rlands Instituut voor
epaste Geowetenschappen TNO

# 1.500.000 JAAR LANG VERANDERINGEN IN DE LOKALE GRONDWATER-SITUATIE VAN EEN KEMPENS BEEKDAL

NITG 98-53-B

NN31169.98-53-B

~~22/2700(98-53-B)~~
HN31169, 98-53-B

Nederlands Instituut voor
Toegepaste Geowetenschappen TNO

*TNO-rapport*
NITG 98-53-B

# 1.500.000 JAAR LANG VERANDERINGEN IN DE LOKALE GRONDWATERSITUATIE VAN EEN KEMPENS BEEKDAL

BIBLIOTHEEK "DE HAAFF"
Droevendaalsesteeg 3a
6708 PB Wageningen

Datum

Maart 1998

Auteur(s)

R.J. Stuurman
A.H.M. Kremers
J.L. van der Meij
J.W.A. Foppen
J. Griffioen

Schoemakerstraat 97
Postbus 6012
2600 JA Delft

Telefoon 015 269 69 00
Fax 015 256 48 00

Projectnummer

145437236

Opdrachtgever

Ministerie van Lanbouw, Natuurbeheer en Visserij

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de 'Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO', dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 1996 TNO

Usn 957185

Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO is gevestigd in Delft en Haarlem en heeft nevenvestigingen in Haarlem, Heerlen, Nuenen, IJmuiden en Zwolle.

Het instituut is het centrale geowetenschappelijke informatie- en onderzoeksinstituut van Nederland, ten behoeve van het duurzaam beheer en gebruik van de ondergrond en de ondergrondse natuurlijke bestaansbronnen.

Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

# Samenvatting

Het tegenwoordige natuurreservaat De Halsche beemd-west bevindt zich in het beekdal van het Merkske. Het bestaat uit een hooigrasland van 100 x 50 meter en heeft in het lage, tegen de beek aangelegen, deel een veenbodem. Het hogere deel bestaat uit een beekeerdbodem.
De natuurwaarden ( Calthion en blauwgrasland) in het hooigrasland worden geassocieerd met het voorkomen van calciumrijke kwel. Dit stemt overeen met de bodemontwikkeling ter plaatse.

Uit de veldmetingen blijkt dat de lokatie sterk te lijden heeft aan verdroging. Deze uit zich in de zomermaanden en is hoofdzakelijk veroorzaakt door een zeer sterke afname in kwelintensiteit. Deze is afhankelijk van de stijghoogte in het ondiepe watervoerende, schelpenrijke, watervoerende pakket. Het beekpeil is zowel in de zomer als de winter onnatuurlijk laag. In de winter heeft dit lage peil echter slechts een 'uitstraling' van circa 15 meter. In de zomer beinvloed deze echter, als gevolg van de weggevallen kwelstroming, het gehele perceel.
De dynamiek van deze grondwaterstroming zorgt er wel voor dat de winter-grondwaterstrand als gevolg van de kwelflux aan maaiveld reikt. Hierdoor wordt verzuring van de wortelzone door regenwaterinfiltratie tijdens de herfst teniet gedaan door het uittreden aan maaiveld van basische kwel tijdens de winter. De bodem-pH is dan ook alleen langs de beek en aan de bovenrand van het beekdal relatief zuur.

Uit het onderzoek naar de relatie tussen landgebruik/drainage en afvoerdynamiek van de beek onder historische, natuurlijke omstandigheden en de actuele, grotendeels agrarische situatie, bleek dat het winterpeil van nature lager en het zomerpeil minstens twee maal hoger lag. Op basis van hydrogeochemische berekening bleek dat de zuurgraad van dit beekwater onder natuurlijke omstandigheden een neutraal karakter had. Dit ondanks het feit dat in de winter 90% van de afvoer uit zuur heide-water bestond. Uit de berekeningen kwan naar voren dat de menging met 10 % basische kwel genoeg is om een het water een neutraal, licht basisch karakter te geven. Mogelijke beinvloeding door inundatie hangt derhalve weer indirect samen met kwel.

Het tijdsafhankelijke modelonderzoek heeft informatie opgeleverd naar de grondwaterstromingsveranderingen in de tijd. Tevens levert het informatie ten aanzien van de gevoeligheid van het lokale beekdalsysteem voor verschillende bovenlokale waterhuishoudkundige veranderingen.
De berekeningen bevestigden dat het beekpeil slechts zeer lokaal de grondwaterstand beinvloed en dat de grondwaterstand in het beekdal in belangrijke mate stijghoogte bepaald was. De dynamiek van deze stijghoogte is de afgelopen decennia gewijzigd. Stijghoogte onderzoek ter plaatse toonde een daling van 40 cm gedurende de aflopen 25 jaar waarbij met name de zomerpeilen dieper

uitzakken. Deze daling staat in relatie met de diffuse grondwaterdaling welke het gevolg is van de ontwatering en grondwateronttrekking.
De modelresultaten onderbouwde ook dat de kwel die binnen de beemd uittreedt, vroeger en nu, van grote diepte afkomstig is. Uit reistijd berekeningenbleek dat ouderdom van dit water honderden jaren bedraagt.

# Inhoud

Samenvatting ..... i

Lijst van figuren ..... v

Lijst van tabellen ..... vii

1 Inleiding ..... 1

2 Een paleogeohydrologische analyse ..... 2
2.1 Inleiding ..... 2
2.2 Van oerbeek tot laaglandbeek ..... 2
2.3 Het referentiebeeld anno 1800 voor het stroomgebied ..... 9
2.3.1 Algemeen ..... 9
2.3.2 Landschap ..... 9
2.3.3 Beekpeil ..... 10

3 Een grondwatermodellering over een periode van 130 jaar tussen 1860 en 1990 ..... 11
3.1 Inleiding ..... 11
3.2 De opzet van het onderzoek ..... 11
3.3 De ligging van het onderzoeksgebied ..... 12
3.4 De hydrogeologische opbouw ..... 12
3.5 De modelopbouw ..... 13
3.5.1 Methode ..... 13
3.5.2 Hydrogeologische model schematisatie ..... 14
3.5.3 Toepassing van statistiek (tijdreeks-analyse en regressie) ten bate van het opstellen van de tijdsafhankelijke randvoorwaarden ..... 14
3.5.4 De bepaling van het langjarig verloop van neerslag en verdamping ..... 15
3.5.5 De bepaling van het langjarig verloop van het beekpeil ..... 16
3.5.6 De bepaling van het langjarig verloop van de stijfhoogten in het eerste watervoerende pakket ..... 16
3.5.7 De verandering in het landgebruik en het secundaire en/of tertiaire ontwateringsstelsel ..... 16
3.5.8 De modelbeperkingen in relatie tot de werkelijkheid ..... 16
3.6 De modelresultaten ..... 17
3.6.1 De bepaling van het dynamisch invloedsgebied voor elke afzonderlijke randvoorwaarden ..... 17

3.6.2 De wijzigingen binnen het stromingssysteem als gevolg van waterhuishoudkundige veranderingen gedurende de afgelopen honderd jaar ..... 18

4 Een analyse van de relatie tussen beekpeil en beekafvoer ..... 20
4.1 Inleiding ..... 20
4.2 Afvoeranalyse ..... 20
4.2.1 Inleiding ..... 20
4.2.2 Methode ..... 21
4.2.3 Resultaten ..... 26
4.2.4 Gemiddelde maandelijkse afvoer en vertaling naar het beekdal ..... 28
4.3 Afvoer in de uitgangssituatie ..... 29
4.4 Enkele chemische karakteristieken van de beek in de uitgangssituatie ..... 30
4.4.1 Inleiding ..... 30
4.4.2 Methode ..... 31
4.4.3 Resultaten ..... 32
4.5 Synthese en discussie ..... 32

5 Algemene synthese ..... 35

6 Literatuur ..... 36

Bijlagen
A Modelresultaten 1860 - 1990

# Lijst van figuren

Figuur 2.1 Het onstaan van het grondwatersysteem rond de Halsche Beemd
Figuur 3.1 De ligging van de Halsche Beemden in het beekdal van het Merkske ten zuiden van Breda
Figuur 3.2 De hydrogeologische opbouw in het Merkske stroomgebied
Figuur 3.3 Een regionaal noord-zuid profiel loodrecht over het Merkske
Figuur 3.4 Een schematische weergave van de modelopbouw
Figuur 3.5 Het verloop van het beekpeil ten hoogte van Castelré, stroomafwaarts van de Halsche Beemd
Figuur 3.6 Het stationaire stromingssysteem tijdens de heideperiode (1861 - 1894)
Figuur 3.7 Het stationaire stromingssysteem tijdens de maisperiode (1986 - 1990)
Figuur 3.8 Enkele tijdsafhankelijke stroombanen op basis van gemiddelde jaarlijkse stijghoogtevelden (1860 - 1990)
Figuur 3.9 Reistijden, vroeger en nu, rond het beekdal
Figuur 4.1 De actuele afvoer van de strijbeek verdeelt naar (1) basisafvoer en (2) kavelafvoer (snel en geremd)
Figuur 4.2 Ontwikkeling van de grondwaterspiegel ten gevolge van een plotseling optredende bui in een kavel begrensd door sloten met een constant peil (uit: de Zeeuw, 1966).
Figuur 4.3 De afvoerverdeling in de negentiende eeuw
Figuur 4.4 Menging van heide- en kwelwater (fig. 4.3) met of zonder $CO_2$-evenwicht.
Figuur 4.5 Het berekende jaarlijkse verloop in calcium- en bivarbonaatconcentraties voor het oppervlaktewater in de negentiende eeuw.
Figuur 4.6 De pH-ontwikkeling van zuur (heidewater) door titratie met bicarbonaat (kwel)

# Lijst van tabellen

Tabel 1.2 Koolstof-14 datering van veenmonsters uit het Markdal bij Wortel uitgevoerd door het Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (Geys, 1975) ..... 4
Tabel 3.1 De waarden van de aanvullingsfaktor bij verschillende reaktiefactoren ..... 25
Tabel 3.2 Overzicht van de waarden van de parameters, waarmee de neerslag- en verdampingsreeks is gemodelleerd tot een berekend afvoerverloop ..... 27
Tabel 3.3 Gemiddelde afvoerhoeveelheden (mm/maand) voor de periode 1961 t/m 1967 per reservoir ..... 28
Tabel 3.4 Voorkomen van de Gt's uitgedrukt in % van het totale oppervlak van het stroomgebied ..... 29
Tabel 3.5 De herkomstgebieden van de reservoirs en hun grootte ..... 29

# 1 Inleiding

In het kader van het TNO doelsubsidie onderzoek (LNV) is onderzoek uitgevoerd naar de tijdsafhankelijke grondwaterstroming rond een beekdal. Het doel van deze studie was om het inzicht te verdiepen ten aanzien van de 'natuurlijke', historische grondwatersituatie binnen een beekdal. Hierbij werd speciale aandacht geschonken aan de relaties tussen de lokale processen met de bovenlokale en regionale processen. Vervolgens is bestudeerd welke waterhuishoudkundige veranderingen tot de achteruitgang van de natuurwaarden binnen het beekdal hebben geleid.

Hiervoor is als praktijkvoorbeeld het Merkske beekdal gekozen. De reden hiervoor was dat reeds veel bekend was over de grondwatersituatie en daarnaast ook veel historische data beschikbaar waren.
Binnen dit beekdal heeft de aandacht zich in het bijzonder gericht op een 50 x 100 meter groot hooigrasland, de Halsche beemd-west.
Tijdens het onderzoek is getracht de dynamiek van de grondwatersituatie in relatie tot de standplaats over een periode van 1.500.000 jaar uit te werken.

De dynamische processen rond de standplaats worden hoofdzakelijk bepaald door de jaarlijkse beekpeil- en kwelintensiteit fluctuaties, de mogelijkheid tot regenwaterinfiltratie, de herkomstdiepte van het kwelwater en het voorkomen van beekinundaties. Voor wat betreft de mogelijke invloed van inundaties speelt ook de kwaliteit van dit water een rol van betekenis.

Om bovenstaande processen beter te begrijpen hebben binnen het project drie deelstudies plaatsgevonden;

Hoofdstuk 2: een paleogeohydrologische analyse;
Hoofdstuk 3: een grondwatermodellering over een periode van 130 jaar tussen 1860 en 1990. Hiervoor is de grondwaterstroming gesimuleerd in een transsect van waterscheiding tot waterscheiding met een verdichting van het netwerk rond de Halsche beemd;
Hoofdstuk 4: een analyse van de relatie tussen beekpeil en beekafvoer met de uittredende ondiepe en diepe grondwaterreservoirs. Hierbij werd met behulp van reservoir- en geochemische modellen de natuurlijke beekwatersamenstelling gereconstrueerd;

In het kader van het project is ook de actuele grondwatersituatie in de beemd onderzocht. Deze resultaten worden afzonderlijk gerapporteerd.

# 2 Een paleogeohydrologische analyse

**Auteur: R.J. Stuurman**

## 2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een poging gewaagd om de 'natuurlijke' abiotische omstandigheden in het Merkske stroomgebied te reconstrueren.
De werkelijke natuurlijke omstandigheden gelden in feite voor de situatie enkele duizenden jaren geleden voordat menselijke beinvloeding het aanzien van het stroomgebied ging beïnvloeden.
Beekdalen als het Merkske worden veelal echter juist gewaardeerd vanwege de waardevolle voedselarme hooigraslanden welke juist als gevolg van menselijk ingrijpen tot stand gekomen zijn.
Daarom wordt in dit hoofdstuk getracht de ontwikkeling van het nog ongestoorde natuurlijke systeem tot een grotendeels door de mens beheerste laaglandbeek te beschrijven (zie figuur 2.1).

## 2.2 Van oerbeek tot laaglandbeek

**Vanaf ca. 1.500.000 jaar B.P.**
Na de Vroeg-Pleistocene afzetting van fijne zanden en kleien van de Formaties van Tegelen en Kedichem, respectievelijk (vgl. Kasse, 1988) bleef rond het Eind-Midden Pleistoceen door algemene erosie een licht naar het noorden hellend landschap over.

**Rond ca. 65.000 jaar B.P.**
Tijdens het begin van het Weichselien trad een sterke verandering van het landschap op doordat duidelijke valleien gevormd werden. Deze erosieve valleigrenzen kunnen in de huidige morfologie herkend worden (o.a. de steilwand langs de Mark bij Wortel en de 'beemdranden').

**Tussen ca. 50.000 - 13.000 jaar B.P.**
Gedurende het Weichsel-pleniglaciaal werden de dalen opgevuld met grove zanden waarop een nieuwe geringe insnijding tijdens het Boven-Pleniglaciaal volgde.
Aan het einde van het Pleniglaciaal(tot ca. 13.000 BP) vond sterke eolische activiteit plaats onder invloed van de afwezigheid van vegetatie door koude en droge condities. Hierbij werden de dalen deels opgevuld met eolisch materiaal. Doordat de beken onmogelijk al het eolisch aangevoerde materiaal kon transporteren ontstond een breed, vlechtend, zwaar geladen riviersysteem. Deze was alleen ten gevolge van sneeuwsmelt in de lente actief en resulteerde in een pleniglaciaal terras.

**Rond 13.000 jaar B.P.**
Tijdens de overgang van het Pleniglaciaal naar het Laat-Glaciaal ontstond een klimaatsverandering naar warmere, nattere condities, waardoor een vegetatiedek ontstond. De eolische activiteit stopte en de oevers werden stabiel. Er ontstond door insnijding een meanderend beeksysteem met een smalle diepe insnijding doordat door toegenomen effectieve neerslag de beekafvoer toenam en a.g.v. stabilisatie van de oevers en uitbreiding van het vegetatiedek het transport afnam. Tot het midden van de Jongere Dryas tijd (ca. 10.500 jaar B.P.) fungeren de vroegere beddingen van het verlaten vlechtende rivierstelsel tijdens hoge afvoeren als rivierkom.
Het landschap veranderde in deze periode van een open kruidenrijke vegetatie naar een door berk gedomineerd open bos.
De smalle, diepe insnijding veroorzaakte verdroging in de omgeving van de beken. Door Kasse werd insnijdingen tot 9 meter diepte aangetroffen welke gestopt zijn rond 11.850 BP. Door Stuurman e.a. (1988) werd in het Merkske-dal bij de Halsche beemd-west een zeer smalle (< 15 meter) insnijding tot 8.5 meter diepte aangetroffen. Langs deze zone ontstonden droge bodems waar eolische activiteit greep op kon krijgen. Hierbij blokkeerde zandruggen op verschillende plaatsen de beekdalen (ondermeer in het Merkske bij Halle) waardoor bovenstrooms meren onstonden die opgevuld werden met klei en gyttja. Als gevolg van verlaging van de grondwaterstand evolueerde de vegetatie in deze periode weer geleidelijk naar een struiken- en kruidenrijke begroeiing.

**Tussen 11.800 - 11.000 jaar B.P.**
Tijdens het Alleröd vond een snelle veen-opvulling van de beekdalen plaats terwijl het terras verschillende malen geinundeerd werd. Deze inundaties namen tijdens de Jonge-Dryas tijd in aantal toe waardoor de veengoei stopte en sedimenten op het veen afgezet werden. In deze periode bevond de grondwaterstand zich relatief ondiep onder het oppervlak. Hierdoor raakten ook relatief laag gelegen zones op de interfluvia onder invloed van het grondwater waardoor moerassen ontstonden die gedomineerd werden door paardestaarten (waarschijnlijk Holpijp), Waterdrieblad en Zeggen.
Aan het einde van het Alleröd werd het klimaat droger waardoor het freatisch niveau daalde en Pinus ging domineren over de Berk. In deze droge periode werden de beken gekenmerkt door een lage afvoer. De neerslag bedroeg 300-325 mm/j, de gemiddelde juli-temperatuur 19$^0$C en de gemiddelde januari-temperatuur -19$^0$C.

**Tussen 11.000 - 10.000 jaar B.P.**
Circa 10.900 jaar geleden (Jongere Dryas) ontstond als gevolg het kouder wordende klimaat een hernieuwde fluviatiele, erosieve activiteit. De juli-temperatuur daalde tot ca. 10 $^0$C. De open, kruidenrijke vegetatie keerde in deze periode terug.
Het einde van de Jongere Dryas werd gekenmerkt door droge omstandigheden met lage grondwaterstanden.

**Tussen 10.000 - 9.000 jaar B.P.**
Deze droge omstandigheden eindigde 'voorgoed' aan het begin van het Holoceen. Gesloten bossen doen verstuivingen van het dekzand stoppen en de den verdwijnt uit het beekdal en Hazelaar en vervolgens Eik begint zich te vestigen. In het Preboraal startte actieve veengroei in de beekdalen (Geys, 1977). Door Geys werd in de Mark bij de kerk van Wortel een ouderdomsonderzoek aan het zes meter dikke veenpakket uitgevoerd met de volgende resultaten.

*Tabel 1.2 Koolstof-14 datering van veenmonsters uit het Markdal bij Wortel uitgevoerd door het Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium (Geys, 1975)*

| diepte onder -mv | ouderdom B.P. | periode |
|---|---|---|
| -1 meter | 2335 j. 126 | Subatlanticum |
| -3 meter | 6225 j. 261 | Atlanticum |
| -4 meter | 8215 j. 282 | Boreaal |
| -5 meter | 9055 j. 314 | Preboreaal |
| -6 meter | 9317 j. 321 | Preboreel |

Rond deze periode (Laat-Paleolithicum) startte de geleidelijke overgang van het natuurlandschap naar het cultuurlandschap. Tot ver in het Mesolithicum (10.000-5000 BP) werd dit deel van Brabant bevolkt door zwervende jagersvolken die geen landbouw of veeteelt bedreven waardoor hun invloed op het landschap gering was.

**Tussen 9.000 - 8.000 B.P.**
Het Boreaal werd gekenmerkt een afname van het neerslagoverschot en door geringe fluctuaties in de afvoer, relatief lagere grondwaterstanden en sterke seizoenale fluctuaties.

**Tussen 8.000 - 5.000 jaar B.P.**
Tijdens de overgang naar het nattere Atlanticum, steeg het regionale grondwaterniveau en hadden de moerasbegroeiing in de beekdalen zich zo uitgebreid dat zich een diffuus drainagesysteem ontwikkelde. Dit was een gevolg van een overgang van een continentaal naar een oceanisch klimaat[1]. De beekdal-moerassen (peat blankets) werden gevoed door continue kwel. Tot het einde van het Atlanticum zou een duidelijke stroomdraad ontbreken.
In de Zwarte Beek aan de zuidzijde van het Kempisch Plateau in België is onderzoek gedaan naar de veenontwikkeling in het beekdal. Hier is het asymetrische pleistocene dal in het smalle gedeelte en/of middenloop van de Zwarte Beek opgevuld met ca. 5 meter veen. Op het diepste punt bevindt zich subaquatisch veen hetgeen op verlanding in open water wijst. Daarboven werd maximaal 2 meter Zeggeveen en Snavelzeggeveen aangetroffen hetgeen op geleidelijke verdere verlanding wijst. Dat veenmossen ontbreken toont dat de vegetatie hoofdzakelijk onder grondwaterinvloed stond.

[1] Rond 8.300 B.P. brak het kanaal bij Dover door en nam de invloed op ons klimaat toe.

Als gevolg van de geleidelijke stijging van de grondwaterstand in/langs de beekdalhelling is daar houtveen (zachte Berk) ontwikkeld. Boven dit veen ontstond later Zegge/Houtveen (Zeggen, Berk, Els, Snavelzegge, Egelskop). Het centrum van het dal was het natst getuige de aanwezigheid van boomloos Zeggen/Rietveen. Deze wordt door Succow (1982) geïnterpreteerd als doorstroomveen welke doorgaans vanuit de ondergrond door mineraalrijk grondwater gevoed worden. Hierbij wordt het instromende grondwater door het veen afgevoerd. Dit veen kon tegen de helling opgroeien. Als gevolg van het zwellend vermogen van dit veen traden nooit overstromingen op.
Op de interfluvia kon zich Berkenrietveen en vervolgens veenmosveen/hoogveen ontwikkelen. Dit was een gevolg van het natte klimaat en van hoge grondwaterstanden veroorzaakt door een geremde waterafvoer in de beekdalendoor ten gevolge van veenontwikkeling aldaar.

**Vanaf ca. 5000 jaar B.P. tot 0 A.D.**
Als gevolg van een daling van de effectieve neerslag vanaf 5850 BP ontstond op de overgang van het Atlanticum naar het Subboreaal, een nieuw insnijdingsfase en herstelde zich de smalle beekmeander.
Rond deze tijd (ca. 4500 j v. Chr.) startte de eerste landbouw op de hogere gronden. Deze bestond uit wisselbouw waarbij percelen bos afgebrand werden, vervolgens in cultuur gebracht en daarna weer verlaten. Daarnaast werd het vee in het bos 'geweid' waardoor a.g.v. vraat van jonge loten open ruimtes in het bos moeten zijn ontstaan. Hierdoor ontstaan kleine heideveldjes en weiden. Vermoedelijk kon de bevolking zich in deze tijd alleen op de hoogste en daardoor droge plaatsen vestigen. Zo werd ondermeer de dekzandrug ten westen van de Oude Leij, tussen Baarle-Nassau en Riel, reeds tijdens de bronstijd bewoond getuige de aanwezigheid van verschillende grafheuvels.

