeving met ARC-Info software, GIS-tools en basis-data;
- een rekenomgeving met de AQ-programmatuur.

Voor een grondwatermodel is met name de opslag van data bepalend voor de gebruiksmogelijkheden. De opslag van data moet dermate flexibel zijn dat ook andere toepassingen (scenario-berekening, lokale detaillering) zonder omvangrijke ingrepen in de modelstructuur mogelijk zijn. Dit heeft geleid tot een wijze van opslag van data die volledig onafhankelijk is van het gekozen netwerk van het rekenprogramma. Het Geografisch Informatie Systeem (GIS) biedt hiervoor vele mogelijkheden. De opslag en bewerking van gegevens geschieden met ARC/INFO. ARC/INFO voorziet in een groot aantal analytische functies waarmee de GIS-data is te bewerken. Daarnaast zijn programma's geschreven om deze data geschikt te maken als invoer van het geohydrologisch model (Lieste et al., 1992; Kovar et al., 1992). Het oplossen van het grondwaterstromingsprobleem gebeurt met het rekenprogramma AQ-FEM (Kovar et al., 1992).

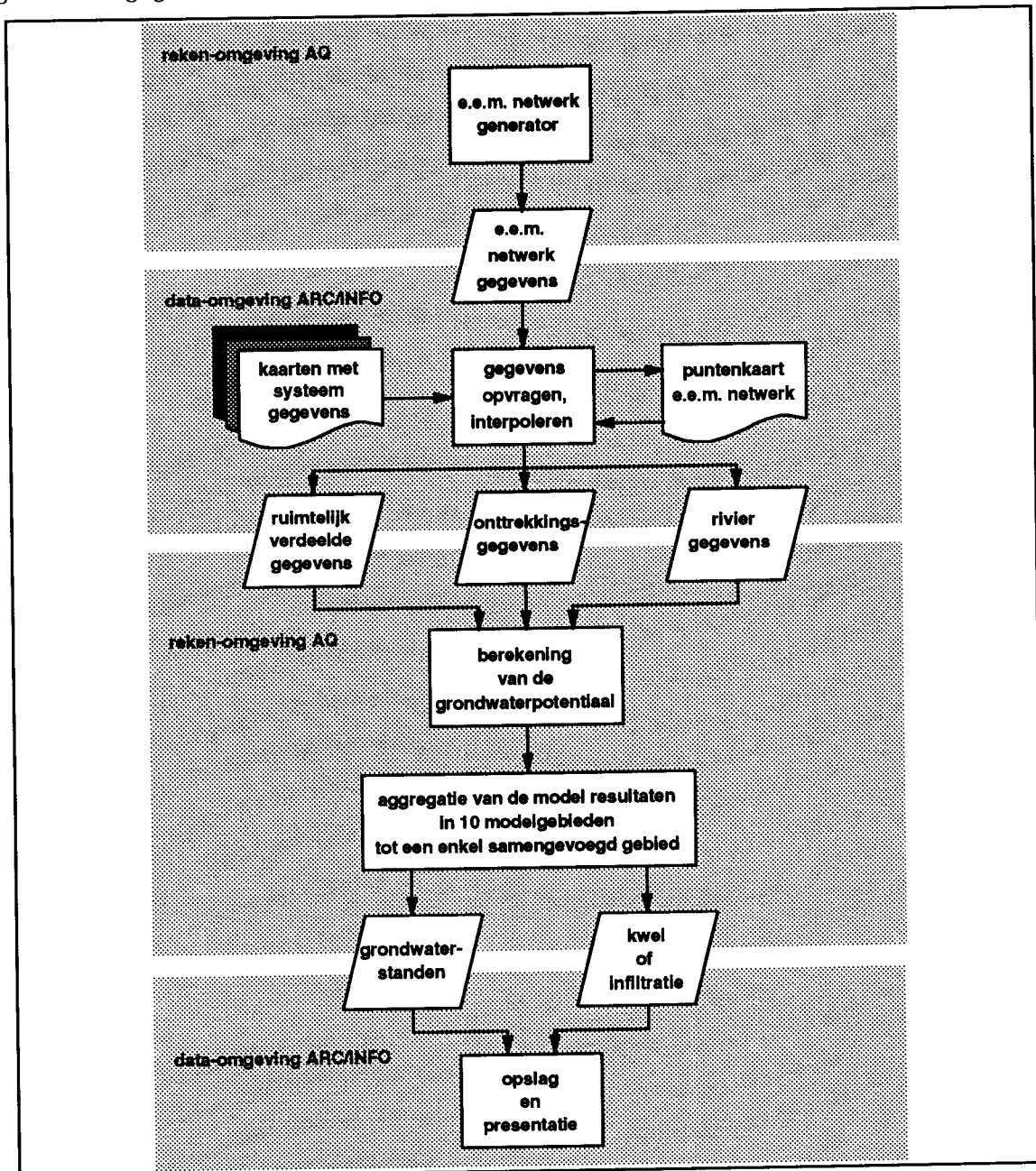
De koppeling tussen ARC/INFO en AQ-FEM verloopt via een aantal interface-programma's. Beide pakketten hebben hun eigen input en output structuur, waardoor een directe koppeling tussen deze pakketten zonder aanpassing niet mogelijk is. Voor een gemakkelijke en systematische uitwisseling van data tussen ARC/INFO en AQ-FEM is gekozen voor gestandaardiseerde ASCII files (Kovar et al., 1992).

Het rekenprogramma AQ-EP, onderdeel van AQ-FEM, berekent de grondwaterstijghoogte in en de grondwaterstroming tussen de watervoerende pakketten. De gebruikte numerieke oplossingsmethode gaat uit van Galerkin's eindige elementenmethode. Het rekenprogramma lost langs iteratieve weg de differentiaalvergelijking op die het stromingsproces beschrijft, in dit geval een twee-dimensionale, horizontale en stationaire grondwaterstroming in een systeem van maximaal 10 watervoerende pakketten. De simultane differentiaalvergelijkingen worden gelineariseerd, rekening houdend met de niet-lineaire relaties naar het oppervlaktewater. Deze set van vergelijkingen wordt opgelost met de geconjugeerde gradiënten methode.

Het programma AQ-EG, eveneens onderdeel van AQ-FEM, genereert het netwerk van drie- en vierhoekige elementen. De rand van het modelgebied wordt vastgelegd met randknooppunten. Binnen deze randknooppunten wordt het netwerk gegenereerd. De gebruiker heeft

invloed op het aantal en de grootte van de elementen, waaruit het netwerk wordt opgebouwd. Het is bovendien mogelijk het netwerk te verdichten binnen een deel van het modelgebied. De belangrijke onderdelen van en de stappen in een modelstudie met LGM zijn afgebeeld in figuur 5.1.

Figuur 5.1 : gegevens-stroomdiagram van het LGM



Zoals eerder vermeld is de ondergrond geschematiseerd tot vier watervoerende pakketten, gescheiden en/of afgedekt door slechtdoorlatende lagen. De slechtdoorlatende laag tussen twee watervoerende pakketten mag plaatselijk ontbreken. In dat geval is voor de verticale weerstand een dummy waarde van 1 dag aangenomen.

Verder zijn er randvoorwaarden nodig. Er kan een keuze gemaakt worden uit drie typen randvoorwaarden, te weten:

- een vaste stijghoogte op de rand waarbij de flux over de rand wordt uitgerekend;
- een vaste flux over de rand waarbij de stijghoogte op de rand wordt berekend;
- een grondwaterstand afhankelijk flux over de rand.

In het algemeen dient de rand van het modelgebied zo gekozen te worden dat op deze randen nauwelijks of geen invloed merkbaar is van de ingreep in het hydrologische systeem.

In het onderzoek is gestreefd naar een element grootte van ca. 1 km². Hierbij is aansluiting gezocht bij het netwerk van het ecohydrologisch voorspellingsmodel DEMNAT-2, dat vierkante elementen met een oppervlakte van 1 km² heeft.

Het huidige LGM omvat tien deelmodellen die elkaar gedeeltelijk overlappen. Het totaaloppervlak van deze deelgebieden bedraagt 35292 km². Het oppervlak van het beschouwde LGM-modelgebied is echter 28008 km² groot. De deelgebieden zijn op bijlage 34 weergegeven. In tabel 5.1 zijn per deelmodel enige kenmerken van het netwerk vermeld, zoals het aantal knooppunten, het aantal elementen, oppervlak van het deelmodel en het gemiddelde, grootste en kleinste oppervlak van een element binnen een deelmodel.

Tabel 5.1

Enige kenmerken van de 10 deelgebieden.

naam	oppervlak deelmodel [km ²]	aantal		oppervlak element [km ²]		
		knooppunten	elementen	gemiddeld	grootste	kleinste
Noord Nederland	8375	3431	3396	2,5	3,6	1,3
Overijssel	4013	2663	2604	1,5	2,1	0,6
Achterhoek	2100	2145	2064	1,0	1,4	0,4
Veluwe	2773	3225	3196	0,9	1,3	0,3
Flevoland	3275	2514	2572	1,3	1,9	0,6
Utrecht	3006	3246	3164	1,0	1,4	0,3
Rivierengebied	2550	2635	2520	1,0	1,0	1,0
West Brabant	2219	3380	3300	0,7	1,0	0,2
Midden Brabant	4906	3371	3360	1,5	2,4	0,6
Oost Brabant	2075	2744	2736	0,8	1,2	0,3

De invoer van de parameters in het rekenprogramma verloopt, met uitzondering van de rivieren, de waterlopen en de grondwateronttrekkingen via de knooppunten van het netwerk. De knooppunten vormen de schakel tussen de netwerkonafhankelijke data in het GIS en de invoer van het rekenprogramma.

In het onderzoek is gewerkt met veel data, gegenereerd door diverse reken- en transformatieprogramma's. In een vroeg stadium is gekozen voor standaardisatie van de filenamen. Het idee hierachter is dat de naam van een file informatie verschaft omtrent het modelgebied, de parameter, het programma dat de data heeft aangemaakt en de wijze waarop de data in de file is weggeschreven (Kovar et al., 1992).

6. SIMULATIE 1988

6.1 Algemeen

Met het model worden hydrologische veranderingen (verandering van de grondwaterstijg-hoogte en de toe- danwel de afname van de kwel) berekend welke ontstaan als gevolg van veranderingen in de bestaande grondwateronttrekkingen. In een dergelijke benadering, waarbij het om veranderingen in de grondwaterstroming gaat (superpositie beginsel), behoeft de bestaande grondwaterstromingssituatie (de referentiesituatie) niet expliciet in de modelberekening te worden meegenomen. Voorwaarde is wel dat het model geheel gebaseerd is op lineaire relaties binnen de deelsystemen.

In de vrij afwaterende gebieden, waarin de grondwaterafvoer gekoppeld is aan de grondwaterstand en de grootte van de afvoer is gelimiteerd, wordt echter niet voldaan aan deze voorwaarde. Het gaat in dit geval om een niet-lineaire relatie (zie par. 4.6). Om deze reden gaat het superpositieprincipe niet op.

Vanuit het oogpunt van de modelijking is het modelleren van de referentiesituatie zeker van belang. De modelijking, waarin wordt nagegaan of het model een betrouwbare weergave is van het hydrologische systeem, is een onmisbaar onderdeel van elke modelstudie. De modelresultaten worden dan getoetst aan de in de werkelijkheid voorkomende (en gemeten) waarden van toestandvariabelen. In de verzadigde grondwaterstroming gebruikt men hiervoor in bijna alle gevallen grondwaterstijghoogten. Op deze wijze wordt een indruk verkregen van de juistheid van de modelschematisering en de ingevoerde geohydrologische parameters.

In paragraaf 6.2 vindt eerst een nadere beschouwing plaats van de gekozen referentieperiode, waarna in paragraaf 6.3 de resultaten per deelgebied worden besproken. In paragraaf 6.4 tenslotte wordt de kwel/infiltratie kaart van de referentieperiode toegelicht.

6.2 Referentieperiode

Het model dient de lange termijn effecten aan te geven van veranderingen in de grondwateronttrekking ten opzichte van de huidige situatie. Dit houdt in dat er uitgegaan mag worden van een stationaire grondwaterstroming. In de "huidige" situatie, die wordt gebruikt bij de ijking van het stationaire grondwaterstromingsmodel, moet het hydrologische systeem zoveel mogelijk een evenwichtstoestand benaderen. De referentieperiode dient met betrekking tot de veranderende hydrologische situatie (grondwateronttrekking, waterhuis-

houdkundige situatie) niet te lang te zijn. Anderzijds dient met het oog op de seizoensfluctuaties van de grondwateraanvulling de periode minimaal één jaar te zijn. Met name voor de relatief traag reagerende hydrologische systemen in het geval van diepe grondwaterstanden is het niet eenvoudig een dergelijke periode met een hydrologische evenwichtssituatie te selecteren.

Verder speelt mee dat bij de ecohydrologische modellering de verandering in de Gemiddelde VoorjaarsGrondwaterstand (Δ GVG) als één van de hydrologische doses wordt beschouwd. Dit is te vertalen in het simuleren van een langjarig gemiddelde voorjaarssituatie of een (lange) aaneengesloten periode waarbinnen het hydrologische systeem een evenwichtssituatie benadert die overeenkomt met een gemiddelde voorjaarssituatie.

In dit onderzoek is gekozen voor deze laatste benadering om zoveel mogelijk uit te kunnen gaan van grondwateronttrekkingen uit een tamelijk recente periode. De te modelleren situatie wijkt dan niet al te veel af van de huidige, waarvoor met het model de scenario's worden doorgerekend. In verband met dit laatste aspect is de aandacht vooral gericht op de periode na 1980.

Op basis van langjarig meteorologische en hydrologische tijdreeksen heeft een analyse plaatsgevonden ten behoeve van de keuze van de referentieperiode.

Een belangrijke parameter voor veranderingen in de grondwaterstijghoogte is de grondwateraanvulling. Hiervoor is met name het verloop van het neerslagoverschot (neerslag minus actuele verdamping) van belang. Het neerslagoverschot is benaderd door de neerslag te verminderen met de referentieverdamping (80 % van de verdamping, berekend volgens Penman; vanaf 1 april 1987 is de neerslag verminderd met de verdamping berekend volgens Makking). Dit neerslagoverschot is min of meer representatief voor een bodembedekking van gras.

Het langjarige (1973-1988) gemiddelde neerslagoverschot van de 15 KNMI-hoofdstations is weergegeven in tabel 6.1. Het neerslagoverschot ligt tussen de 195 mm/jaar (Zeeland) en 317 mm/jaar (Groningen en N.O. Drenthe). Om een indruk te krijgen van relatief droge en natte jaren is voor het meteorostation de Bilt voor dezelfde periode de jaarlijkse afwijking van het gemiddelde neerslagoverschot per jaar weergegeven in figuur 6.1. Voor het vergelijken van het neerslagoverschot met tijd-stijghoogtelijnen is de cumulatieve afwijking van het jaarlijkse ten opzichte van het langjarige gemiddelde neerslagoverschot voor deze periode berekend. Het resultaat voor de Bilt is weergegeven in figuur 6.2.

Er zijn in de periode 1973-1988 duidelijke verschillen in de neerslag. De jaartotalen in deze periode laten zien dat de jaren zeventig relatief droog en de tachtiger jaren daarentegen overwegend nattere jaren zijn. De jaren 1985 en 1986 blijken wat het neerslagover-

schot betreft gemiddelde jaren te zijn. Van de jaren 1987 en 1988 is het neerslagoverschot groter dan het gemiddelde over deze periode. Het jaartotaal van 1988 voor de verschillende hoofdstations in Nederland is weergegeven in tabel 4.2.

Tabel 6.1

Gemiddelde neerslag (N), referentieverdamping (E_0) en neerslagoverschot (NN) over de periode van 1973-1988 [in mm/jaar] per KNMI-district.

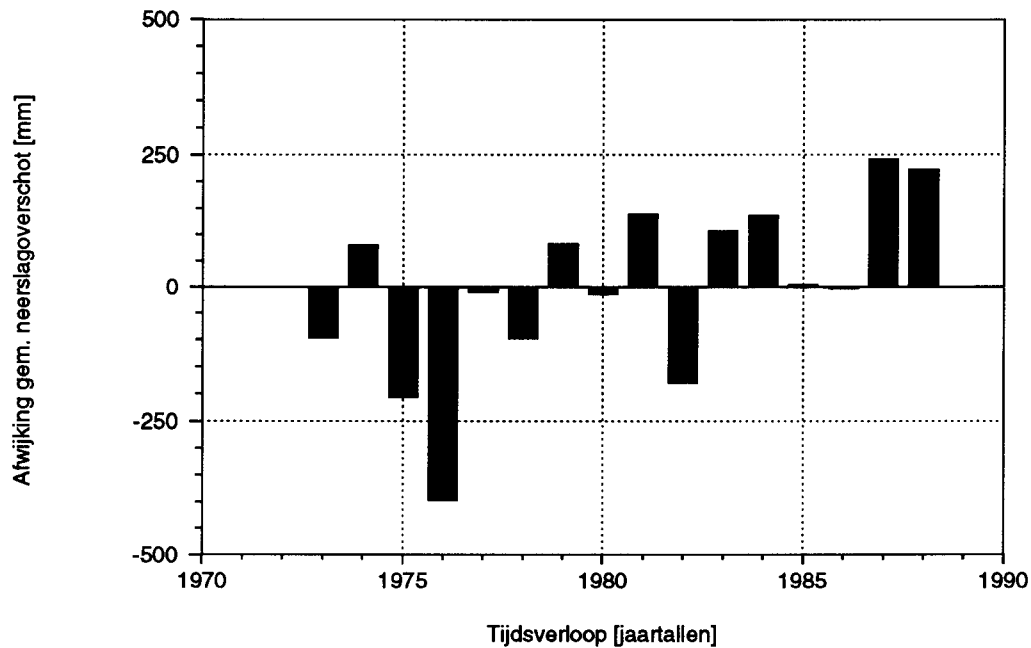
Nummer district	N	E_0	NN
1. Wadden, Den Helder	798	676	257
2. Friesland	805	630	301
3. Groningen, N.O Drenthe	800	604	317
4. Noord-Holland (boven Noordzee Kanaal)	808	687	258
5. IJsselmeerpolders	777	682	231
6. Zuid Drenthe, Salland en Twente	770	614	279
7. Zuid-Holland (excl. Goeree Overflakkee), Noord-Holland (onder Noordzee Kanaal) en West Utrecht	830	693	276
8. Utrecht, Gelderse Vallei, Veluwe en het Gooi	821	636	312
9. Achterhoek (Gelderland)	753	632	248
10. Betuwe (Gelderland)	790	656	266
11. Zeeland en Goeree Overflakkee	780	731	195
12. Westelijk Noord-Brabant	804	666	271
13. Oostelijk Noord-Brabant	777	672	239
14. Noord Limburg	737	661	209
15. Zuid Limburg	809	665	277
Gemiddelde voor Nederland	791	660	263

Een vergelijking van het neerslagoverschot van 1988 met dat van de periode 1973-1988 laat zien, dat het neerslagoverschot van 1988, gemiddeld over de 15 KNMI-distrikten, ca. 140 mm hoger is dan het gemiddelde over de periode 1973-1988.

De waarden van de neerslag en de verdampingscijfers van 1988 vormen de basis voor de grondwateraanvulling, die de invoer vormt van het model.

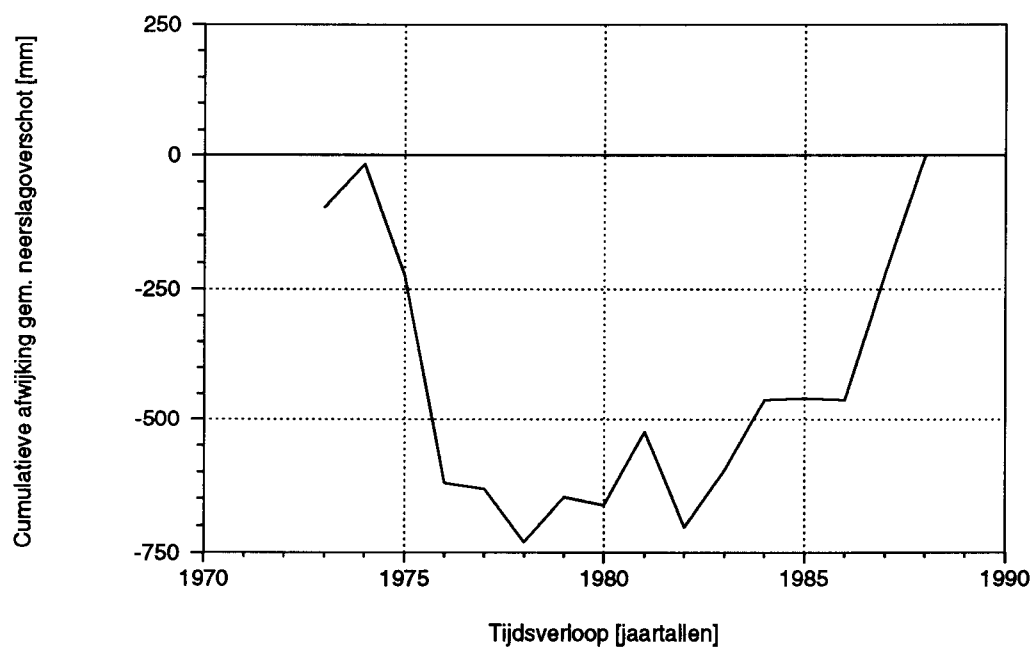
Figuur 6.1.

Afwijking van het jaarlijkse neerslagoverschot ten opzichte van het langjarig gemiddelde neerslagoverschot over de periode 1973-1988 (De Bilt).



Figuur 6.2

Cumulatieve afwijking van het gemiddelde neerslagoverschot over de periode 1973-1988 (De Bilt).



In het voorgaande jaar (1987) is het neerslagoverschot eveneens hoger dan de gemiddelde waarde over de periode 1973-1988.

Het stijghoogte verloop is geanalyseerd voor vier waarnemingsputten op de hoge zandgronden (Veluwe, Utrechtse Heuvelrug) te weten de peilputten 32F-2, 32A-148, 33C-4 en 39B-19. Het verloop van de stijghoogte lijkt bij dergelijke meetpunten sterk op het verloop van de cumulatieve afwijking van het gemiddelde neerslagoverschot. Door de plaatselijk grote dikte van de onverzadigde zone zijn pieken in het neerslagoverschot enigszins vertraagd en afgevlakt terug te vinden in de stijghoogtelijnen. De vertraging loopt op de Utrechtse Heuvelrug op tot 3 maanden. Op de Veluwe worden op plaatsen met een onverzadigde zone van meer dan 20 meter vertragingen van meer dan 6 maanden bepaald. In deze gebieden zullen de grondwaterstijghoogten, gemeten in 1988, gedeeltelijk het gevolg zijn van het neerslagoverschot in 1987. Verder zijn, als gevolg van de afvlakking in de grondwateraanvulling, de fluctuaties in de grondwaterstijghoogte binnen een jaar klein in vergelijking met fluctuaties die kunnen optreden gedurende een aantal opeenvolgende jaren.

Uit de evaluatie van het verloop van het gemiddelde neerslagoverschot en de stijghoogten in het eerste watervoerende pakket is het jaar 1988 gekozen als het meest recente jaar om als simulatieperiode te dienen voor een langjarig gemiddelde **voorjaarssituatie**.

De keuze van 1988 betekent dat de gemiddelde grondwaterstijghoogte van 1988 boven de langjarig gemiddelde situatie ligt. Daarnaast zullen de hogere grondwaterstijghoogten in het eerste watervoerende pakket en de grotere grondwateraanvulling een grotere grondwaterstroming naar het oppervlaktewater betekenen dan in een gemiddeld jaar.

6.3 Berekening van de gemiddelde grondwaterstijghoogte van 1988.

Voor de modelijking is gekozen voor een simpele toets, waarbij de berekende grondwaterstijghoogten zijn vergeleken met de gemeten grondwaterstijghoogten van de waarnemingsputten in het onderzoeksgebied. Hiervoor zijn de berekende grondwaterstijghoogten in de knooppunten van het modelnetwerk geïnterpoleerd naar de lokaties van de waarnemingsputten.

De ijking heeft plaats gevonden op de grondwaterstijghoogten in het eerste watervoerende pakket. De grondwaterstijghoogten in de diepere watervoerende pakketten zijn voor dit onderzoek van ondergeschikt belang. Alle waarnemingsputten, waarvan een filter in het eerste watervoerende pakket is gelegen, zijn hiervoor gebruikt. De gegevens betreffen de waarnemingsputten waarvan de grondwaterstijghoogten zijn opgeslagen in het grondwaterstanden archief van IGG-TNO.

Voor elk deelgebied is per waarnemingspunt het verschil tussen gemeten en berekende grondwaterstijghoogte bepaald. De uitkomsten zijn vastgelegd in een frequentietabel, waaruit de kansdichtheid is geschat. De kansdichtheid is grafisch weergegeven in de vorm van een histogram. De histogrammen van alle deelgebieden zijn weergegeven in de figuren 5a t/m 5j. Het histogram is te generaliseren tot een kansverdeling. De kansverdeling wordt onder meer gekarakteriseerd door het gemiddelde en de spreiding in de uitkomsten. Maatstaven voor de spreiding zijn het gemiddelde, de variantie en de standaardafwijking. Het gemiddelde van de verzameling is berekend door alle verschillen tussen gemeten en berekende waarden te sommeren en de som daarna te delen door het aantal waarnemingen. De mediaan is de middelste waarde van de verzameling (dus het verschil bij de helft van het aantal waarnemingen). Het verschil in gemeten en berekende waarde heeft dan een over- en onderschrijdskans van 50%. Bij een symmetrische kansverdeling zoals de normale verdeling, vallen het gemiddelde en de mediaan samen. Bij de analyse is ervan uitgegaan dat de kansverdeling van de verschillen tussen gemeten en berekende waarden van de grondwaterstijghoogten in het eerste watervoerende pakket geen voorkeur heeft voor afwijkingen in een bepaalde richting. De kans op een zekere positieve afwijking is even groot als die op een even grote negatieve afwijking. In tabel 6.2 zijn de resultaten van de statistische bewerking weergegeven.