Het grootste oppervlak van Noord-Brabant werd bedekt met uitgebreide moerassen (Renes, 1985). Het hoogveen groeide de zandop-duikingen op en vormde zich geleidelijk tot aaneengesloten grote oppervlakten.

**De periode 0 - 1100 jaar A.D.**
Vanaf 700 v. Chr. (IJzertijd) nam de bevolking sterk toe en ontwikkelden zich permanente akkercomplexen, die vanaf het begin van de jaartelling steeds meer afgestemd raakten op de romeinse economie. In deze periode kwamen voornamelijk uitgestrekte loofwouden en veengebieden voor. Het beekdal zal regelmatig geïnundeerd zijn a.g.v. stormvloeden, kruiend ijs, meandering en wellicht bevers.
Er ontwikkelde zich Kleine zeggenmoerassen en natuurlijke graslanden door grote grazers als Edelhert, Oerrund, Wisent, wild Zwijn en Eland.
Als gevolg van sterke ontvolking in de derde tot en met vijfde eeuw na Chr. kon het bosareaal tijdelijk weer regenereren.

Er zijn geen aanwijzingen dat de beken gedurende deze periode op directe wijze door menselijk ingrijpen beinvloed werden. Wel zal de ontbossing indirect het beeksysteem beinvloed hebben.

De doorbraak van de duinenreeks bij Zeeland rond de vijfde eeuw na Chr. is wellicht van belang geweest voor de waterhuishouding in het Merkske gebied. Als gevolg van deze doorbraak werd een deel van het veen in noordwest-Brabant weggeslagen en kwam de Mark sterk onder zeeinvloed te staan.
Als gevolg hiervan was zelfs in het Land van Hoogstraten de getijdewerking merkbaar.
De grens waar de getijdewerking nog merkbaar verplaatste zich in de loop van de tijd geleidelijk in stroomafwaartse richting. Dit hield vermoedelijk verband met verzandingen en het ontstaan van grilliger meanders in de loop van de eeuwen waardoor ook scheepvaart op de Mark geleidelijk onmogelijk werd.
Na de Romeinse tijd raakte het grondbezit in handen van kloosters en hoven ('hofhorigheid'). In deze periode (ca.800 na Chr.) werden met name door de kloosters talrijke watermolens in de provincie Noord-Brabant aangelegd waardoor de beekafvoer en het beekpeil sterk onder menselijke invloed kwamen te staan. Dit gold in het bijzonder voor de beken in Midden- en Oost Brabant.
In de Mark zijn uit deze periode een viertal watermolens bekend. Het is niet bekend of er ook in het Merkske ooit een watermolen gestaan heeft.
Wel zal de aanwezigheid van de Volmolen in de Mark, direct stroomafwaards van de samenvloeiing met het Merkske, met name in het benedenstroomse deel van het Merkske invloed gehad hebben.
Overigens werd het beekpeil in deze tijd ook sterk beinvloed door visserij waarbij de beek plaatselijk opgestuwd werd.

**De periode 1000 - 1800 jaar A.D.**
Na het verdrijven van de Noormannen (ca. 1100) nam de ontginning ten bate van de landbouw toe. De bevolking groeide sterk, de horigheid en het grootgrondbezit nam af. Het oppervlak bos nam in deze periode sterk af en het oppervlak heide, weiland en akker nam sterk toe. De natuurlijke gronden werden ondermeer gebruikt voor strooiselwinning, afplaggen en veebeweiding.
In deze periode startte men ook met de ontginning van de nattere lagere gronden. Hierbij werden ondermeer de natte gronden langs de beekdalen verdeeld om vervolgens ontgonnen c.q. ontwaterd te worden. In deze tijd ontstonden de beemden of hooigraslanden. De beemdpercelen liepen soms ver tegen de dalflank op.

Onder invloed van de geomorfologische en hydrologische gesteldheid van het gebied ontstond in deze periode rond het Merkske duidelijke agrarische kultuurlandschapspatronen waarbij twee categorieën onderscheiden kunnen worden: (1) de beekdalnederzetting en (2) de plateaunederzetting.
Een voorbeeld van een beekdalnederzetting vormt 't Groeske bij Castelré. Bij dit type bevinden zich beemden langs de beek. Deze waren veelal smalle particuliere percelen, loodrecht gerangschikt t.o.v. de beek. Iets hoger op de beekdaloever

bevond zich de nederzettingskern welke omgeven was door het akkergebied. Het akkergebied werd meestal door een houtwal gescheiden van de woeste gronden (de Gemeynt) welke uit bossen en heide bestond.
Als gevolg van de ontbossing en het intensieve gebruik van de heide namen vanaf de tiende eeuw zandverstuivingen toe. Hierdoor nam de sedimentlast in de beken geleidelijk toe.

Doordat als gevolg van de houtkap een brandstoftekort opgetreden was ontstond rond 1200 de turfwinning. Hierbij werden eerst de lage gronden in het noordwesten van Brabant ontgonnen waarna geleidelijk het meer zuidelijke, tegen de zandgronden opwiggende veen ontgonnen werd. Hierbij werden talrijke turfvaarten aangelegd. In feite kon tot deze periode alleen de hoge dekzandruggen bewoond worden. Voorbeelden hiervan vormen Baarle-Nassau en Hoogstraten (genoemd als 'Vrijheid' in 1210).

In het begin van 1300 stagneerde de ontwikkeling door allerlei oorzaken (o.a. passieve overheid, tekort aan mest etc.). De ontginning werd nog maar zeer langzaam en kleinschalig voortgezet en duurde in feite tot in de negentiende eeuw. Belangrijk was echter de introductie van de potstalmest rond 1300 waardoor een driedeling ontstond van woeste gronden, hooilanden en akkers. Rond het Merkske bevond zich weinig hooiland waardoor veel woeste grond nodig was om het vee te voeden en om voldoende mest te produceren.

De Halsche beemden ontstonden vermoedelijk in de veertiende eeuw. In een akte uit 1403 wordt namelijk gesproken over de stichting van een abdijhoeve ter plaatse. Deze werd gebouwd door monikken van de St. Michielsabdij uit Antwerpen. Rond 1671 werd door deze abdij de nog bestaande hoeve Halschoor gebouwd. Een 'schoor' is een met graszoden bedekte houten brug over een beek. De Halbrug vormde in de zeventiende eeuw een belangrijke noord-zuid verbinding tussen Antwerpen en Den Bosch (uit Van Wirskante 1993-3).

Dankzij de kartering van Ferraris (1778) is het landgebruik rond het Merkske aan het einde van de achttiende eeuw bekend. Het gebied werd gedomineerd door uitgestrekte heidevelden. Slechts aan de randen van de beekdalen zijn de gronden in cultuur gebracht. Deze akkers waren met hagen omgeven. De begreppelde beekdalen waren in gebruik als hooiland. Opvallend is dat waar hooilanden overal netjes evenwijdig van elkaar loodrecht op de beek lopen , dit in de Kromme Hoek niet het geval is. Hier bevinden de natte hooilanden zich relatief ver van de beek. De kaart toont dat het gebied tussen het Merkske en de Mark, waar tegenwoordig de bosrijke terreinen van de Rijksweldadigheidskolonie bevinden, hoofdzakelijke natte heide met verschillende verspreid liggende vennen voorkwamen.
De kaarten tonen ook duidelijk de oostelijke, stroomopwaartse begrenzing van de natte hooilanden in de Noordermark en het Markske, respectievelijk bij Moermolen en Zondereigen. Ten oosten hiervan, op de ongeveer noord-zuid geörienteerde waterscheiding tussen Mark en Reusel, bevonden zich heidevelden

met talrijke vennen en moerassen. De bovenlopen van het Merkske ontspringen in deze zone.
Uit de 'Memoires' van Ferraris blijkt dat het gebied uit vlak land, hoofdzakelijk heidevelden, bestond met cultuurgronden die omringd werden door dikke hagen. Op deze cultuurgronden verbouwde men rogge, haver, vlas en boekweit. Door het gebrek aan hout gebruikten de bewoners turf en heideplaggen als brandstof. De weinige bossen bestonden hoofdzakelijk uit eiken. Het Merkske was volgens Ferraris 12-13 voet (ca. 3,4 meter) breed, 4-5 voet (ca. 1,25 meter) diep en de waterhoogte in de droge periode bedroeg 2,5 voet (ca. 70 cm). In de winter vonden regelmatig overstromingen plaats. Het plaatselijk voorkomen van beekleemafzettingen in de beemden is hier het gevolg van. De moerassen, vennen en plassen op de heidevelden stonden alleen in de winter vol met water.

De ontginning van de heide startte in Noord-Brabant vroeger (begin 1800) dan in de rest van Nederland. Dit was het gevolg van een relatief goed georganiseerde mestvoorziening. Over water water werd namelijk vanuit de grote steden (o.a. Amsterdam) straatvuil, as, secreetmest aangevoerd.

Vanaf 1850 startte de commerciele heideontginning deels gevolgd door bebossing (dennen). Uit de Topografische en Militaire kaart van het Koninkrijk der Nederlanden (1838-1840) blijkt dat ofschoon nog steeds het grootste oppervlak van het stroomgebied uit heide bestaat het drainagesysteem in vergelijking met Ferraris sterk toegenomen is. Zo zijn de Manke Goren gedraineerd en bestaan de veenputten in Moermolen niet meer. Ook in de Kromme Hoek zijn ontwateringssloten gegraven.
Het interfluvium tussen Mark en Merkske is inmiddels ontgonnen ten behoeve van de Rijksweldadigheidskolonie.
De kaart toont dat de vennen zich voor een groot deel op de waterscheidingen bevinden. Opvallend is dat op de waterscheiding tussen Mark en Reusel de vennen in een zuidwest-noordoost richting zijn georiënteerd, overeenkomstig met de algemene windrichting.

Wat betreft de genese lijkt de volgende hypothese waarschijnlijk. In het Begin-Laatglaciaal begint de Mark en het Merkske diep in te snijden waardoor ook de grondwaterstand gaat dalen. Juist in de infiltratiegebieden zijn de grondwaterstanden het sterkst gedaald en het meest gevoelig voor uitwaaien. De diepte van de abblatiedepressies is sterk afhankelijk van de grondwaterspiegel. Als vervolgens in het Alleröd het klimaat weer natter wordt stijgt de grondwaterstand en veranderen de depressies in moerassen. De vennen zijn vervolgens veel later ontstaan tijdens de veenwinning.

Uit de topografische kaart van 1894 ('Bonnebladen') blijkt dat veel heidevelden zijn omgezet in naaldbossen hetgeen kan worden toegeschreven aan de grote landbouwcrisis van 1880.

## 2.3 Het referentiebeeld anno 1800 voor het stroomgebied

### 2.3.1 Algemeen

Uit bovenstaande beschrijving van de historische ontwikkeling van het Merkske gebied blijkt dat de eerste gedetailleerde beschrijvingen van het Merkske stroomgebied dateren uit 1778. Het betreft de kartering en beschrijving van Ferraris. Daarmee doet zich de gelukkige omstandigheid voor dat er een goede beschrijving is van het Merkske stroomgebied van voor de grote ontginningen. Het gebied was door menselijk ingrijpen weliswaar grotendeels ontbost, de bodems op de hogere gronden waren verarmd door beweiding en het steken van plaggen en er had her en der turfwinning plaatsgevonden, maar het gebied was nog nauwelijks ontwaterd en bemesting zal zich hoofdzakelijk beperkt hebben tot de enkeerdgronden rond de nederzettingen. De situatie zoals beschreven door Ferraris kan dan ook uitstekend worden gebruikt als referentie voor de 'natuurlijke' gesteldheid van het stroomgebied zoals die in principe ook weer hersteld zou kunnen worden.

### 2.3.2 Landschap

Zoals boven beschreven werd het stroomgebied van het Merkske rond 1800 gedomineerd door uitgestrekte heidevelden. Slechts aan de randen van de beekdalen zijn de gronden in cultuur gebracht. Deze akkers waren met hagen omgeven. De begreppelde beekdalen waren in gebruik als hooiland. Opvallend is dat waar hooilanden overal netjes evenwijdig van elkaar loodrecht op de beek lopen , dit in de Kromme Hoek niet het geval is. Hier bevinden de natte hooilanden zich relatief ver van de beek.

De kaart toont dat het gebied tussen het Merkske en de Mark, waar tegenwoordig de bosrijke terreinen van de Rijksweldadigheidskolonie bevinden, hoofdzakelijke natte heide met verschillende verspreid liggende vennen voorkwamen.

De kaarten tonen ook duidelijk de oostelijke, stroomopwaartse begrenzing van de natte hooilanden in de Noordermark en het Markske, respectievelijk bij Moermolen en Zondereigen. Ten oosten hiervan, op de ongeveer noord-zuid geörienteerde waterscheiding tussen Mark en Reusel, bevonden zich heidevelden met talrijke vennen (meer dan 150 vennen binnen het stroomgebied van het Merkske) en moerassen. Veel van de vennen konden in de zomder droog staan. De bovenlopen van het Merkske ontspringen in deze zone.

Uit de 'Memoires' van Ferraris blijkt dat het gebied uit vlak land, hoofdzakelijk heidevelden, bestond met cultuurgronden die omringd werden door dikke hagen. Op deze cultuurgronden verbouwde men rogge, haver, vlas en boekweit. Door het

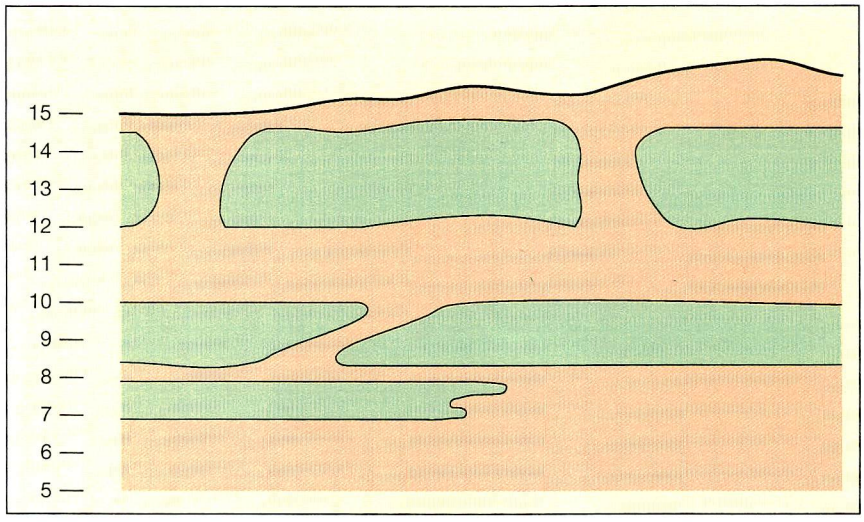
gebrek aan hout gebruikten de bewoners turf en heideplaggen als brandstof. De weinige bossen bestonden hoofdzakelijk uit eiken.

Langs de Belgisch-Nederlandse grens is ook op de kaart van Ferraris een relatief laag gelegen, moerasachtige zone herkenbaar. Deze zone (Eindegoor) vormt van oudsher het brongebied voor het Merkske. Lange tijd zal dit in de vorm van zure moerassen zijn geweest, later als vennengebied. Dit bovenstaande infiltratiegebied grensde in westelijke richting aan een oorspronkelijk moerasachtige zone welke na vervening weer overging in een zone van natte heide en vennen. In België, langs de weg naar Turnhout zijn bij Zwartwater, Groot- en Klein Klotteraard nog resten van dit vennencomplex bewaard gebleven. Voor de rest is deze zone nu ontwaterd.

Aan de westzijde van deze zone bevinden zich twee, enkele hectaren grootte, ovale depressies die een belangrijke functie binnen het natuurlijk beekdalsysteem van het Merkske bezitten. In latere tijden zijn deze depressies dichtgegroeid om in nog latere tijden weer ontveend en ontwaterd te worden.
Deze depressies vormen vroeger en nu het brongebied voor diep, calciumrijk grondwater.
In de winter worden de beekdalen langdurig overstroomd. Op deze plaatsen vindt men nu nog beekafzettingen van enkele decimeters dikte.

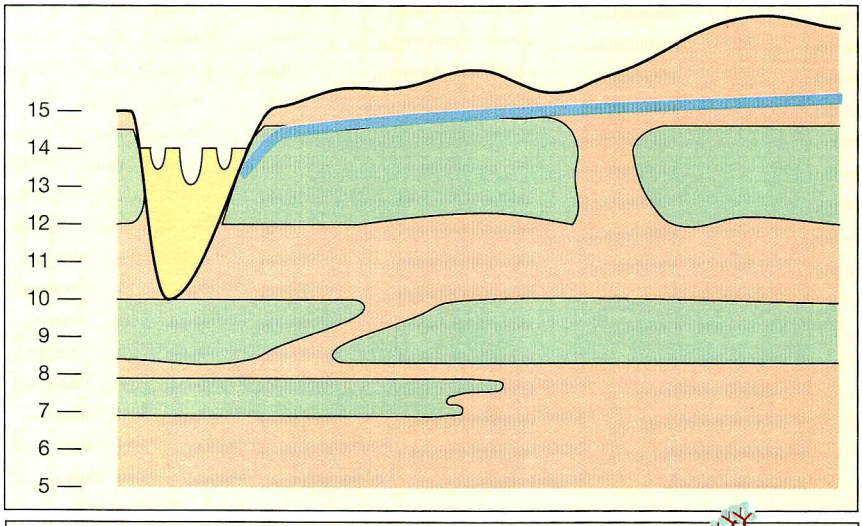
### 2.3.3 Beekpeil

Het Merkske was volgens Ferraris 12-13 voet (ca. 3,5 meter) breed, 4-5 voet (ca. 1,25 meter) diep en de waterhoogte in de droge periode bedroeg 2,5 voet (ca. 70 cm). In de winter vonden regelmatig overstromingen plaats.De plaats staat niet aangeduid maar zal vermoedelijk Stenenbrug bij Castelré betreffen.
Uit de veenontwikkeling langs de beek kan worden opgemaakt dat onder natuurlijke omstandigheden het zomerpeil enkele decimeters (± 40 cm) onder het aangrenzende maaiveld zakte.



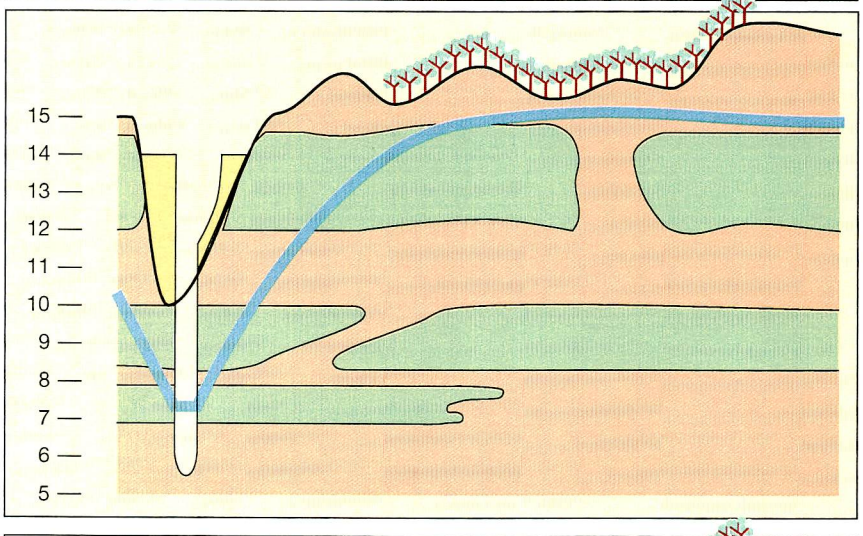

Vroeg-Pleistoceen

(1.500.000 jaar B.P.)



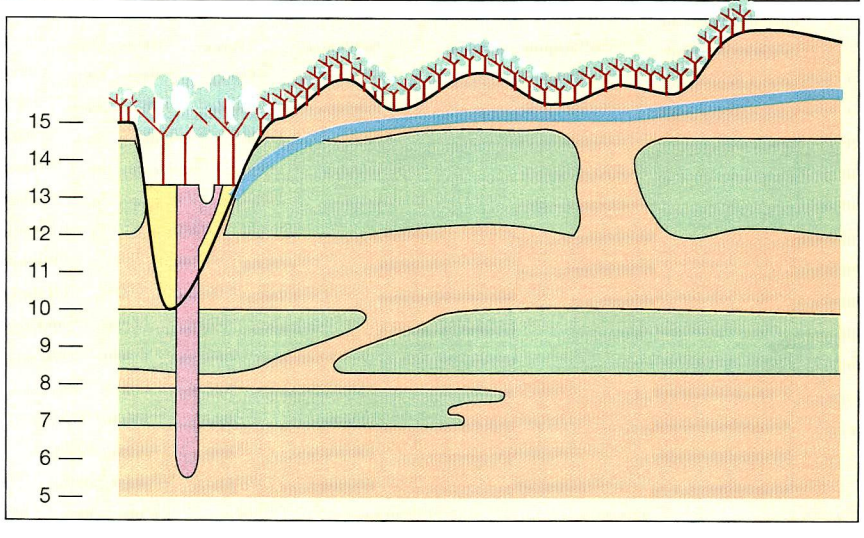

Tijdens het Weichselien (65.000 B.P.) worden duidelijk valleien gevormd en gedurende het Weichsel-pleniglaciaal (50.00-13.000 B.P.) opgevuld met zanden.

65.000 - 13.000 B.P.



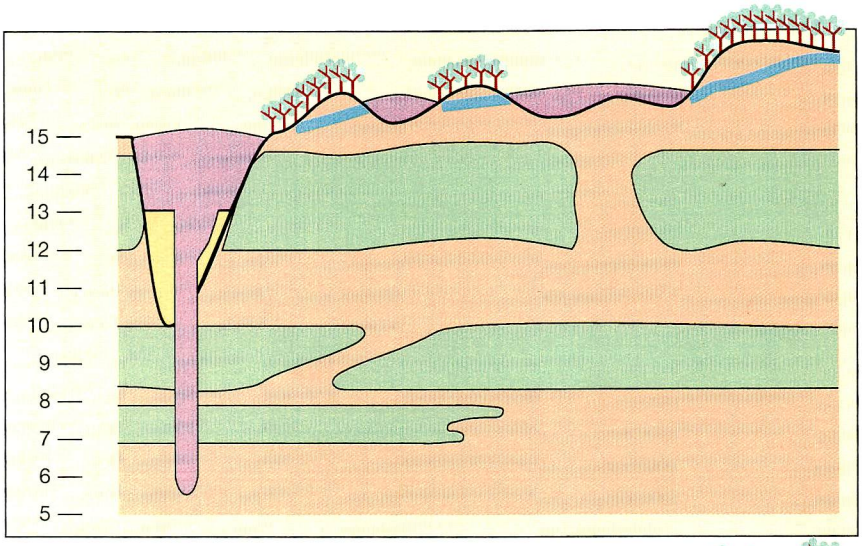

Op de overgang van het Pleniglaciaal naar het Laat-Glaciaal ontstond door insnijding een meanderend beeksysteem met een opmerkelijk diepe insnijding welke rond 11.850 B.P. stopte. Hierdoor trad verdroging direct langs de beken op. Hierdoor blokkeerden dekzandruggen op verschillende plaatsen de beekdalen waardoor bovenstrooms meren ontstonden.

12.000 B.P.



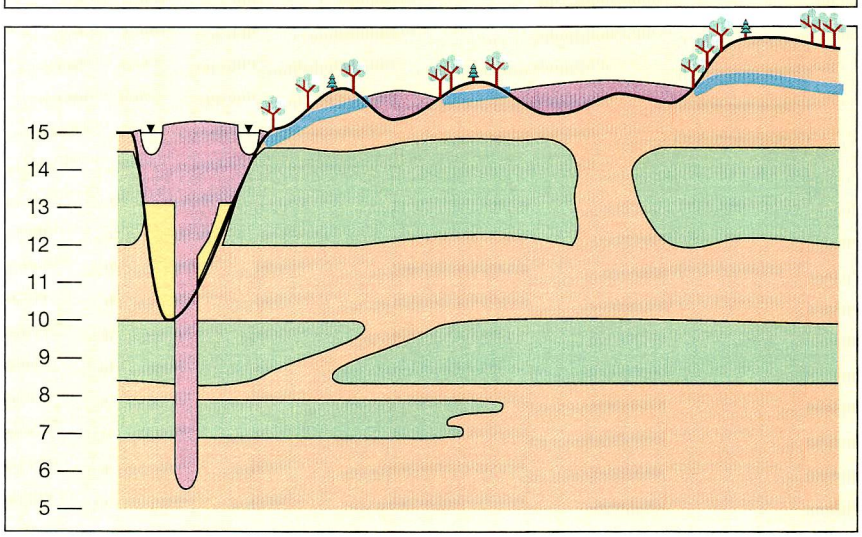

Tijdens het Alleröd (11.800 - 11.000 B.P.) werden de beekdalen relatief snel opgevuld met veen. Als gevolg van de stijgende grondwaterstand kwamen lage zones op de interfluvia onder invloed van het grondwater.

11.000 B.P.



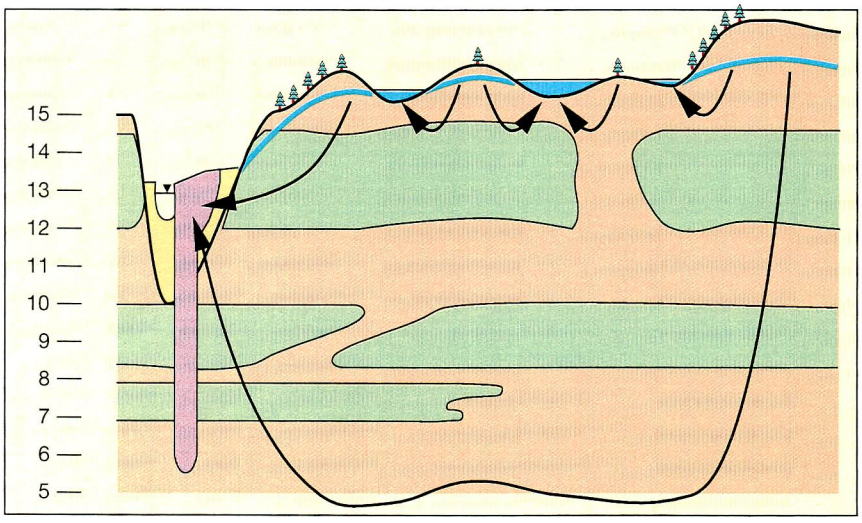

Vanaf het begin van het Atlanticum had de moerasbegroeiing zich zo uitgebreid dat zich een diffuus drainagesysteem ontwikkelde. Deze moerassen werden grotendeels gevoed door opstijgend grondwater. Tot het einde van het Atlanticum zou een stroomdraad ontbreken.

8000 B.P.




Tijdens de overgang van het Atlanticum naar het subboreaal (ca. 5000 B.P.) herstelde zich de smalle beekmeander a.g.v. een daling van de effectieve neerslag en mogelijk a.g.v. de start van de landbouw op de hogere gronden.

5000 B.P.




Rond 1200 startte a.g.v. houtgebrek de turfwinning. Wat achter bleef was een uitgestrekte zone met vennen en natte heide.

1000 A.C.

*Fig. 2.1: Het ontstaan van het grondwatersysteem rond de beekdalen.*

# 3 Een grondwatermodellering over een periode van 130 jaar tussen 1860 en 1990

**Auters: R.J. Stuurman**
**A.H.M. Kremers**
**J.L. van der Meij**

## 3.1 Inleiding

Uit verschillende studies is bekend dat in veel beekdalen de natuurwaarden samenhangen met het voorkomen van opstijgend grondwater. Als gevolg van deze kwelsituatie ontstaat namelijke een specifieke natte, zwak zure tot basische standplaatssituatie met bijbehorende bodemprocessen. Zoals bekend heeft dit standplaatstype de afgelopen decennia veel te lijden gehad van verdrogingsprocessen. Als gevolg hiervan zijn grote oppervlakten basische standplaats geleidelijk verzuurd of geëutrofieerd.
Wat betreft deze verdrogende processen roept zich de vraag op voor welke procentuele bijdrage de verschillende waterhuishoudkundige veranderingen verantwoordelijk zijn. Omdat deze veranderingenen vaak geleidelijk over een tijdstermijn van verschillende tientallen jaren plaatsvinden roept zich tevens de vraag op met welke snelheid of liever gezegd met welke vertraging deze veranderingen op de kwelsituatie in het beekdal doorwerken.

Bovenstaande vragen zijn uitgewerkt in het kader van de TNO doelsubsidie van het Ministerie van Landbouw. Hierbij is uitgegaan van een bestaande lokatie. Deze betreft het beekdal van het Merkske in de provincie Noord-Brabant en dan in het bijzonder de Halsche Beemden (zie figuur 3.1). Het onderzoek bestond uit metingen in het veld en een grondwatermodelstudie.

## 3.2 De opzet van het onderzoek

Tijdens het onderzoek vond min of meer gelijktijdig de modelstudie als het veldonderzoek plaats.
Binnen het modelonderzoek werd in eerste instantie de langjarige effecten van tijdsafhankelijke veranderingen in de grondwaterstroming bestudeerd. Hierbij werd 1860 als uitgangsdatum gekozen. Deze datum werd min of meer representatief geacht omdat toen het Waterschap nog niet was opgericht en grondwaterwinning niet plaatsvond. Daarnaast zijn sinds deze datum redelijk nauwkeurige landgebruikskaarten aanwezig.
Gebruik werd gemaakt van de USDS modelcode MODFLOW. Voor elke randvoorwaarde van het model werd een continue of discrete tijdreeks opgesteld waarbij gebruik gemaakt werd van historische archieven en tijdreeksmodellering.

Op basis van het veldonderzoek werd de actuele grondwatersituatie in het beekdal bepaald. Hierbij werd aandacht besteed aan de fluctuaties in grondwaterstanden, grondwaterstijghoogten en oppervlaktewaterpeilen in relatie tot de bodem- en hydrochemie in de wortelzone. Deze metingen vonden plaats in een raai die loodrecht op de beek gesitueerd werd. Er werd gebruik gemaakt van bestaande peilbuizen en nieuw geinstalleerde buizen waaronder een ca, 18 meter diep meetpunt welke uitgerust werd met minifilters. Daarnaast vonden op verschillende data metingen plaats volgens de zogenaamde boorgatmethode.
Het veldonderzoek moest inzicht geven in de actuele tijdsafhankelijke grondwatersituatie.

## 3.3 De ligging van het onderzoeksgebied

Het studiegebied ligt binnen het West-Brabantse stroomdal van het Merkske ten zuiden van Breda. De dichts bijgelegen grotere gemeenten zijn Baarle Nassau/Hertog en Hoogstraten (België). Het stroomgebied heeft een landgebruik van 70 % landbouw en 30 % bos. Het agrarisch landgebruik bestaat uit wissselend mais en grasland ten bate van de intensieve veeteelt. Dit laatste brengt op vele plaatsen overbemesting met zich mee.
De verintensivering van het agrarisch landgebruik ging samen met een toename aan drainagemiddelen. Omdat de beekloop de staatsgrens vormt is deze echter bespaard gebleven voor kanalisatie. Wel heeft met de tijd een verbreding en verdieping plaatsgevonden.

Grote industriële grondwaterwinningen of waterwinningen voor de drinkwatervoorziening vinden binnen het beekdal niet plaats. Wel bevindt zich op de waterscheiding te Baarle Nassau/Hertog een winning voor mineraalwater (Bar-le-Duc). Op iets grotere afstand bevinden zich enkele Belgische grondwaterwinningen te Hoogstraten, Meerle en Merksplas. De laatste jaren vindt wel een duidelijke toename plaats aan beregingsputten.

## 3.4 De hydrogeologische opbouw

Zowel de dynamiek van de grondwaterstroming als die van de oppervlaktewaterafvoer wordt bepaald door een dunne laag dekzand en de ondiepe ligging van de top van de Kedichem-Tegelen Formaties. Plaatselijk dagzomen deze formaties, terwijl in veel gevallen de sloten zijn gegraven tot aan de top van deze formaties.

Van boven naar beneden kunnen de volgende hydrogeologische eenheden worden onderscheiden (zie figuur 3.2):

1. Een relatief dun watervoerend pakket bestaande uit fijne zanden van de Formatie van Twente. De laagdikte varieert van nul tot enkele meters;
2. Een slecht doorlatend, ca. 40 meter dik, pakket dat bestaat uit zeer fijne zanden met naar boven toe steeds meer kleilenzen. De bovenste tien meter bestaat hoofdzakelijk uit klei;
3. Een watervoerend pakket dat bestaat uit grove, schelpenrijke zanden van de Formatie van Maassluis;
4. Een enkele decimeters tot enkele meters dikke, niet aaneengesloten, kleilaag ( Kallo klei= top van Formatie van Oosterhout);
5. Het diepste watervoerende pakket bestaat uit zeer schelpenrijke zanden;
6. De zogenaamde slecht doorlatende basis bestaat uit zeer fijne zanden van de Formatie van Breda met daaronder de tientallen meters dikke homogene Boomse klei (Formatie van Rupel).

Op regionale schaal dagzomen de watervoerende eenheden in Belgie terwijl de lagen in noordelijke richting hellen. De grondwaterscheiding ligt ten hoogte van de zogenaamde Microcuesta van de Kempen (zie figuur 3.3).

## 3.5 De modelopbouw

### 3.5.1 Methode

Om de tijdsafhankelijke aspecten van grondwaterstroming rond een beekdal te simuleren is gekozen voor een transsect-benadering loodrecht op het beekdal en evenwijdig met de regionale grondwaterstroming in de diepe watervoerende pakketten.
Voor dit transsect is vervolgens onderzocht welke waterhuishoudkundige veranderingen gedurende de afgelopen 160 jaar hebben plaatsgevonden.
De tijdsafhankelijke randvoorwaarden voor wat betreft neerslag, verdamping, beekpeil en stijghoogte in het diepe watervoerende pakket zijn gereconstrueerd op maandbasis. Hierbij is gebruik gemaakt van bestaande tijdreeksen welke met behulp van tijdreeks- en regressieanalyses in de tijd werden terug geëxtrapoleerd.
De verandering van het landgebruik en het draingesysteem is gereconstrueerd aan de hand van oude kaarten tot vier tijdvakken.
De simulatie vond plaats met de modelcode Modflow.

### 3.5.2 Hydrogeologische model schematisatie

De hydrogeologische opbouw van het model bestaat uit vijf eenheden (zie figuur 3.4):

1. Een dun freatische watervoerend pakket van zandig materiaal (Kh=7,5 m/d);
2. Het bovenste, 12-20 meter dikke, kleilagen rijke traject van de Kedichem-Tegelen formaties (Kh=2, Kv=0,03 m/d);
3. Het diepere, zandiger, traject van de Kedichem-Tegelen Formaties (Kh=2,5, Kv=2,5 m/d);
4. De grove zanden van de Formatie van Maassluis (Kh=20, Kv=20 m/d);
5. Een smalle veeninschakeling (Kh=0.1, Kv=0.1 m/d) in het beekdal welke zich tot circa 10 meter diepte in de Kedichem-Tegelen kleilagen heeft ingesneden.

Het transsect ligt tussen twee waterscheidingen waardoor de modelzijranden dicht verondersteld mogen worden. De onderrand bestaat uit een dynamische stijghoogte-randvoorwaarde aan de onderzijde van de grove zanden van de Formatie van Maassluis. De bovenrand bestaat uit een dynamisch beekpeil, een dynamisch neerslagoverschot terwijl voor de drainage en landgebruik een viertal tijdvakken worden onderscheiden.
De gesimuleerde periode betreft het tijdvak 1860-1990 waarbij de dynamische randvoorwaarden op maandbasis gedifferentieerd zijn. Deze reeksen zijn deels gereconstrueerd.

### 3.5.3 Toepassing van statistiek (tijdreeks-analyse en regressie) ten bate van het opstellen van de tijdsafhankelijke randvoorwaarden

Statisch modelleren gaat uit van de wetmatigheden die in gemeten data aanwezig zijn. Als deze wetmatigheden bekend zijn kunnen ze gebruikt worden om ondermeer, hiaten in de beschikbare gegevens aan te vullen. Tijdreeks-analyse, in het bijzonder transfer-modellering en ook regressie-technieken zijn in dit onderzoek gebruikt om op statistisch verantwoorde wijze, invulling te geven aan bv. onbekende stijghoogte- en beekpeil-standen.

**transfer-modellering**

Bij stijghoogte-transfermodellering wordt met een beperkt aantal parameters een zo goed mogelijke karakterisatie gemaakt van de relatie tussen enerzijds een stijghoogte-reeks en anderzijds één of meerdere 'verklarende' reeksen.
Allerlei onbekende (antropogene) beïvloedingen van de 'output-'reeks komen tot uiting in de vorm van de zgn. 'residu-reeks'. De residu-reeks is het verschil tussen de (som van de) verklarende reeks(en) en de gemeten reeks en bevat dus alle variaties die niet te relateren zijn aan de verklarende 'input-'reeksen.
Indien alle drijvende krachten bekend zijn en de modellering dermate goed is dat alle informatie uit de meetreeks met het model is vastegelegd zal deze residu-reeks geen samenhang meer met de tijd vertonen (witte ruis).

Het stijghoogte-verloop kan met deze techniek bijvoorbeeld worden uitgesplitst naar een - lineaire - transformatie van één of meerdere verklarende componenten. In sommige stiuaties vertoont het residu toch een tijds-afhankelijke samenhang (trend). Er is dan nog sprake van één of meerdere - onbekende - verklarende/drijvende kracht(en) die niet in de transfermodellering is meegenomen. Wellicht kan op grond van hydrologische (gebieds-)kennis vervolgens dit trendmatige verloop toegekend worden aan een - vermoedelijke - bekende drijvende kracht. Hiermede kan dan toch extra, tot dan toe niet exacte, informatie verkregen worden.

Een belangrijk verklarende component van het stijghoogte-verloop zijn de schommellingen van het klimaat, weerspiegelt door het neerslag-overschot-verloop. Het uitsplitsen van een stijghoogte-reeks naar de verklarende component 'neerslag-overschot' heeft als grote voordeel dat een model geschat wordt dat daadwerkelijk afhankelijk is van natte en droge perioden.
Het vervolgens modelleren van de residu-reeks kan bv informatie opleveren over de mate van daling van de stijghoogte als gevolg van grondwaterwinning. Tesamen kunnen deze twee modellen een totaal-beeld opleveren van historisch verklarende componenten. In het geval dat voor een bepaalde periode een transfermodel berekend is, kan voor een periode waarvan geen historische meetgegevens bekend zijn echter men beschikt wel over een 'input-'reeks een output-reeks gegenereert worden.

Over de periode 1952-1990 zijn bijvoorbeeld gemeten peilen bekend van een stuw in het Merkske. Echter, vroegere gegevens ontbreken.
Met behulp van tijdreeks-analyse/transfer-modellering kan voor bovengenoemde situatie de ontbrekende peil- en stijghoogte-data voor de periode 1860-1967 gegenereert worden.

**regressie-techniek**
Regressie-techniek (lineair/niet-lineair) kan toegepast worden in situaties waarin er een correlatie is tussen een te schatten, op zekere lokatie onbekende variabele, en een bekende variabele elders. In dit onderzoek is gebruikt gemaakt van de correlatie in neerslag en verdamping van het KNMI-meetstation Hoofddorp en het meetstation Oudenbosch.

### 3.5.4 De bepaling van het langjarig verloop van neerslag en verdamping

Het KNMI heeft een aantal lange meetreeksen gepubliceerd van neerslag- en verdampingscijfers voor een aantal meetstations in Nederland. Van ondermeer van de stations Hoofddorp en Oudenbosch (westelijk Noord-Brabant) zijn maandelijkse gegevens beschikbaar. Van de periode 1861-1979 zijn neerslag-gegevens beschikbaar van het station Hoofddorp. Vanaf 1911 tot 1979 zijn voor het station Oudenbosch neerslag- en verdampingscijfers beschikbaar. Van de periode 1979-1990 zijn alleen neerslag-gegevens beschikbaar.

Voor wat betreft neerslag-cijfers is mbv. lineaire-regressie de data van Oudenbosch terugwaarts aangevuld op basis van de beschikbare gegevens van station Hoofddorp.
Gemiddelde maand-cijfers van verdamping van station Oudenbosch zijn gebruikt om de Oudenbosch-verdampingscijfers (terugwaarts en tot heden) aan te vullen. Bij het bepalen van de werkelijke verdamping is vervolgens rekening gehouden met het in de tijd veranderde landgebruik.

### 3.5.5 De bepaling van het langjarig verloop van het beekpeil

Beschikbaar is het peilverloop te Castelre over de periode 1952-1993 (zie figuur 3.5), enkele kilometers stroomafwaarts van de Halsche Beemden. Met behulp van de hierboven gegenereerde data betreffende neerslag en verdamping is een transfermodel geschat van het beekpeil, welke vervolgens gebruikt is om terugwaarts in de tijd beek-peilen te genereren. Het onverklaarde deel van de meetreeks - wat dus alle (antropogene) variaties bevat die niet te relateren zijn aan het klimaat - is vervolgens via niet-lineaire regressie (mbv GENSTAT) gemodelleerd om ook hiervan een model te hebben en te superponeren op het beekpeil op basis van alleen het klimaat.

### 3.5.6 De bepaling van het langjarig verloop van de stijfhoogten in het eerste watervoerende pakket

Voor de bepaling van het stijghoogte-verloop in het Maassluis-pakket is een vergelijkbaar proces gevolgd maar dan toegepast op beschikbare gegevens van de binnen het transsect gelegen meetlokatie 50D P 0008 (1967-1990). Ook hier is het onverklaarde deel dat resteerde na de transfer-modellering, ook nog gemodeleerd (niet-lineaire regressie) om voor een trendmatig verloop (daling) te kunnen corrigeren.

### 3.5.7 De verandering in het landgebruik en het secundaire en/of tertiaire ontwateringsstelsel

Na bestudering van verschillende topografische kaarten konden vier perioden worden onderscheiden waarbinnen het landgebruik en het drainagestelsel min of meer is gelijk gebleven:

1. de heide periode ( 1850-1890 );
2. de naaldbosperiode (1890-1960);
3. de graslandperiode (1960-1986);
4. de maisperiode (1986-heden).

### 3.5.8 De modelbeperkingen in relatie tot de werkelijkheid

De tijdens deze studie opgestelde modelschematisatie staat, ondanks de introductie van het gebruik van langjarige tijdreeksen als randvoorwaarden, nog steeds veraf

van van de werkelijkheid. De hydrogeologische eenheden zijn bijvoorbeeld homogeen verondersteld. Vermoedelijk speelt juist deze beperking een negatieve rol bij het zo getrouw mogelijk simuleren van de kwelstroming rond een beekdal. In werkelijkheid bestaat het slecht doorlatende pakket immers uit een stelsel van kleilenzen in een matrix van fijn zand. Deze wordt nu geschematiseerd door een homogene weerstand wat het gevolg heeft dat de opstijgende stroombanen 'numeriek' naar het beekdal worden getrokken.
Andere onbetrouwbare modelparameters zijn de geschatte bergingscoefficienten, de veronderstelde homogene verdeling van het neerlagoverschot, de abstarctie van de meteorologische data tot maandvolumen.

## 3.6 De modelresultaten

### 3.6.1 De bepaling van het dynamisch invloedsgebied voor elke afzonderlijke randvoorwaarden

*Inleiding*
In deze paragraaf worden de resultaten beschreven van een gevoeligheidsanalyse. Hierbij is systematisch gerekend met één dynamische randvoorwaarde terwijl de rest van de randvoorwaarden stationair bleven. Als resultaat wordt de ruimtelijke variatie van de stijghoogte getoond.

*Gevoeligheid van de stijghoogte als gevolg van tijdsafhankelijk neerslagoverschot.*
Uit de bijlagen 1 t/m 3 blijkt dat de gevoeligheid voor variaties in het neerslagoverschot zeer groot is. Alleen tijdens de heide-periode (1861-1894) hadden tijdsafhankelijke variaties in het neerslagoverschot geen invloed op de stijghoogten direct onder en direct langs de beek. Deze zone langs de beek bedroeg slechts enkele tientallen meters. Tijdens de latere tijdvakken, waarbij ook de ondiepe afvoer via het ontwateringssysteem is meegenomen, is te zien dat de gevoeligheid voor fluctuaties in het neerslagoverschot in het beekdal sterk toeneemt.

*Gevoeligheid van de stijghoogte als gevolg van tijdsafhankelijk beekpeil*
In de bijlagen 4 t/m 7 worden de stijghoogtevariaties getoond bij beekpeilfluctuatie voor de verschillende historische perioden.
Duidelijk is zichtbaar dat het beekpeil binnen het beekdal slechts een invloedszone van 10-30 meter heeft. Dit lokale invloedsgebied lijkt over de periode van 130 jaar nauwelijks te veranderen.
Tijdens de heideperiode (1861-1894) heeft het beekpeil ook bovenlokaal een geringe invloed gehad op de grondwaterstand. In latere perioden lijkt deze invloed niet meer aanwezig te zijn. Dit wordt echter veroorzaakt door de wijze van modelleren. Na de heideperiode wordt namelijk het drainagesysteem geintensiveerd. Eerst tijdens de bosperiode worden ten bate van de bosaanplant

rabatten aangelegd, later tijdens de weide- en maisperiode wordt het netwerk van diepe greppels geïntensiveerd.
Tijdens het modelleren wordt echter uitgegaan van gemiddelde (stationaire) peilen voor deze ontwateringsmiddelen waardoor hier virtueel de invloed van de beek wordt uitgevlakt. Dit geldt dus als het ontwateringssysteem gevuld is. Als deze droog valt zal de beek ook bovenlokaal een geringe invloed krijgen.