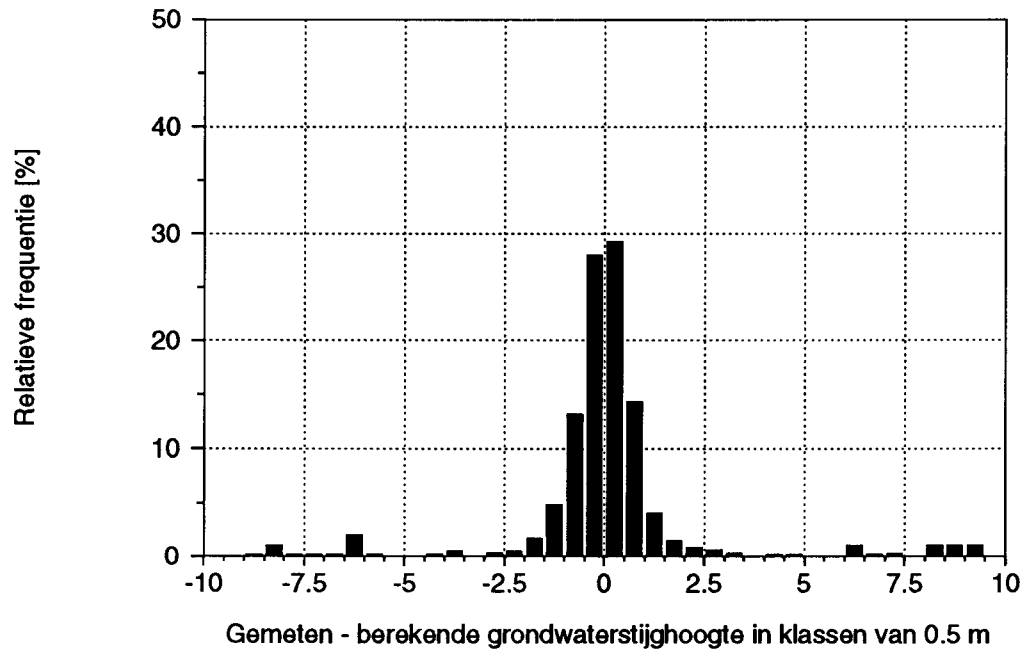
Tabel 6.2

Statistische parameters van de verdeling van het verschil tussen gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het eerste watervoerende pakket per deelmodel.

deelmodel	aantal waarne- mingen	gemiddelde verschil [m]	min. waarde [m]	25 % percentiel [m]	mediaan [m]	75 % percentiel [m]	max. waarde [m]
Noord Nederland	708	0,04	-4,21	-0,38	0,03	0,44	7,68
Overijssel	999	-0,09	-8,10	-0,70	-0,35	0,09	18,30
Achterhoek	406	-0,67	-6,13	-0,87	-0,56	-0,29	8,73
Veluwe	645	0,29	-5,45	-0,83	-0,37	0,18	19,74
Flevoland	494	0,38	-4,66	-0,50	0,01	0,65	11,86
Utrecht	781	-0,39	-4,95	-0,73	-0,37	0,07	4,59
Rivierengebied	408	0,00	-3,59	-0,70	-0,42	-0,11	32,43
West Brabant	286	0,06	-6,21	-0,96	-0,49	0,18	14,68
Midden Brabant	538	-0,48	-11,05	-1,01	-0,52	0,05	17,28
Oost Brabant	387	-0,11	-3,11	-0,96	-0,46	0,10	20,25

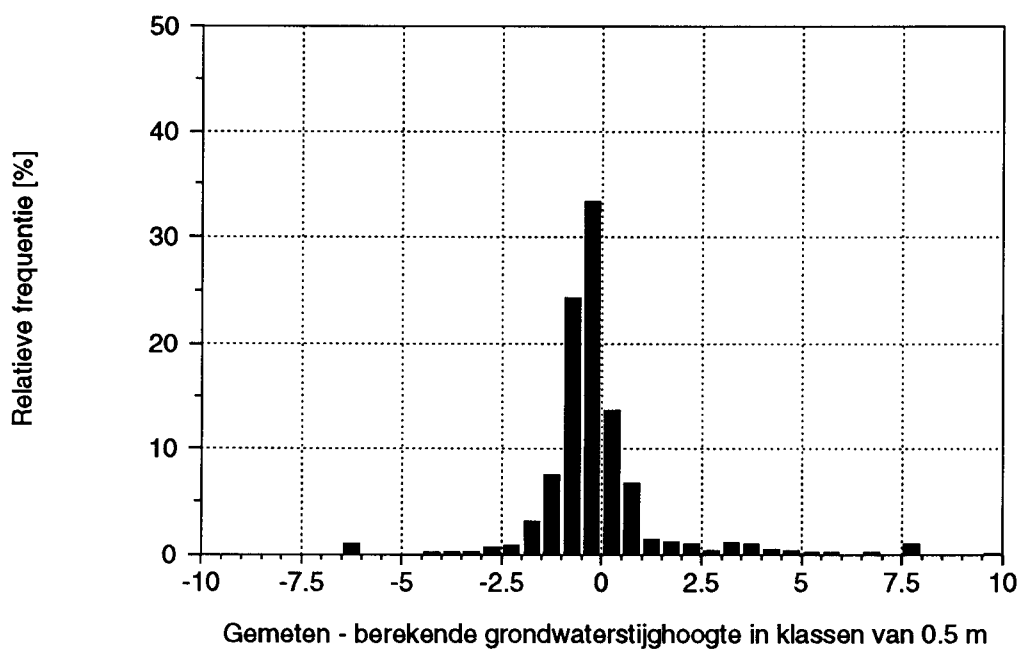
Figuur 5a.

Relatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het 1^e watervoerende pakket voor het deelmodel "Noord Nederland".



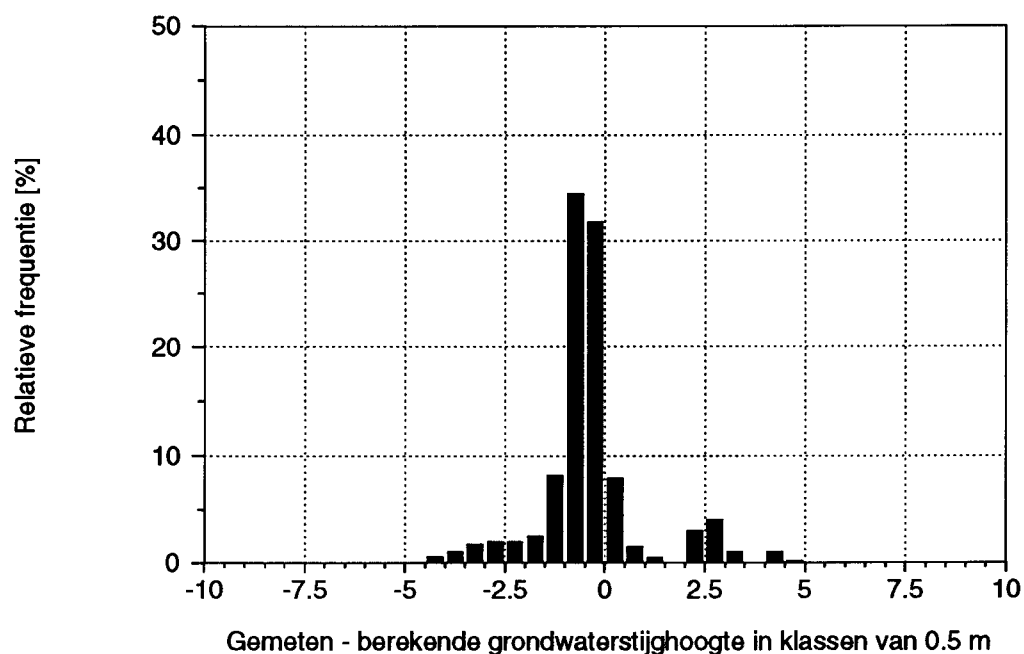
Figuur 5b.

Relatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het 1^e watervoerende pakket voor het deelmodel "Overijssel".



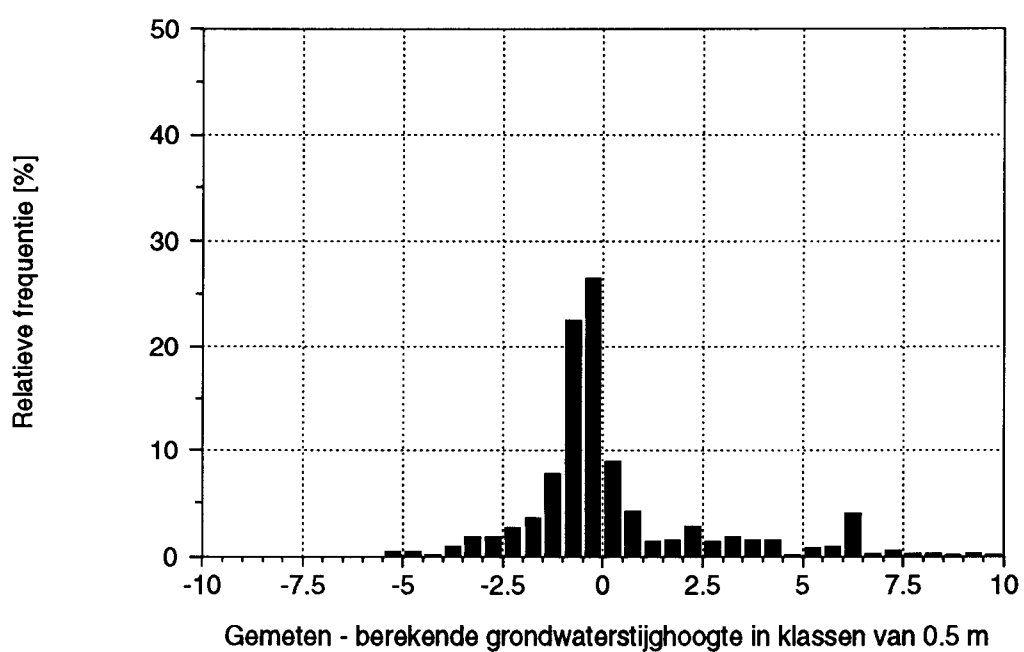
Figuur 5c.

Relatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het 1^e watervoerende pakket voor het deelmodel "Achterhoek".



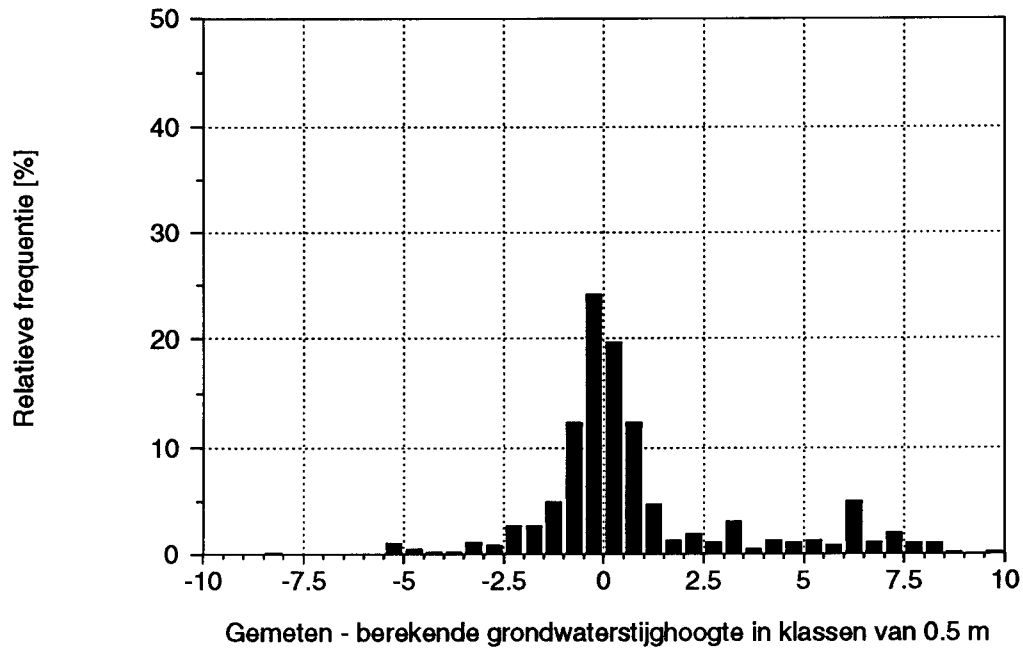
Figuur 5d.

Relatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het 1^e watervoerende pakket voor het deelmodel "Veluwe".



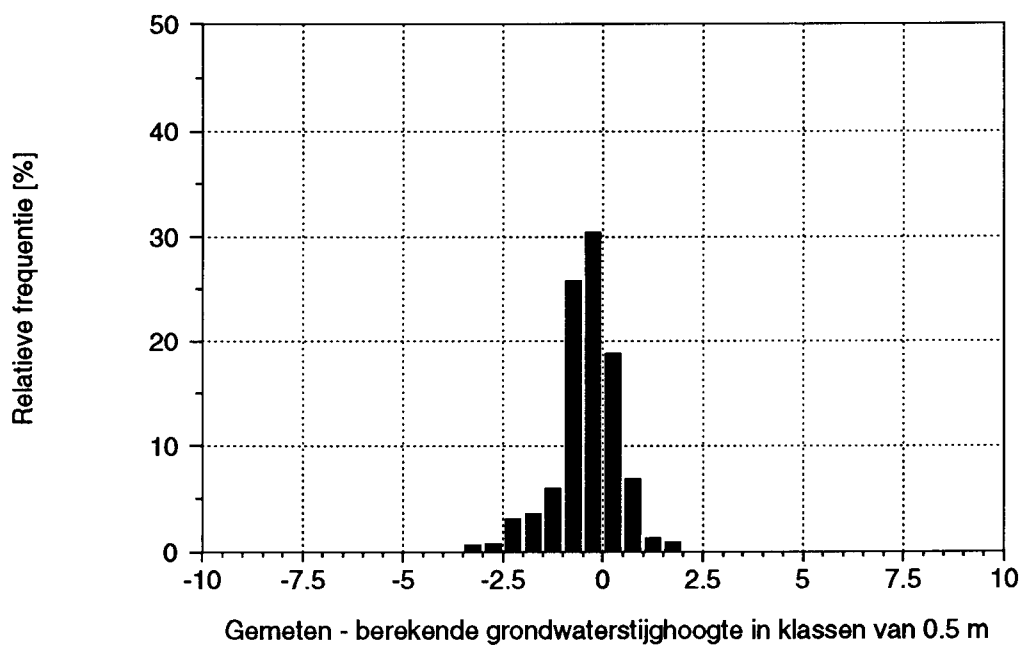
Figuur 5e.

Relatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het 1^e watervoerende pakket voor het deelmodel "Flevoland".



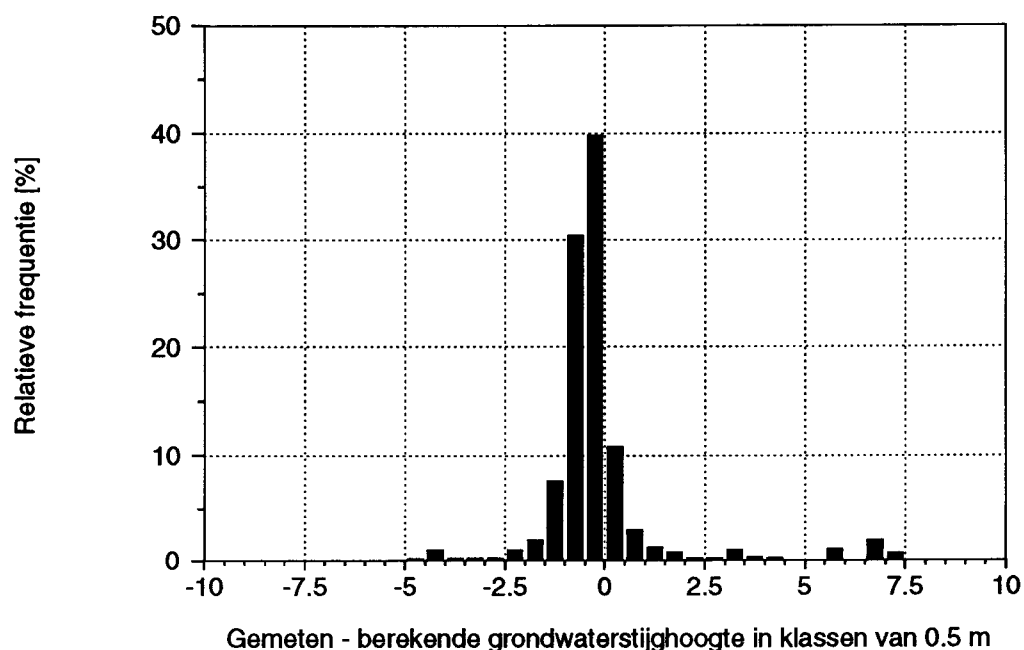
Figuur 5f.

Relatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het 1^e watervoerende pakket voor het deelmodel "Utrecht".



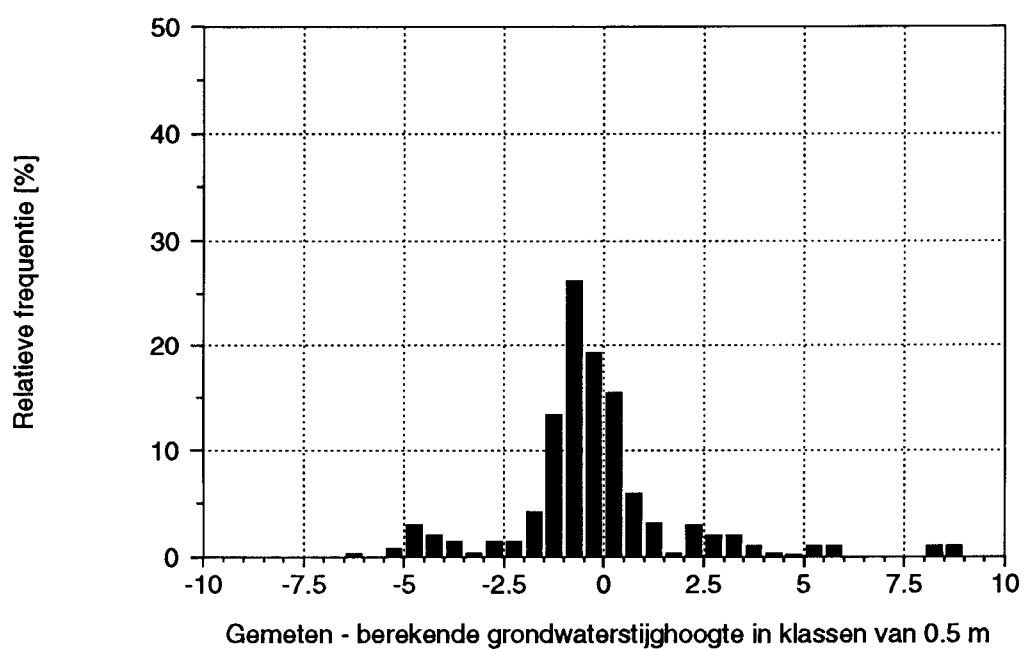
Figuur 5g.

Relatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het 1^e watervoerende pakket voor het deelmodel "Rivieren".



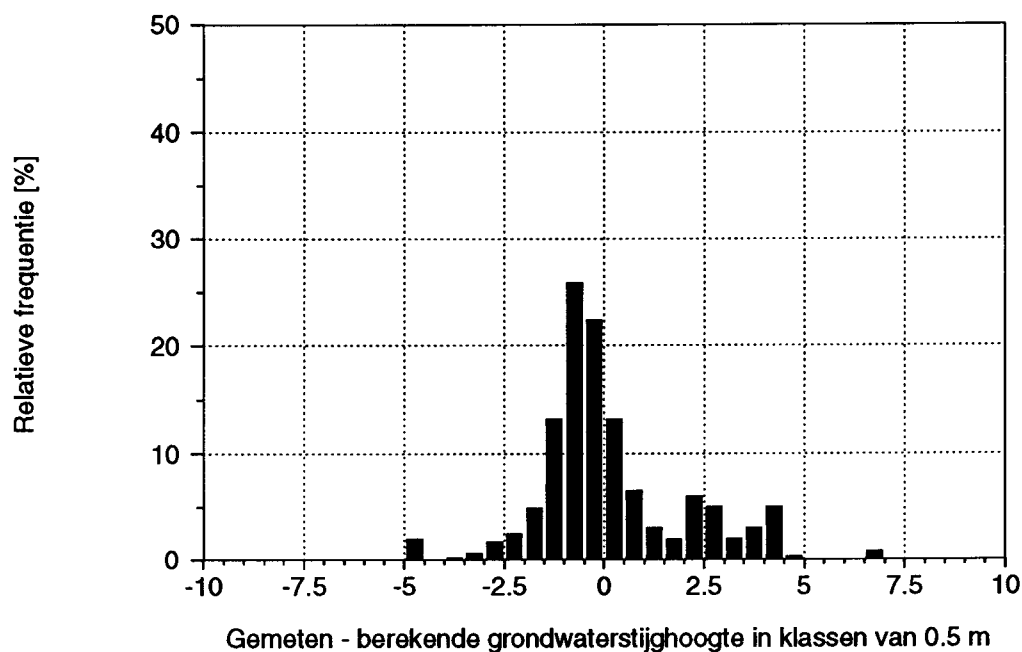
Figuur 5h.

Relatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het 1^e watervoerende pakket voor het deelmodel "West Brabant".



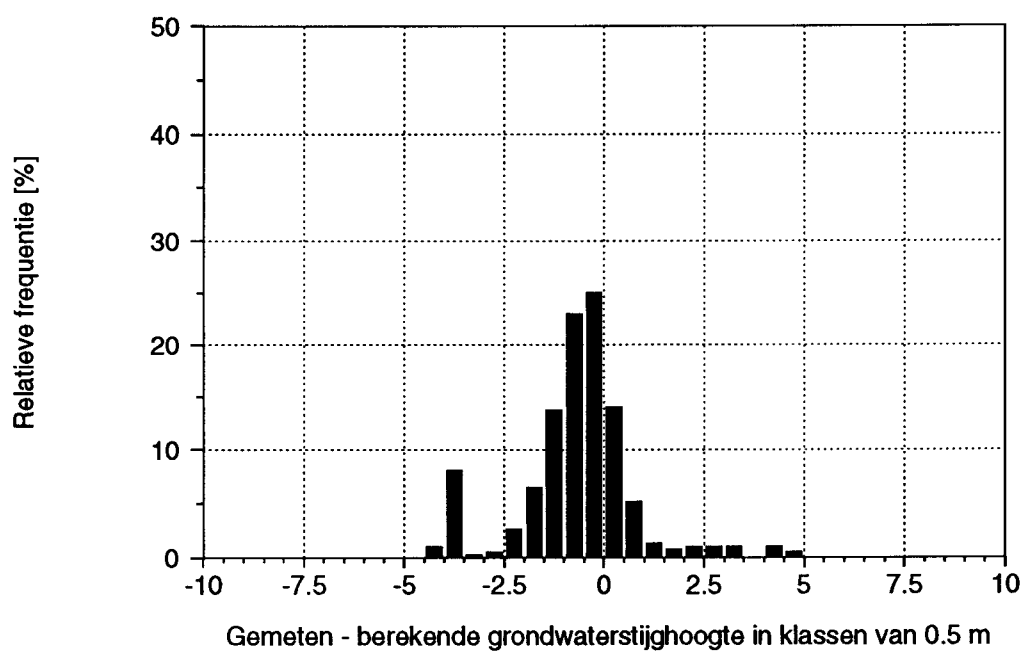
Figuur 5i.

Relatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het 1^e watervoerende pakket voor het deelmodel "Midden Brabant".



Figuur 5j.

Relatieve frequentieverdeling van de verschillen tussen de gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het 1^e watervoerende pakket voor het deelmodel "Oost Brabant".



Uit het histogram en de resultaten van de statistische analyse is te zien of de data min of meer symmetrisch liggen ten opzichte van de gemiddelde waarde. In dat geval moet het gemiddelde dus dicht bij de mediaan liggen. In drie deelgebieden, Noord Nederland, Utrecht en Midden Brabant, liggen het gemiddelde en de mediaan minder dan 10 cm van elkaar. Verder kan uit het histogram worden afgeleid hoe de modelwaarden liggen ten opzichte van de gemeten waarden. Overwegend negatieve verschillen betekenen dat het modelresultaat in het modelgebied hoger uitkomt dan de werkelijke grondwaterstijghoogten. Het werken met de mediaan heeft als voordeel dat deze minder wordt beïnvloed door enkele grote lokale verschillen. Nu zijn het de deelgebieden Noord-Nederland en Flevoland, waar het LGM goede resultaten geeft. In de overige deelgebieden berekent het model te hoge grondwaterstijghoogten. In dat geval is het interessant te bekijken bij welk percentiel de omslag van negatieve naar positieve waarden van het verschil tussen de gemeten en met het model berekende grondwaterstijghoogte plaats vindt. In tabel 6.3 is naast het aantal waarnemingspunten waarvoor het verschil negatief is, het percentiel dat behoort bij dit omslagpunt vermeld. Het omslagpunt bij de deelgebieden Noord Nederland en Flevoland ligt dicht bij de 50%. Ook Overijssel, met 55% komt redelijk uit deze analyse te voorschijn. Voor de overige deelgebieden ligt het omslagpunt bij het percentiel van ca. 70%, met als uitschieters de deelgebieden Rivierengebied (81%) en Achterhoek (87%).

Tabel 6.3

Het percentiel van het punt waar het verschil tussen gemeten en berekende grondwaterstijghoogte in het eerste watervoerende pakket van teken verandert.

deelmodel	aantal waarne- mingen	aantal waarnemingen waarin $\varphi_{\text{gemeten}} < \varphi_{\text{model}}$	percentiel omslag punt
Noord Nederland	708	346	49
Overijssel	999	707	55
Achterhoek	406	354	87
Veluwe	645	443	69
Flevoland	494	243	49
Utrecht	781	554	71
Rivierengebied	408	332	81
West Brabant	286	195	68
Midden Brabant	538	394	73
Oost Brabant	387	277	71

Naar aanleiding van de tabellen 6.2 en 6.3 en de figuren 5a t/m 5j kan het volgende worden opgemerkt.

- Met het model zijn over het algemeen te hoge grondwaterstijghoogten in het eerste watervoerende pakket berekend. Dat blijkt ondermeer uit tabel 6.3, waarin het percentiel van het omslagpunt is weergegeven. Dat ligt voor zeven van de tien modelgebieden rond de 70 % of hoger. Het zou eigenlijk de waarde van 50% moeten zijn, de waarde waarbij de over- en onderschrijdingskans even groot is.
- De overwegend hoge positieve waarden van het verschil tussen gemeten en berekende grondwaterstijghoogte komen vooral voor in gebieden met diepe grondwaterstanden, zoals op de heuvelruggen. Het gaat in dat geval om waarnemingsputten waarvan het filter tussen gestuwde lagen is gesteld. De stuwung, waarbij de horizontale doorlatendheid in de x-richting verschillend kan zijn van die in de y-richting, is niet in het model verwerkt. Ook de representativiteit van sommige waarnemingen is discutabel. Op sommige plaatsen komen schijnspiegels voor in de ondergrond. Een filter, dat in een schijnspiegel is geplaatst, levert een onjuiste waarde voor de grondwaterstijghoogte in het eerste watervoerende pakket. Een aantal grote positieve verschillen kan hierdoor worden verklaard (o.a op de Brabantse Wal, de zuidelijke Veluwezoom, westelijke deel van de Veluwe, de stuwwal bij Nijmegen, Montferland).
- In een aantal gebieden, waar het eerste watervoerend pakket in het model een zeer gering doorlaatvermogen heeft, treden grote negatieve verschillen op. In deze gebieden speelt het afwateringsstelsel van kleine waterlopen (sloten, greppels) een zeer belangrijke rol. Het model is op deze zeer lokale omstandigheden niet ingericht. Daarvoor ontbreken nog te veel gegevens, zoals de ligging van het maaiveld ten opzichte van N.A.P.
- De ontwatering van de vrij afwaterende gebieden is gekoppeld aan de grondwaterstand-afvoerrelatie. De grondwaterstand in deze relatie is weergegeven ten opzichte van het maaiveld, waarvan de hoogteligging in het model noodgedwongen gebrekkig is bepaald in verband met het ontbreken van een digitaal gegevensbestand hiervan. Grote verschillen kunnen ontstaan met de werkelijke maaiveldshoogte. Het zal duidelijk zijn dat de invloed van de grondwaterstand-afvoerrelatie, gezien het kleine traject waarover de grondwaterstand invloed uitoefent op de drainage-afvoer, zeer gevoelig is voor een onjuist bepaalde ligging van het maaiveld.
- Bij het beoordelen van de modelresultaten is het van belang te weten dat de waargenomen grondwaterstijghoogten behept kunnen zijn met fouten. Allereerst kunnen er fouten zijn gemaakt bij het toekennen van stijghoogtewaarnemingen aan watervoerende pakketten. In hoofdstuk 3.7 is beschreven hoe per waarnemingsput de gemiddelde grondwaterstijghoogte van 1988 is toegekend aan het watervoerende pakket. Hiertoe is de geohydrologische informatie omtrent de opbouw van de ondergrond geïnter-

poleerd naar de lokatie van de waarnemingsput. Deze geschematiseerde opbouw kan afwijken van de werkelijke opbouw ter plaatse van de waarnemingsput, waardoor in het uiterste geval filters aan een onjuist watervoerend pakket wordt toegekend. In feite houdt dit in dat een verkeerde waarde van de grondwaterstijghoogte aan het watervoerende pakket wordt opgegeven.