*Gevoeligheid van de stijghoogte als gevolg van de tijdsafhankelijk stijghoogte in het eerste watervoerende pakket*
Tijdens dit scenario werd de ruimtelijk invloed bestudeerd voor stijghoogtefluctuaties in het eerste waterveorende pakket. Tijdens de heideperiode blijken de grondwaterstanden en stijghoogten in de bovenste meters onder het hele beekdal ongevoelig. Wel de stijghoogten in het beekdal dieper dan 10 meter bleken gevoelig. Tijdens latere perioden lijkt de invloed relatief het zelfde te blijven. Alleen rond het stationair veronderstelde ontwateringsmiddel is de invloed dan minimaal.

*Conclusies ten aanzien van de ruimtelijke invloed van de verschillende randvoorwaarden*
Op basis van de in de vorige paragrafen beschreven berekeningen kan doormiddel van superpositie worden getoond hoe de invloed van de verschillende randvoorwaarden zich tot elkaar verhouden. Hierbij is gebruik gemaakt van een driehoeksdiagram waarin neerslagoverschot (incl. afvoer door drainage), stijghoogte en beekpeil invloeden tegen elkaar zijn afgezet.

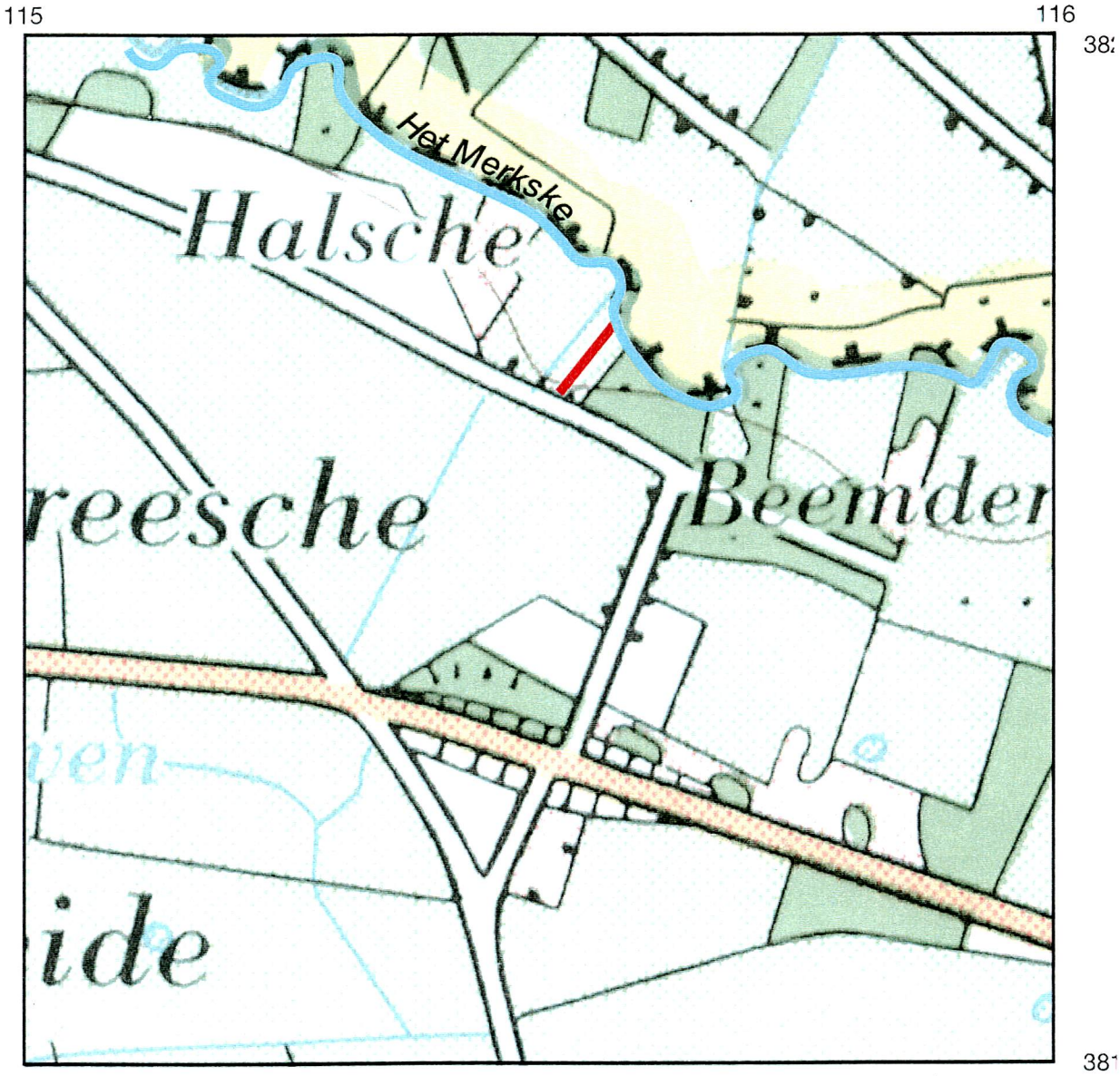
### 3.6.2 De wijzigingen binnen het stromingssysteem als gevolg van waterhuishoudkundige veranderingen gedurende de afgelopen honderd jaar

De veranderingen in het stromingssysteem als gevolg van de waterhuishoudkundige veranderingen en klimaatschommelingen worden op drie manieren gepresenteerd; (1) stationaire stromingspatronen voor de verschillende, wat landgebruik en drainage betreft, homogene perioden, (2) de ruimtelijke reistijdspreiding voor de verschillende homogene perioden en (3) tijdsafhankelijke stroombanen.

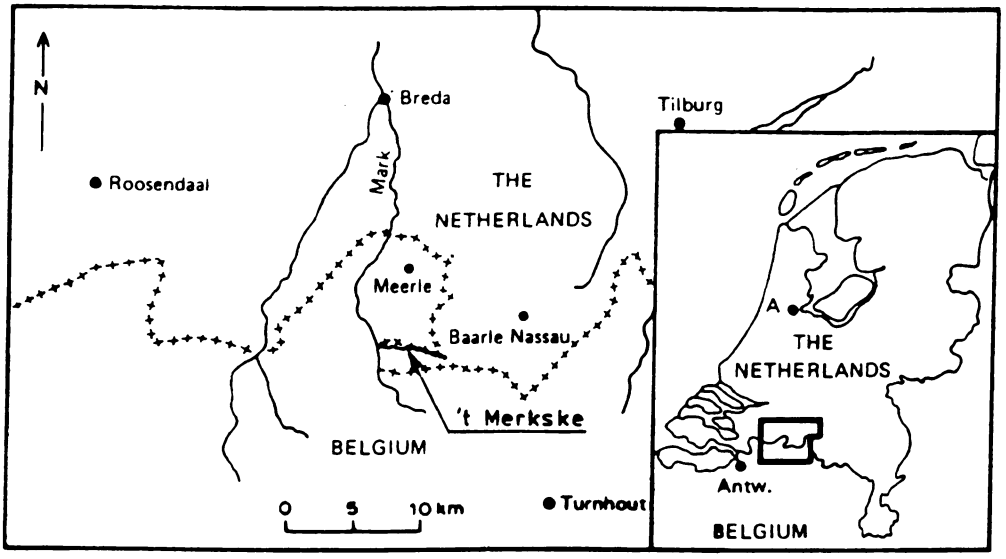
In de figuren 3.6 en 3.7 wordt het stationaire stromingsbeeld tijdens respectievelijk de heide-periode als de maisperiode getoond. Duidelijk zichtbaar is dat de stroming in het boven het beekdal van 'infiltratie naar grote diepte' overgaat in ondiepe grondwaterstroming. De beekdalranden stonden vroeger onder invloed van diepe kwel maar komen later meer onder invloed van lokale stroming.

In figuur 3.8 worden enkele tijdsafhankelijke stroombanen getoond. De stroombanen zijn berekend op basis van gemiddelde jaarlijkse stijghoogtevelden

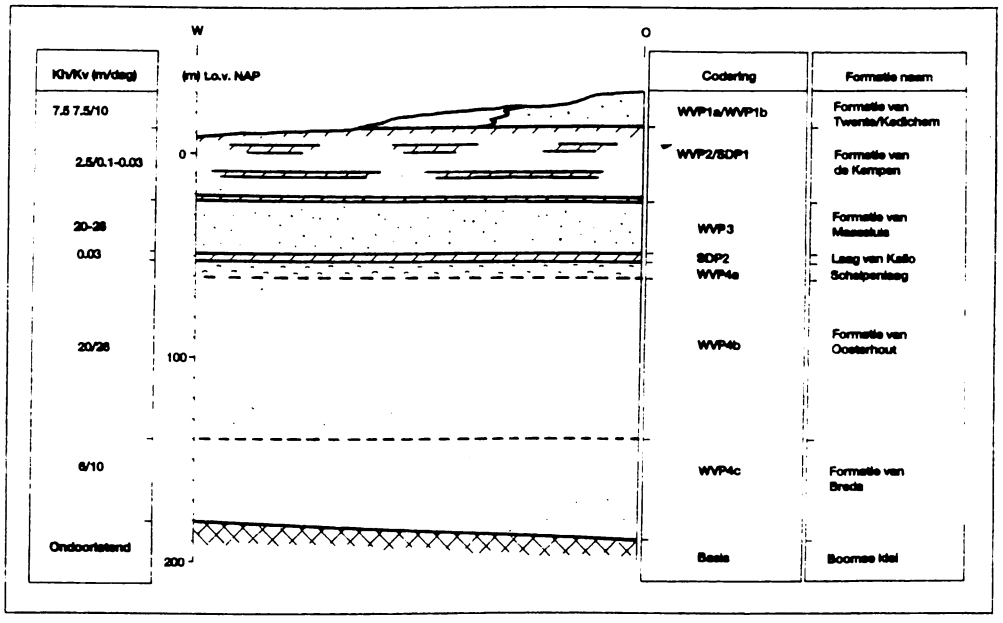
(1860-1990). Met name langs het beekdal lijken de stroombanen zichtbaar beïnvloed door tijdsafhankelijke processen.
In figuur 3.9 worden de reistijden van het infiltrerende water langs de beekdalen getoond. In de kwelzone vanuit het watervoerende pakket was dit (theoretisch) niet mogelijk. De figuren tonen duidelijk de verandering die is ontstaan in reistijden als gevolg van een veranderde waterhuishouding.
Opmerkelijk is dat in de infiltratiezonde de reistijden naar het diepere watervoerende pakket zijn verdubbeld.



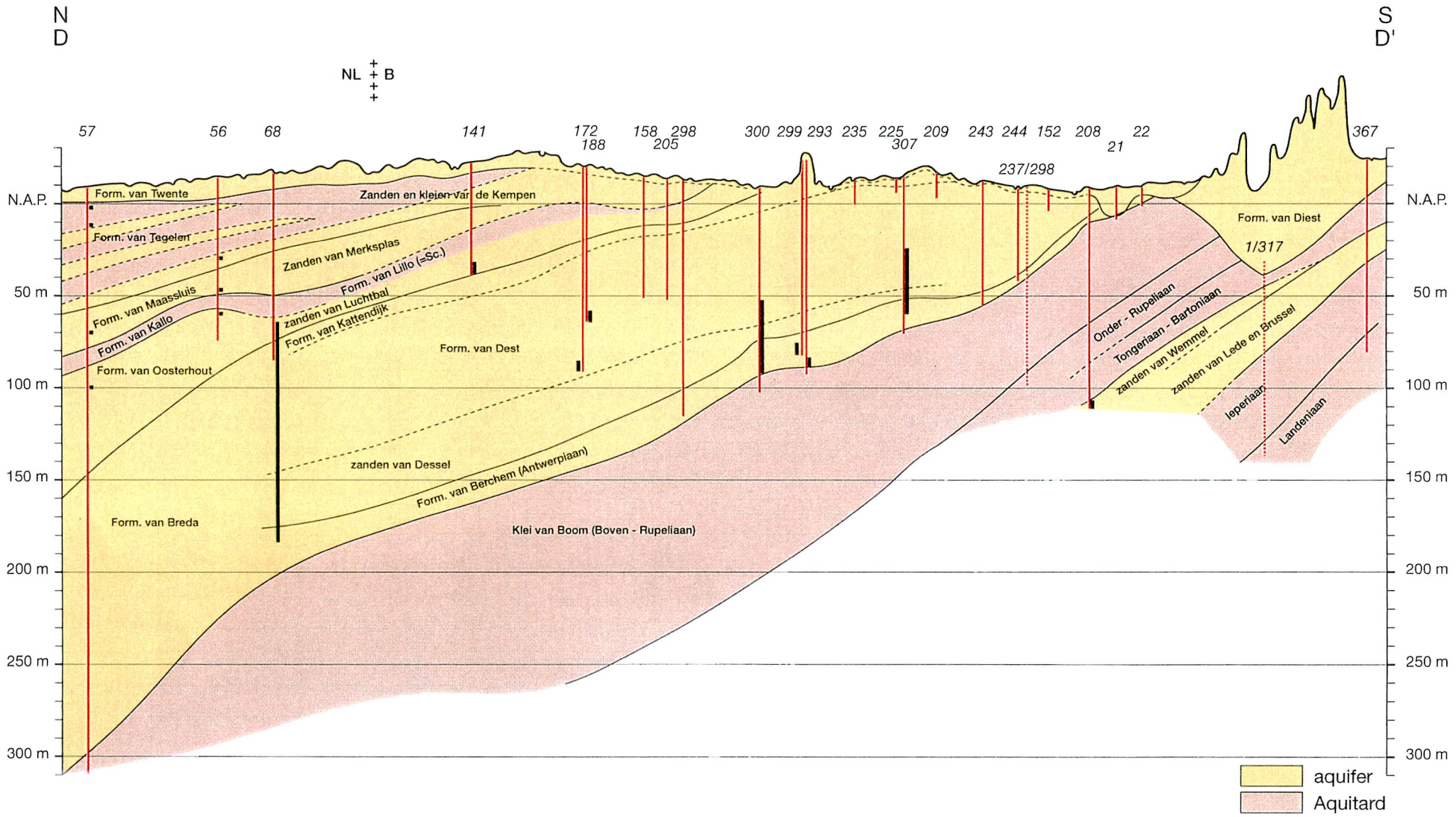

*Figuur* 3.1 *De ligging van de Halsche Beemden in het beekdal van Het Merkske ten zuiden van Breda.*




De lokatie van het Merkske ten zuiden van Baarle-Nassau

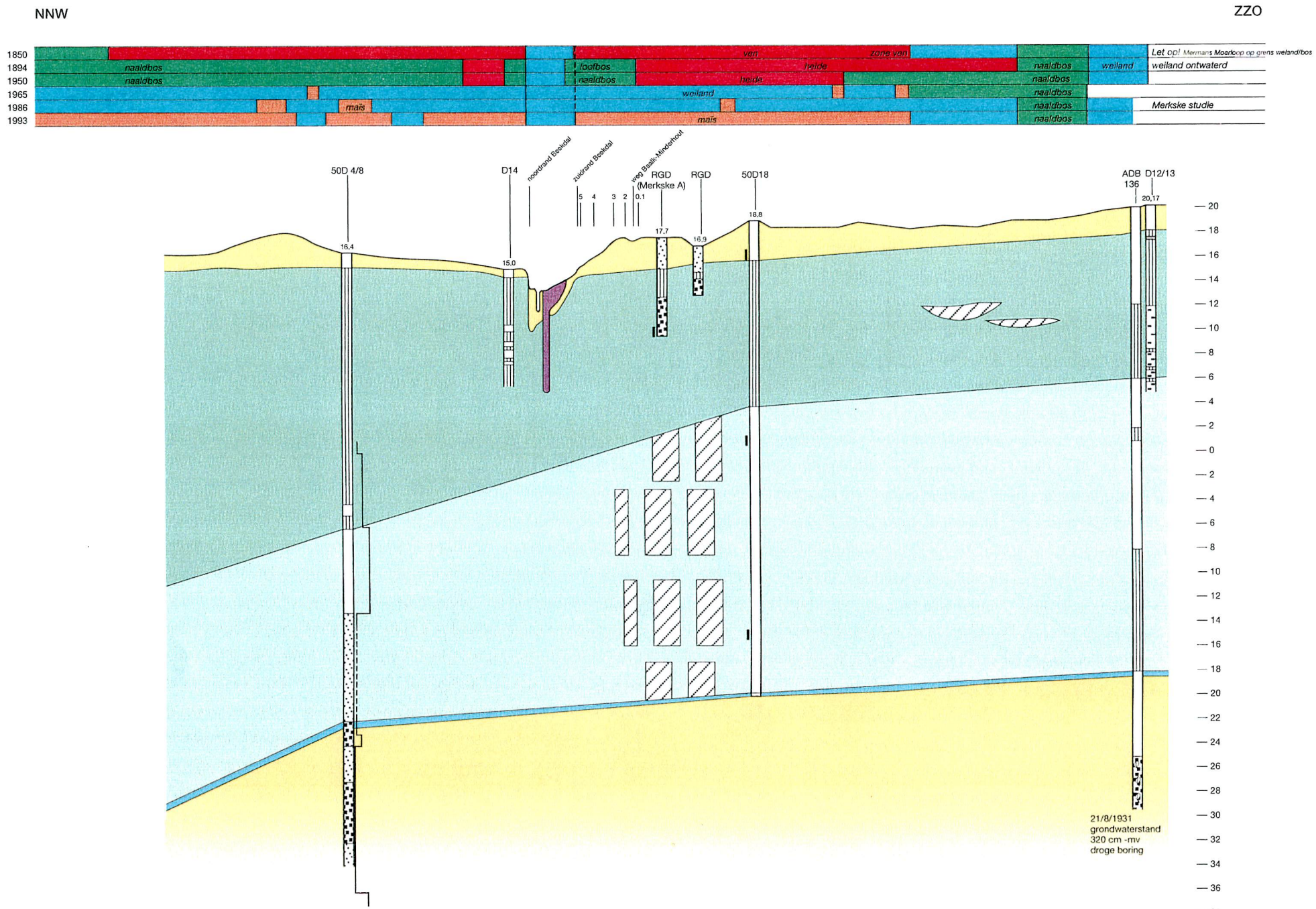



Figuur 3.2 De hydrogeologische opbouw in het Merkske stroomgebied.



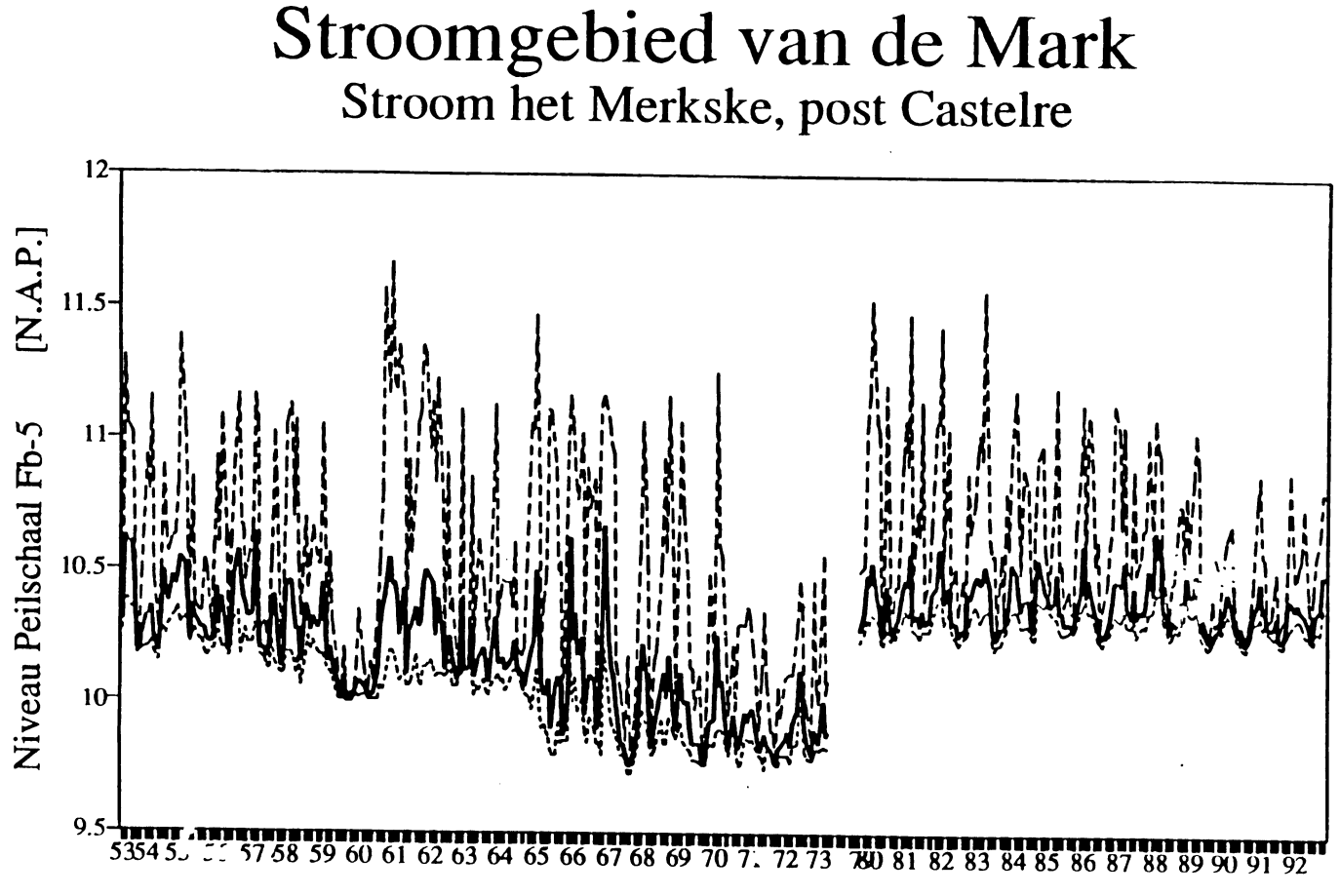

*Figuur* 3.3 *Een regionaal noord-zuid profiel loodrecht over Het Merkske.*

Geujen 96W-01




*Figuur* 3.4 *Een schematische weergave van de modelopbouw.*

stuurman 94-01

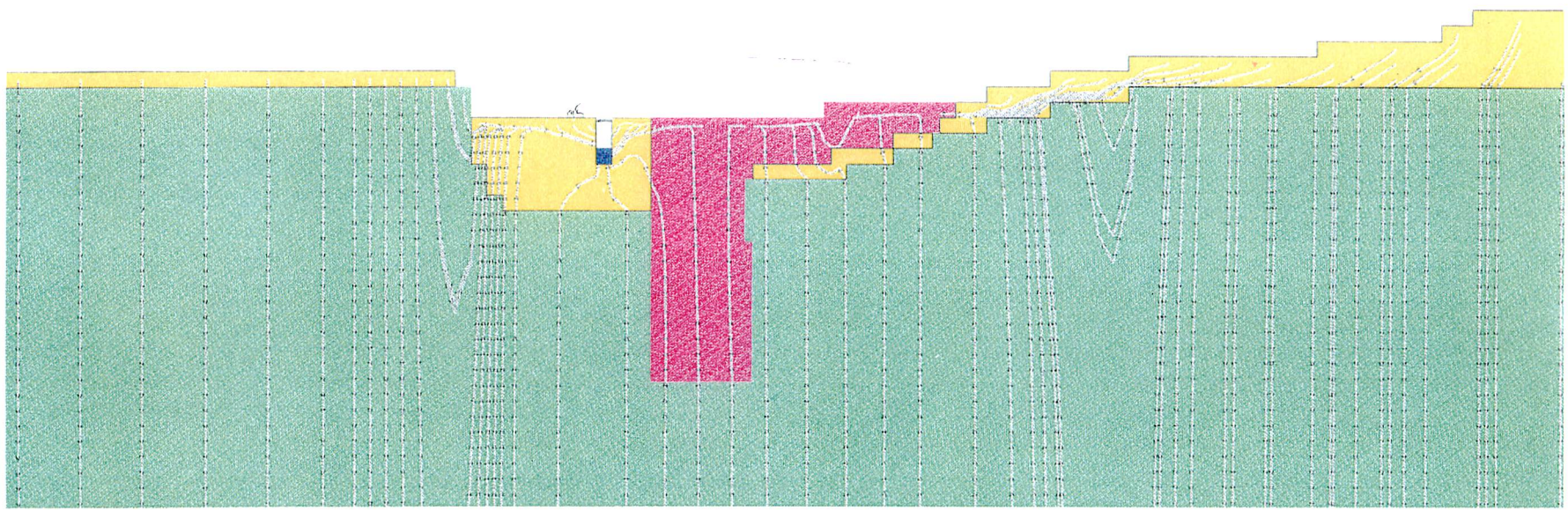



Figuur 3.5 Het verloop van het beekpeil ten hoogte van Castelré, stroomafwaarts van de Halsche beemd.

Legenda:

Titel:

HALSCHE BEEMDEN



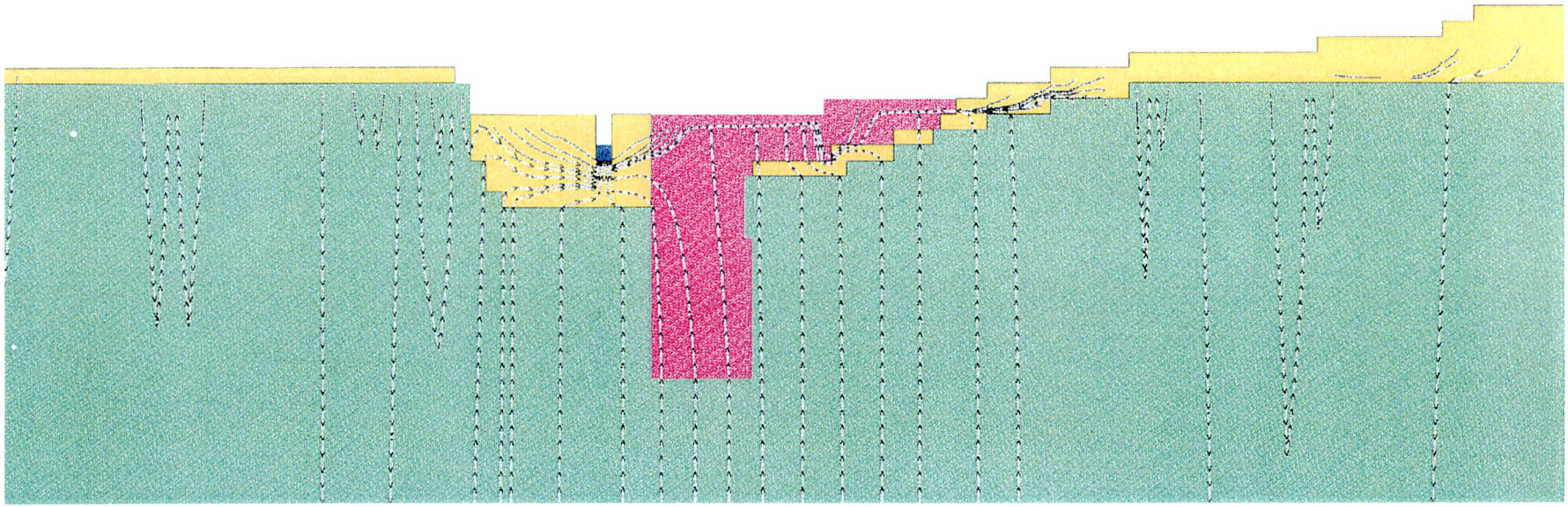
Figuur 3.6 Het stationaire stromingssysteem tijdens de heideperiode (1861-1894).

C o l o f o n :

Legenda:

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN



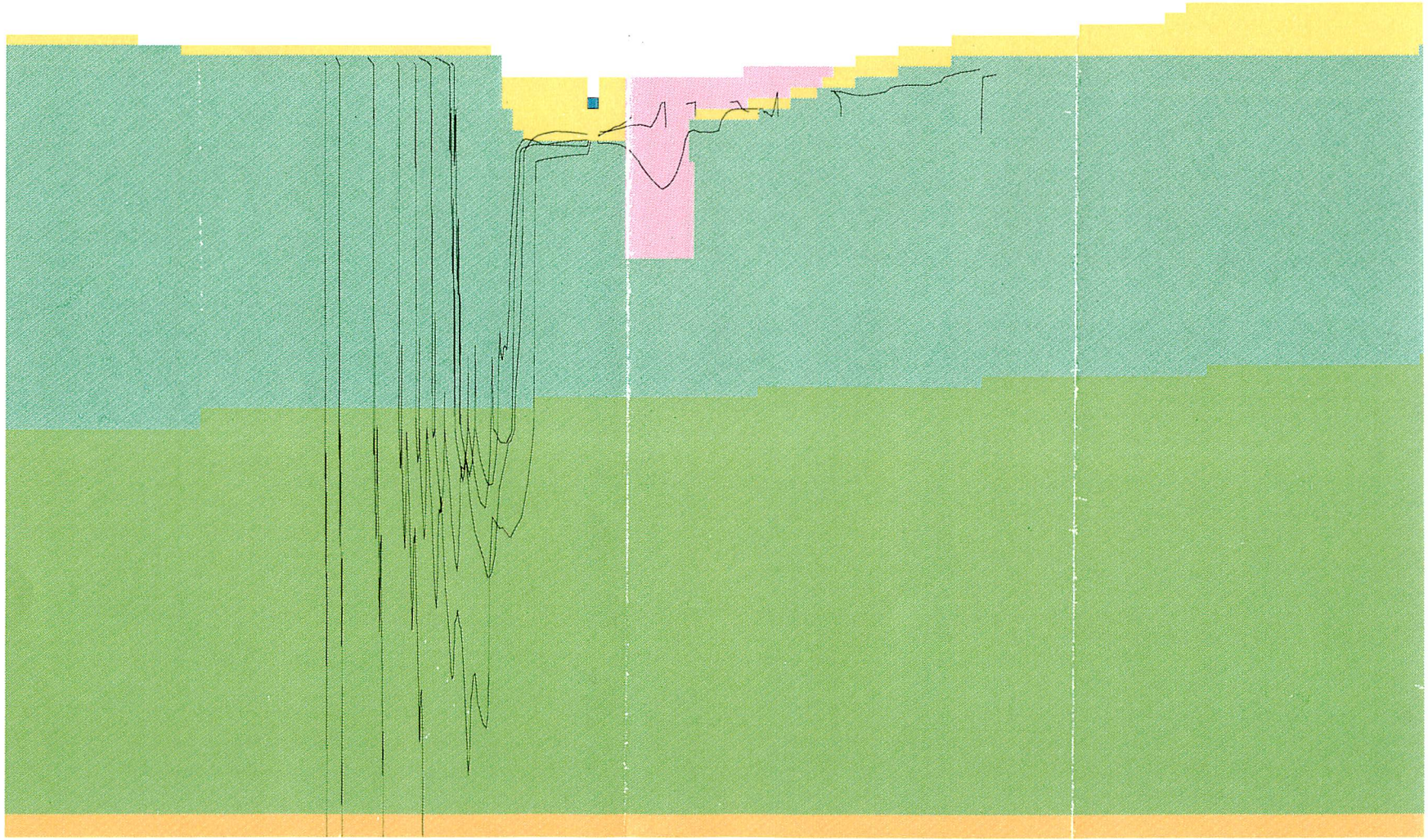
Figuur 3.7 Het stationaire stromingssysteem tijdens de maisperiode (1986-1990).

C o l o f o n :

TNO Grondwater en Geo-energie | Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels | In opdracht:

Legenda:

Titel:



Colofon:

Figuur 3.8 Enkele tijdsafhankelijke stroombanen op basis van gemiddelde jaarlijkse stijghoogtevelden (1860-1990)

'96-02-15 - TKG

Titel:

1860

TNO Grondwater en Geo-Energie

Titel:

1990

Figuur 3.9 Reistijden, vroeger en nu, rond het beekdal

TNO Grondwater en Geo-Energie

# 4 Een analyse van de relatie tussen beekpeil en beekafvoer

**Auteurs: J.W. Foppen**
**R.J. Stuurman**
**J. Griffioen**

## 4.1 Inleiding

In dit rapport wordt in twee stappen aan de hand van een bestaande situatie de oppervlaktewaterkwaliteit berekend, zoals die bij benadering moet zijn geweest in de vorige eeuw.
De eerste stap (hoofdstuk 4.2 en 4.3) is om de gemeten afvoer te analyseren en te bepalen wat de herkomstgebieden zijn. Van de Strijbeekse beek, ten oosten van Strijbeek in Noord-Brabant zijn dagelijkse waterhoogten gemeten in de zestiger jaren. Met behulp van een Q-h relatie zijn deze waterhoogten omgerekend naar debieten. Vervolgens zijn de debieten m.b.v. de zgn. reservoirbenadering (De Zeeuw, 1966) geanalyseerd. Hieruit zijn een aantal reservoirkarakteristieken voor het stroomgebied bepaald en de waarden van deze karakteristieken zijn veranderd om de situatie, zoals die rond de eeuwwisseling heerste (de zgn. uitgangssituatie), te benaderen.
Vervolgens (hoofdstuk 4.4) zijn voor deze uitgangssituatie met de modelcode PHREEQE (Parkhurst and Plummer, 19..) een aantal berekeningen uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in met name de pH, de [Ca] en [HCO3] en de verzadigingsindex van calciet van het oppervlaktewater.
In het laatste hoofstuk (4.5) van dit rapport worden de resultaten van de berekeningen van hoofdstuk 2, 3 en 4 geintegreerd en ter discussie gesteld. Bovendien worden enkele vragen geformuleerd m.b.t. tot de invloed van de veranderingen van de kwaliteits- en kwantiteitsparameters op de flora en fauna in de beek.

## 4.2 Afvoeranalyse

### 4.2.1 Inleiding

Om een goede inschatting te kunnen maken van de grootte van de verschillende componenten, die tezamen verantwoordelijk zijn voor de gemeten totale afvoer van een beek en die bepalend zijn voor de waterkwaliteit van de beek, is het noodzakelijk om allereerst de gemeten afvoer te analyseren.
In dit hoofdstuk worden de gemeten afvoeren van de Strijbeekse beek geanalyseerd m.b.v. de zgn. reservoir-benadering (de Zeeuw, 1966).
In deze benadering wordt de gemeten afvoer verklaard vanuit een gemeten neerslagoverschot-reeks. De totale gemeten afvoer is opgebouwd uit deelafvoeren vanuit verschillende reservoirs met elk hun eigen karakteristieken en met elk een

eigen reactie op een neerslagoverschot-reeks. De reservoirs kunnen vertaald worden naar verschillende min of meer typische gebiedsdelen in het stroomgebied van de beek.

### 4.2.2 Methode

Afvoergebieden zijn opgebouwd uit reservoirs, te onderscheiden in grondwaterreservoirs en oppervlaktereservoirs. Een reservoir bestaat uit één of meer ontwateringseenheden, tussen twee ontwateringsmiddelen (greppels, sloten, beken, enz.) gelegen stroken. De gelijkwaardige ontwateringseenheden binnen een afvoergebied vormen tezamen een reservoir. Ontwateringseenheden worden als gelijkwaardig beschouwd wanneer ze, wat betreft de ontwatering, onder nagenoeg dezelfde omstandigheden verkeren, d.w.z. overeenkomstige eigenschappen bezitten tussen doorlatendheid, hoogteligging, afstand tussen de ontwateringsmiddelen en andere hydrologische eigenschappen.
Grondwaterreservoirs kunnen in twee typen worden onderscheiden (fig. 4.1):
- kavelafvoerreservoirs
- kwelreservoirs.

Kavelafvoerreservoirs worden aangetroffen in met sloten doorsneden landschappen. De ontwateringseenheden zijn de kavels. Wat hun reservoirinhoud betreft reageren ze betrekkelijk snel op wisselende weersomstandigheden. Ze leveren een daarmee overeenkomende variërende afvoer, aangemerkt als kavelafvoer.
Stroken hoge gronden, al dan niet doorsneden met sloten, vormen de ontwateringseenheden van kwelreservoirs. Ze leveren kwelafvoer, die zich manifesteert als kwel in laag gelegen beekdalen. Kwelafvoer fluctueert in het algemeen aanzienlijk minder sterk in de tijd dan kavelafvoer.
Reservoirs hoeven niet constant van grootte te zijn. Bepaalde ontwateringsmiddelen vallen soms droog. De reservoirs krijgen dan andere afmetingen.
Grondwaterreservoirs liggen ruimtelijk naast elkaar en ze vullen samen het hele afvoergebied.

*Kwelafvoer*

Het verloop van de afvoerintensiteit voor kwelafvoer wordt gegeven door:

$$a_t = a_0 \exp(-\beta t) + \{1 - \exp(-\beta t)\} mp \qquad (2.1)$$

waarin

| | | |
|---|---|---|
| $a_0$ | afvoerintensiteit aan het begin van een tijdvak | [mm/t] |
| $a_t$ | afvoerintensiteit aan het einde van een tijdvak | mm/t] |
| ß | de reactiefactor van het kwelreservoir | [1/t] |
| t | lengte van het tijdvak | [t] |
| p | effectieve neerslagintensiteit over het tijdsinterval | [mm/t] |
| m | oppervlakteaandeel "op hoger peil gelegen" gronden | [-] |

Twee termen moeten nader uitgelegd worden, nl. ß en m.
De factor waarmee de in de exponent voorkomende tijd wordt vermenigvuldigd, typeert de reactiesnelheid van het reservoir. Daarom wordt deze factor aangeduid als reactiefactor. In navolging van de Zeeuw wordt in het vervolg de reactiefactor van kavelafvoer aangeduid met $\alpha$ en die voor kwel met ß.
Kraijenhoff van de Leur leidde voor $\alpha$ af:

$\alpha = (\pi^2 kD)/(l^2 \mu)$

waarin

| | | |
|---|---|---|
| $\alpha$ | de reactiefactor van het kavelafvoerreservoir | [1/dag] |
| k | doorlaatfactor | [m/dag] |
| D | dikte van de watervoerende laag | [m] |
| l | gemiddelde breedte van de ontwateringseenheid | [m] |
| $\mu$ | actief poriënaandeel | [m/m] |

De Zeeuw en Hellinga (1958) leidden voor ß af:

$ß = (8kD)/(l^2(2-m)\mu)$

Het inzijgingsgebied kan worden voorgesteld als het kwelreservoir van het beekdal. Het beekdal is veelal het gebiedsdeel met kavelafvoer. Als het kwelreservoir een lengte b heeft en de twee gebieden samen een lengte l, dan is

$m = b/l$

De rest (l-b) van het totale oppervlak wordt ingenomen door het kavelreservoir. In het algemeen geldt, dat elk reservoir, dat een deel van de totale afvoer bepaalt, een zeker oppervlakteaandeel m inneemt. Tezamen zijn de oppervlakteaandelen gelijk aan 1.

*Kavelafvoer*

De waarde, die de kavelafvoer bereikt t.g.v. een voortdurend constante neerslag, die begint aan het begin van de eerste dag, wordt gegeven door:

$$a_s = \frac{8}{\pi^2} \cdot p_{1\to s} \sum_{n=1,3,5,\ldots}^{n=\infty} \frac{1}{n^2}\left(1 - e^{\alpha t n^2 s}\right) \qquad (2.2)$$

waarin

| | | |
|---|---|---|
| $a_s$ | afvoerintensiteit aan het einde van het interval | [mm/t] |
| $p^{1\to s}$ | effectieve neerslagintensiteit aan het begin van het interval s | [mm/t] |
| n | 1,3,5,7,..... | |
| s | 1,3,5,7,..... | |

De afvoer aan het eind van de dag s tengevolge van een dagneerslag op de dag s-x wordt gevonden als het verschil tussen de afvoerbijdrage volgens form (2.2) tengevolge van een op de dag s-x om 0 uur aanvangende neerslag $p_{s-x}$, en de afvoerbijdrage, die zou ontstaan wanneer dezelfde neerslag een etmaal later zou beginnen. Deze afvoer t.g.v. een dagneerslag wordt dan

$$a_s = \frac{8}{\Pi^2} * p_{1\to s} \sum_{n=1,3,5\ldots}^{n=\infty} \frac{1}{n^2}\left(\varepsilon^{n^2 x} - \varepsilon^{n^2(x+1)}\right) \qquad (2.3)$$

waarin

$$\varepsilon = e^{-\alpha t} \qquad (2.4)$$

Hiermee is het principe van de dag voor dag berekening gegeven. Het hierna volgende leidt tot een handzame rekenmethode.
Fig. 4.2 toont schematisch de ontwikkeling van de grondwaterspiegel in een perceel. De lijnen 1 geven de grondwaterspiegel voor en de lijnen 2 vlak na een plotselinge neerslag. De lijnen 3 stellen de grondwaterspiegel voor aan het begin van het zgn. "staartverloop" van de afvoercurve van het perceel.
In fig. 4.2a is uitgegaan van een vlakke grondwaterspiegel; in fig. 4.2b is de uitgangstoestand een staartverloopgrondwaterspiegel en in fig. 4.2c was het staartverloop nog niet ingetreden. De gearceerde watermassa's veroorzaken een afstroming, die sneller verloopt dan evenredig met de drukhoogte in het midden van de kavel. De niet-gearceerde watermassa veroorzaakt een met de drukhoogte in het midden van de kavel evenredige afstroming.
Voor een theoretische onderbouwing en voor de afleidingen van de hier gebruikte formules wordt verwezen naar Kraijenhoff van de Leur (1958). Hier wordt volstaan met de constatering, dat kavelafvoer in het algemeen bestaat uit een evenredig en een onevenredig deel.
In form. 2.3 stelt eerstgenoemde term binnen de haakjes na het sommatie-teken het evenredige deel van de kavelafvoer voor ($a^*_s$). Ofwel:

$$a^*_s = \frac{8}{\Pi^2} * p_s (1-\varepsilon) \qquad (2.5)$$

Het onevenredig afstromende deel ($a^{**}_s$) is:

$$a^{**}_s = \frac{8}{\Pi^2} * p_s \sum_{n=3,5,7\ldots}^{n=\infty} \frac{1}{n^2}\left(1-\varepsilon^{n^2}\right) \qquad (2.6)$$

wanneer $a_s$ de afvoerintensiteit voorstelt aan het eind van de dag s, waarvan $a_{s-1}=0$. Form. (2.3) kan vereenvoudigd worden tot

$$a^{**}_s = u_\alpha * p_s \qquad (2.7)$$

waarin $u_\alpha$ de (dimensieloze) aanvullingsfaktor wordt genoemd, omdat met behulp hiervan $a^*_s$ wordt aangevuld tot $a_s$. De aanvullingsfactor voor de afvoer bedraagt

$$u_\alpha = \frac{8}{\Pi^2} \sum_{n=3,5,7\ldots}^{n=\infty} \frac{1}{n^2}\left(1-\varepsilon^{n^2}\right) \qquad (2.8)$$

Waarden voor de aanvullingsfaktoren worden door De Zeeuw in een tabel gegeven, afhankelijk van de reactiefaktor. Deze tabel (zie tabel 2.1) kan zonder problemen worden opgenomen in een spreadsheet.
De berekeningsmethode van het evenredig verlopende deel van de kavelafvoer gebeurt op dezelfde manier als de berekening van de kwelafvoer:

$$a^*_s = \varepsilon\, a^*_{s-1} + \frac{8}{\pi^2}(1-\varepsilon)\, p_s \qquad (2.9)$$

*Tabel 3.1 De waarden van de aanvullingsfaktor bij verschillende reaktiefactoren*

| alfa | u_alfa | alfa | u_alfa | alfa | u_alfa |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.001 | 0.0228 | 0.2 | 0.1743 | 0.7 | 0.1893 |
| 0.005 | 0.0467 | 0.21 | 0.1757 | 0.8 | 0.1893 |
| 0.01 | 0.0637 | 0.22 | 0.1768 | 0.9 | 0.1894 |
| 0.015 | 0.0759 | 0.23 | 0.1779 | 1.0 | 0.1894 |
| 0.02 | 0.0855 | 0.24 | 0.1789 | | |
| 0.025 | 0.0936 | 0.25 | 0.1799 | | |
| 0.03 | 0.1005 | 0.26 | 0.1807 | | |
| 0.035 | 0.1065 | 0.27 | 0.1815 | | |
| 0.04 | 0.119 | 0.28 | 0.1822 | | |
| 0.045 | 0.1167 | 0.29 | 0.1828 | | |
| 0.05 | 0.1211 | 0.3 | 0.1833 | | |
| 0.055 | 0.1251 | 0.32 | 0.1843 | | |
| 0.06 | 0.1288 | 0.34 | 0.1852 | | |
| 0.065 | 0.1322 | 0.36 | 0.1859 | | |
| 0.07 | 0.1353 | 0.38 | 0.0865 | | |
| 0.075 | 0.1382 | 0.4 | 0.1869 | | |
| 0.08 | 0.1408 | 0.42 | 0.1873 | | |
| 0.085 | 0.1434 | 0.44 | 0.1877 | | |
| 0.09 | 0.1457 | 0.46 | 0.188 | | |
| 0.095 | 0.148 | 0.48 | 0.1882 | | |
| 0.1 | 0.15 | 0.5 | 0.1884 | | |
| 0.11 | 0.1538 | 0.52 | 0.1886 | | |
| 0.12 | 0.1572 | 0.54 | 0.1887 | | |
| 0.13 | 0.1602 | 0.56 | 0.1888 | | |
| 0.14 | 0.1629 | 0.58 | 0.1889 | | |
| 0.15 | 0.1653 | 0.6 | 0.189 | | |
| 0.16 | 0.1657 | 0.62 | 0.1891 | | |
| 0.17 | 0.1695 | 0.64 | 0.1891 | | |
| 0.18 | 0.1713 | 0.66 | 0.1892 | | |
| 0.19 | 0.1729 | 0.68 | 0.1892 | | |

Het optreden van het onevenredig deel in het kavelafvoerverloop is voor grote reactiefactoren moeilijk aan te tonen. Volgens de Zeeuw (1966) valt niet zelden bij kennelijk overwegend kavelafvoer geen onevenredig deel te onderkennen. Met name treft men dit aan bij stroomgebieden op hoge gronden. Hiervoor zijn twee oorzaken aan te geven:

- Bij de berekening van het onevenredige deel van de kavelafvoer wordt ervan uitgegaan, dat de grondwaterspiegel in een perceel voorgesteld kan worden met een sinusoïde. Dit geldt alleen als er rond de sloot geen radiale weerstand aanwezig zou zijn. Omdat deze weerstand meestal wel aanwezig is, zal in werkelijkheid de grondwaterspiegel in de buurt van het ontwateringsmiddel sterker zijn opgebold. Bij een neerslagoverschot zal de toename van de grondwaterstroom meer lineair zijn dan door de cosinus of sinusreeks wordt gesuggereerd. Het gehele kavelafvoerproces kan dan beschreven worden met formule 2.1 door ß te vervangen door $\alpha$.
- Als hoogstwaarschijnlijk belangrijkste oorzaak voor het niet tot ontwikkeling komen van het onevenredig deel van de kavelafvoer kan gelden, dat tijdelijk

verhoogde open waterstanden, juist in perioden, dat het onevenredige deel zijn sterkst uitgesproken vorm zou moeten tonen, de ontwatering afremmen.