- Verder is voorzichtigheid geboden bij het toekennen van een representativiteit aan een waarneming voor een groot gebied. Met name voor het eerste watervoerende pakket kunnen plaatselijk geldende hydrologische eigenschappen de grondwaterstijghoogte zeer beïnvloeden, waardoor afwijkingen tussen berekende en gemeten waarden kunnen ontstaan.

6.4 Berekening van de gemiddelde kwel/infiltratie van 1988.

Niet alleen de verandering in de grondwaterstand maar ook de verandering in de hoeveelheid kwel respectievelijk de omslag van kwel naar inzijging en omgekeerd, is gebleken belangrijk te zijn voor standplaatsen met vochtige tot zeer natte condities. Dit betekent dat in de referentieperiode aangegeven moet worden in welke gebieden kwel danwel infiltratie optreedt. Daarom is extra aandacht besteed aan het maken van de kwel/infiltratiekaart van 1988, waarbij met name is gekeken naar gebieden waar kwel optreedt.

Tabel 6.4

Het aantal km² met kwel, dan wel infiltratie per klasse.

q_0 [mm/dag]	km ²
$\leq -2,00$	542
-2,00 - -1,00	1126
-1,00 - -0,50	2100
-0,50 - -0,25	2135
-0,25 - -0,10	2019
-0,10 - 0,00	1848
0,00 - 0,10	1580
0,10 - 0,25	1954
0,25 - 0,50	2887
0,50 - 1,00	4752
1,00 - 2,00	4597
$> 2,00$	460

Op bijlage 35 is de grootte van de kwel, dan wel de infiltratie, die met het LGM is berekend, in klassen weergegeven uitgaande van de gegevens van 1988. In de hoge zandgebieden is de infiltratie gelijk aan de grondwateraanvulling. In de vrij afwaterende gebieden begrenzen de grondwaterstand-afvoerrelaties de infiltratie, cq de kwel. Voor de poldergebieden is de grondwaterstroming naar het oppervlaktewater niet aan een maximale, cq minimale waarde gebonden. Tabel 6.4 geeft een overzicht van de kwel dan wel de infiltratie, weergegeven als het aantal km² per klasse binnen het LGM-modelgebied. De kwelstroming is aangegeven met een negatieve waarde.

De oppervlakte van het gebied, waarin met het model voor de situatie van 1988 kwel wordt berekend, is 9770 km² groot. Het infiltratiegebied bedraagt dus 16230 km².

Naar aanleiding van bijlage 35 kan het volgende worden opgemerkt.

- Ondanks de extra aandacht die besteed is aan de kwel/infiltratie kaart van 1988 dragen de gepresenteerde cijfers een indicatief karakter, vanwege de onzekerheden die ten grondslag liggen aan de gegevens. In de poldergebieden is dit op de eerste plaats een gevolg van het generaliseren van de polderpeilen, waarbij het polderpeil in klassen van 50 cm is ingedeeld. Een (lokale) kwelstroom tussen aangrenzende polders binnen dezelfde klasse is met deze data derhalve niet te modelleren. Dit geldt eveneens bij de aanwezigheid van relatief hoog liggende en min of meer droogtegevoelige gronden ter plaatse van de zandbanen.
- In de vrij-afwaterende gebieden is, het ontbreken van een digitaal bestand van de maaiveldshoogten als een groot gemis ervaren. Het verkeerd berekenen van de maaiveldshoogte ten opzichte van N.A.P. heeft onmiddellijk gevolgen voor de afvoer van grondwater dan wel de aanvoer van oppervlaktewater.

7. CONCLUSIES

1. Het onderzoek ten behoeve van het BPDIV en MER is opgezet voor het berekenen van de hydrologische effecten van ingrepen in de grondwateronttrekking op landelijke schaal. Het Landelijk Grondwater Model (LGM) levert, uitgaande van de doelstelling en van de hydrologische karakteristieken van het onderzochte gebied, de gegevens, waarmee de geohydrologische doses van het ecohydrologisch voorspellingsmodel DEMNAT-2 zijn bepaald. Voor wat betreft de hydrologische effecten als gevolg van veranderingen in de grondwateronttrekkingen heeft het onderzoek een vergelijkend karakter, waarbij de resultaten van de doorgerekende scenario's als geheel op landelijke schaal met elkaar zijn vergeleken. De resultaten mogen niet gebruikt worden om een oordeel uit te spreken over de lokale hydrologische effecten van een grondwaterwinning. Hiervoor is in de regel nader onderzoek nodig om het lokaal-hydrologisch systeem te kunnen beschrijven en de optredende effecten nader te kunnen aangeven.
2. Het GIS is een zeer bruikbaar instrument gebleken bij het modelleren van grote gebieden, waarbij veel ruimtelijk verdeelde parameters een rol spelen. Het GIS biedt mogelijkheden om snel en efficiënt invoer gegevens te toetsen, berekende en gemeten waarden met elkaar te vergelijken.
3. Opslag van modelgegevens in een GIS heeft als voordeel dat voor nieuwe toepassingen gebruik kan worden gemaakt van de bestaande basisset. Het maken van een nieuw model voor een gebied waarvan de data al beschikbaar zijn is daardoor relatief eenvoudig. Het genereren van een netwerk, waaraan de modeldata moeten worden toegekend, is voldoende. Het LGM is dermate flexibel dat ook andere toepassingen (scenario's, lokale detaillering) zonder omvangrijke ingrepen in de modelstructuur mogelijk zijn.
4. Door de gestructureerde opzet van de rekenprogramma's is een instrument ontwikkeld dat gemakkelijk kan worden verbeterd en uitgebreid. Dat geldt zowel voor de programma's binnen het eindige elementen pakket AQ-FEM als voor de programma's die de interface vormen tussen het GIS-ARC/INFO en AQ-FEM.
5. Het standaardiseren van de data die gebruikt worden als input voor, danwel geproduceerd worden als output van programma's, leidt tot een betere afstemming tussen de programma's onderling. In de toekomst kan hierdoor efficiënter worden gewerkt bij de implementatie van nieuwe programma's binnen het LGM.

6. Uit de evaluatie van het verloop van de (cumulatieve afwijkingen van) het gemiddelde neerslagoverschot en de stijghoogten in vier waarnemingsputten over de periode 1973-1988 is het jaar 1988 gekozen als het meest recente jaar waarbinnen het hydrologische systeem een evenwichtssituatie benadert die overeenkomt met een gemiddelde **voorjaarssituatie**, mede omdat 1987 in meteorologisch opzicht aan de natte kant was. Dit is van belang voor gebieden met een dikke onverzadigde zone waar de pieken en dalen in het neerslagoverschot enigszins vertraagd terug te vinden zijn in de grondwaterstijghoogten. Het jaar 1988 vormt derhalve een geschikt jaar voor de stationaire ijking van het hydrologische systeem voor een gemiddelde voorjaarssituatie.
7. De berekende grondwaterstijghoogten in het eerste watervoerende pakket zijn per deelgebied getoetst aan gemeten, over 1988 gemiddelde, grondwaterstijghoogten. De afwijking tussen berekende en gemeten waarden is nog erg variabel, maar wel verklaarbaar uit het modelonderzoek en daardoor afdoende voor de toepassing van het LGM ten behoeve van de onderbouwing van het BPDIV en de bijbehorende MER.

8. AANBEVELINGEN

In het onderzoek ten behoeve van het Beleidsplan Drink- en Industriewatervoorziening (BPDIV) is een eerste versie van het LGM ontwikkeld. Voor toekomstig (geo)hydrologisch onderzoek binnen de milieuthema's zal het LGM ook worden ingezet. Het LGM is qua opzet dermate flexibel dat deze toepassingen zonder omvangrijke ingrepen in de modelstructuur mogelijk zijn. Het model zal echter nog wel aanmerkelijk moeten worden uitgebreid en verbeterd.

In onderstaande aanbevelingen wordt daar nader op ingegaan.

1. Binnen het onderzochte gebied vindt ongeveer 90% van de totale grondwaterwinning voor de openbare drinkwatervoorziening plaats. Het westelijke deel van Nederland i.c. de duinen en de Waddeneilanden zijn vanwege de zoet/zout problematiek - die een aangepaste wijze van hydrologisch modelleren vraagt - en de fijschaligheid van het waterhuishoudkundig systeem niet doorgerekend. De oostelijke delen van Twente en de Achterhoek zijn vanwege het vrijwel volledig ontbreken van een watervoerend pakket van enige betekenis niet in het model meegenomen. Door de zeer complexe geologische en geohydrologische situatie is bovendien Zuid Limburg niet gemodelleerd. Voor toekomstig (milieu-)onderzoek verdient het aanbeveling deze gebieden in het LGM onder te brengen. Het LGM zal hiervoor moeten worden uitgebreid met de mogelijkheid om de effecten van zoet/zout grondwater in rekening te kunnen brengen, zodat ook berekeningen kunnen worden uitgevoerd, waarbij deze effecten een rol kunnen spelen.
2. De schematisatie van het oppervlaktewater dient aanmerkelijk te worden gedetailleerd. In de huidige versie van het LGM zijn bijvoorbeeld de polderpeilen ingevoerd in stappen van 50 cm, hetgeen overigens op de gewenste berekeningsresultaten voor de toepassing van het LGM in het kader van de BPDIV en MER niet bezwaarlijk is. Voor onderzoeken waarvoor meer gedetailleerde uitspraken worden vereist een verdere verfijning van de gegevens over het oppervlaktewater noodzakelijk. Het verdient aanbeveling de verzameling van die gegevens op gestructureerde wijze ter hand te nemen. De bij IGG-TNO en de Meetkundige Dienst in ontwikkeling zijnde systemen respectievelijk het Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem (REGIS) en het Waterstaatkundig Informatie Systeem (WIS) vormen een voor deze activiteit geschikt kader.
3. Het ontbreken van een gedetailleerde gedigitaliseerde hoogtekaart van Nederland is als een groot gemis ervaren. Het verdient aanbeveling de hoogtegegevens te digitaliseren.

4. Bij de verdere ontwikkeling van het LGM moet meer ruimte gereserveerd worden voor de analyse van de betrouwbaarheid van de berekeningsresultaten. Op deze wijze kunnen gemaakte aannamen, zoals de schematisering, gebruikte parameterwaarden e.d., worden geverifieerd. De mathematische kant van de betrouwbaarheidsbepalingen is nog volop in ontwikkeling. Er is bij het RIVM een onderzoek gestart naar technieken, waarmee gemeten en berekende waarden van de grondwaterstijghoogten op systematische wijze kunnen worden vergeleken en waarmee op grond van deze vergelijking en weging van de verschillen waarden van de grondconstanten kunnen worden berekend.
5. Het LGM zal ook worden ingezet bij het voorspellen van de grondwaterkwaliteit. Derhalve dient met het LGM concentraties in het grondwater berekend te worden op basis van de beschrijving van het transport en gedrag van opgeloste stoffen in het grondwater. De uitbreiding van de bestaande programmatuur van het LGM richt zich allereerst op uitbreiding met de mogelijkheid om snelheidsberekeningen van het grondwater, stroombanen en verblijftijden, en transportberekeningen uit te voeren. De modules hiervoor zijn beschikbaar; aan de koppeling met de huidige versie van het LGM wordt gewerkt.

9. LITERATUURLIJST

9.1 Geraadpleegde literatuur

Drecht G. van, 1992 : Nitraatuitspoeling van landbouwgronden.
RIVM-rapport (in voorbereiding).

Ernst L.F., 1962 : Grondwaterstroming in de verzadigde zone en hun berekeningen bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen.
Proefschrift, R.U. Utrecht.

Grakist, G., H. van Veldhuijzen, 1992 : Effecten van grondwaterstandsveranderingen op de landbouwproductie; een methodiek.
RIVM-rapport 714305001

Heij G.J., 1975 : Basiswaarden van de weerstanden van de slechtdoorlatende lagen in West-Utrecht.
RID

Heij G.J., 1979 : Beschrijving van het geohydrologische systeem in West-Utrecht.
RID-rapport HyH 79-11

Iwaco, 1990 : Hydrologische effecten van een grondwaterwinning van 4,25 miljoen m³/jaar door Fuji Photo Film b.v.

Kovar, K., A. Leijnse, J.B.S. Gan, 1992 : Groundwater Model for the Netherlands. Mathematical Model Development and User's Guide.
RIVM-rapport 714305002

Lieste, R., J.G.W. Verlouw, 1992 : Het gebruik van een Geografisch Informatie Systeem ten behoeve van het Landelijk Grondwater Model.
RIVM-rapport 714305003

Pastors M.J.H., 1992 : Landelijk Grondwater Model ; berekeningsresultaten.
RIVM-rapport 714305005

Provincie Drenthe, 1985 : Grondwaterplan Drenthe; Rapport van de technische werkgroep grondwaterplan 2.

RID, 1978 : Geohydrologische gegevens van Zuidelijk Flevoland en de Gelderse Vallei.

RID-mededeling 78-4

RGD, 1975 : Toelichting bij Geologische Overzichtskaarten van Nederland.

VROM, 1990 : Beleidsplan Drink- en Industriewatervoorziening "Naar een Glasheldere Toekomst".

VROM, nota 90353/5-90.

9.2 Rapporten, uitgebracht in kader van onderzoek "Effecten Grondwaterwinning"

- rapport nr.1: Het ecohydrologisch voorspellingsmodel DEMNAT-2;
 conceptuele modelbeschrijving
 Witte, J.P.M., C.L.G.Groen, J.G.Nienhuis
 november 1992
 CML-rapport nr.89
 RIVM-rapport 714305007
 ISBN nr:90-6960-030-7
- rapport nr.2: Het ecohydrologisch voorspellingsmodel DEMNAT-2;
 technische modelbeschrijving
 Nienhuis, J.G., J.B.S.Gan, R.Lieste
 december 1992
 RIVM-rapport 714305008
 ISBN nr:90-6960-032-3
- rapport nr.3: Het gebruik van een Geografisch Informatie Systeem ten behoeve van
 het ecohydrologisch voorspellingsmodel DEMNAT-2
 Nienhuis, J.G.
 december 1992
 RIVM-rapport 714305006
 ISBN nr:90-6960-028-5
- rapport nr.4: FLORBASE; een bestand van de Nederlandse flora, periode 1975 - 1990
 Groen, C.L.G., M.Gorree, R.van der Meijden, R.Huele, M.van 't Zelfde
 december 1992
 CML-rapport nr.91
 ISBN nr:90-6960-037-4
- rapport nr.5: Ecoseries 2.0. Naar een ecoserieclassificatie, ten behoeve van
 het ecohydrologisch voorspellingsmodel DEMNAT-2
 Klijn, F., A.ten Harmsel, C.L.G.Groen
 april 1992
 CML-rapport nr.85
 ISBN nr:90-6960-036-6

- rapport nr.6: Verspreiding en natuurwaarden van ecotoopgroepen in Nederland
Witte, J.P.M., R.van der Meijden
november 1992
ISBN nr:90-6960-040-4
- rapport nr.7: Effecten van ingrepen in de waterhuishouding op vegetaties van natte en
vochtige standplaatsen
Linden, M.v.d., J.Runhaar, M.v.'t Zelfde
november 1992
CML-rapport nr.86
ISBN nr:90-6960-034-X
- rapport nr.8: Berekening invloed systeemvreemd water met DEMGEN
Pakes, U., R.H.van Waveren, F.A.M.Claessen
november 1992
RIZA; werkdocument 92-117X
ISBN nr:90-6960-039-0
- rapport nr.9: Groundwater Model for the Netherlands.
Mathematical Model Development and User's Guide
Kovar, K., A.Leijnse, J.B.S.Gan
november 1992
RIVM-rapport 714305002
ISBN nr:90-6960-027-7
- rapport nr.10: Landelijk Grondwater Model; conceptuele modelbeschrijving
Pastoors, M.J.H.
november 1992
RIVM-rapport 714305004
ISBN nr:90-6960-026-9
- rapport nr.11: Het gebruik van een Geografisch Informatie Systeem ten behoeve van
het Landelijk Grondwater Model
december 1992
Lieste, R., J.G.W.Verlouw
RIVM-rapport 714305003
ISBN nr:90-6960-024-2

- rapport nr.12: Landelijk Grondwater Model; berekeningsresultaten
Pastoors, M.J.H.
november 1992
RIVM-rapport 714305005
ISBN nr:90-6960-025-0
- rapport nr.13: Het ecohydrologisch voorspellingsmodel DEMNAT-2;
interpretatie van de rekenresultaten
Groen, C.L.G., R.van der Meijden, J.G.Nienhuis, U.Pakes, J.P.M.Witte
november 1992
CML-rapport nr.90
RIVM-rapport 714305009
RIZA-nota nr. 92-058
ISBN nr:90-6960-029-3
- rapport nr.14: Toetsing van de verspreiding van ecotoopgroepen aan het LKN-bestand
Groen, C.L.G., J.P.M.Witte
december 1992
CML-rapport nr.92
ISBN nr:90-6960-033-1
- rapport nr.15: Effecten van grondwaterstandsveranderingen op de landbouwproductie;
een methodiek
Grakist, G., H.van Veldhuijzen
maart 1992
RIVM-rapport 714305001
ISBN nr:90-6960-035-8
- rapport nr.16: Effecten op natuur van grondwaterwinning ten behoeve van Beleidsplan
Drink- en Industrierwatervoorziening en MER
Beugelink, G.P., F.A.M.Claessen, J.H.C.Mülschlegel
november 1992
RIVM-rapport 714305010
RIZA-nota nr.92.059
ISBN nr:90-6960-038-2

Nr = Nummer Bodemkaart 1:250.000
 Code = Code Bodemkaart 1:250.000
 LWo = Klasse wateroverlast
 LDr = Klasse droogteschade
 Opp = Oppervlak legenda-eenheid Bodemkaart

Nr	Code	LWo	LDr	Opp
0	water			
1	V1	2	4	271
2	V2	2	4	136
3	V3	2	4	192
4	V4	2	4	8
5	V5	2	4	287
6	V5x	2	4	12
7	V6	2	4	907
8	bV6	2	4	1
9	V6x	2	4	24
10	V7	2	4	122
11	V8	2	4	95
12	V8\	2	4	1
13	V9	2	4	344
14	V10	2	4	265
15	V11	2	4	358
16	V11->	2	4	2
17	V12	2	4	283
18	V12g	2	4	3
19	V12x	2	4	2
20	V13	2	4	633
21	V13x	2	4	15
22	V13->	2	4	11
23	V14	2	4	595
24	V14g	2	4	8
25	V14->	2	4	3
26	V15	2	4	121
27	Z1	1	6	82
28	Z2	1	6	193
29	bZ2	1	6	826
30	bZ2n	1	6	6
31	Z2n	1	6	10
32	Z2v	1	6	43
33	Z2/	1	6	4
34	Z2->	1	6	1
35	Z3	1	4	134
36	bZ3	1	4	637
37	bZ3n	1	4	5
38	Z3n	1	4	34
39	Z3/	1	4	3
40	Z3->	1	4	4
41	Z4	1	4	194
42	Z5	1	2	234
43	Z5g	1	2	22

Nr	Code	LWo	LDr	Opp
44	Z6	1	2	394
45	Z7	1	2	83
46	Z7g	1	2	7
47	Z7x	1	2	2
48	Z8	1	2	2217
49	Z8g	1	2	242
50	Z8x	1	2	469
51	Z8x->	1	2	4
52	Z8\	1	2	11
53	Z8->	1	2	7
54	Z9	1	2	82
55	Z9x	1	2	1
56	Z10	1	4	114
57	Z10x	1	4	27
58	Z11	1	3	510
59	Z11g	1	3	21
60	Z11x	1	3	270
61	Z12	1	2	678
62	Z12g	1	2	108
63	Z12->	1	2	10
64	Z13	1	2	461
65	Z14	1	6	221
66	Z15	1	6	33
67	Z16	1	6	1122
68	Z16g	1	6	16
69	Z16x	1	6	72
70	Z17	1	6	121
71	Z17g	1	6	17
72	Z17x	1	6	1
73	Z18	1	6	739
74	Z18g	1	6	55
75	Z18x	1	6	222
76	Z19	1	3	91
77	Z19x	1	3	2
78	Z20	1	2	1135
79	Z20g	1	2	105
80	Z20v	1	2	1
81	Z20x	1	2	143
82	Z20->	1	2	11
83	Z21	1	2	232
84	Z21g	1	2	70
85	Z21x	1	2	35
86	Z21x\	1	2	2
87	Z21\	1	2	4

Appendix.

Indeling van de eenheden van de bodemkaart van Nederland 1:250.000 in klassen van gevoeligheid voor droogteschade en wateroverlast.

Nr	Code	LWo	LDr	Opp
88	Z22	1	4	15
89	Z23	1	4	96
90	Z23g	1	4	3
91	Z23n	1	4	5
92	Z23x	1	4	2
93	Z24	1	4	79
94	Z24x	1	4	10
95	Z25	1	7	29
96	Z25n	1	7	25
97	Z26	1	4	308
98	Z26g	1	4	44
99	Z26x	1	4	4
100	Z27	1	4	687
101	Z28	1	7	69
102	M1	1	1	106
103	M1v	2	5	2
104	M1->	1	1	3
105	M2	2	3	117
106	eM2	2	3	3
107	beM2	2	3	11
108	M3	1	1	3
109	bM3	1	1	135
110	M4	1	1	21
111	bM4	1	1	94
112	beM4	1	1	41
113	bM4x	2	5	2
114	M5	1	1	60
115	eM5	1	1	16
116	beM5	1	1	6
117	M6	2	5	88
118	eM6	2	5	11
119	M7	1	3	518
120	eM7	1	3	38
121	M7v	1	1	7
122	M7->	1	1	39
123	M8	1	1	1651
124	eM8	1	1	56
125	eM8v	1	1	5
126	M8v	1	1	74
127	M8\	1	1	2
128	M8->	1	1	26
129	M9	1	1	48
130	bM9	1	1	19
131	beM9	1	1	6
132	M9\	1	1	18
133	M9->	1	1	2
134	M10	1	1	720
135	eM10	1	1	12
136	M10v	1	1	2
137	M10->	1	1	68
138	M11	2	3	960
139	eM11	2	3	89
140	eM11v	2	3	10
141	M11v	2	3	15
142	M11->	2	3	30

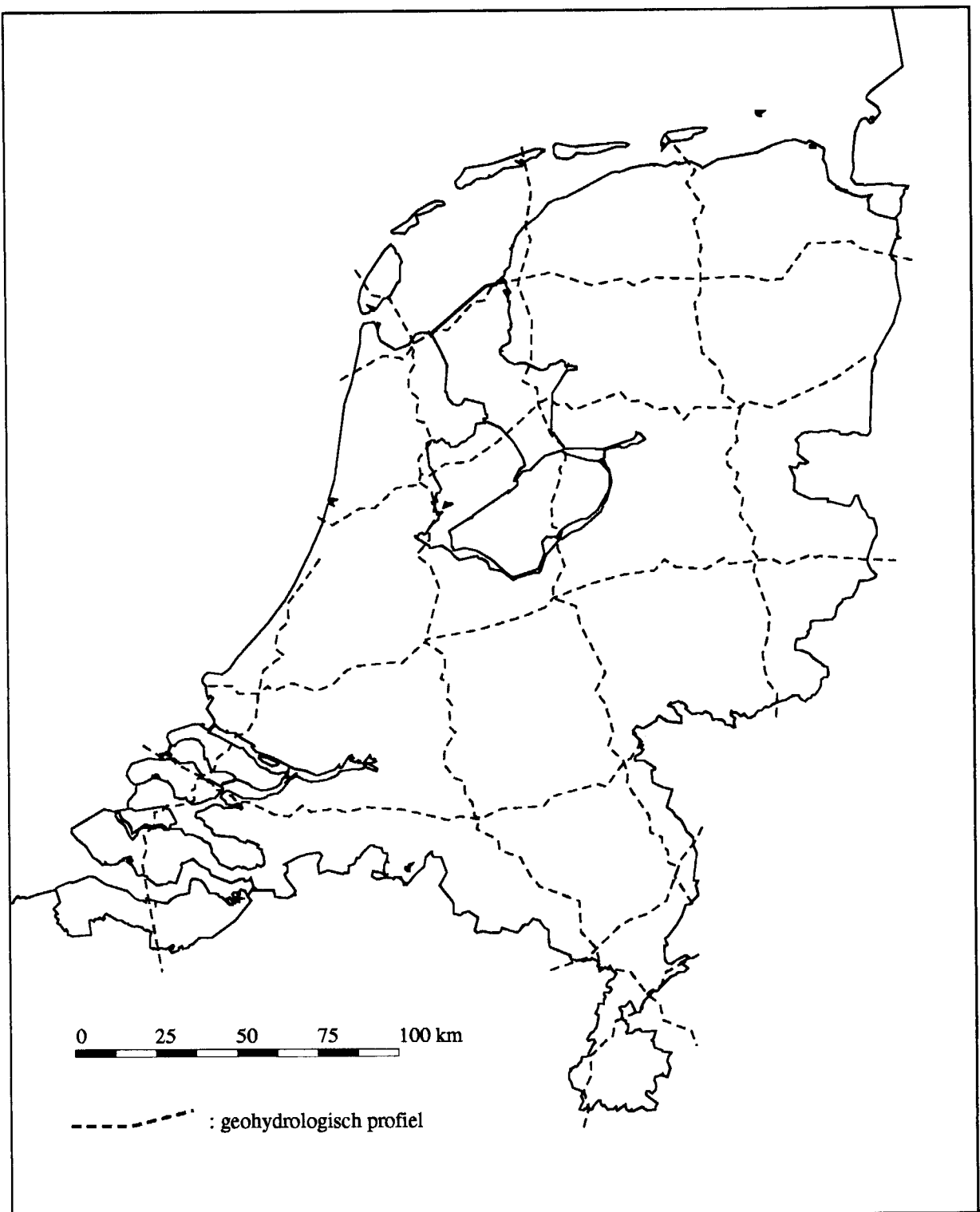
Nr	Code	LWo	LDr	Opp
143	M12	2	3	90
144	M13	2	3	210
145	eM13	2	3	5
146	M13v	2	3	1
147	M14	1	1	304
148	M14\	1	1	11
149	M15	1	1	44
150	M15\	1	1	4
151	M16	2	3	296
152	M16\	2	3	7
153	M16->	2	3	11
154	M17	2	1	54
155	M18	2	5	539
156	eM18	2	5	41
157	M18->	2	5	24
158	M19	1	1	337
159	M20	2	3	489
160	M20\	2	3	3
161	M21	2	4	48
162	M21->	2	4	11
163	M22	2	4	598
164	eM22	2	4	2
165	M23	2	4	24
166	M23->	2	4	16
167	R1	2	8	31
168	bR1	2	8	22
169	bR1\	2	8	120
170	mR1	2	8	21
171	R1\	2	8	44
172	R2	2	3	84
173	bR2	2	3	38
174	R3	2	3	612
175	bR3	2	3	119
176	mR3	2	3	5
177	R3g	2	4	2
178	R4	1	1	22
179	R4\	1	1	20
180	mR4\	1	1	3
181	R5	2	5	461
182	bR5	2	5	9
183	mR5	2	5	13
184	R6	2	8	141
185	bR6	2	8	10
186	R6\	2	8	3
187	R7	2	4	437
188	mR7	2	4	2
189	R8	2	3	217
190	bR8	2	3	1
191	R8\	2	3	2
192	R9	1	1	52
193	bR9	1	1	11
194	R10	2	3	194
195	bR10	2	3	64
196	K1	1	1	50
197	K2	1	1	107

Vervolg appendix.

Nr	Code	LWo	LDr	Opp
198	K2g	1	1	62
199	K3	1	1	94
200	K3g	2	8	59
201	K4	1	1	83
202	K5	1	1	23
203	K6	1	1	11
204	L1	2	0	15
205	L1g	1	6	18
206	L2	2	0	236
207	L2g	2	8	2
208	L3	2	0	50
209	dL3	2	0	5
210	L3g	1	6	4
211	L4	2	0	15
212	dL4	2	0	58
213	L4g	1	6	20
214	L5g	1	6	3
215	S1	1	0	5
216	S2	1	0	15
217	V5/V13	2	4	8
218	V5/Z8	2	4	3
219	V6/V14	2	4	49
220	V8/V14	2	4	2
221	V11/V14	2	4	6
222	V13/Z8	2	4	208
223	V13/Z11	2	4	3
224	V14/Z7	2	4	9
225	V14/Z20	2	4	6
226	Z3/Z4	1	4	45
227	bZ3/Z4	1	4	11
228	Z4/Z27	1	4	15
229	Z5g/K3g	1	1	6
230	Z8/Z26	1	4	8
231	Z18/Z26	1	4	27
232	Z20/R4	1	2	20
233	M1/M2	1	1	6
234	M1->/M2	1	1	18
235	M1->/M1>	1	1	8
236	M2->/M1>	1	1	85
237	M7/M13	1	3	5
238	M13/M20	2	3	56
239	M15/M16	1	1	26
240	A1	2	4	155
241	A2	2	4	16
242	A3	1	2	521
243	A3x	1	2	715
244	A3->	1	2	12
245	A4	1	4	187
246	A4x	1	4	13
247	A5	1	3	40
248	A5->	1	3	8
249	A6	2	0	26
250	A7	1	3	44
251	A8	1	3	212
252	A8x	1	3	2

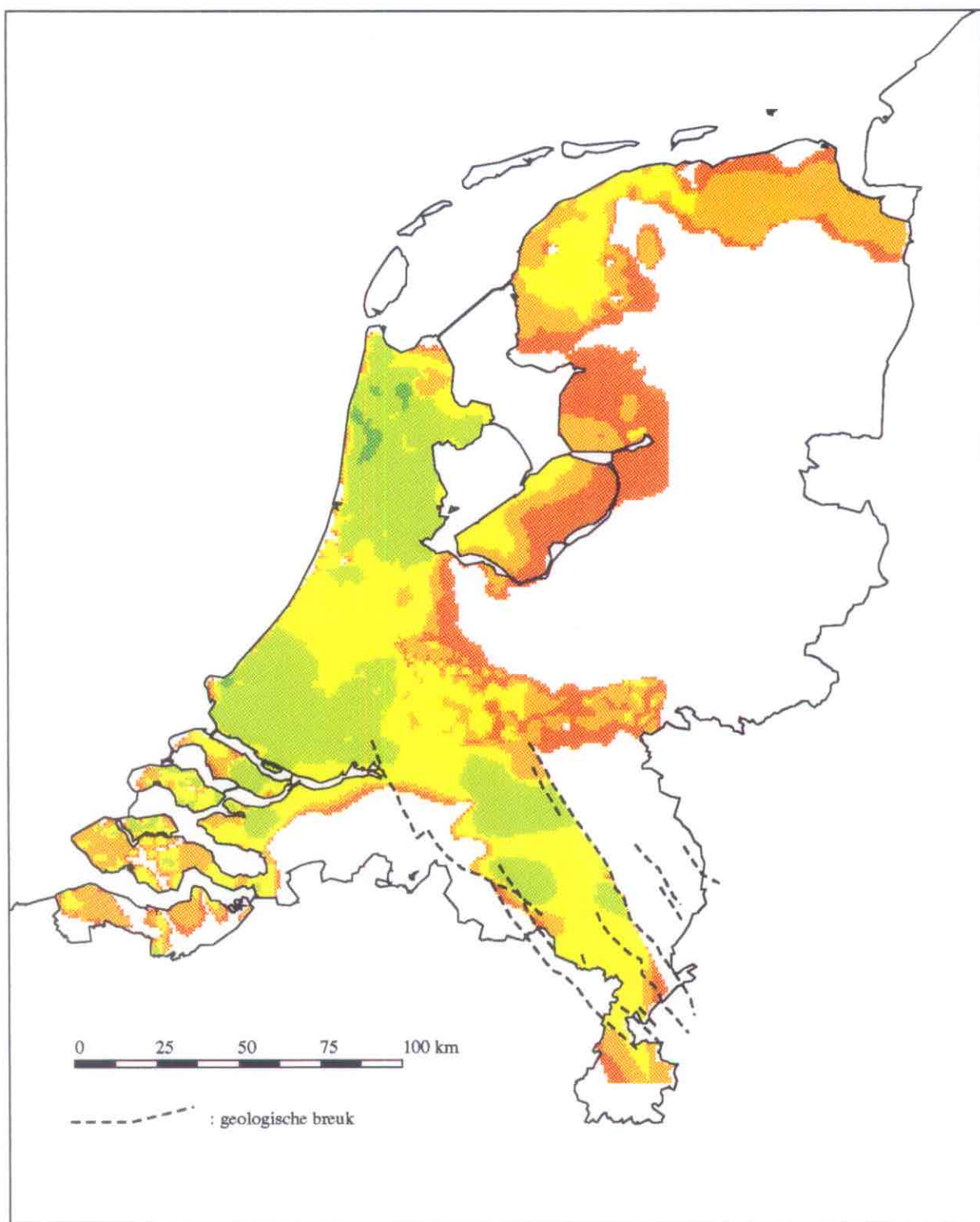
Nr	Code	LWo	LDr	Opp
253	A9	2	8	60
254	bA9	2	8	1
255	A9->	2	8	3
256	A10	2	4	12
257	A10->	2	4	85
258	A11->	2	4	68
259	A12	2	0	39
260	A13	2	0	13

Vervolg appendix.



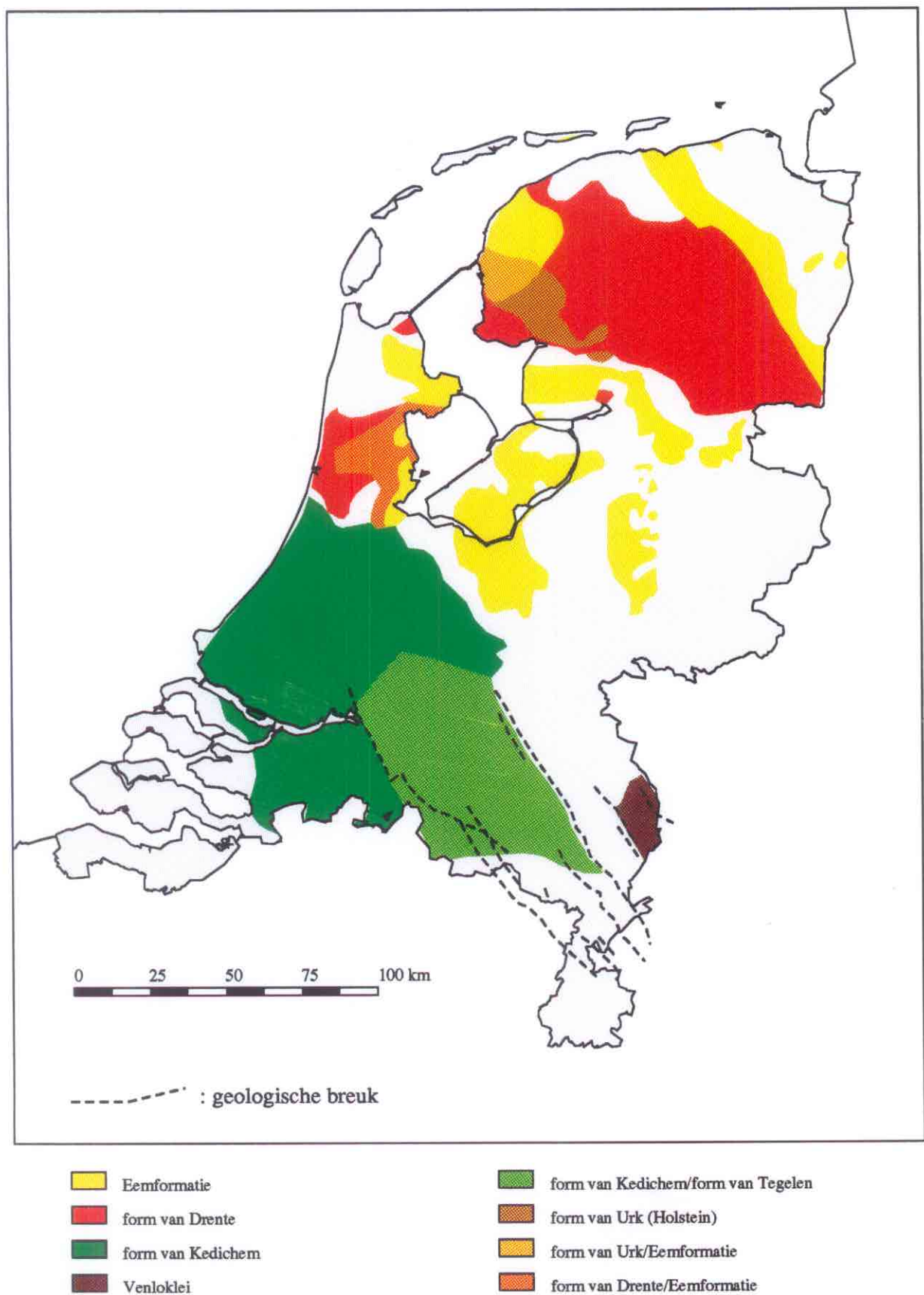
Bijlage 1.

Overzicht van de geohydrologische profielen



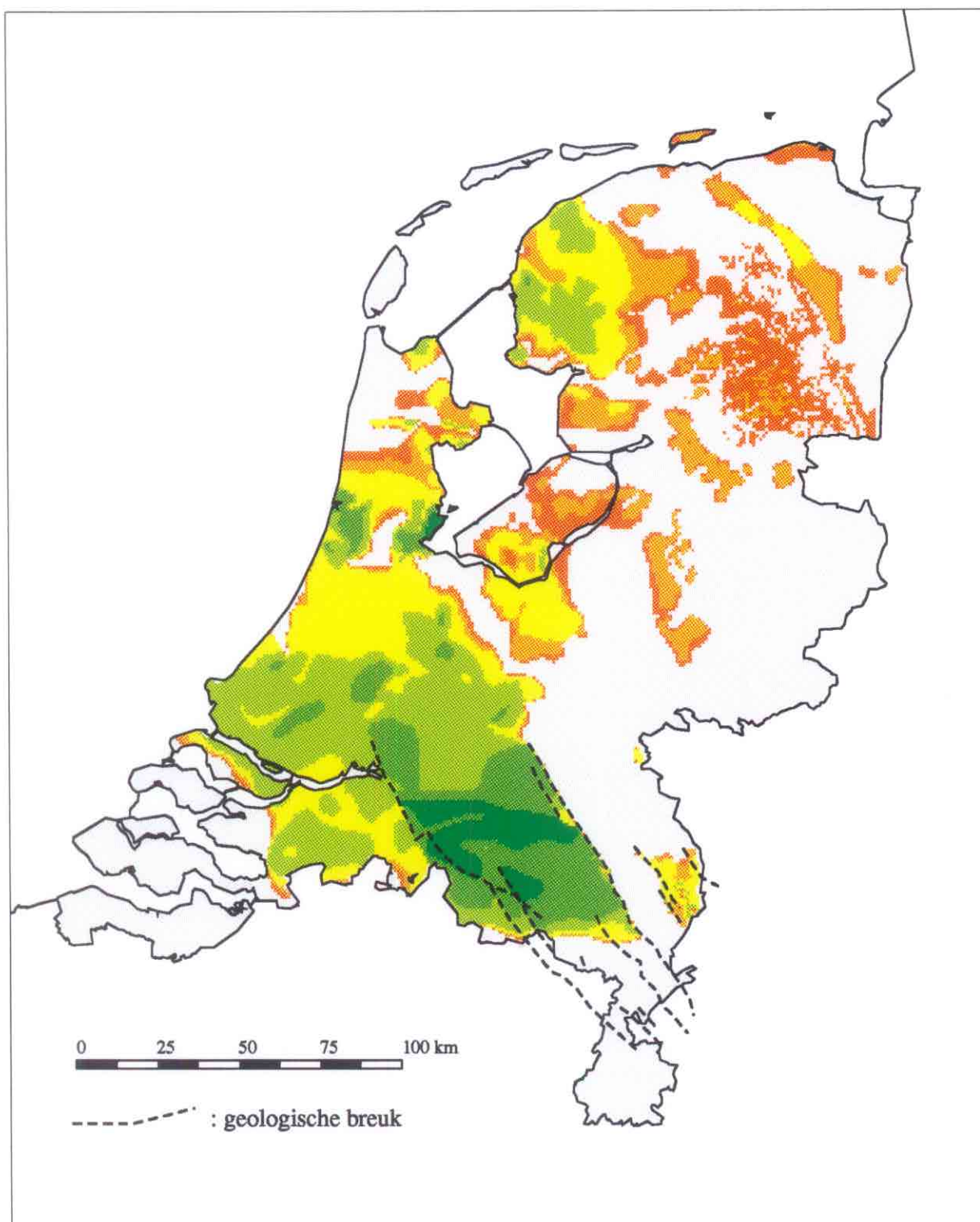
Bijlage 2.

Dikte van de afdekkende slechtdoorlatende laag



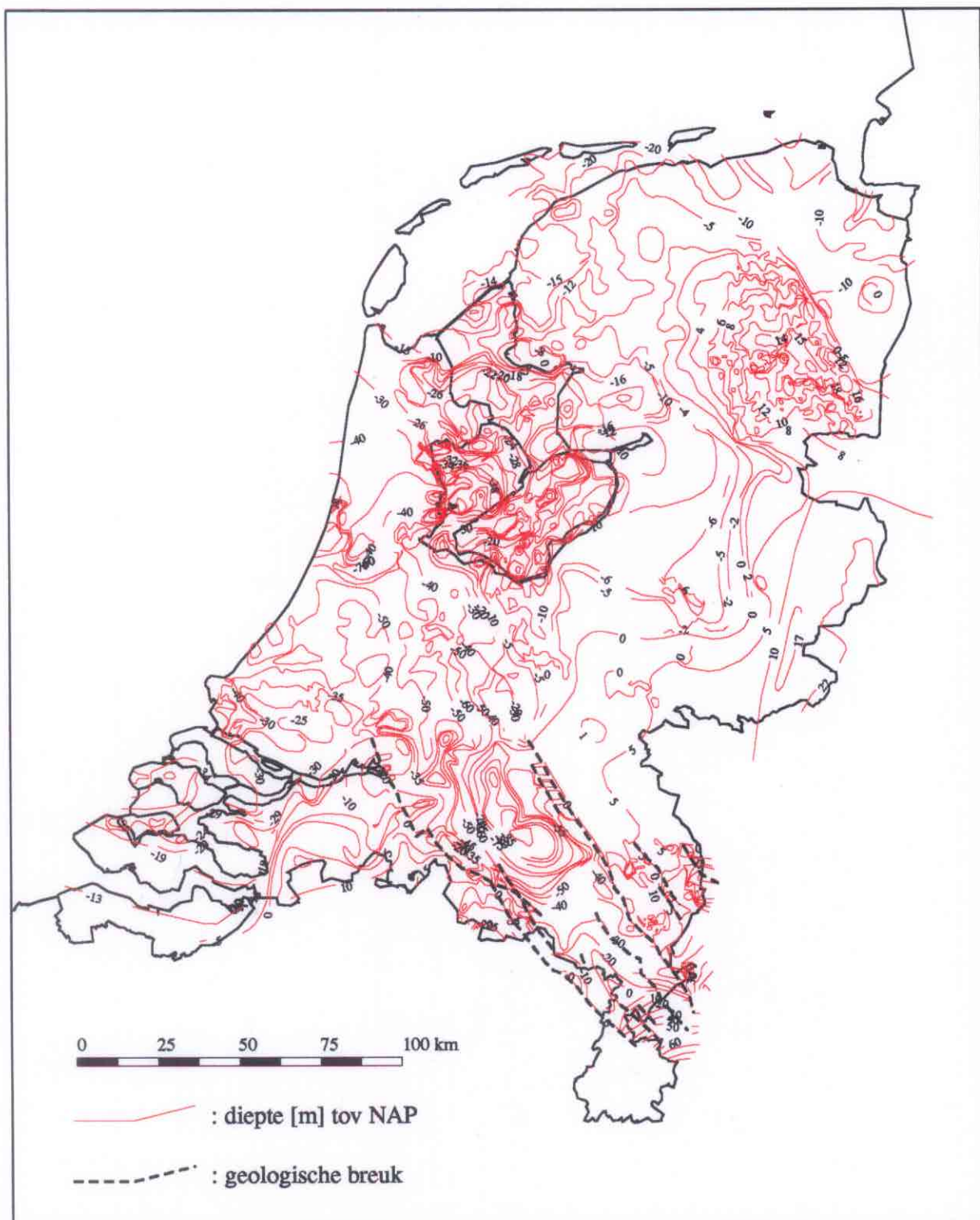
Bijlage 3.

Geologische eenheden behorende tot de eerste slechtdoorlatende laag.



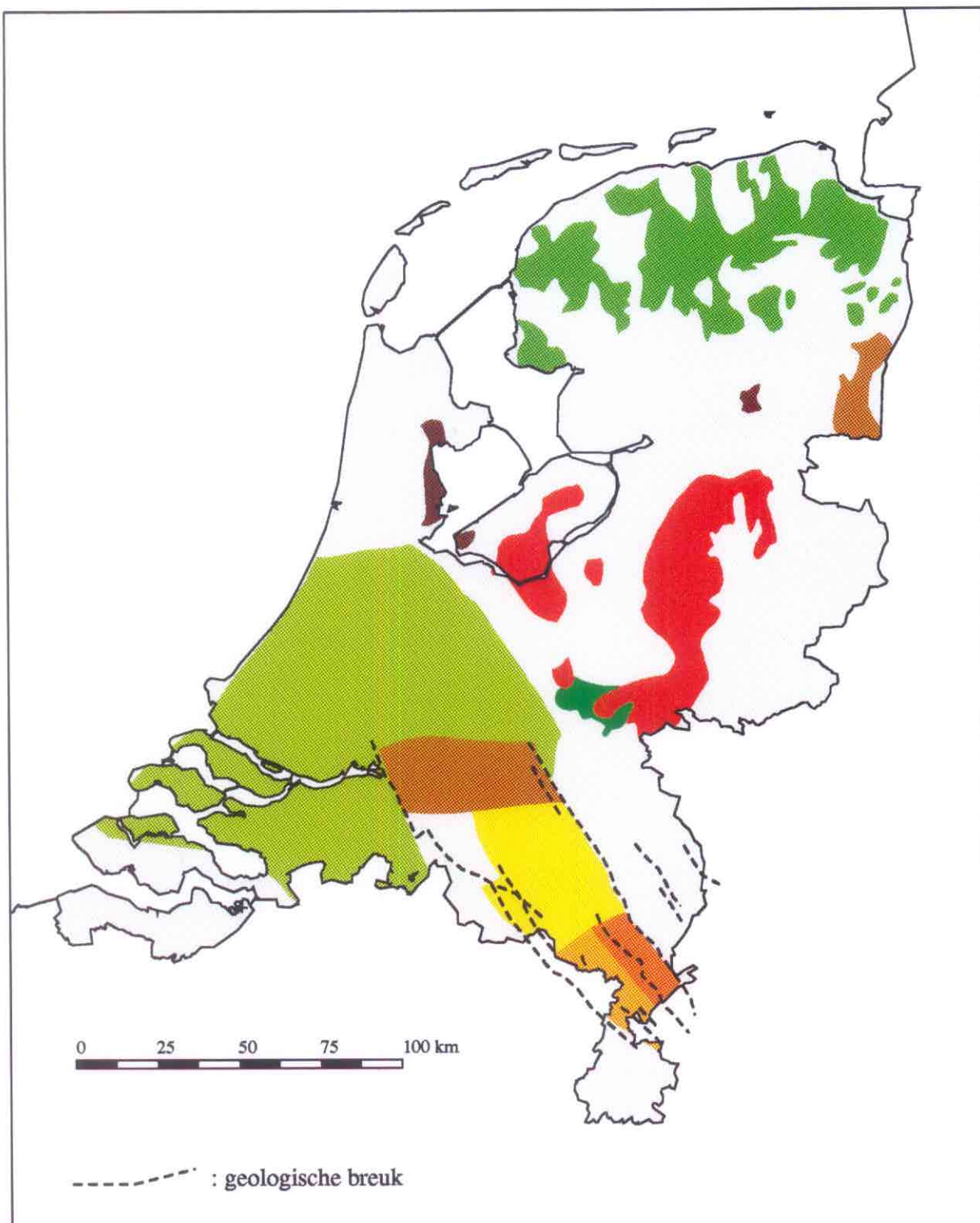
Bijlage 4.

Dikte van de eerste slechtdoorlatende laag



Bijlage 5.

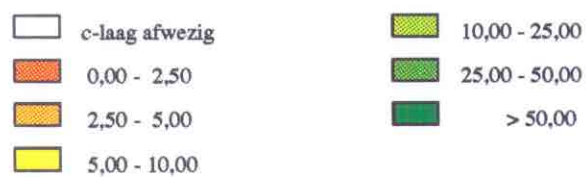
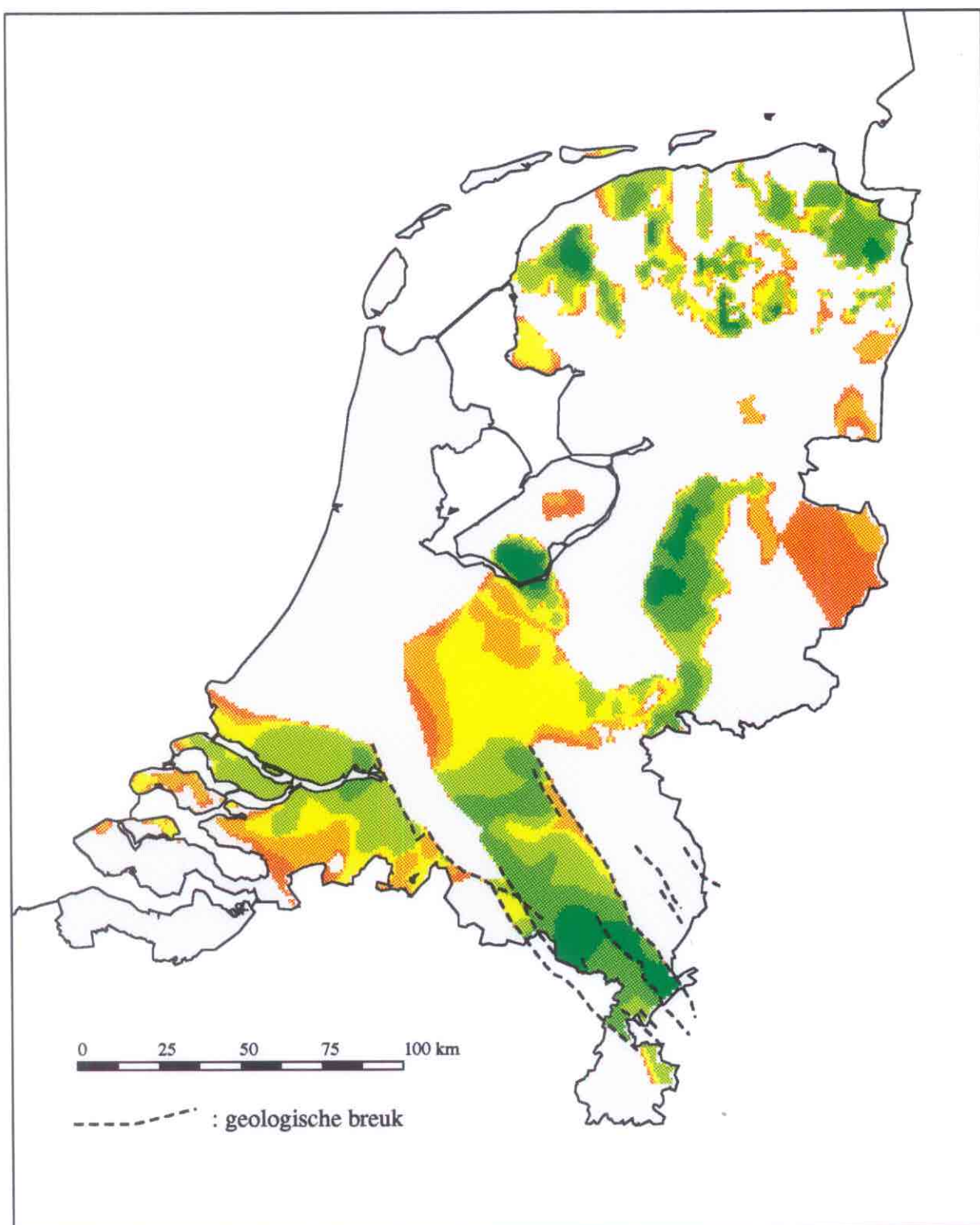
Diepte bovenkant van de eerste slechtdoorlatende laag



- | | |
|--|--|
| form. van Drente | form. van Enschede |
| Potklei | form. van Maassluis |
| form. van Urk (Cromerklei) | form. van Belfeld |
| form. van Kedichem | bovenste Brunssumklei |
| form. van Tegelen | form. van Belfeld/bovenste Brunssumklei |

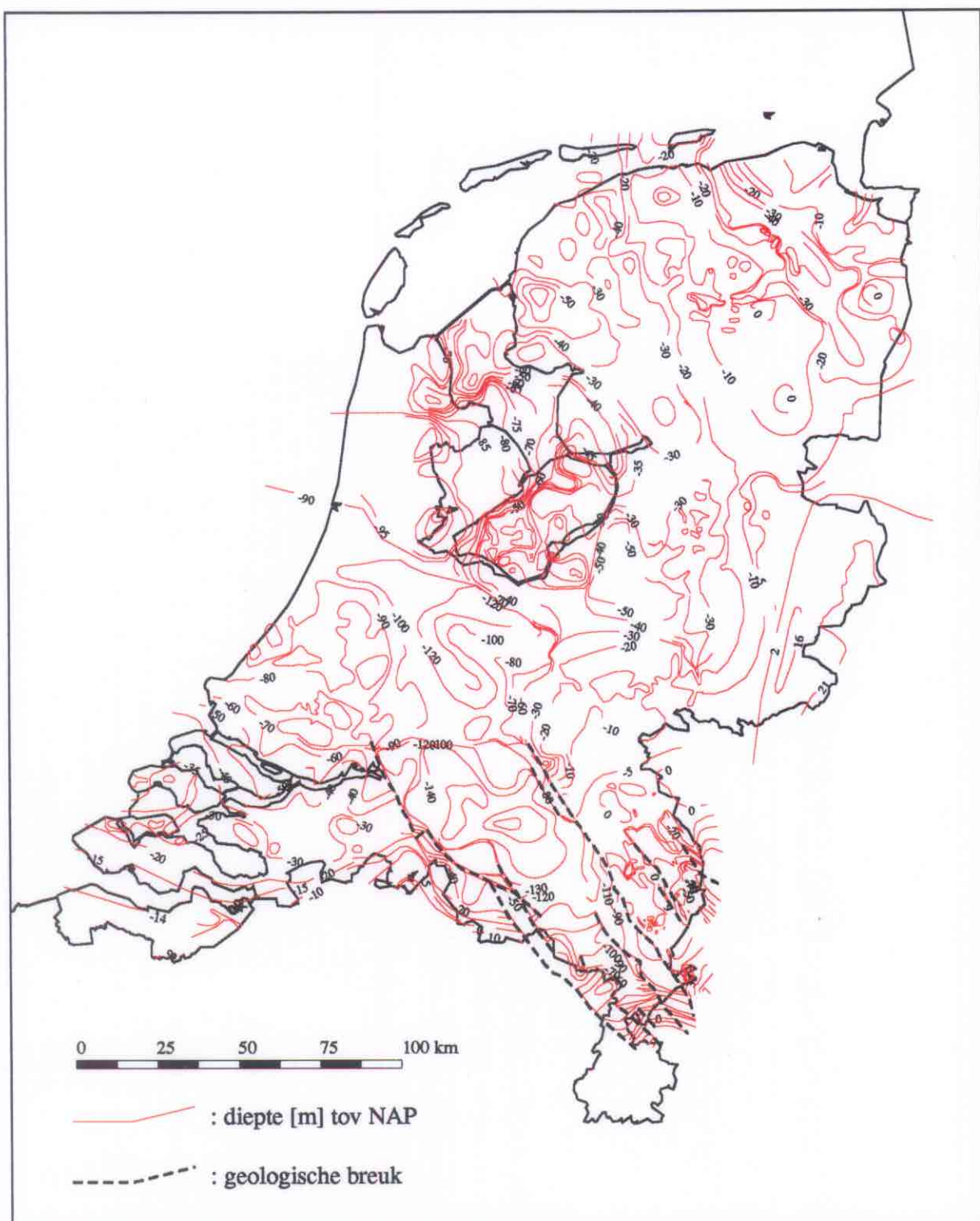
Bijlage 6.