### 4.2.3 Resultaten

Alhoewel de algemene methode en de daarbij horende formules hierboven zijn besproken, betekent dit nog niet, dat de verschillende reservoirs nu al bepaald kunnen worden. Daarvoor moeten nog een aantal stappen worden gezet, die in bijlage 1 worden uitgelegd. Dit gebeurt aan de hand van een spreadsheet dat voor de berekeningen gebruikt is.
De dagelijks gemeten waterstanden van de Strijbeekse beek zijn omgerekend naar afvoeren (in mm/dag) m.b.v. de Q-h relatie. Deze zijn vervolgens gesommeerd per dekade van elke maand. De gemeten dekade afvoer is gebruikt om de berekende afvoer mee te ijken.
Als neerslagoverschotreeks is de neerslag- en Penmanverdampingsreeks per dekade van de weerstations Gemert en Oudenbos gemiddeld. De verdamping is met behulp van een gewasverdampingsfactor gereduceerd. De grootte van deze factor varieert per seizoen: 1 in de herfst en de winter, 0.9 in de lente en 0.8 in de zomer.
De ijking geschiedt aan de hand van de volgende criteria:
- (totale berekende afvoer - totale gemeten afvoer)/ totale gemeten afvoer < 0.1
- de hoogte van de berekende en gemeten pieken dienen in verschillende piekhoogte domeinen (0-10, 10-20, 20-30 mm/dek enz.) met elkaar in overeenstemming te zijn.
- de helling van de berekende en gemeten pieken dienen overeen te komen.

Om een eerste schatting te maken van het aantal benodigde reservoirs moet de gemeten dagelijkse afvoer nader bekeken worden. Hierin kunnen een aantal verschijnselen geconstateerd worden:
- de zomerafvoer in de jaren '61, '64, '66 en '67 is minimaal, maar nooit gelijk aan nul.
- In de jaren '60 en '62 is gedurende de zomer een toename in de afvoer waarneembaar, terwijl het gemiddelde neerslagoverschot negatief is. Met andere woorden, in die jaren is ofwel sprake van een artefact (er is bijv. water vanuit een ander gebied ingelaten) ofwel sprake van een complex van buien, dat niet op de weerstations Gemert en Oudenbos is gevallen. Een dergelijk -lokaal- verschijnsel is in de zomer niet ongewoon.
- In de herfst en in de winter neemt de afvoer toe tot max. 4-5 mm/dag.
- Als de pieken van de herfst en winterafvoer af worden gehaald, dan blijft een zekere afvoer over, die trager reageert dan op neerslag dan de piekafvoer. Anders gezegd, in de recessiecurven van de afvoer is veelal een knik aanwezig: eerst een steil dalende tak en vervolgens een vlakker verlopend deel.

Voor het aantal benodigde reservoirs kan het volgende in eerste instantie verondersteld worden:
- de zomerafvoer is zeer laag, maar vrij constant. Dit kan gesimuleerd worden met een kwelreservoir met een zeer lage reactiefactor.
- de piekafvoer in herfst en winter kan gesimuleerd worden met een kavelafvoerreservoir.
- de enigszins vertraagde afvoer in herfst en winter kan gesimuleerd worden met een derde reservoir met een reactie factor, die qua grootte ligt tussen het kwel- en kavelafvoerreservoir. De Zeeuw (1966) geeft hieraan de benaming "moerasafvoer". Een gebied, waar van moerasafvoer sprake is, kan worden gekenmerkt door een minder goed ontwikkeld waterlopenstelsel, waardoor de afvoer uit dit gebied vertraagd wordt.

De aldus berekende a(tot) voor een heel jaar wordt vergeleken met de gemeten afvoer.
Met het spreadsheet kunnen allerlei combinaties van parameters bekeken worden, waarbij vooral de waarden van m, alfa, beta en omega zijn gevarieerd. In tabel 3.2 is de uiteindelijk gekozen set van parameters weergegeven.

*Tabel 3.2 Overzicht van de waarden van de parameters, waarmee de neerslag- en verdampingsreeks is gemodelleerd tot een berekend afvoerverloop*

| Parameter | Waarde |
|---|---|
| alfa | 0.6 [$dag^{-1}$} |
| omega | 0.07 [$dag^{-1}$] |
| beta | 0.0001 [$dag^{-1}$] |
| m kavel | 0.25 [-] |
| m moeras | 0.25 [-] |
| m kwel | 0.5 [-] |
| gemeten totale afvoer | 1703 [mm] |
| berekende totale afvoer | 1436 [mm] |
| kavelafvoer | 629 [mm] |
| moerasafvoer | 625 [mm] |
| basis afvoer | 181 [mm] |

De berekende afvoer wijkt meer dan 10% af van de gemeten afvoer. Dit komt vooral tot stand door de hoge gemeten afvoer in de perioden 31 mei t/m 30 september 1960 en 20 mei t/m 10 oktober 1962. In deze perioden is wellicht sprake van ofwel een artefact (waterinlaat) ofwel lokale neerslag, die niet op de weerstations Gemert en Oudenbos is gevallen. Als de afvoer, die in deze perioden is geregistreerd, van de totale gemeten afvoer wordt afgetrokken, dan bedraagt de totale gemeten afvoer 1474 mm. Dit getal is aangehouden voor de totale gemeten afvoer. Het verschil met de berekende totale afvoer bedraagt dan minder dan 10%.

### 4.2.4 Gemiddelde maandelijkse afvoer en vertaling naar het beekdal

In fig. 4.1 is in een staafdiagram de bijdrage van de verschillende reservoirs aan de gemiddelde maandelijkse totale afvoer weergegeven. Om deze figuur te construeren zijn van elk jaar de dekaden 1 t/m 3, 4 t/m 6, 7 t/m 9, enz. opgeteld en gemiddeld.
Opvallend is, dat de afvoer in de zomer voor de helft of meer afkomstig is van het basisafvoerreservoir en dat de afvoer vanuit het kavelreservoir het hele jaar door ongeveer gelijk is aan die uit het geremde afvoerreservoir. In tabel 3.3 zijn per maand en per reservoir de hoeveelheden weergegeven, die afgevoerd worden.

*Tabel 3.3 Gemiddelde afvoerhoeveelheden (mm/maand) voor de periode 1961 t/m 1967 per reservoir*

| | basis-afvoer | geremde afvoer | kavel-afvoer |
|---|---|---|---|
| jan | 1.8 | 15.4 | 13.8 |
| feb | 2.5 | 9.9 | 8.3 |
| maa | 1.8 | 4.7 | 3.5 |
| apr | 2 | 5.4 | 4.8 |
| mei | 1.8 | 1.9 | 1.1 |
| jun | 2 | 0.2 | 0 |
| jul | 1.7 | 0.8 | 1.4 |
| aug | 1.7 | 1.0 | 0.5 |
| sep | 1.9 | 1.2 | 1.0 |
| okt | 1.7 | 3.9 | 5.7 |
| nov | 2 | 11.9 | 14.9 |
| dec | 1.8 | 22.0 | 23.7 |

De vraag is nu welk deel van het stroomgebied verantwoordelijk is voor kavel-, geremde en basisafvoer. Het verschil tussen de drie reservoirs zou in de topografie in principe tot uiting moeten komen in gebieden met verschillen in slootafstanden: bij het kavelafvoerreservoir hoort een gebied met een geringe slootafstand, waardoor een snelle afvoerpiek gegenereerd kan worden, bij het geremde afvoerreservoir hoort een gebied met een vrij grote slootafstand, waardoor afvoer vertraagd zal optreden en bij het basisafvoerreservoir hoort een gebied zonder sloten, waardoor nauwelijks een afvoerreactie op neerslag gegenereerd wordt.
Omdat gedetailleerde kaarten van het gebied ontbreken, is de grondwatertrappenkaart gebruikt om de herkomstgebieden van de verschillende afvoertypen mee te kunnen identificeren.
In tabel 3.4 zijn procentueel weergegeven de verschillende Gt's, die in het gebied voorkomen.

*Tabel 3.4 Voorkomen van de Gt's uitgedrukt in % van het totale oppervlak van het stroomgebied*

| Gt | grootte, in % van het totale oppervlak |
|---|---|
| III | 8.8 |
| V | 20.6 |
| V* | 2 |
| VI | 33.5 |
| VII + VII* | 33.5 |

De berekende % voor (zie tabel 3.2) m kavel, m moeras en m basis waren resp. 0.25, 0.25 en 0.5. Het lijkt redelijk om de grondwatertrappen onder te verdelen in drie groepen, t.w. Gt III+V, Gt V*+VI en Gt VII+VII*. Gt III+V liggen het dichtst bij de beek en het drainagepatroon is in deze twee Gt's vermoedelijk het meest dicht. Deze Gt's genereren dan de kavelafvoer. In Gt V*+VI is de slootafstand groot (enkele 100-en meters) en ze liggen meestal verder van de beek. Deze Gt's genereren de geremde afvoer. In Gt VII+VII* zijn sloten afwezig. Dit is het bosgebied in het oosten, bovenin het beekdal. Dit gebied zou dan verantwoordelijk zijn voor basisafvoer. In tabel 3.5 zijn de berekende en gemeten oppervlakken tegen elkaar uitgezet.

*Tabel 3.5 De herkomstgebieden van de reservoirs en hun grootte*

| Gebiedsaandeel --> Reservoirtype | Grondwatertrappen-kaart | Grootte (ha) | Berekend |
|---|---|---|---|
| Kavelreservoir | Gt III_V = 0.294 | 1093 | 0.25 |
| Moerasreservoir | Gt V*+VI = 0.355 | 1320 | 0.25 |
| Basisafvoerreservoir | Gt VII+VII* = 0.335 | 1244 | 0.5 |

De gemeten waarden kunnen in overeenstemming worden gebracht met de berekende waarden door aan te nemen, dat het gebied, dat voor de basisafvoer verantwoordelijk is niet 1244 ha, maar 2450 ha groot is. De gebiedsaandelen voor kavel, geremde en basis afvoer worden dan resp. 0.23, 0.27 en 0.50. Dit houdt in, dat het gebied, waarin de basisafvoer gegenereerd wordt kennelijk veel groter is dan het bosgebied in het oosten van het stroomgebied. Op basis van een vergelijking met de grondwatertrappenkaart is het waarschijnlijk, dat er sprake is van een netto lek het stroomgebied in. Deze lek zou afkomstig kunnen zijn van infiltratiegebieden ten zuiden van het stroomgebied van de Strijbeekse beek. Het is niet onwaarschijnlijk, dat dit inderdaad aan de orde is, omdat zowel Stuurman in het Merkske als Faber in de Mark eveneens tot een dergelijke conclusie komen.

## 4.3 Afvoer in de uitgangssituatie

Het doel van deze studie is om een idee te krijgen van de oppervlakte-waterkwaliteit van de Strijbeekse beek in de uitgangssituatie. De uitgangssituatie kan gedefinieerd worden als de situatie, die in het verleden (vorige eeuw) aan de orde was. Dat wil zeggen, de beek en het bosgebied waren er reeds, maar het

overige gebied was voor het grootste deel heide met een minimale ontwatering. Het gebied, dat nu Gt III heeft zal in de uitgangssituatie minimaal zijn geweest en het gebied met Gt V is in de uitgangssituatie natte heide geweest. Vertaald naar reservoircoefficienten betekent dat, dat deze lager dienen te zijn dan in de huidige situatie. Aangenomen is, dat om de afvoer in de uitgangssituatie te simuleren er sprake is van twee reservoirs (heide en bos), t.w een met een coefficient van 0.07 (moerasafvoer) en een met een coefficient van 0.0001 (basisafvoer). Beide beslaan de helft van het stroomgebied.
In fig. 4.3 zijn de afvoerhoeveelheden weergegeven gemiddeld per maand voor een periode ergens in de vorige eeuw met eenzelfde neerslag en verdampingsreeks als in de periode 1961 t/m 1967.
In vergelijking met fig. 4.1 valt op, dat de afvoer in de wintermaanden lager is en in de zomermaanden juist hoger. Bovendien is het aandeel basisafvoer in de zomermaanden maximaal een kwart van de totale afvoer (september en oktober).
Tot slot moet worden opgemerkt, dat deze figuur de basis vormt voor de chemische berekeningen in hoofdstuk 4.4

## 4.4 Enkele chemische karakteristieken van de beek in de uitgangssituatie

### 4.4.1 Inleiding

Om een idee te krijgen van de waarde van enkele belangrijke chemische parameters van de beek in de uitgangssituatie zijn m.b.v. het computerprogramma PHREEQE (Parkhurst en Plummer, 19..) chemische berekeningen uitgevoerd.
Voor de twee reservoirs voor basis- en moerasafvoer zijn twee watertypen aangenomen en vervolgens zijn deze met elkaar "gemengd" in de verhouding volgens het staafdiagram van fig. 4.3.
Het watertype voor basisafvoer representeert een grondwaterkwaliteit van het CaHCO3-type met een neutrale pH, anaeroob en in evenwicht met calciet. Nutrienten als N en P zijn zo goed als afwezig. Dit water wordt opgepompt door pompstation Prinsenbosch, waarvan de ruwwater analyse is gebruikt.
Het watertype voor moerasafvoer representeert de oppervlaktewaterkwaliteit in heidegebieden met een lage pH, aeroob en sterk onderverzadigd m.b.t. calciet. Ook hier zijn nutrienten N en P zo goed als afwezig.
Nadat in dit hoofdstuk de berekeningsmethode en de resultaten beschreven zijn zal pas in hoofdstuk 4.5 worden stilgestaan bij de vertaling van de resultaten naar de situatie in het beekdal. Bovendien zullen daar de resultaten worden vergeleken met de kwaliteit van het huidige beekwater.

### 4.4.2 Methode

In PHREEQE zijn twee watertypen met elkaar gemengd in de verhouding van fig. 4.3 en tabel 4.1.

| Maand | Basis | Moeras |
|---|---|---|
| jan | 7.2 | 92.8 |
| feb | 10.2 | 89.8 |
| maa | 8.9 | 91.1 |
| apr | 11.0 | 89.0 |
| mei | 11.9 | 88.1 |
| jun | 17.1 | 82.9 |
| jul | 18.8 | 81.2 |
| aug | 21.7 | 78.3 |
| sep | 37.3 | 72.7 |
| okt | 23.0 | 77.0 |
| nov | 16.0 | 84.0 |
| dec | 8.5 | 91.5 |

Omdat de verhoudingen per maand niet veel verschillen zijn alleen de maanden januari, maart, mei, juli, september en november doorgerekend.
Voor heidewater en grondwater zijn de analyses van tabel 4.2 gebruikt.

| Param. | Opp. wat | Grondw. |
|---|---|---|
| pH | 4.9 | 7.5 |
| Ca | 12 | 65 |
| Mg | 3.7 | 5.1 |
| Na | 18 | 6 |
| C1 | 16 | 10.5 |
| HCO3 | 0.5 | 230 |
| SO4 | 41 | 0 |
| NO3 | 0.44 | 0 |
| PO4 | 0.43 | 0.51 |
| NH4 | 0.24 | 0.45 |
| Fe | 0 | 1.7 |
| K | 0 | 1.9 |

De oppervlaktewateranalyse is afkomstig van Stuurman (1998); de grondwateranalyse is afkomstig van pompstation Prinsenbosch.
In PHREEQE zijn deze twee watertypen met elkaar gemengd, waarbij -omdat het er uiteindelijk om gaat de kwaliteit van het oppervlaktewater te voorspellen- evenwicht met zuurstof is verondersteld en waarbij het ijzer uit het grondwater kan neerslaan als driewaardig ijzeroxihydroxide.
Vervolgens is het aldus berekende oppervlaktewater in evenwicht gebracht met de in de atmosfeer aanwezige kooldioxide.

### 4.4.3 Resultaten

In fig. 4.4, 4.5 en 4.6 zijn de belangrijkste resultaten weegegeven.
In fig. 4.4 slaat de index (1) op de resultaten zonder evenwicht met $CO_2$ en de index (2) op de resultaten met $CO_2$-evenwicht.
Op het moment, dat het zure heidewater in contact komt met neutraal tot basisch grondwater stijgt de pH vrij fors. In maand 1 -bijv- wordt het heidewater met slechts 7.2 % (zie tabel 4.1) grondwater gemengd, waardoor de pH stijgt van 4.9 naar ca. 6.4; in de situatie met $CO_2$-evenwicht stijgt de pH zelfs naar ca. 7.6.
In de loop van het jaar neemt de bijdrage basisafvoer toe tot maximaal ruim 27% in september. Omdat daardoor steeds meer bicarbonaat wordt toegevoegd neemt de pH verder toe tot 7 en 8.2 resp in de situatie zonder en met $CO_2$-evenwicht. Ook de [Ca] en [HCO3] (fig. 4.5) nemen toe tot max. 25 en 60 mg/l.
Opvallend is, dat de $pCO_2$ in de situatie zonder evenwicht nagenoeg constant is, nl. ca. -2.25: de toegevoegde bicarbonaat wordt tezamen met een proton omgezet in $H_2CO_3$, dat vervolgens in de oplossing blijft.
Het mechanisme, dat verantwoordelijk is voor de pH, [HCO3] en $pCO_2$ kan als volgt worden samengevat:

H + HCO3 = H2CO3 pK = +6.3
H2CO3 = CO2 + H2O pK = +1.5
ofwel
pH = 7.8 + log[HCO3] - log[CO2]
Deze vergelijking is grafisch weegegeven in fig. 4.6. Duidelijk is te zien, dat bij lage [HCO3] een geringe toevoeging tot grote stijging van de pH zal leiden.
In beide gevallen is de verzadigingsindex voor calciet (SIcalc) negatief, m.a.w. het hele jaar door is het oppervlaktewater onderverzadigd m.b.t. calciet. Pas bij grotere hoeveelheden toegevoegd grondwater (50% en meer) zal calciet gaan neerslaan.