Geologische eenheden behorende tot de tweede slechtdoorlatende laag.



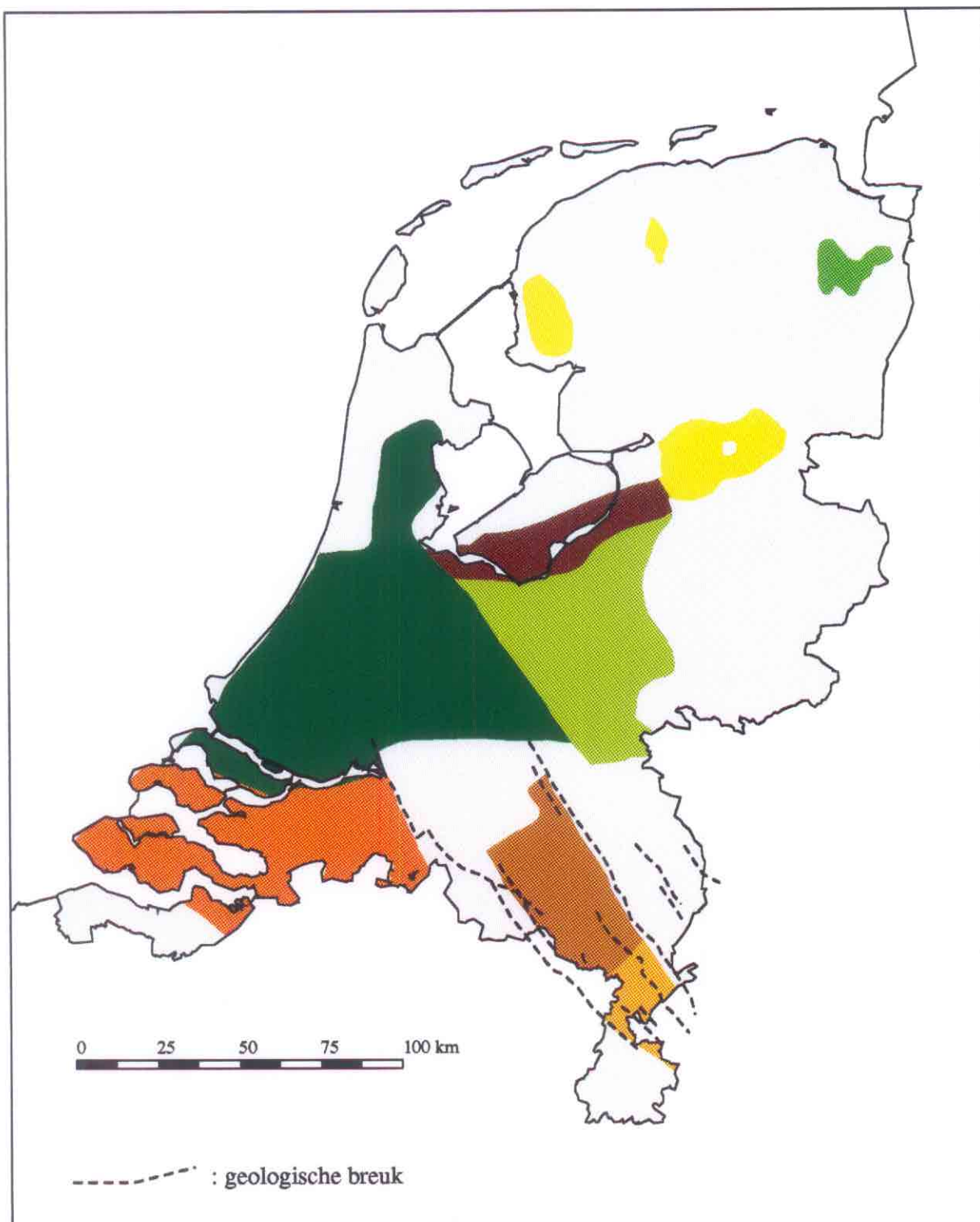
Bijlage 7.

Dikte van de tweede slechtdoorlatende laag



Bijlage 8.

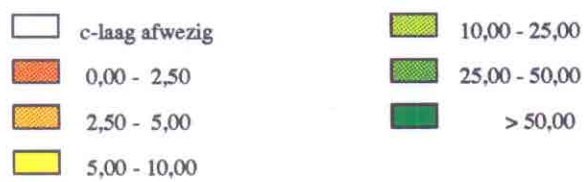
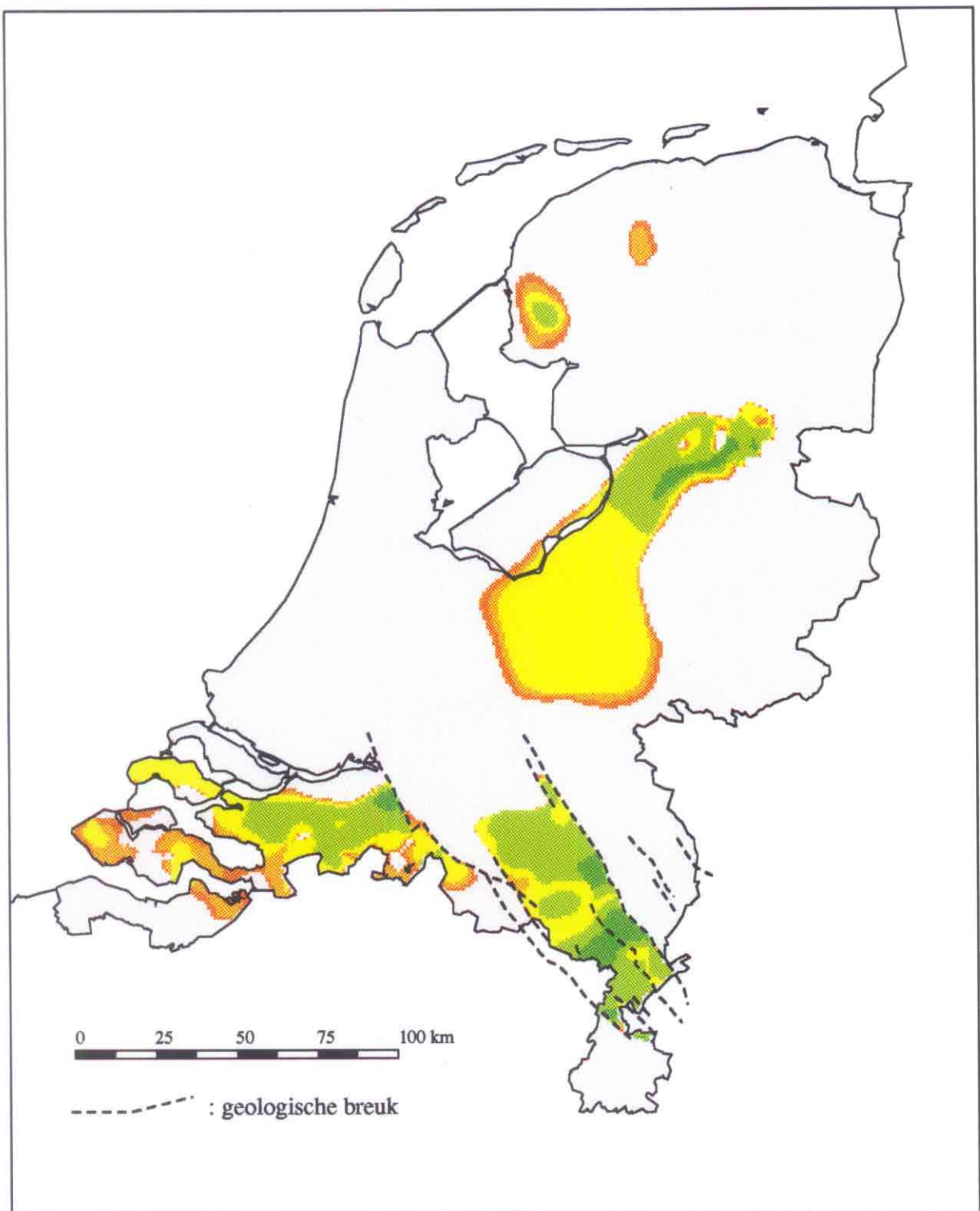
Diepte bovenkant van de tweede slechtdoorlatende laag



- | | |
|--|---|
| form. van Harderwijk | form. van Oosterhout |
| form. van Scheemda | form. van Kallo/form van Reuver |
| form. van Tegelen | onderste Brunssumklei |
| form. van Maassluis | |
| form. van Harderwijk/Tegelen/Maassluis | |

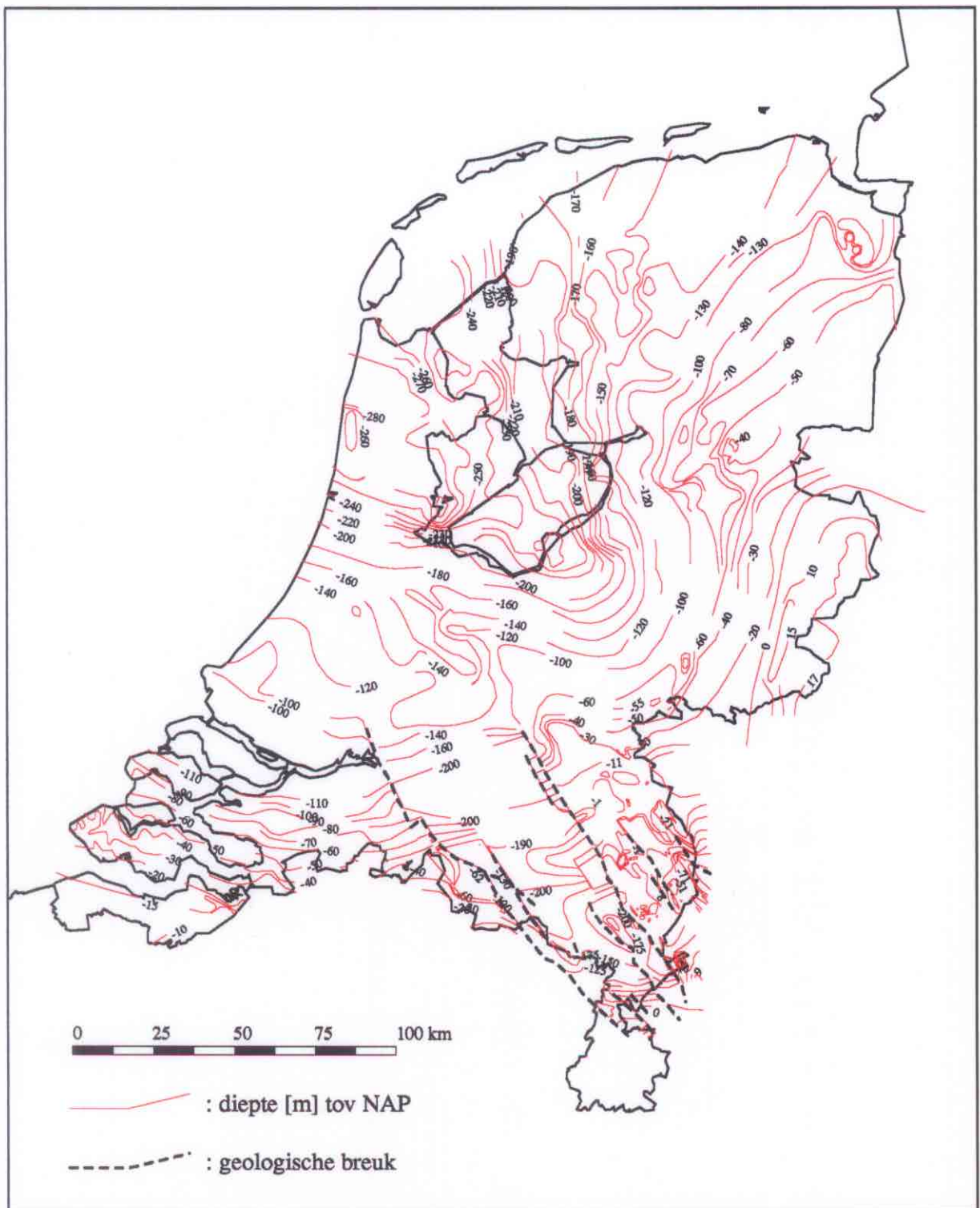
Bijlage 9.

Geologische eenheden behorende tot de derde slechtdoorlatende laag.



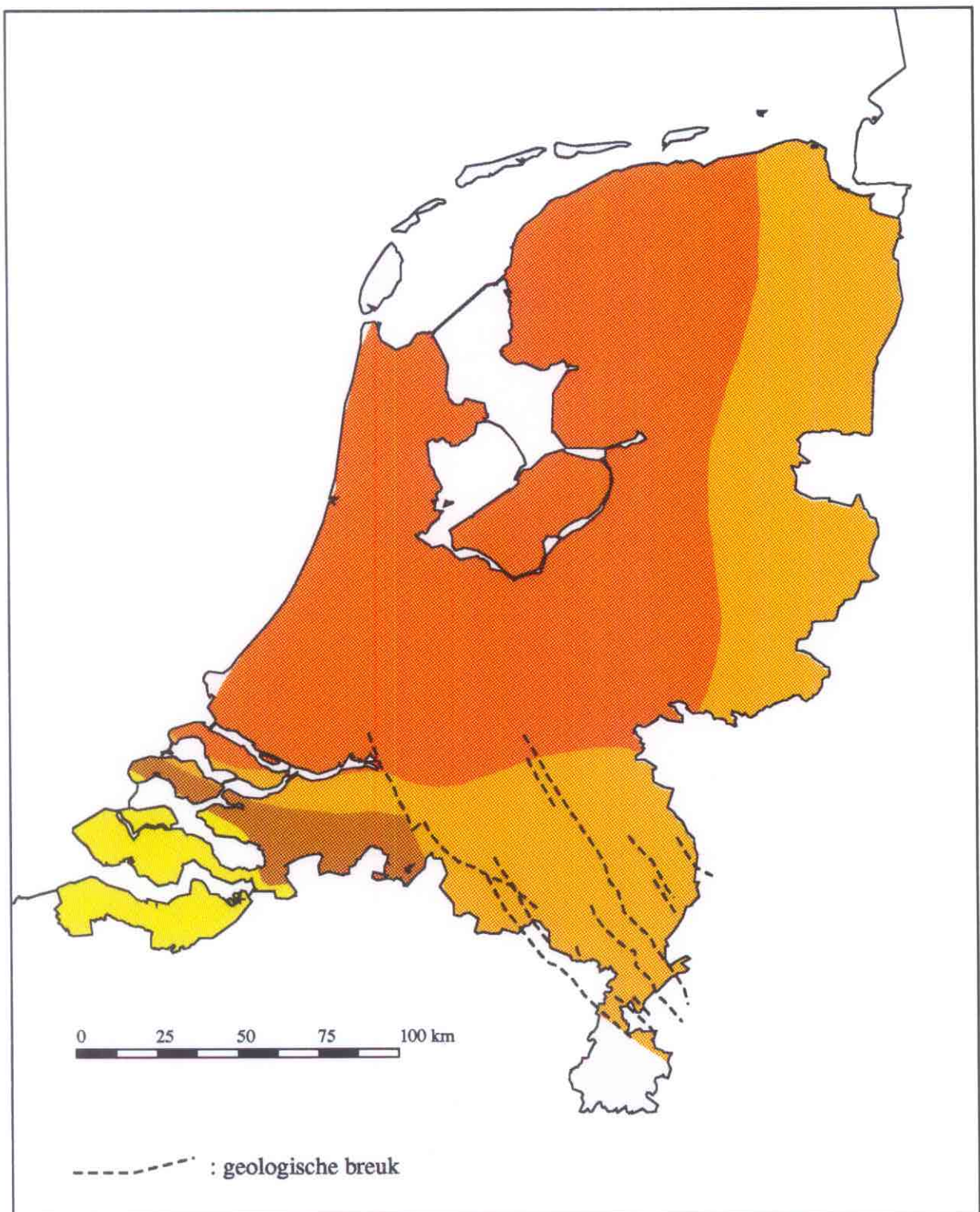
Bijlage 10.

Dikte van de derde slechtdoorlatende laag



Bijlage 11.

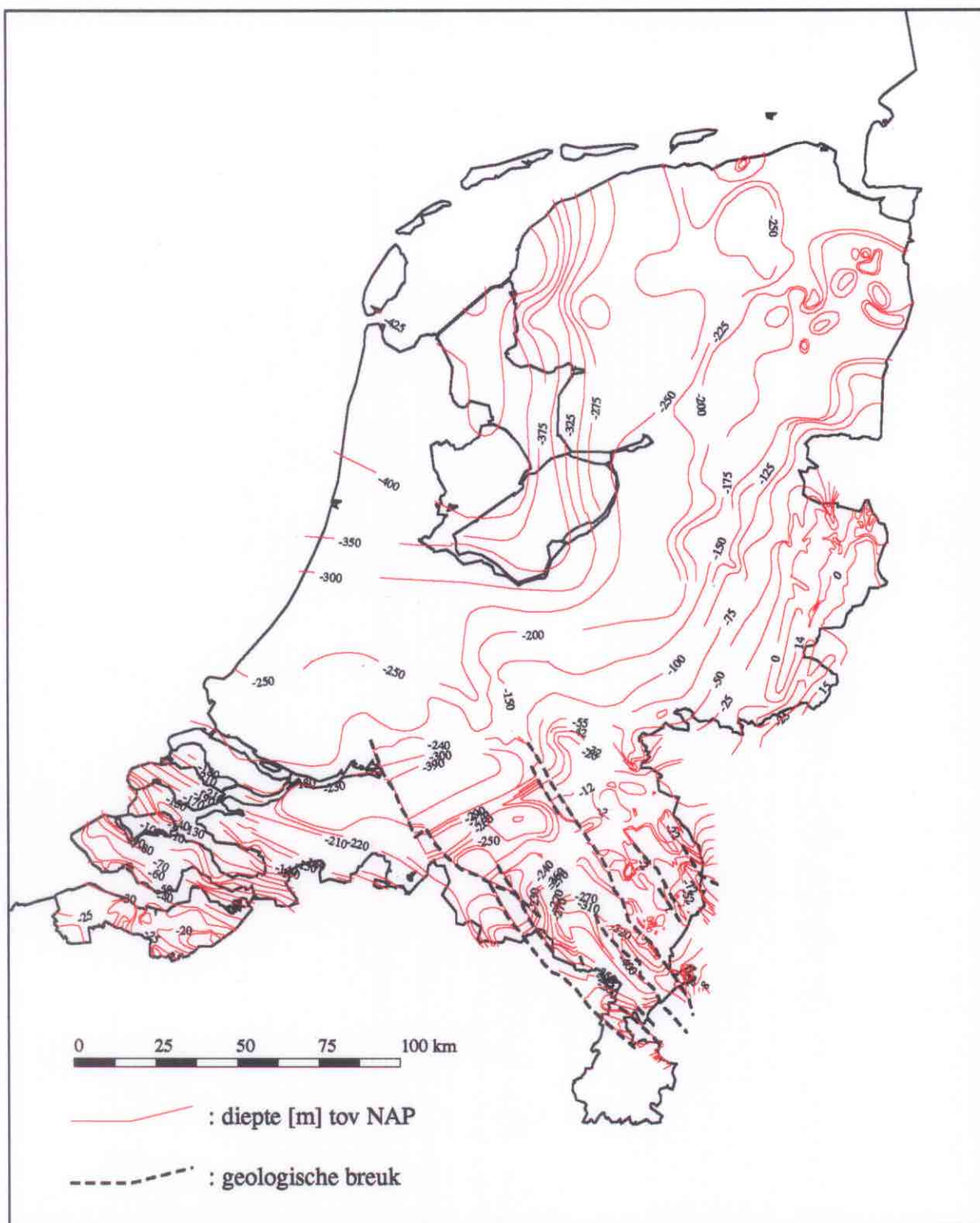
Diepte bovenkant van de derde slechtdoorlatende laag



- form. van Oosterhout
- form. van Breda
- form van Rupel
- form van Breda/form van Rupel

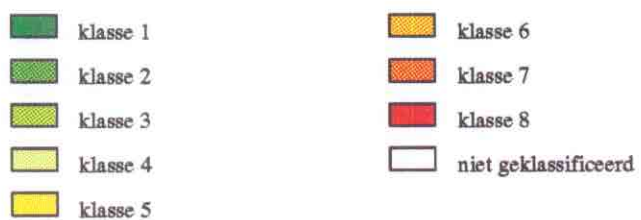
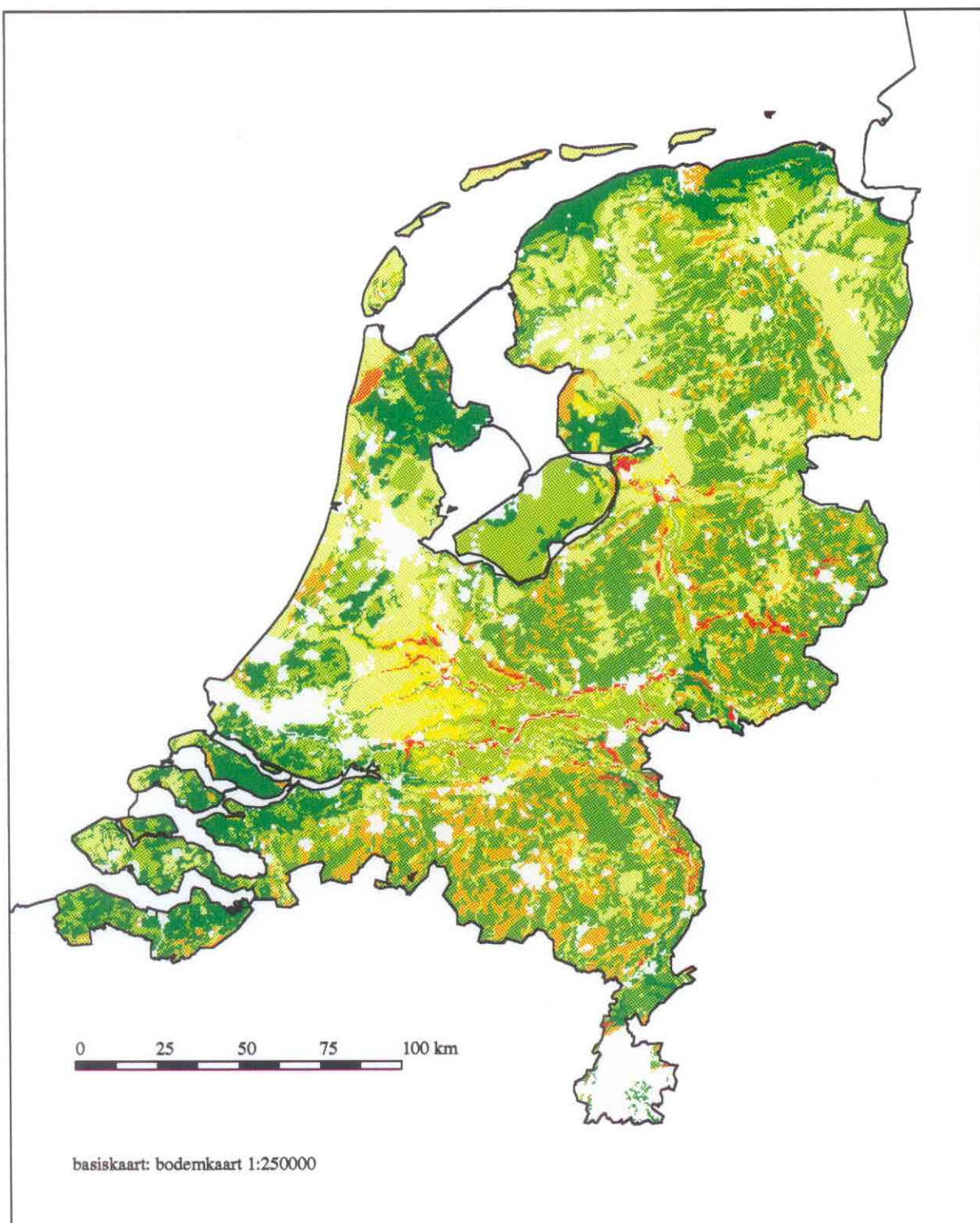
Bijlage 12.

Geologische eenheden behorende tot de geohydrologische basis



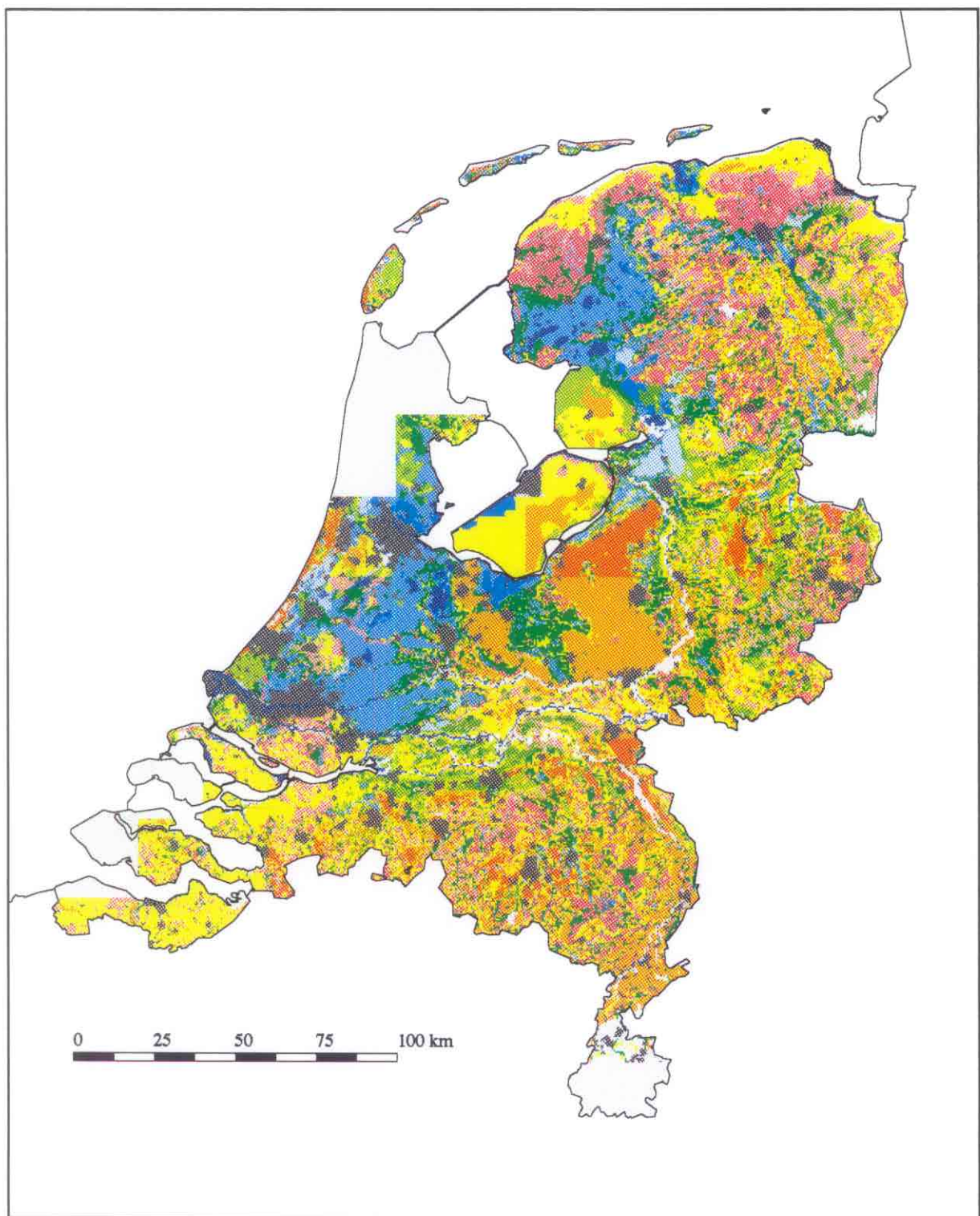
Bijlage 13.

Diepte bovenkant van de geohydrologische basis.



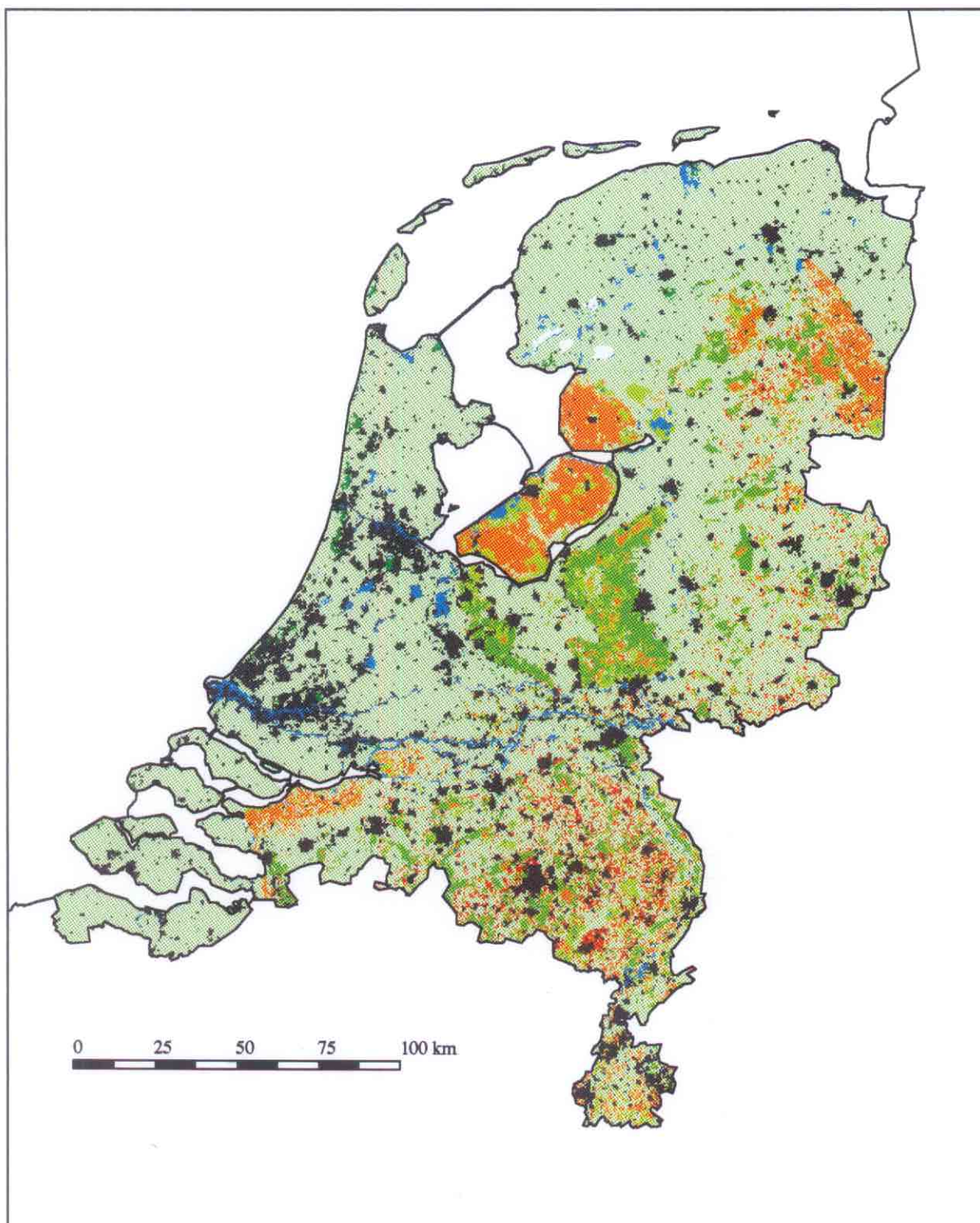
Bijlage 14.

Overzicht van de droogtegevoeligheidsklassen.



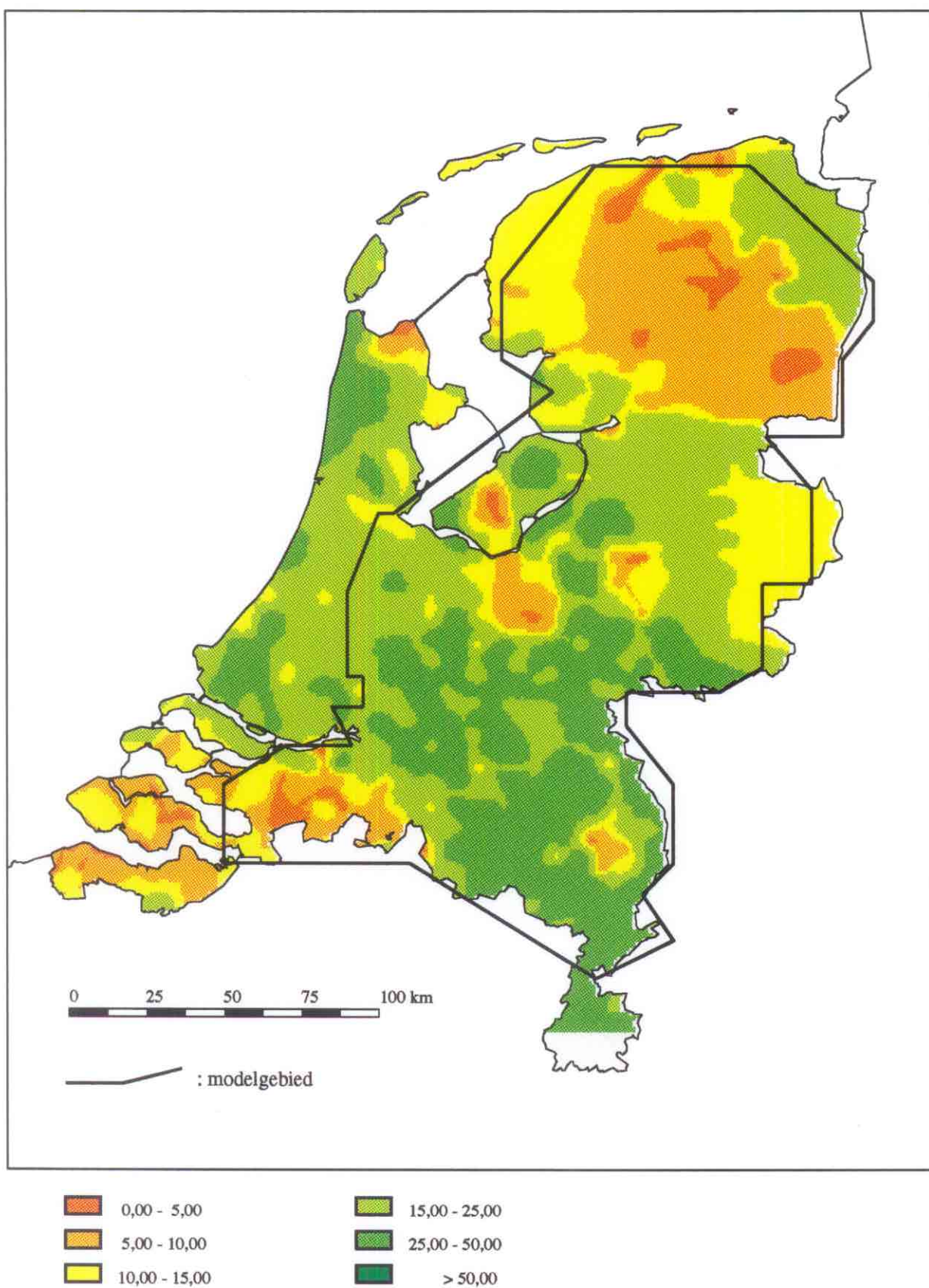
 gt 1	 gt 4	 gt 7*
 gt 2	 gt 5	 open water.
 gt 2*	 gt 5*	 stedelijke bebouwing.
 gt 3	 gt 6	 afgegraven, opgehoogd, etc.
 gt 3*	 gt 7	 onbekend (uiterwaard, zee, buitenland, etc).

Bijlage 15.
Grondwatertrappenkaart.



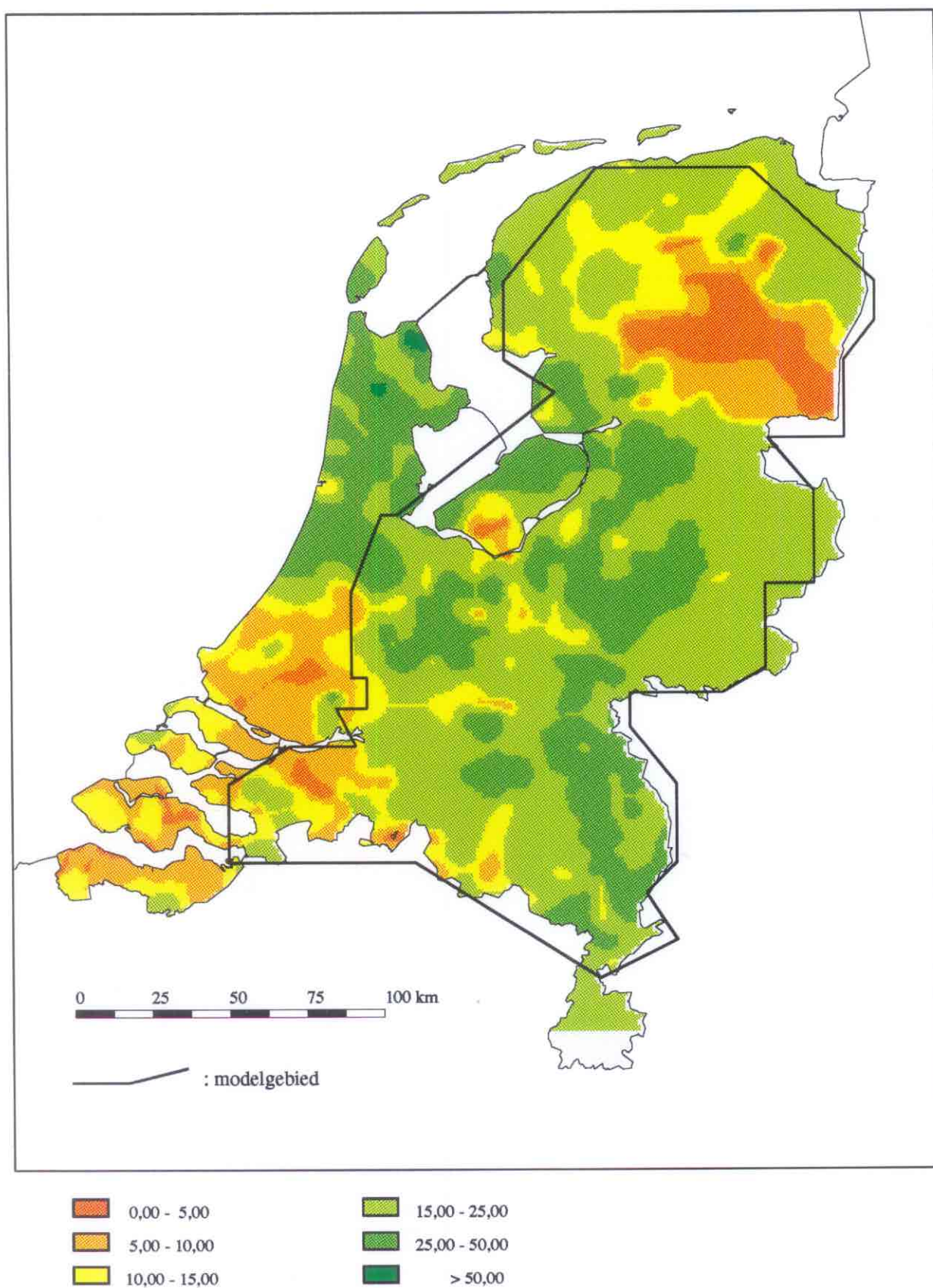
- | | |
|---|--|
|  gras |  bos |
|  mais |  loofbos |
|  bouwland |  naaldbos |
|  oppervlakte water |  stedelijk gebied |

Bijlage 16.
Overzicht van het bodemgebruik in 1988



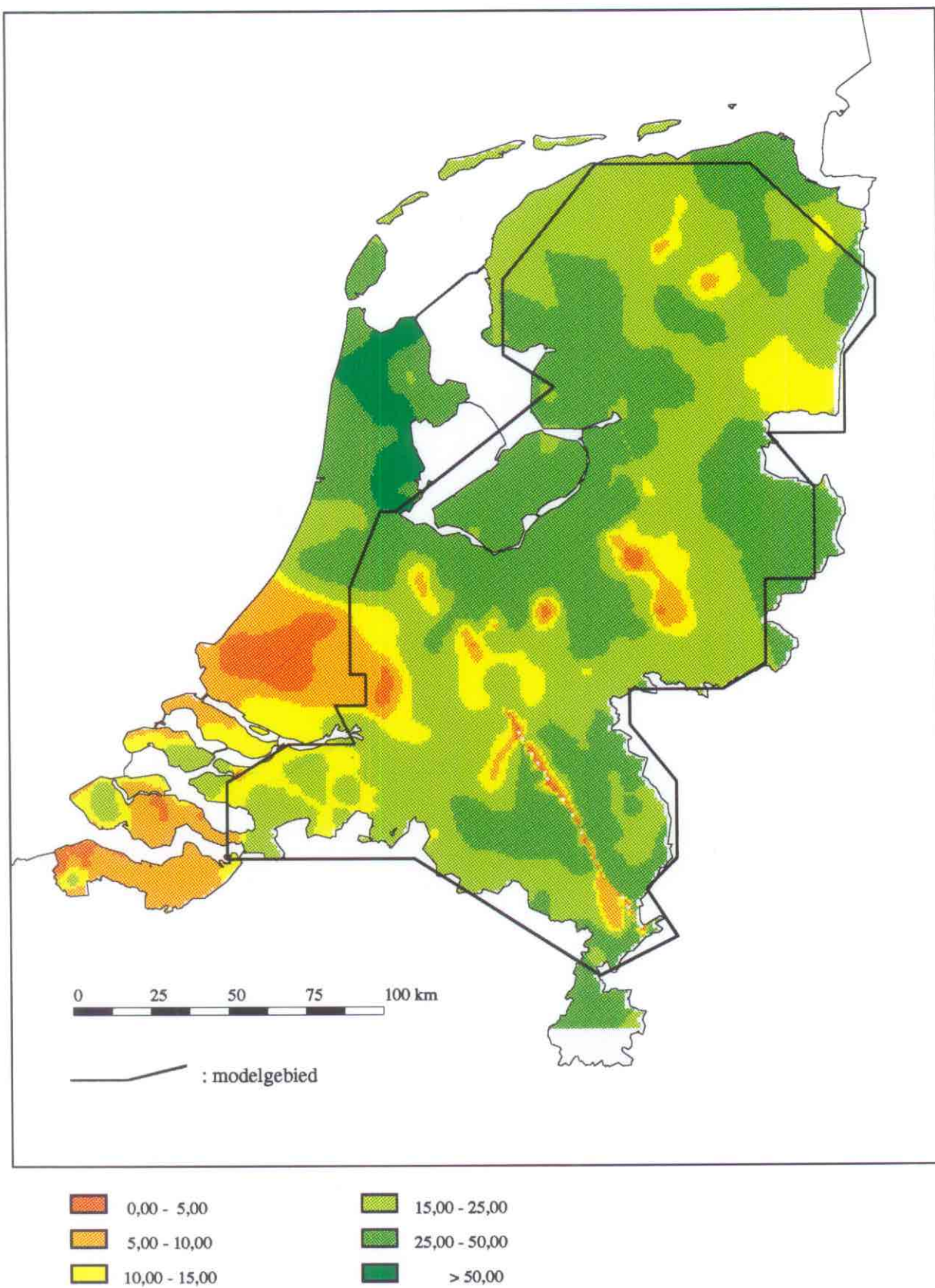
Bijlage 17.

Waarden van de doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket [m/dag].



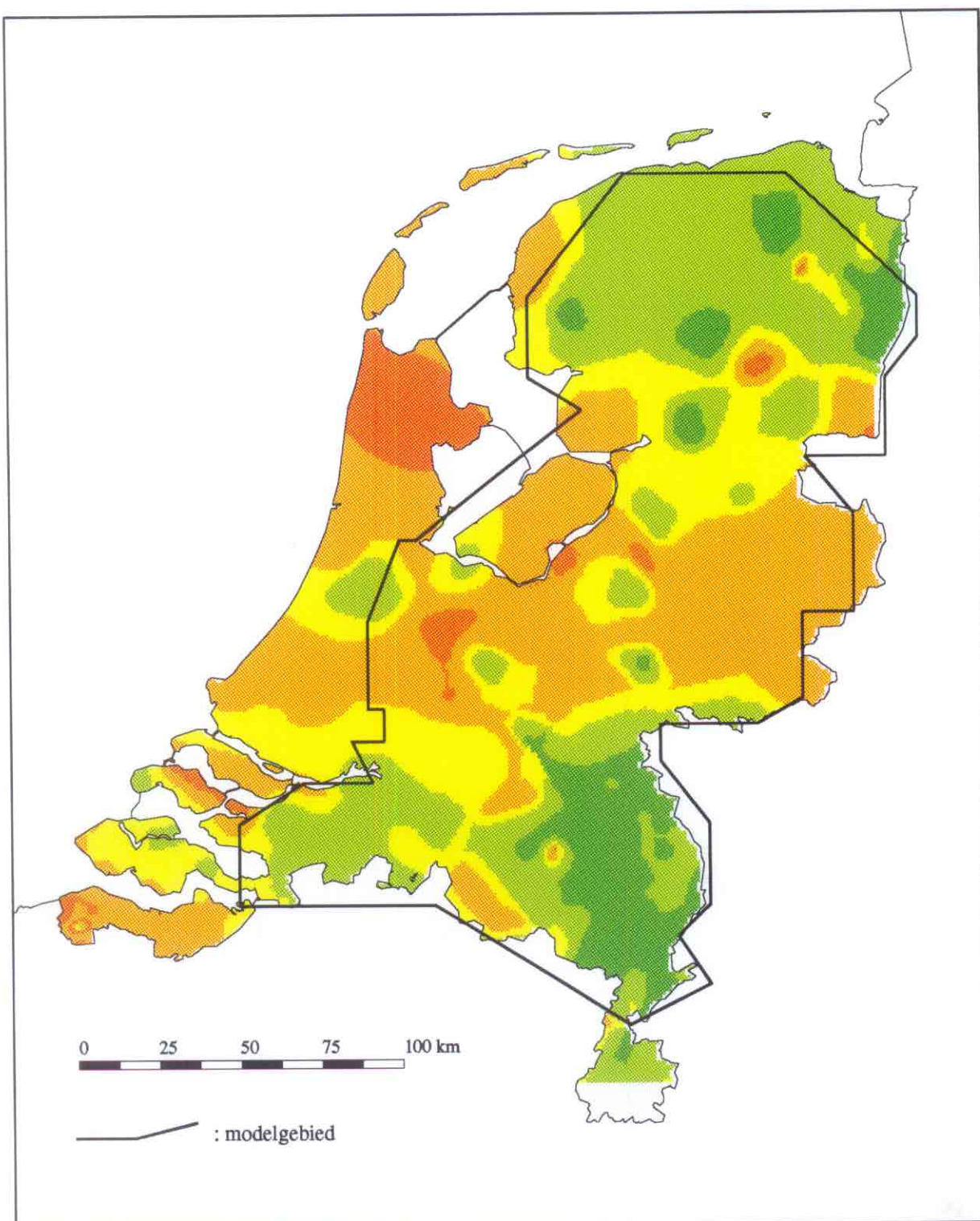
Bijlage 18.

Waarden van de doorlatendheid van het tweede watervoerende pakket [m/dag].



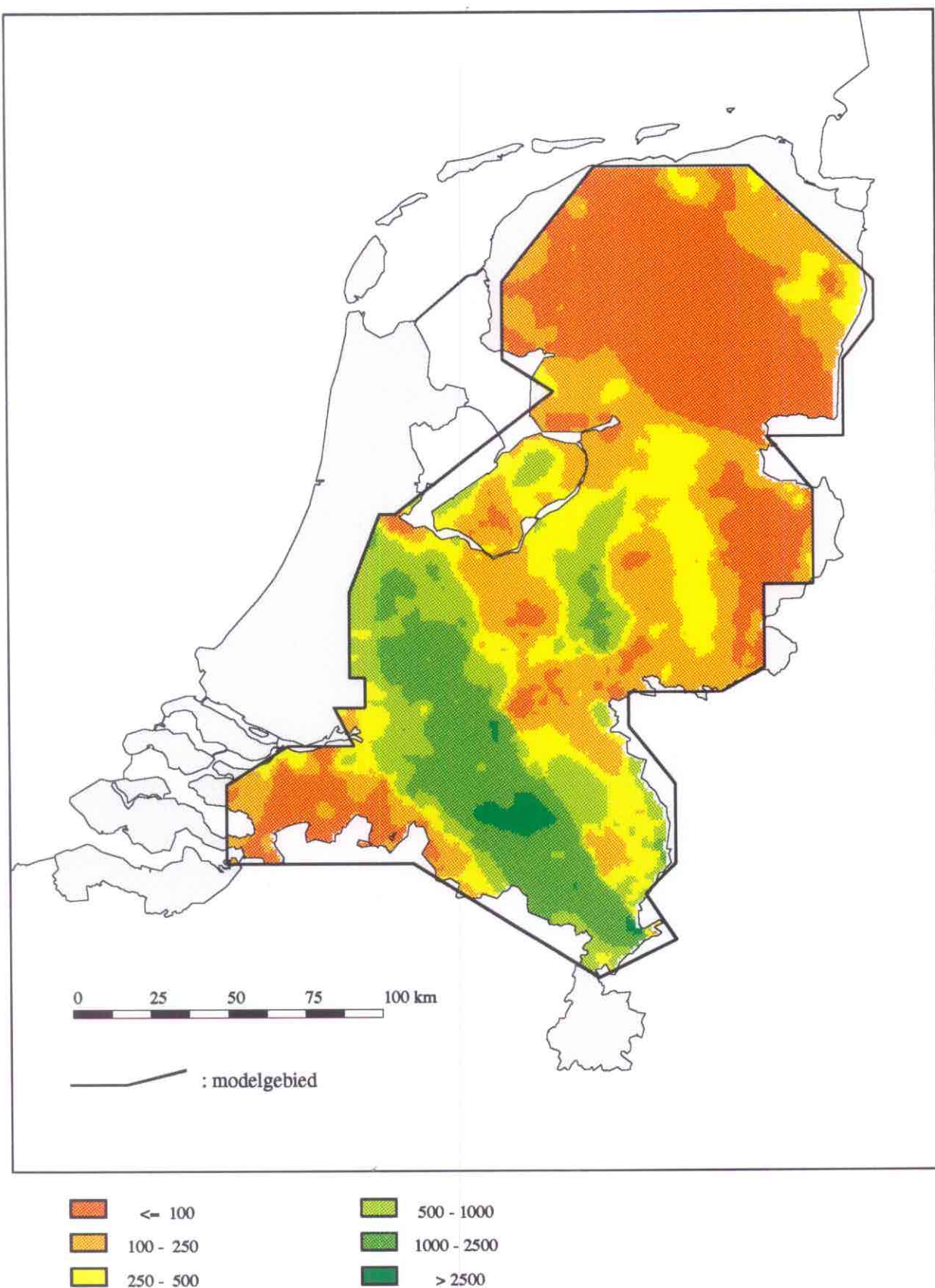
Bijlage 19.