## 4.5 Synthese en discussie

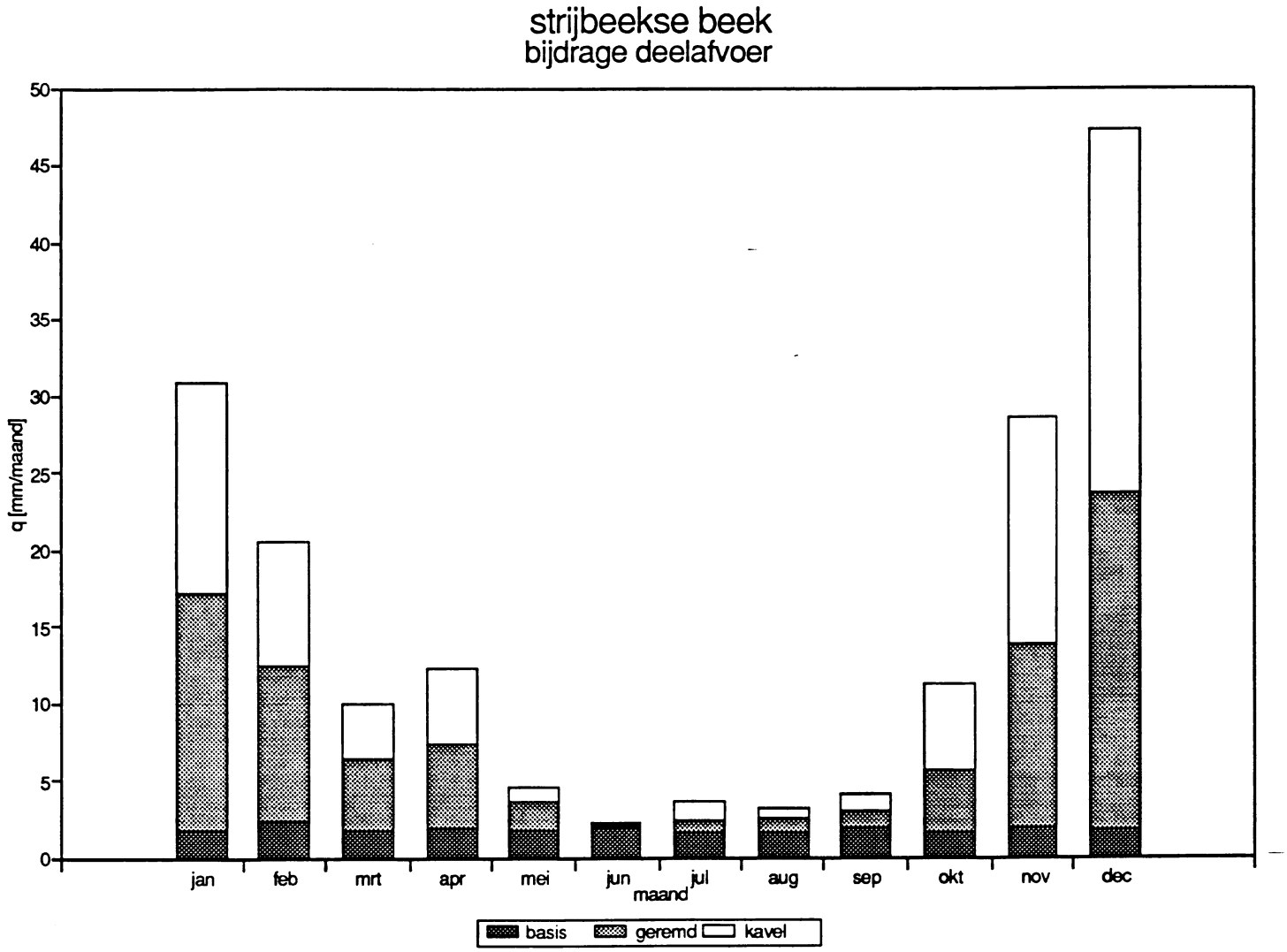
De uitgangssituatie voor het afvoerverloop is fig. 4.3. Met betrekking tot het drainagepatroon houdt dat in, dat het waterlopenstelsel slecht ontwikkeld is en dat de reactie van de afvoer op neerslag traag verloopt. Dit is een min of meer historische situatie en de typische daarbij behorende vegetatie voor Noord-Brabant is heide. Het begrip "uitgangssituatie" slaat dus op de situatie, zoals deze in de vorige eeuw en enkele eeuwen daarvoor rond de Strijbeekse beek kon worden aangetroffen.
Voor de reconstructie van het afvoerverloop in de uitgangssituatie is uitgegaan van twee reservoirs: een kwel- en moerasreservoir. Met name het gebruik van het moerasreservoir houdt in, dat er in het beekdal van de Strijbeekse beek in ieder geval een zekere vorm van drainagepatroon aanwezig moet zijn geweest. Wellicht zijn dit de slootjes in het beekdal geweest, die af en toe meer of minder door liepen tot in het heidegebied aan het beekdal grenzend. De slootjes kunnen in het hele beekdal aanwezig zijn geweest, maar ook bijv. alleen benedenstrooms; er zijn

diverse geografische constellaties te bedenken voor de ligging van het kwel- en moerasreservoir.
Een typisch heide-oppervlaktewater is zuur en heeft lage concentraties aan macro-ionen. Er zijn geen onvervuilde analyses daarvan beschikbaar. Het in hoofdstuk 4 gebruikte water is in 1991 gemonsterd en laat de invloed zien van atmosferische depositie (verhoogde SO4-concentratie). Het effect daarvan op de berekeningen was echter nihil.
Een typisch opkwellend grondwatertype is basisch en in evenwicht of oververzadigd met calciet. De Ca en HCO3-concentraties zijn relatief hoog; de concentraties van de overige ionen zijn laag.
Als het grondwater in de beek opkwelt en daardoor in contact komt met het zure heidewater dan stijgt de pH tot neutrale waarden, zelfs als de kwelintensiteit zeer laag is. De bijbehorende [Ca] en [HCO3] blijven laag, het hele jaar door. Met andere woorden, in de periferie van het beekdal zal uitsluitend zuur heide-oppervlaktewater worden aangetroffen en stroomafwaarts zal een vrij plotselinge pH sprong optreden doordat een geringe hoeveelheid kwel in het beekdal omhoog komt. De zone waarin de pH verandert zal gedurende het jaar niet veel van plaats veranderen, omdat de basisafvoer het hele jaar vrij constant is. Anders gezegd, het gebied met een neutrale pH is het hele jaar vochtig tot nat en in het gebied met een zure pH zal een zekere mate van grondwaterstandsfluktuatie aan de orde zijn.
Over de concentraties van de overige ionen en dan met name die, waar N en P in zitten, kan worden opgemerkt, dat ook deze in het hele beekdal het hele jaar door laag zullen zijn geweest.
Wat zijn nu de chemische verschillen tussen de uitgangssituatie en de huidige situatie?
In de eerste plaats zijn de concentraties N en P vele malen hoger in de huidige situatie vanwege het voorkomen van land en akkerbouw op de flanken van het beekdal.
In de tweede plaats is in de huidige situatie, omdat er ofwel geen heide meer is ofwel omdat het areaal heidegebied sterk geslonken is, de pH sprong in het drainagestelsel niet meer terug te vinden omdat er geen zuur water meer aangetroffen wordt.
In de derde plaats zijn in de huidige situatie de [Ca] en [HCO3] in het oppervlaktewater in de zomer ongeveer net zo hoog (of iets lager vanwege oververzadiging met calciet) als in het grondwater, omdat dan het % basisafvoer 80-95% van de totale afvoer bedraagt. In de huidige situatie is het oppervlaktewater in de zomer dus vele malen harder dan in de uitgangssituatie.
Behalve deze chemische verschillen zijn er ook duidelijke kwantiteitsverschillen te zien:

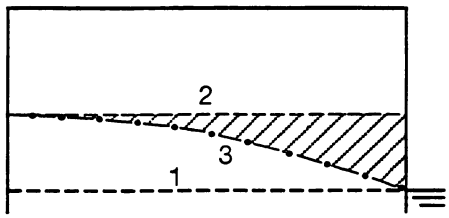
- In de winter is in de huidige situatie de totale afvoer tot tweemaal groter dan in de uitgangssituatie.
- In de zomer geldt precies het omgekeerde.
- In de huidige situatie bedraagt het verschil in totale afvoer tussen zomer en winter ca. 4 en 40 mm. In de uitgangssituatie bedraagt dat ca. 7 en 25 mm. Met andere woorden, in de huidige situatie zijn de zomer en winterverschillen groter

en dit zal ook terug te vinden zijn in de grondwaterstandsfluktuatie. Deze zal in de uitgangssituatie geringer zijn.
- In de maanden juni t/m september bedraagt in de huidige situatie het % basisafvoer 50% of meer; in de uitgangssituatie is dat max. 27% (in september en oktober).

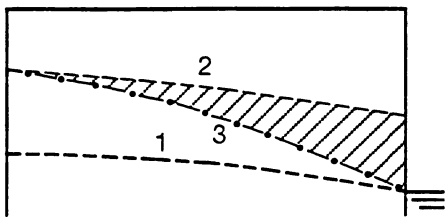
Gegeven deze kwaliteits- en kwantiteitsveranderingen, is het interessant om te weten wat de invloed van deze veranderingen is op de flora en fauna in de beek. Met name het volgende aspekt zou daarbij beschouwd moeten worden: Naar aanleiding van de berekeningen veranderen drie kwaliteitsaspekten van de beek (N en P vracht, pH in de ruimte en in de tijd, hardheid in de tijd). Vermoedelijk heeft de verandering in N en P vracht de grootste invloed op de flora en fauna in de beek. Het zou wellicht interessant zijn om ook te bepalen wat het afzonderlijke effect is van een pH- en hardheidverandering.



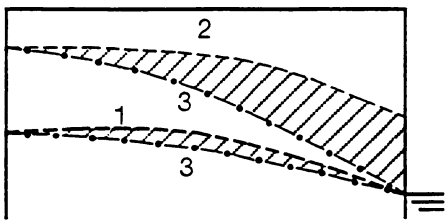

Figuur 4.1 De actuele afvoer van de strijbeek verdeelt naar (1) basisafvoer en (2) kavelafvoer (snel en geremd)




A
Uitgangstoestand: een vlakke grondwaterspiegel.




B
Uitgangstoestand: een staartverloop van voorafgaande neerslag.

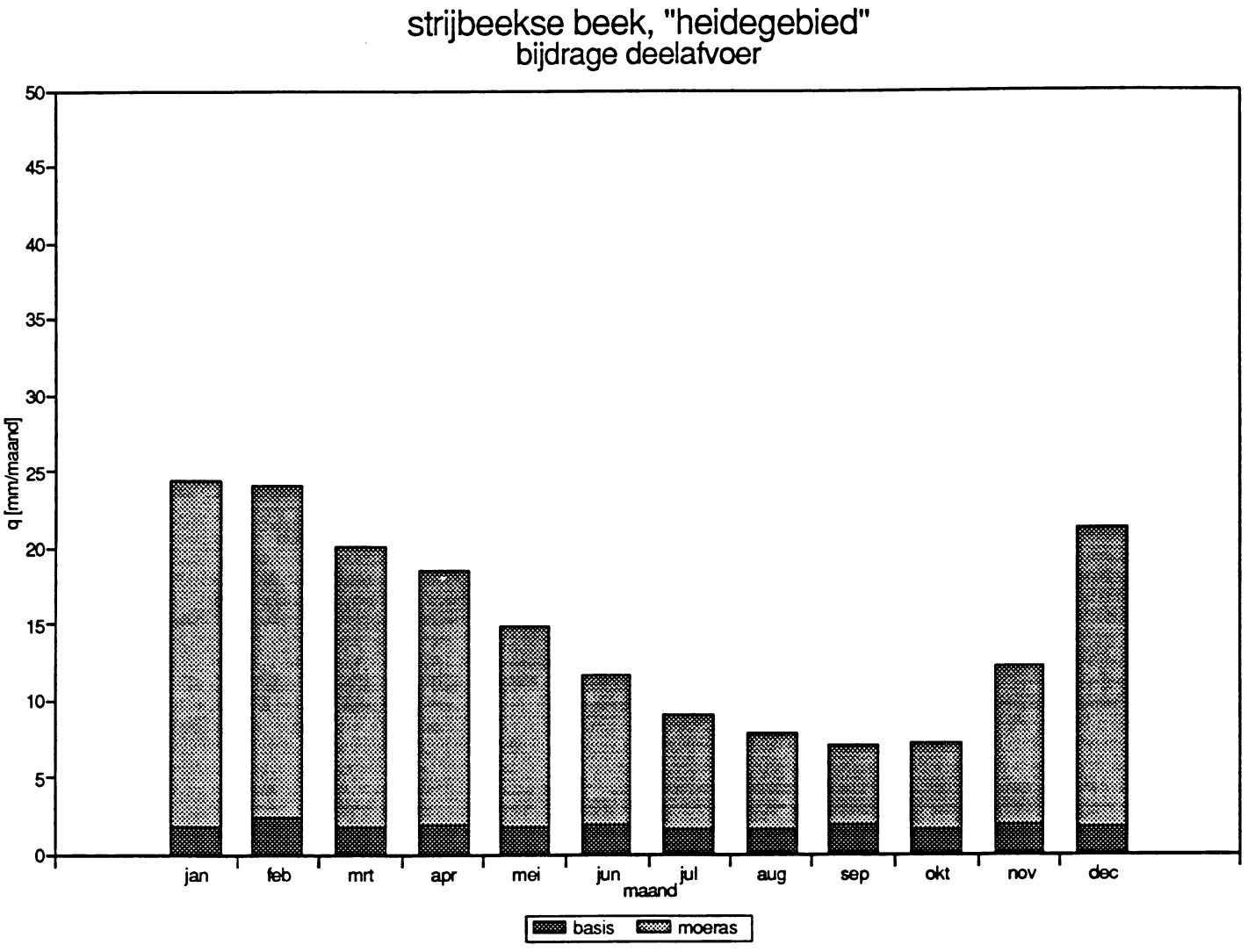



C
In de uitgangstoestand is het staartverloop nog niet bereikt.

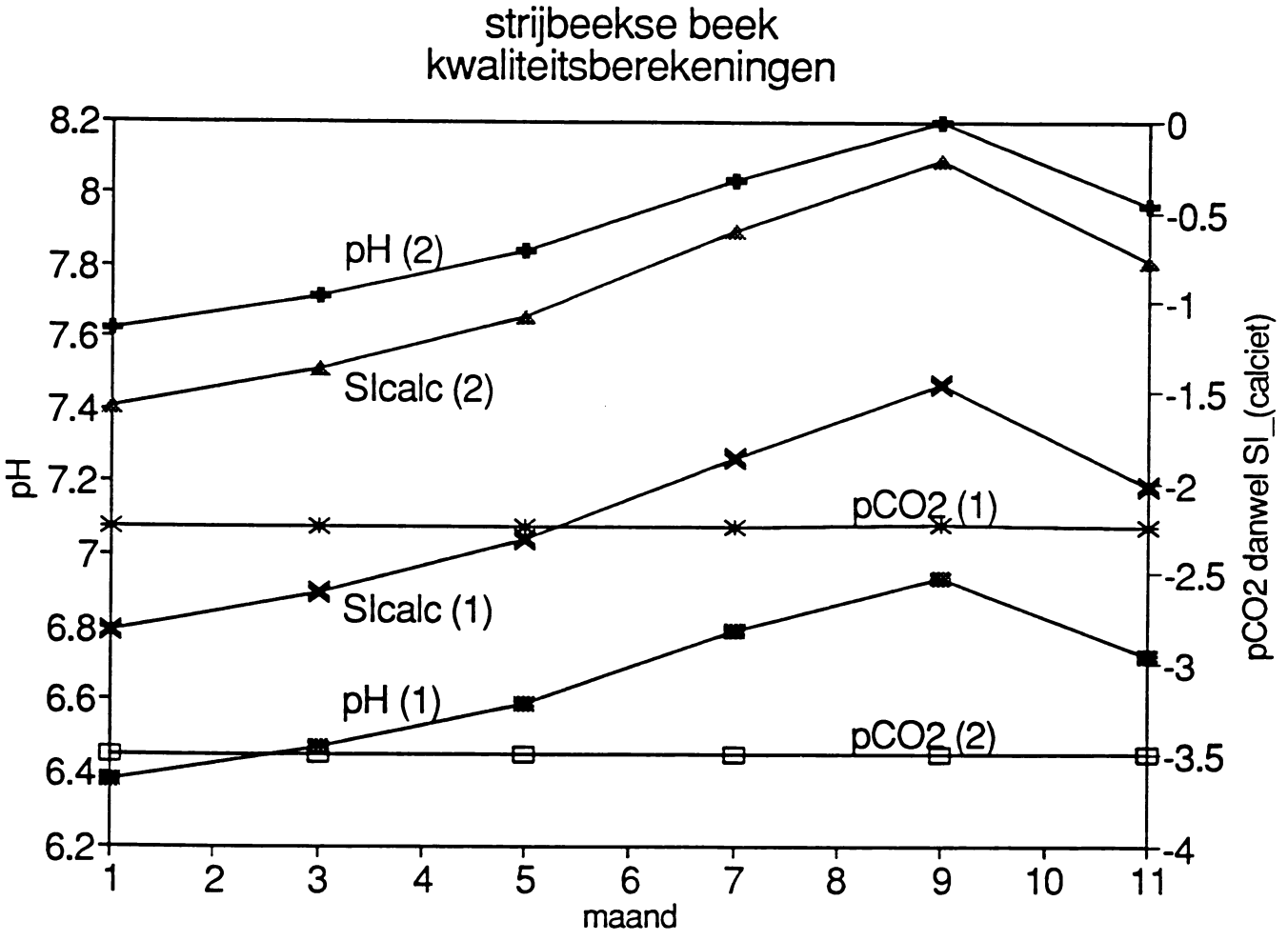
De gearceerde watermassa's veroorzaken een afstroming die sneller verloopt dan evenredig met de drukhoogte in het midden van de kavel.

--1-- grondwaterspiegel voor de bui
--2-- grondwaterspiegel onmiddelijk na de bui
—3— grondwaterspiegel aan het begin van het zogenaamde 'staartverloop'

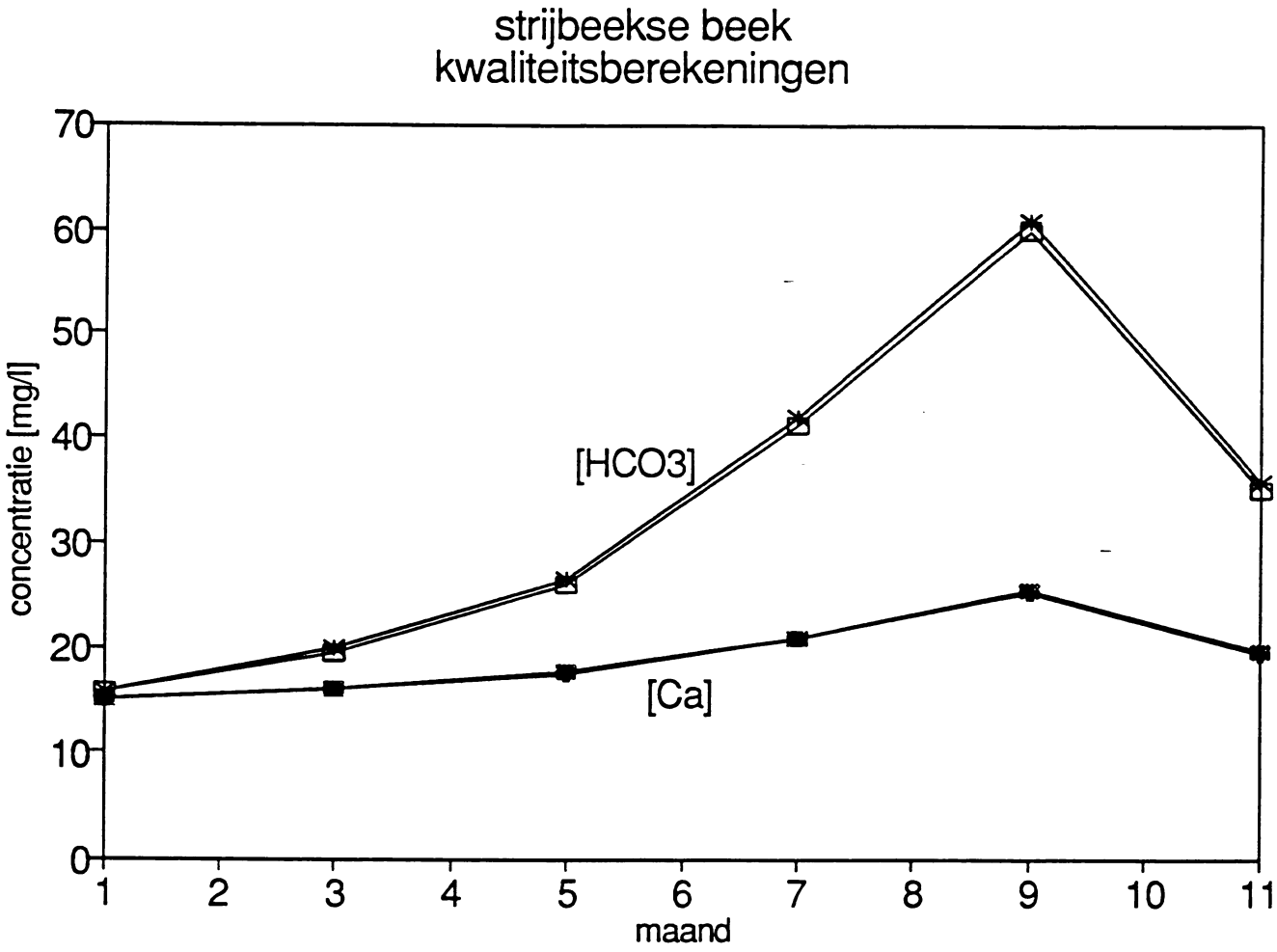
Figuur 4.2 Ontwikkeling van de grondwaterspiegel ten gevolge van een plotseling optredende bui in een kavel begrensd door sloten met een constant peil (uit: de Zeeuw, 1966).



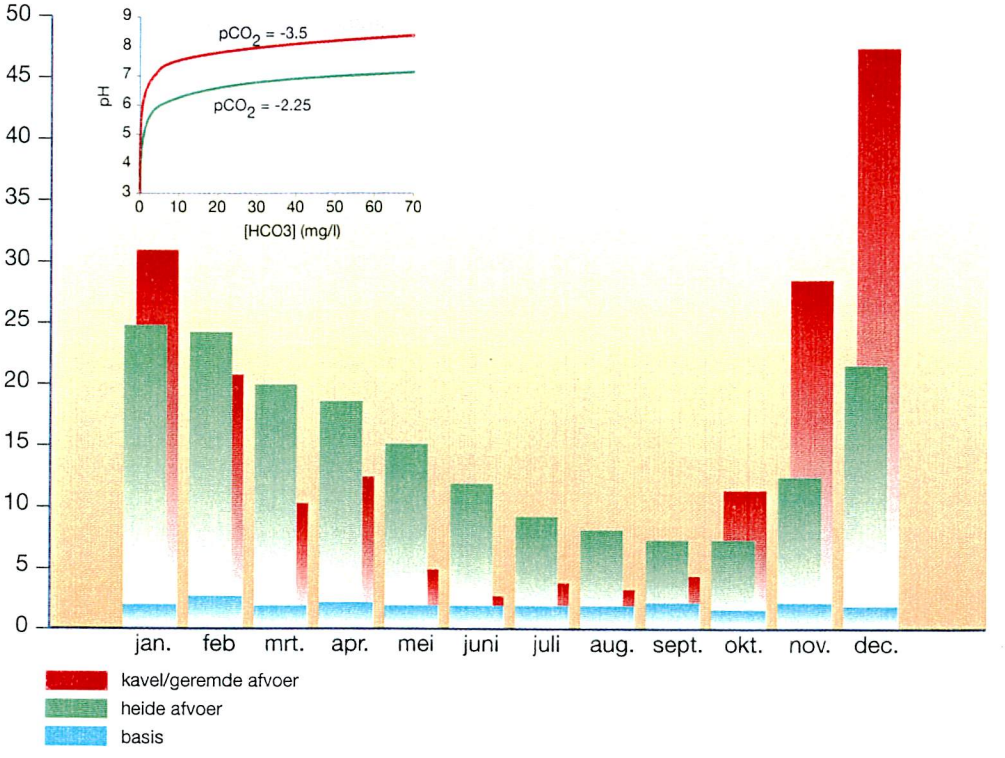

Figuur 4.3 De afvoerverdeling in de negentiende eeuw




Figuur 4.4 Menging van heide- en kwelwater (fig. 4.3) met of zonder $CO_2$-evenwicht.




Figuur 4.5 Het berekende jaarlijkse verloop in calcium- en bivarbonaatconcentraties voor het oppervlaktewater in de negentiende eeuw.




Met behulp van reservoir-analyse (Methode De Zeeuw) is de actuele afvoer verdeeld in een kwelcomponent en een relatief snelle component (drainage). Vervolgens is de historische afvoerverdeling gesimuleerd m.b.v. historische kaarten. Ten slotte hebben hydrochemische evenwichtsberekeningen (Phreeq) plaatsgevonden door de twee (historische) reservoirs te mengen. De afvoerverdeling bleek onder natuurlijke omstandigheden egaler verdeeld. Opmerkelijk is dat de relatief kleine bijdrage aan basisch kwel genoeg was.