Waarden van de doorlatendheid van het derde watervoerende pakket [m/dag].



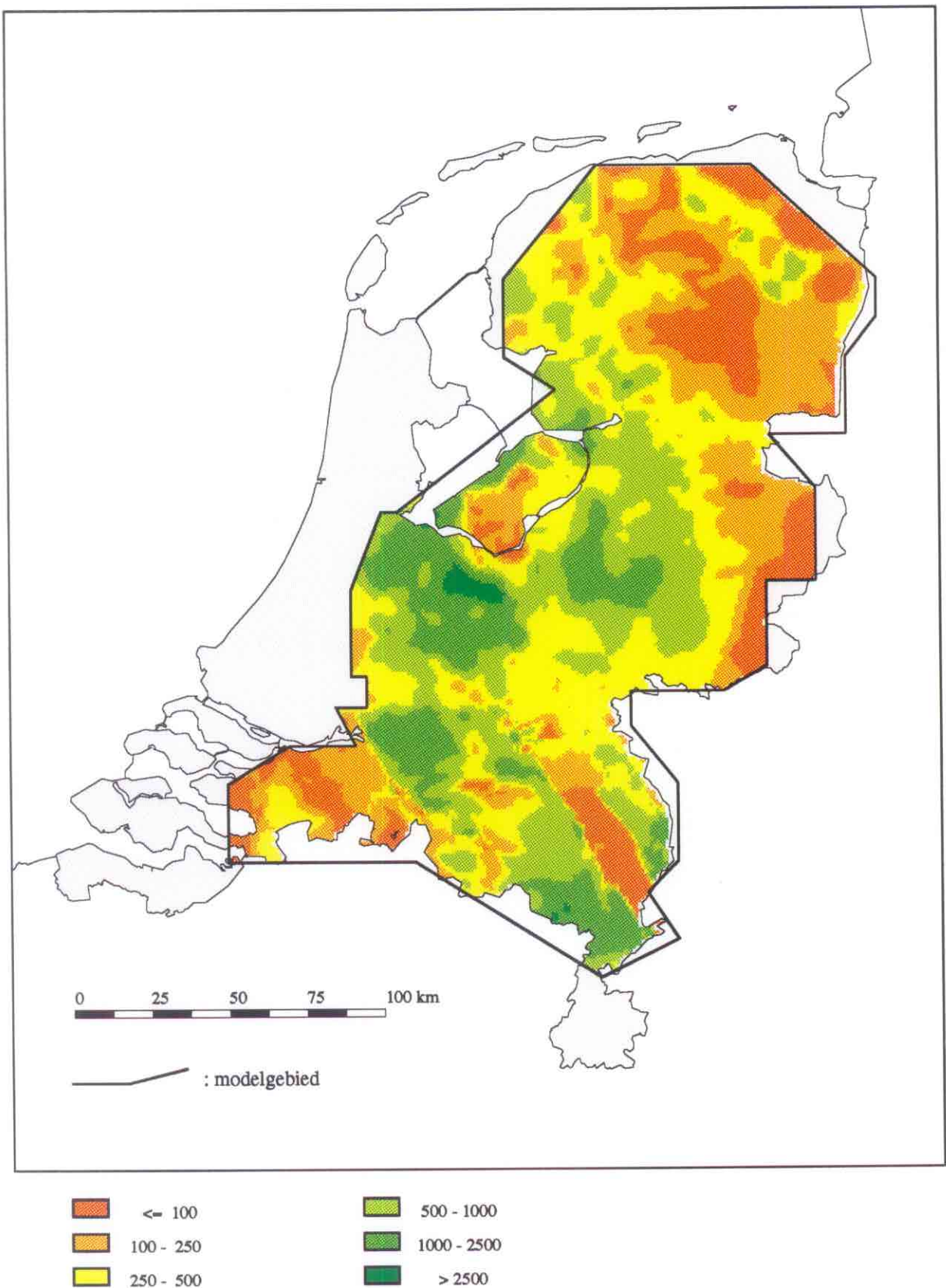
Bijlage 20.

Waarden van de doorlatendheid van het vierde watervoerende pakket [m/dag].



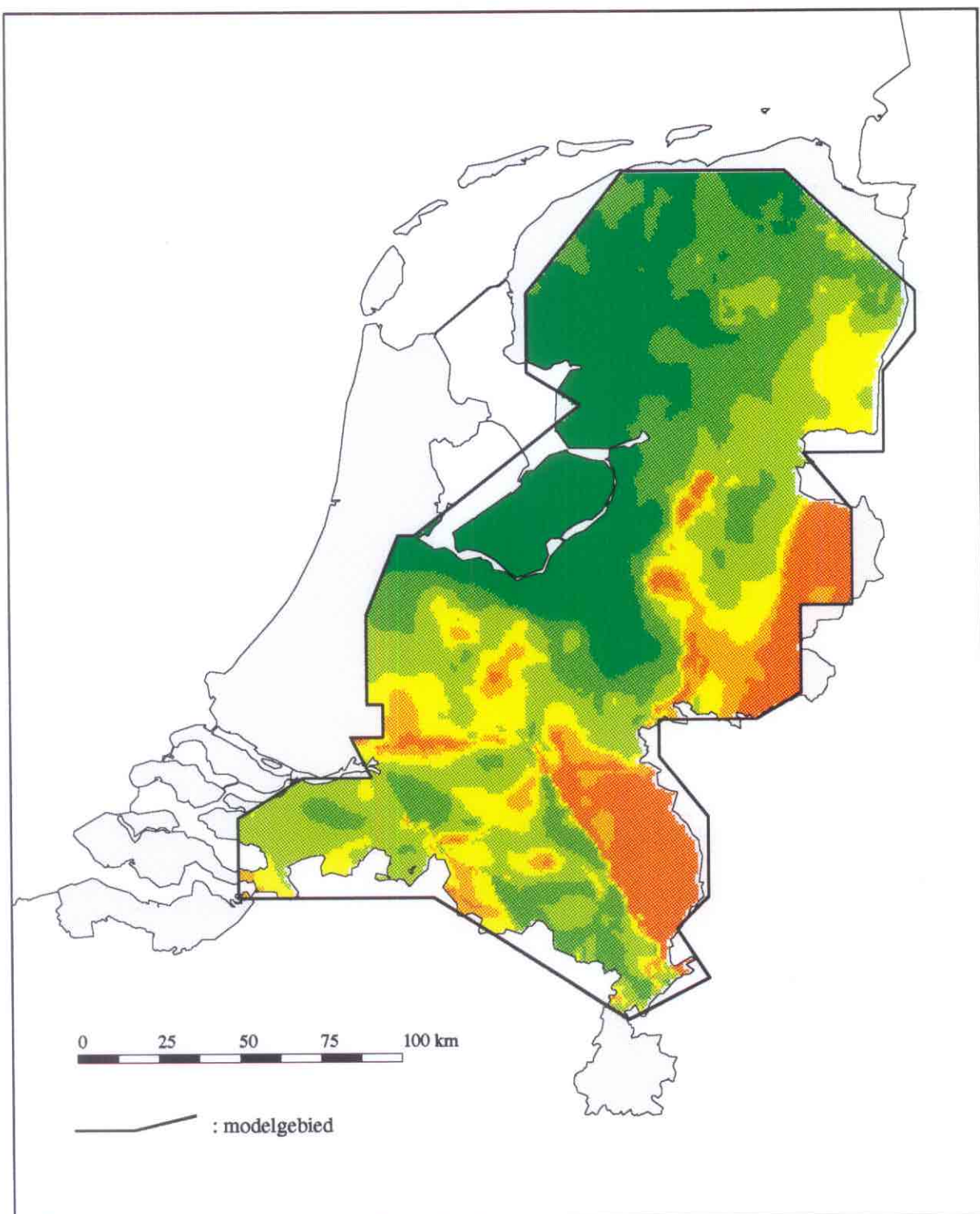
Bijlage 21.

Overzicht doorlaatvermogen (kD-waarde) van het eerste watervoerende pakket.



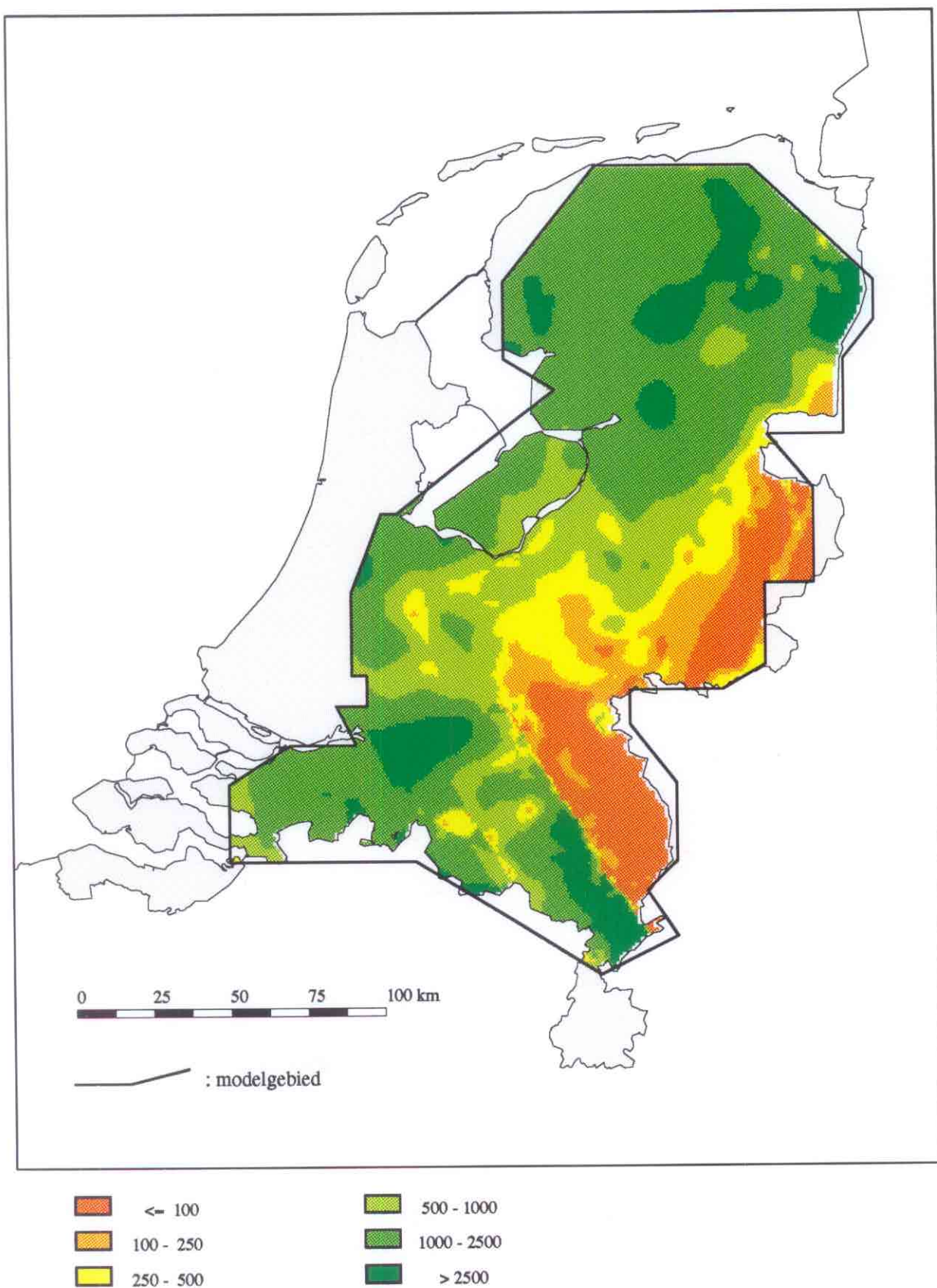
Bijlage 22.

Overzicht doorlaatvermogen (kD-waarde) van het tweede watervoerende pakket.



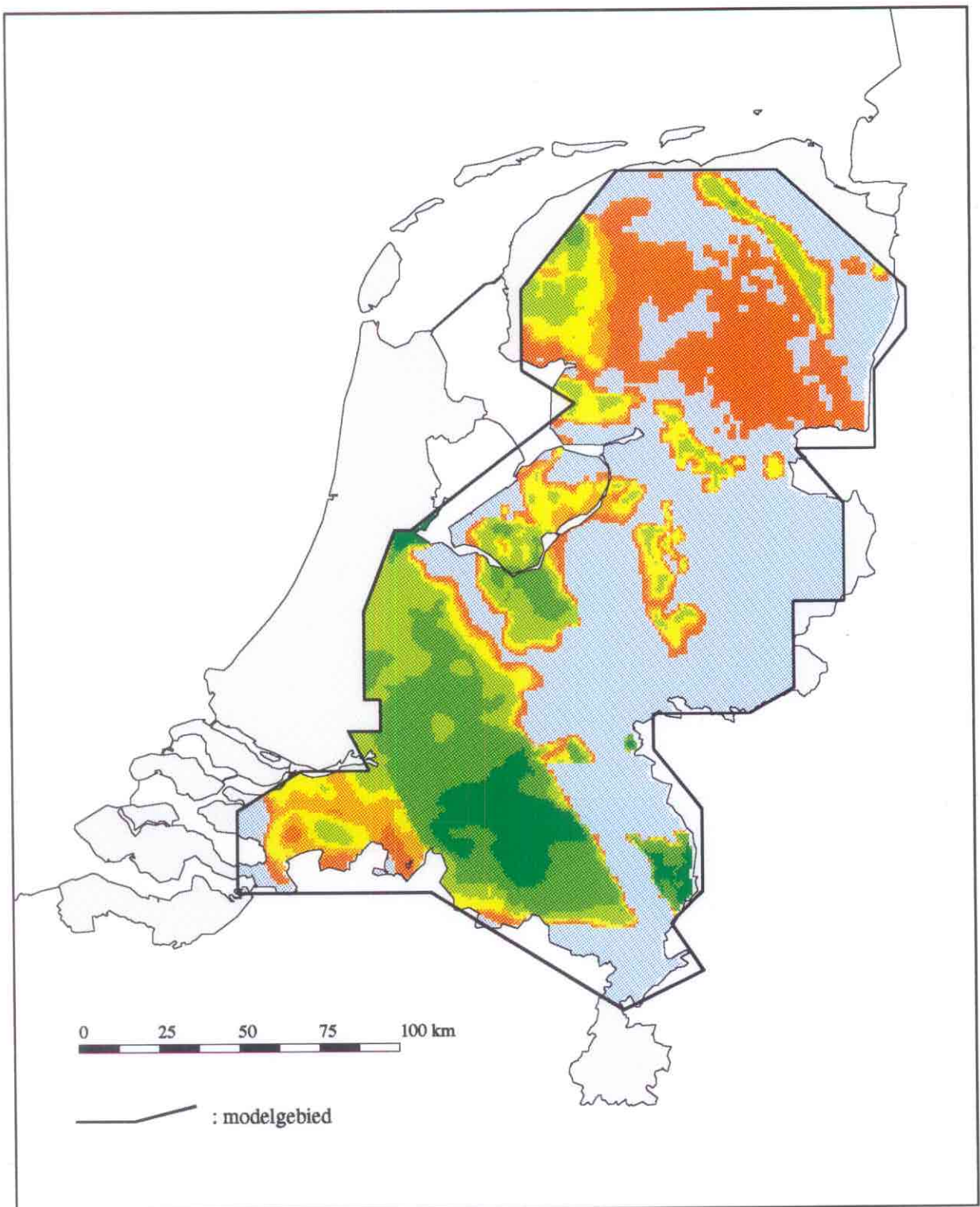
Bijlage 23.

Overzicht doorlaatvermogen (kD-waarde) van het derde watervoerende pakket.



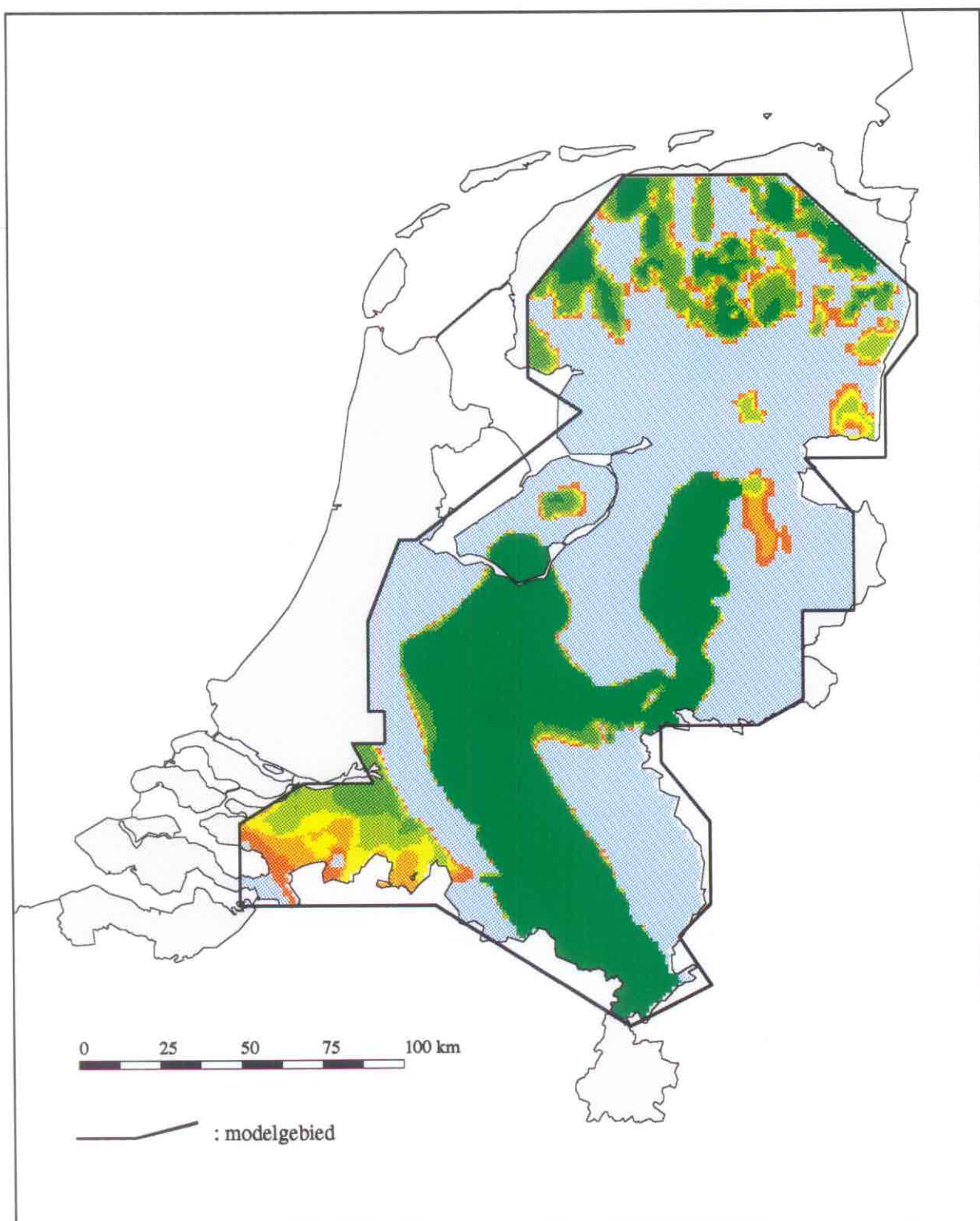
Bijlage 24.

Overzicht doorlaatvermogen (kD-waarde) van het vierde watervoerende pakket.



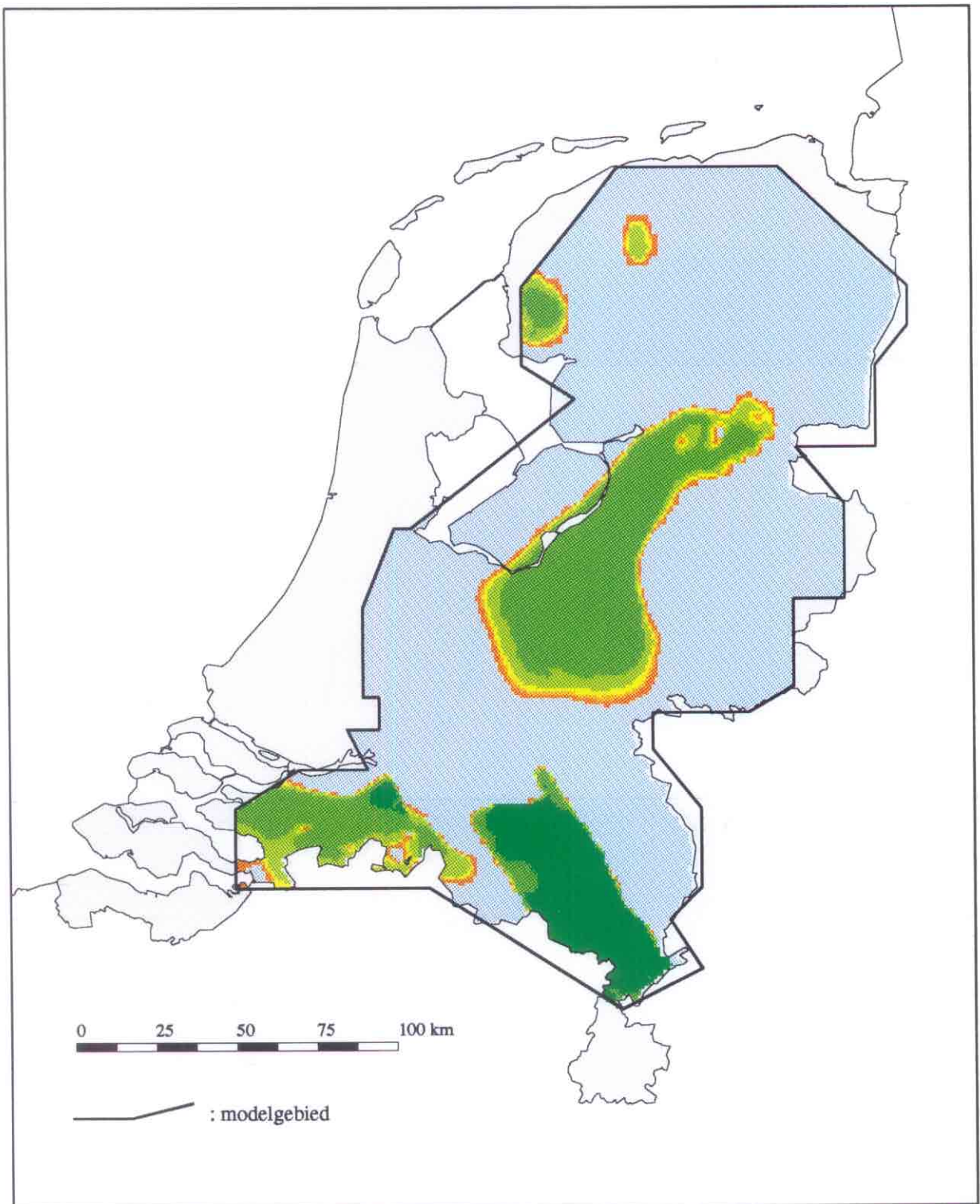
Bijlage 25.

Waarden van de verticale weerstand van de eerste slechtdoorlatende laag.



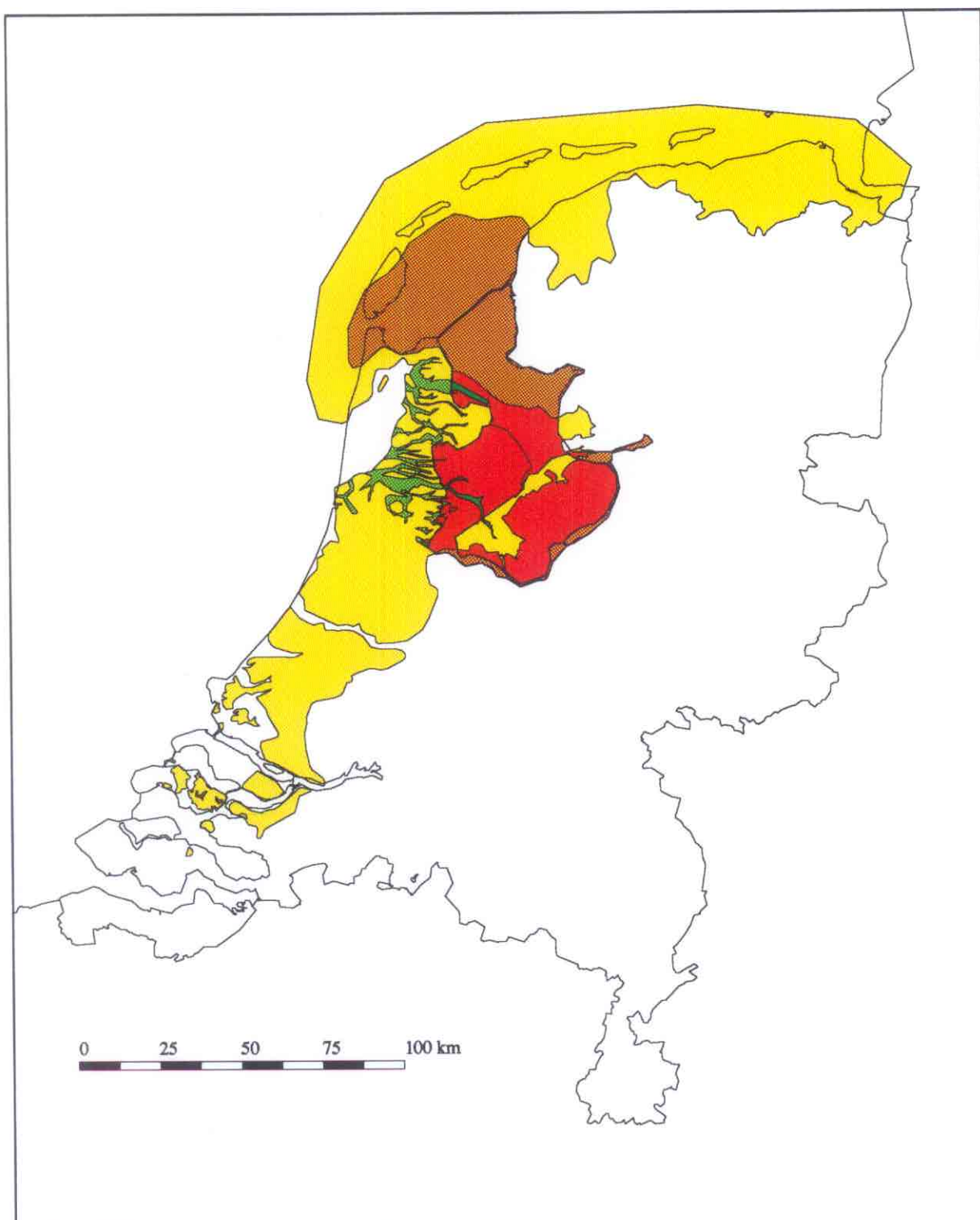
Bijlage 26.

Waarden van de verticale weerstand van de tweede slechtdoorlatende laag.



Bijlage 27.

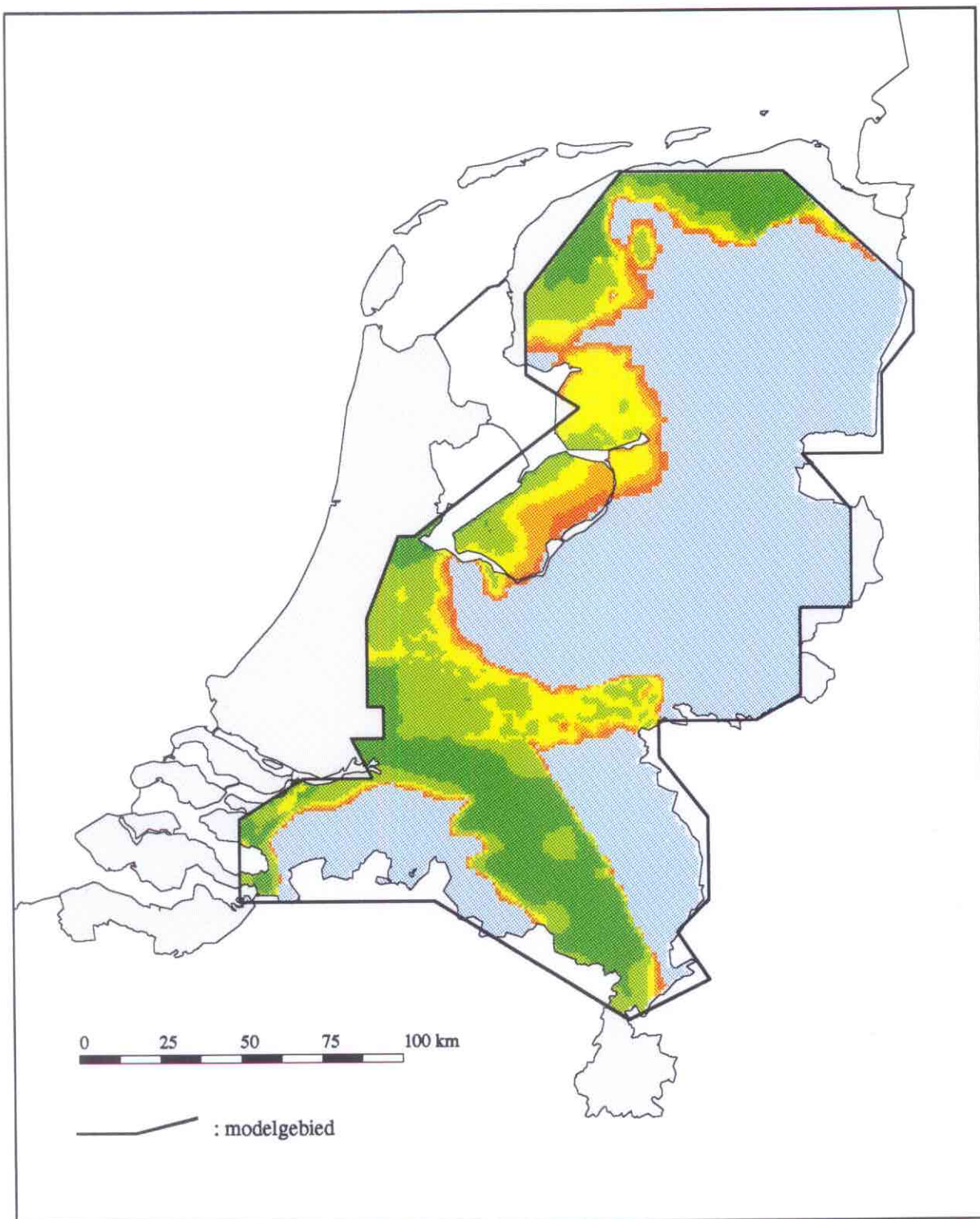
Waarden van de verticale weerstand van de derde slechtdoorlatende laag.



- | | |
|--|--|
|  $c = 300 * d$ |  $c = 2500$ |
|  $c = 22000 + 1100 * d$ |  $c = 1100 * d$ |
|  $c = 9000$ | $d = \text{dikte afdekkende laag [m]}$ |
|  $c = 3000 + 150 * d$ | $c = \text{weerstand afdekkende laag [dagen]}$ |

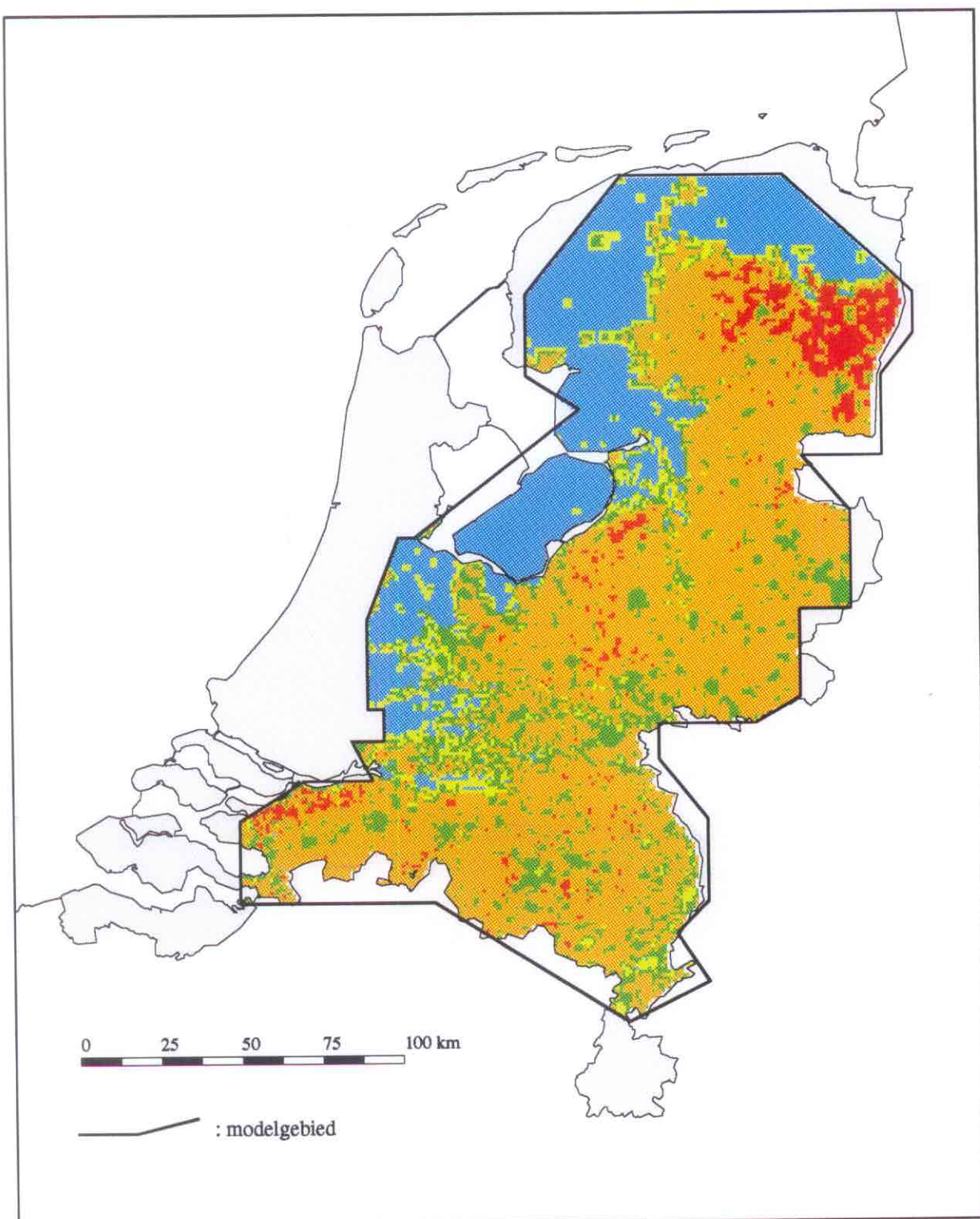
Bijlage 28.

Verbreiding van het basisveen binnen de afdekkende laag,
verdeeld in eenheden voor de berekening van de weerstand.



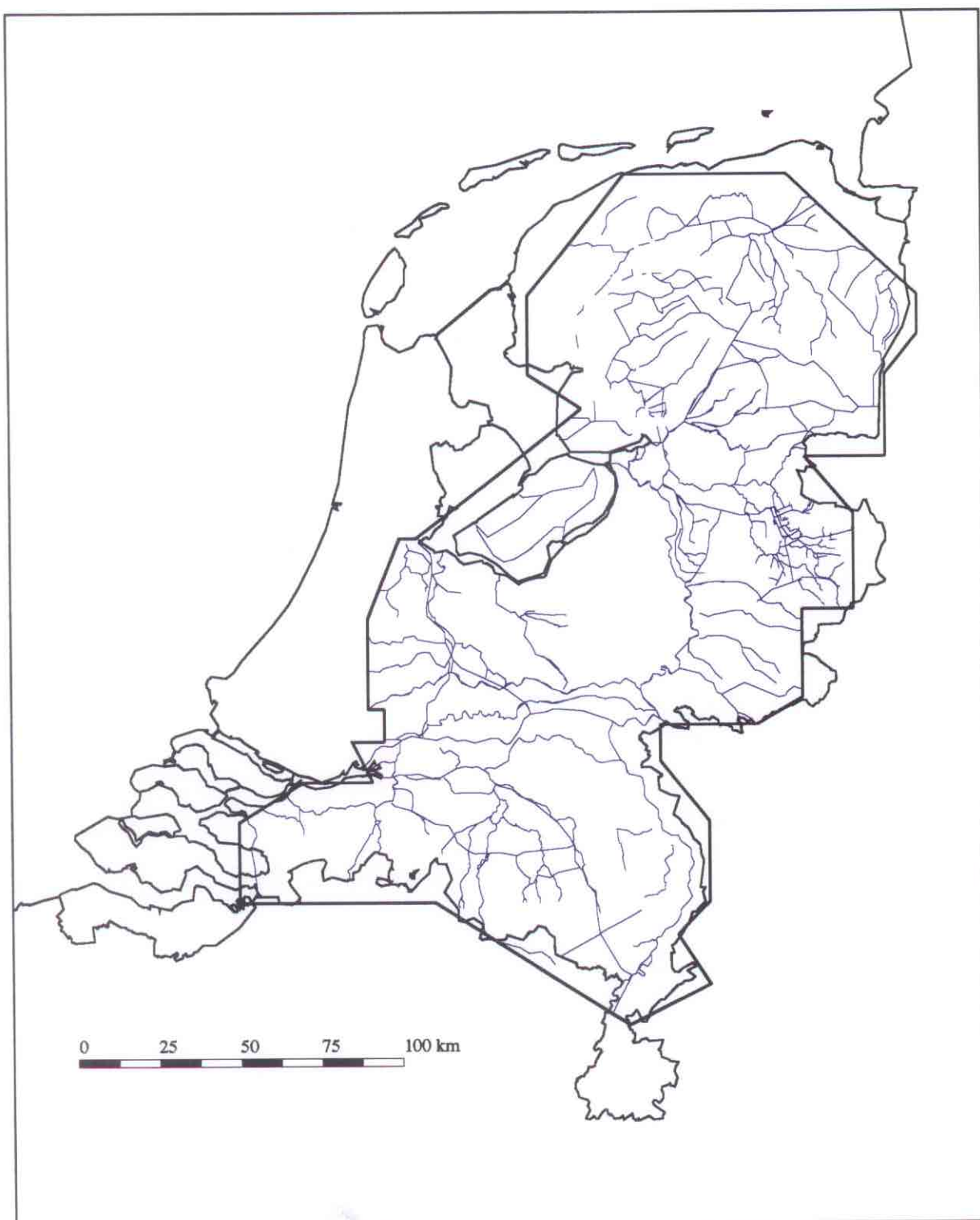
Bijlage 29.

Waarden van de verticale weerstand van de slechtdoorlatende afdekkende laag.



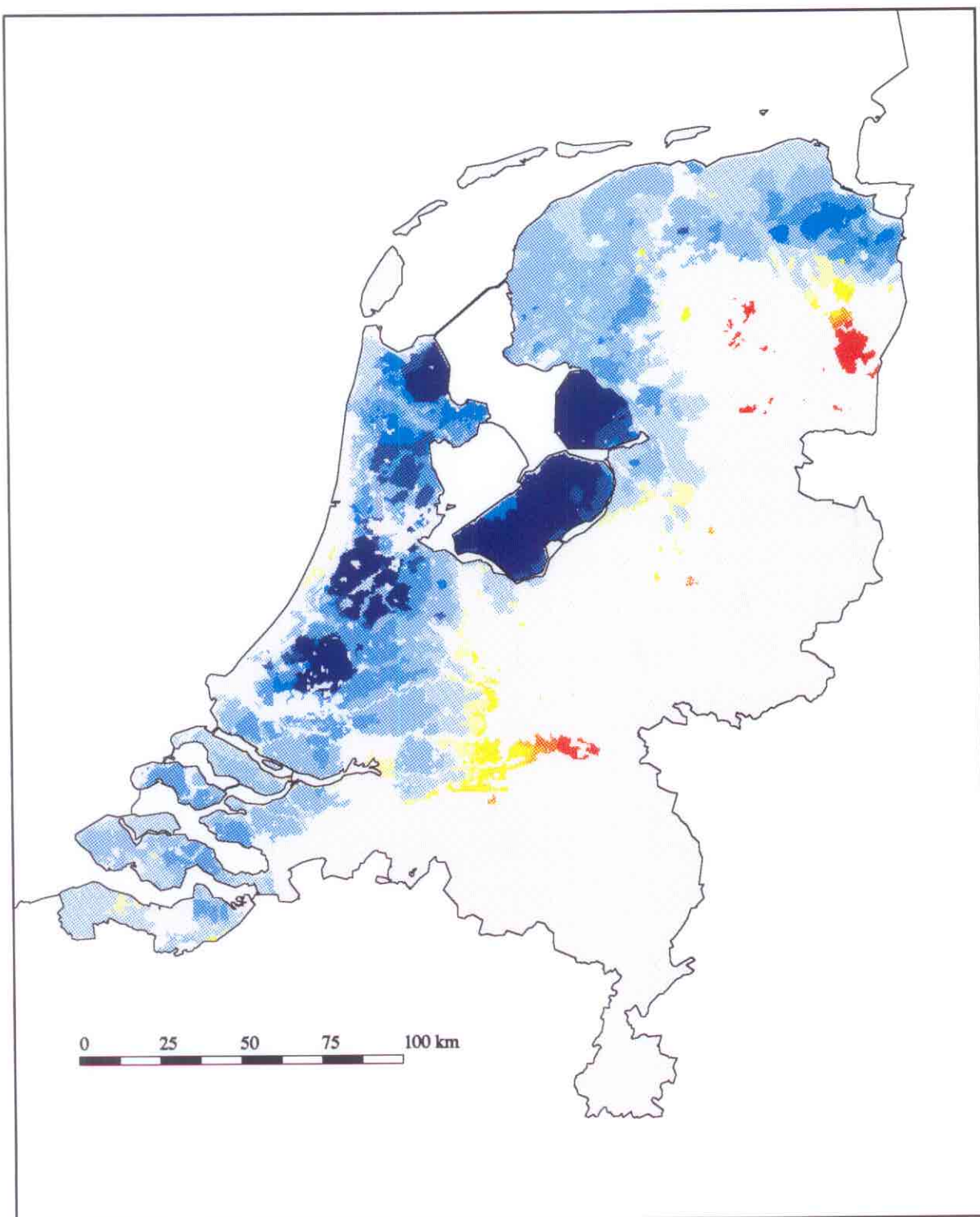
Bijlage 30.

Grondwateraanvulling binnen het modelgebied [mm/dag].



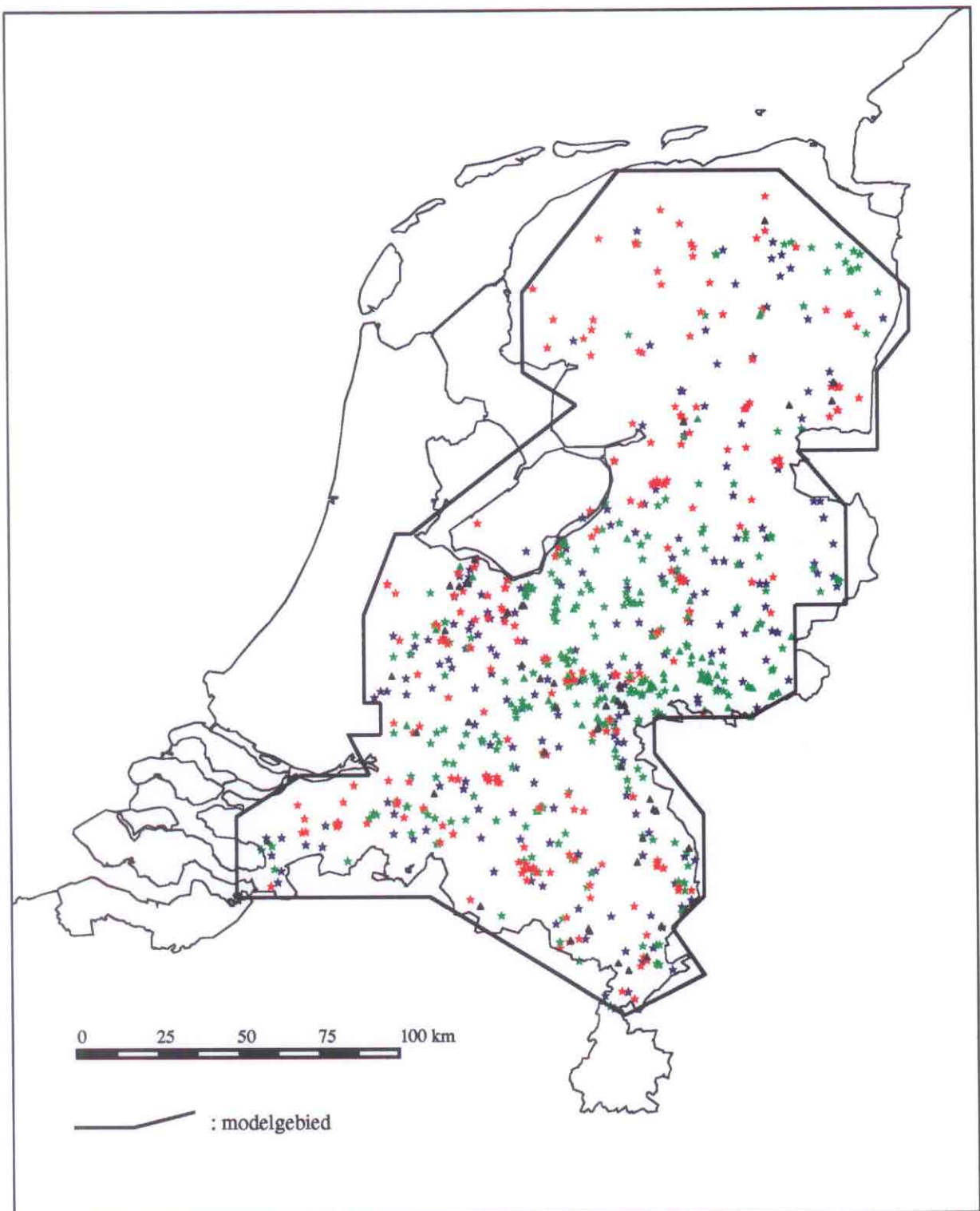
Bijlage 31.

Gemodelleerde waterlopen



Bijlage 32.

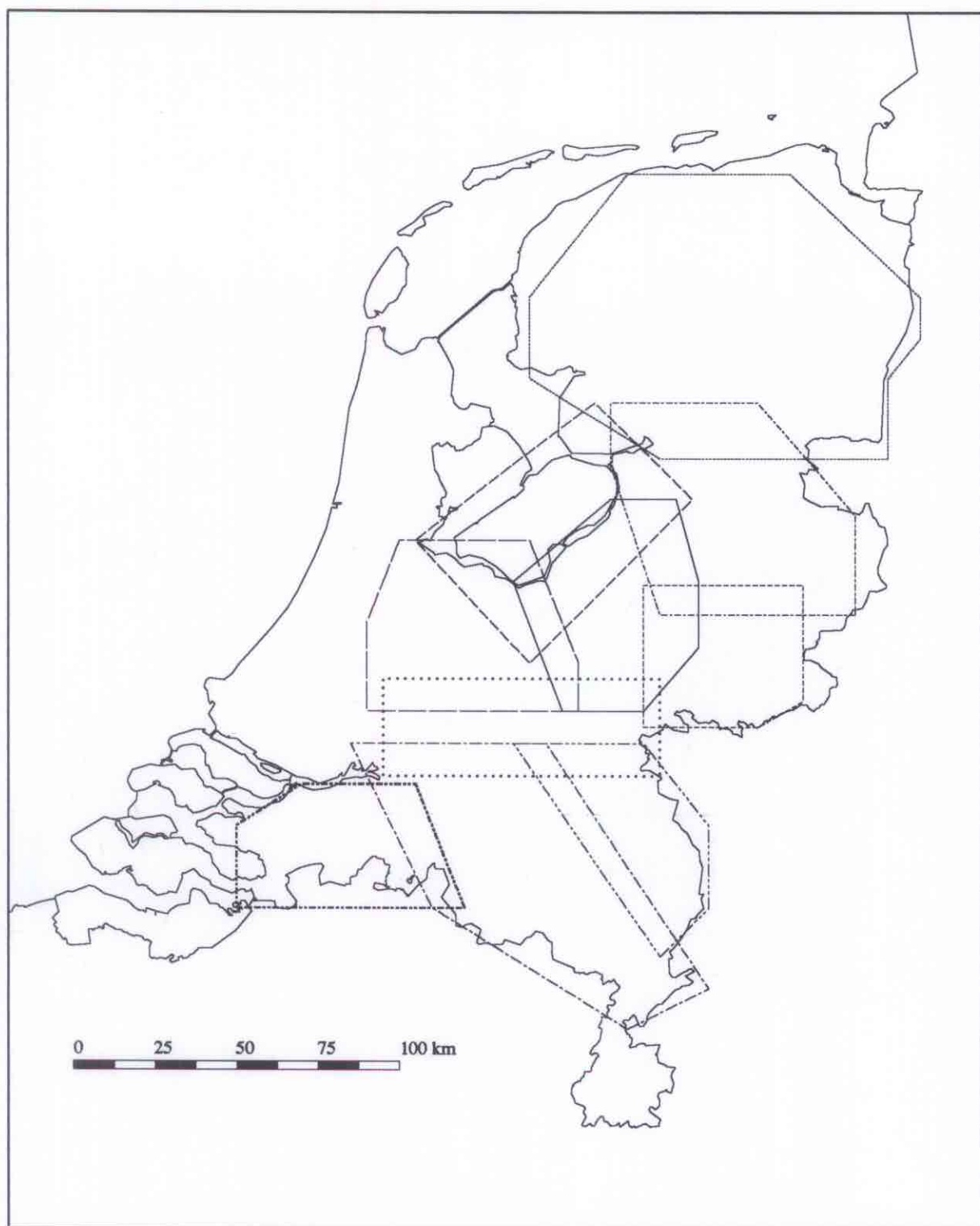
Gemiddelde peilen van polders en van boezemwateren.



- ★ grondwateronttrekking tbv de openbare drinkwatervoorziening
- ★ grondwateronttrekking door industrie
- ★ koelwater winningen
- ▲ bemalingen (tijdelijk)
- ▲ overig

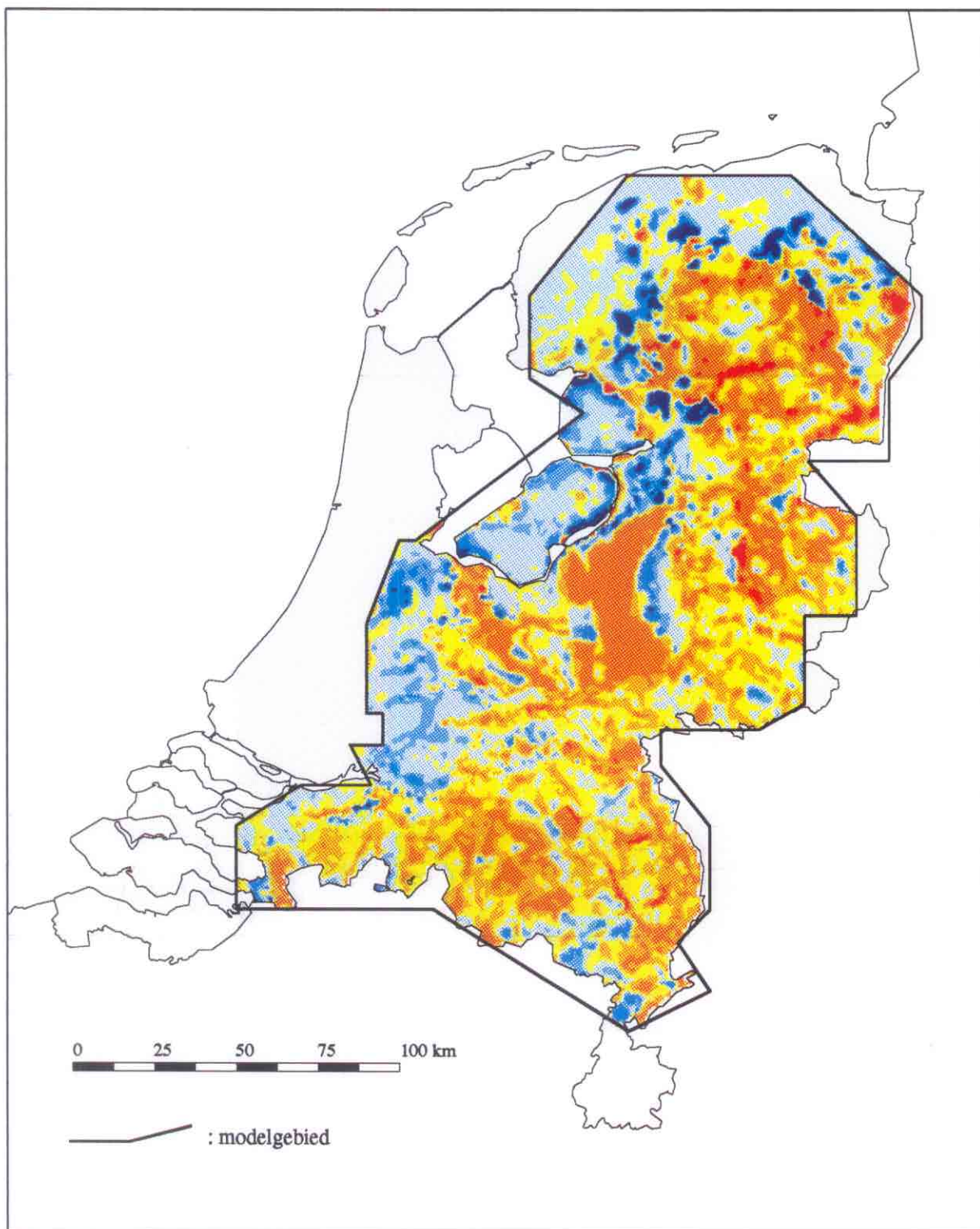
Bijlage 33.

Lokaties van grondwaterwinplaatsen binnen modelgebied van LGM
(industriële onttrekking > 50000 m³/jaar); situatie 1988.



Bijlage 34.

Deelgebieden van het LGM t.b.v. BPDIV en MER.



Bijlage 35.

Gebieden met kwel of infiltratie, berekend met het LGM.
(gemiddelde situatie 1988)