Figuur 4.6 De pH-ontwikkeling van zuur (heidewater) door titratie met bicarbonaat (kwel)

# 5 Algemene synthese

In deze studie is aandacht besteed aan de verandering van de grondwatersituatie in de Halsche beemd over een periode van 1.500.000 jaar. In een volgend rapport (de Louw en Stuurman, 1988 in prep.) wordt de actuele toestand uitgewerkt.
Uit dit rapport blijkt dat de grondwatersituatie in de beemd al honderden tot miscchien wel duizenden jaren door menselijk handelen wordt beïnvloed. Het belangrijkste moment was de ontginning van het broekbos tot hooigrasland in de vijftiende eeuw door monikken uit Antwerpen. Zij groeven ook de eerste ontwateringsgreppels. Eeuwen lang werd 1-2 maal per jaar gehooid en bestond de 'bemesting' uit overstroming door het Merkske. De standplaats bevond zich onder (zeer) voedselarme omstandigheden door de combinatie van natrientenafvoer door hooien, het vastleggen van fosfaat door ijzerrijke kwel en de humusgenese o.i.v. basische kwel.
Met name het lage deel van het beekdal stond vroeger langdurig onder water. Beekleemafzetting herinneren aan deze periode.
Uit een afvoeranalyse in combinatie met hydrogeochemische berekeningen blijkt dat de kwaliteit van het oppervlaktewater basisch was.
Uit de tijdsafhaneklijke grondwaterstromingsberekeningen blijkt dat het stromingssysteem sterk is veranderd. Tussen beekdal en infiltratiegebied is een gebied ontstaan met ondiepe stroming naar het drainagesysteem. Mede hierdoor zijn de reistijden naar het diepe watervoerende pakket toegenomen.
In het beekdal blijkt het beekpeil slechts een geringe invloed te hebben. Beekpeilverandering heeft slechts een zone van ca. 30 cm beïnvloed. Stijghoogteverandering heeft invloed op de kwelflux en uit zich met name in het centrum van het beekdal. Drainageveranderingen in het interfluvium uitten zich met name aan de dalranden. Op basis van deze studie kan niets gezegd worden over de oorzaak van stijghoogtenverlaging.

# 6 Literatuur

Grey, S.J., 1975; De sedimentologie en de morfogenetische betekenis van de Oudpleistocene afzettingen in de Noorderkempen. Thesis, Gent, 230 p.

Kasse, K., 1988; Early-Pleistocene tidal and fluviatile environments in the southern Netherlands and Northern Belgium. Proefschrift, Vrije Universiteit Amsterdam.

Kraijenhoff van de Leur, 1958; A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir co-efficient. De Ingenieur 70: B 87-B94.

Parkhurst en Plummer, 1980; PHREEQE - a computer program for geochemical calculations. U.S. Geol. Surv. Water Res. Inv., 80 - 96, 210 p.

Renes, 1985; West-Brabant. Een cultuurhistorisch landschapsonderzoek. Waalre, 1985.

Zeeuw, J.W. de, 1966; Analsye van het afvoerverloop van gebieden met hoofdzakelijk grondwaterafvoer, Mededelingen Landbouwhogeschool 66-5, Wageningen.

# Bijlage A Modelresultaten 1860 - 1990

Legenda:

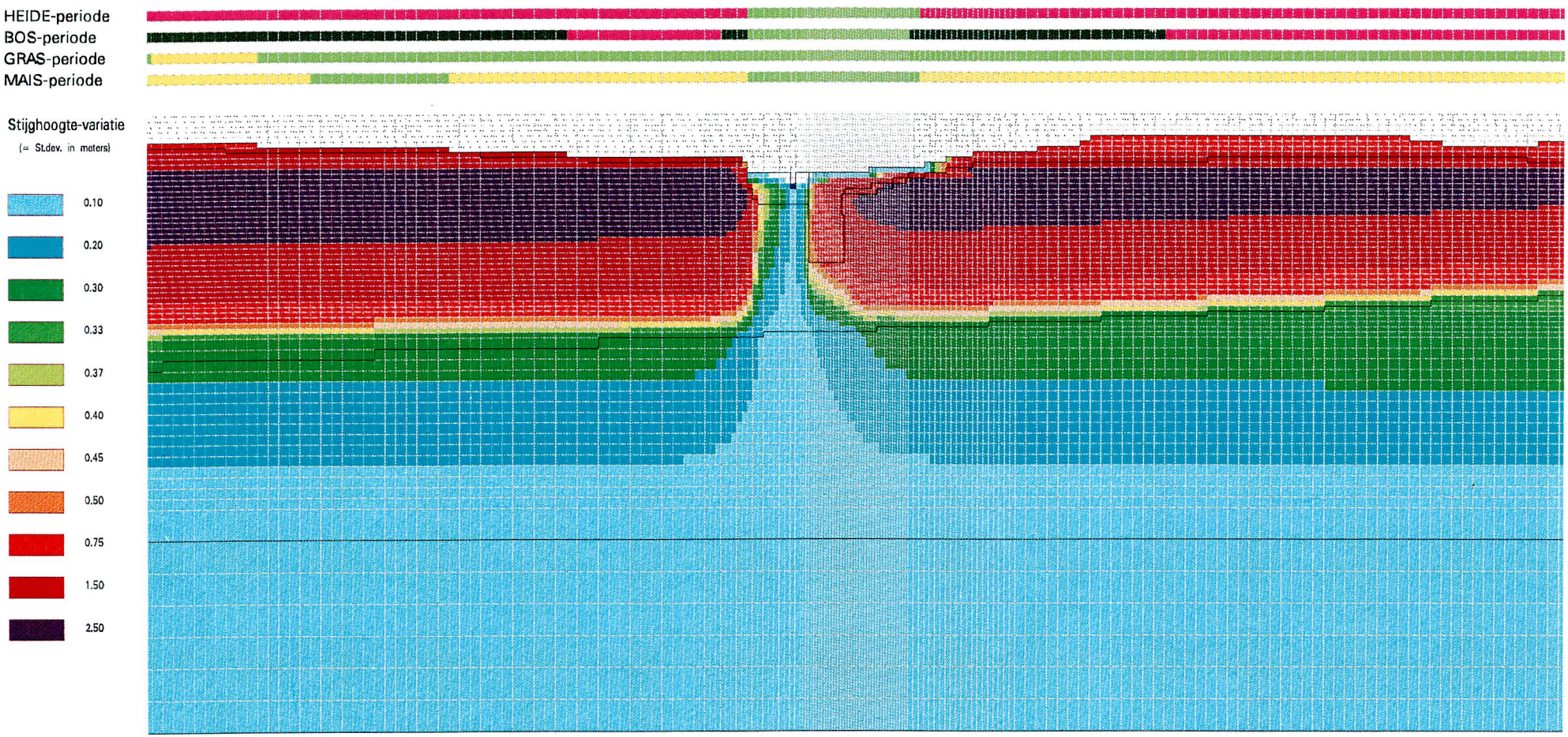
- Ruimtelijke verbreiding Heide
- Ruimtelijke verbreiding Bos
- Ruimtelijke verbreiding Gras
- Ruimtelijke verbreiding Mais

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

## Gevoeligheid v/d stijghoogte agv tijds-afhankelijk Neerslag-overschot

Ontwaterings-stelsel = HEIDE-periode (1861-1894)




'95-06-09 - TK

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor "Het Merkske"

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

Bijlage 1

Legenda:

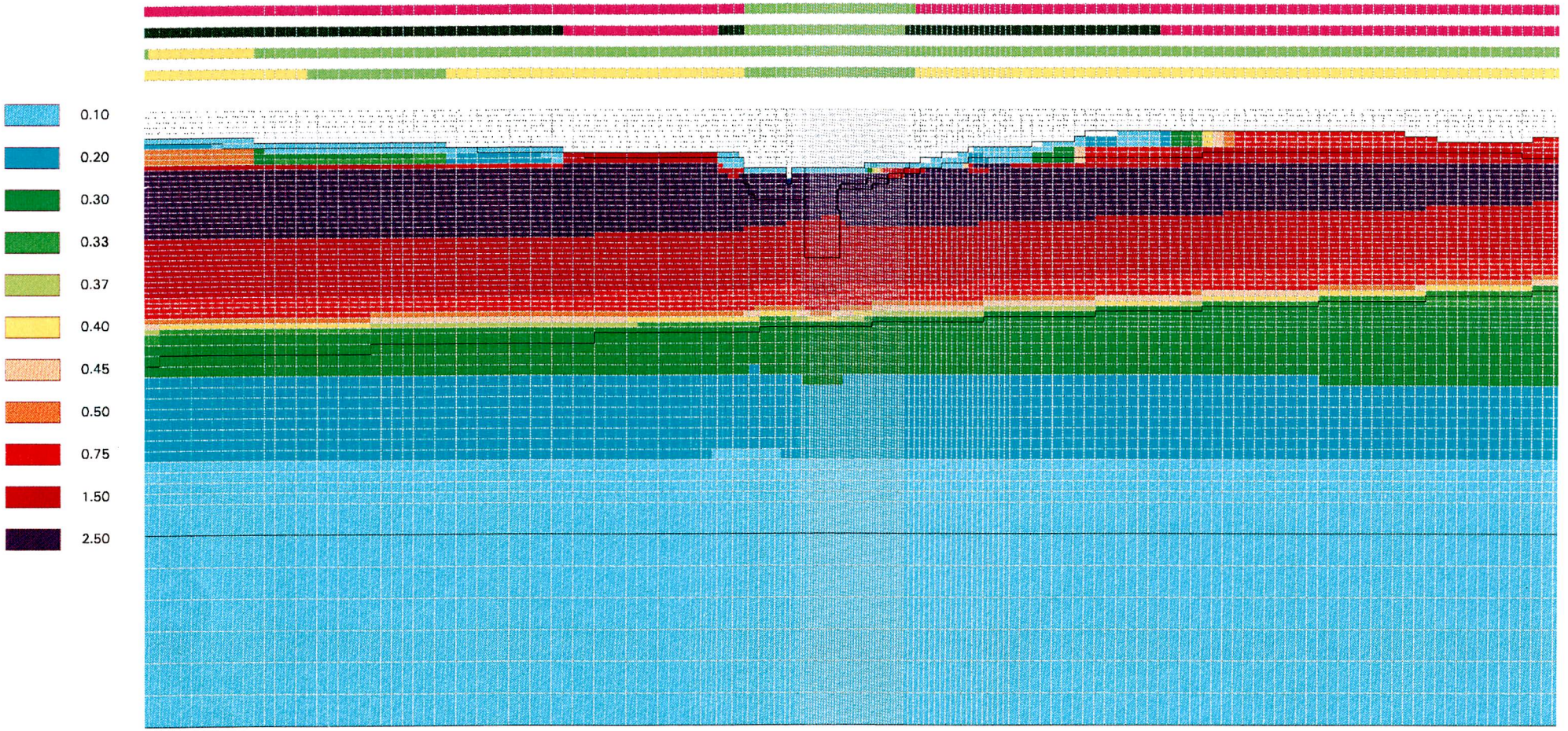
Stroombaan met stroomrichting

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

Gevoeligheid agv
NO + ontwaterings-stelsel

BOS-periode




'95-05-30 - TKI

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor "Het Merkske"

In opdracht:
RAPPORT nr.: OS-95/xxx

*Bijlage 2*

Legenda:

3

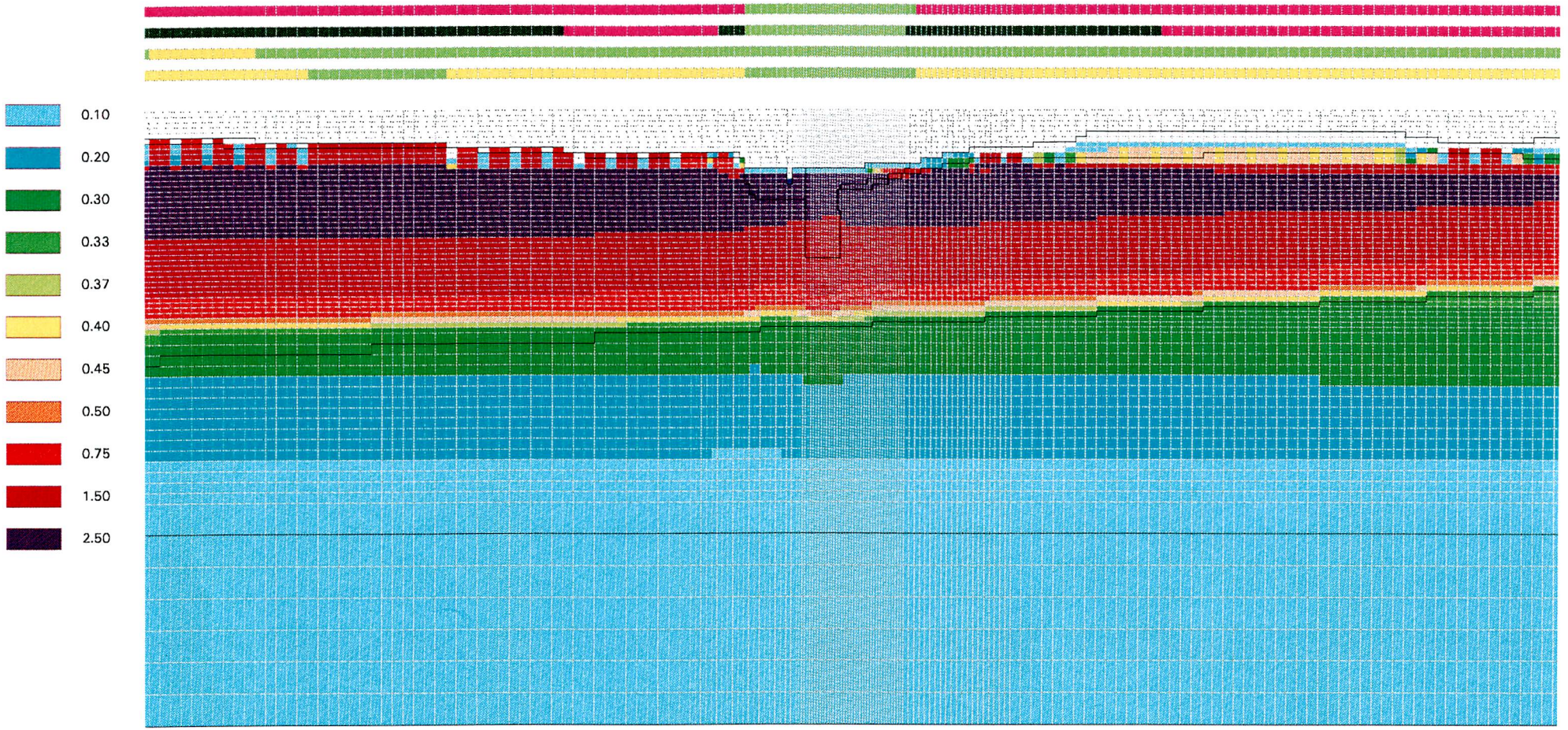
Stroombaan met stroomrichting

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

Gevoeligheid agv
NO + ontwaterings-stelsel

MAIS-periode




'95-05-30 - TKi


C o l o f o n :

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
RAPPORT nr.: OS-95/xxx

Legenda:

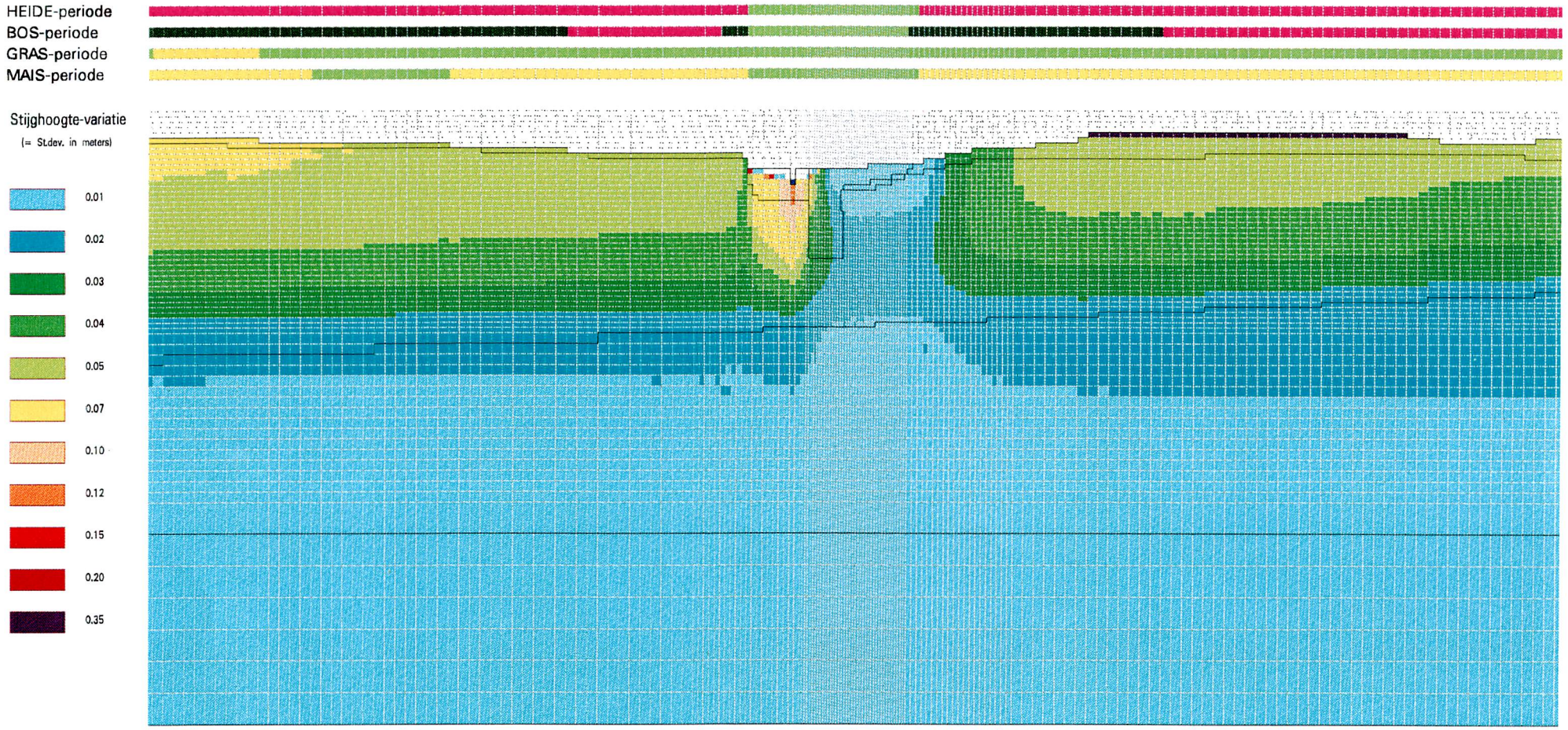
- Ruimtelijke verbreiding Heide
- Ruimtelijke verbreiding Bos
- Ruimtelijke verbreiding Gras
- Ruimtelijke verbreiding Mais

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

## Gevoeligheid v/d stijghoogte agv tijds-afhankelijk Beekpeil (Merkske)

Ontwaterings-stelsel = HEIDE-periode (1861-1894)




'95-07-05 - TNO

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

*Bijlage 4*

Legenda:

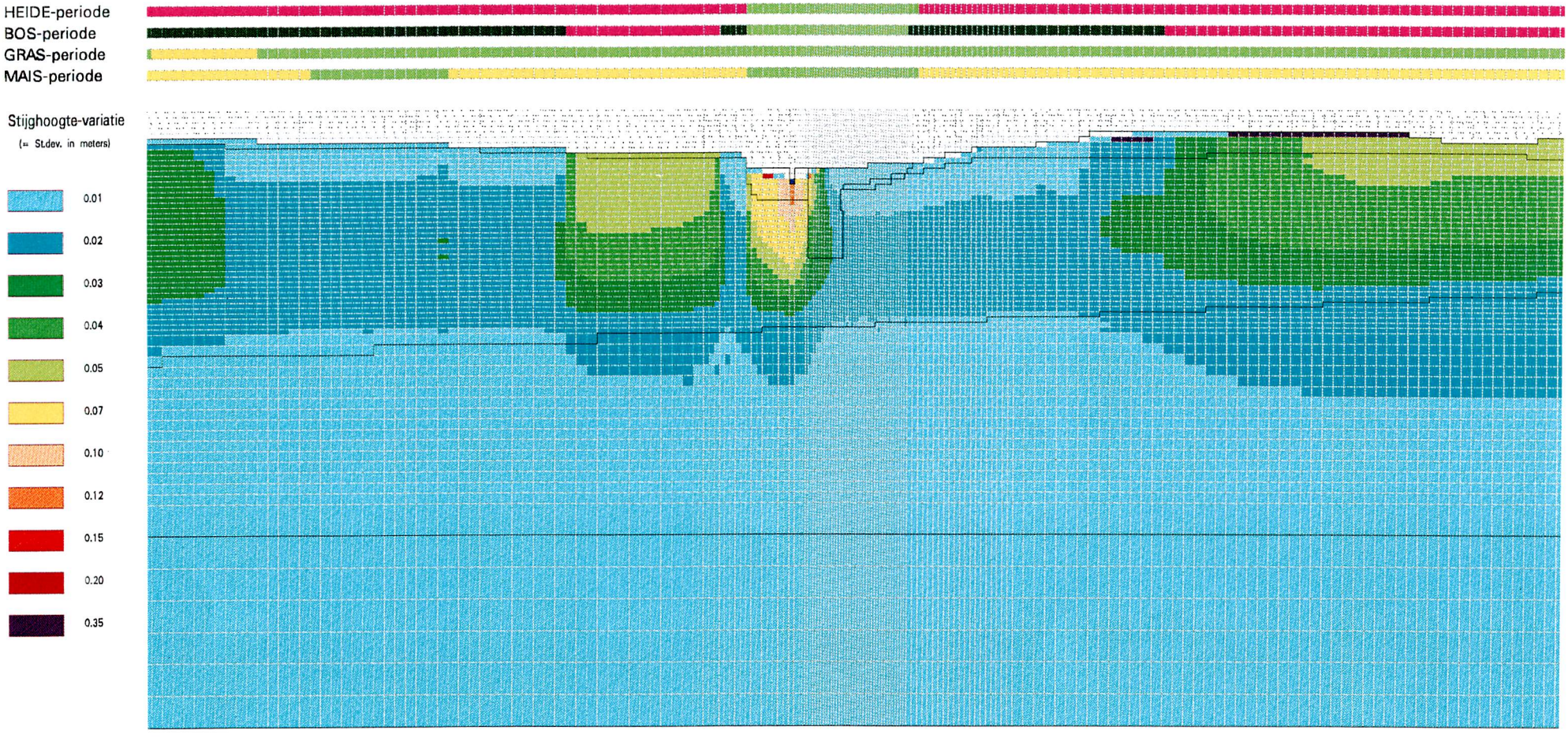
- Ruimtelijke verbreiding Heide
- Ruimtelijke verbreiding Bos
- Ruimtelijke verbreiding Gras
- Ruimtelijke verbreiding Mais

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

## Gevoeligheid v/d stijghoogte agv tijds-afhankelijk Beekpeil (Merkske)

Ontwaterings-stelsel = BOS-periode (1894-1950)




'96-07-05 - TKI

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

*Bijlage 5*

Legenda:

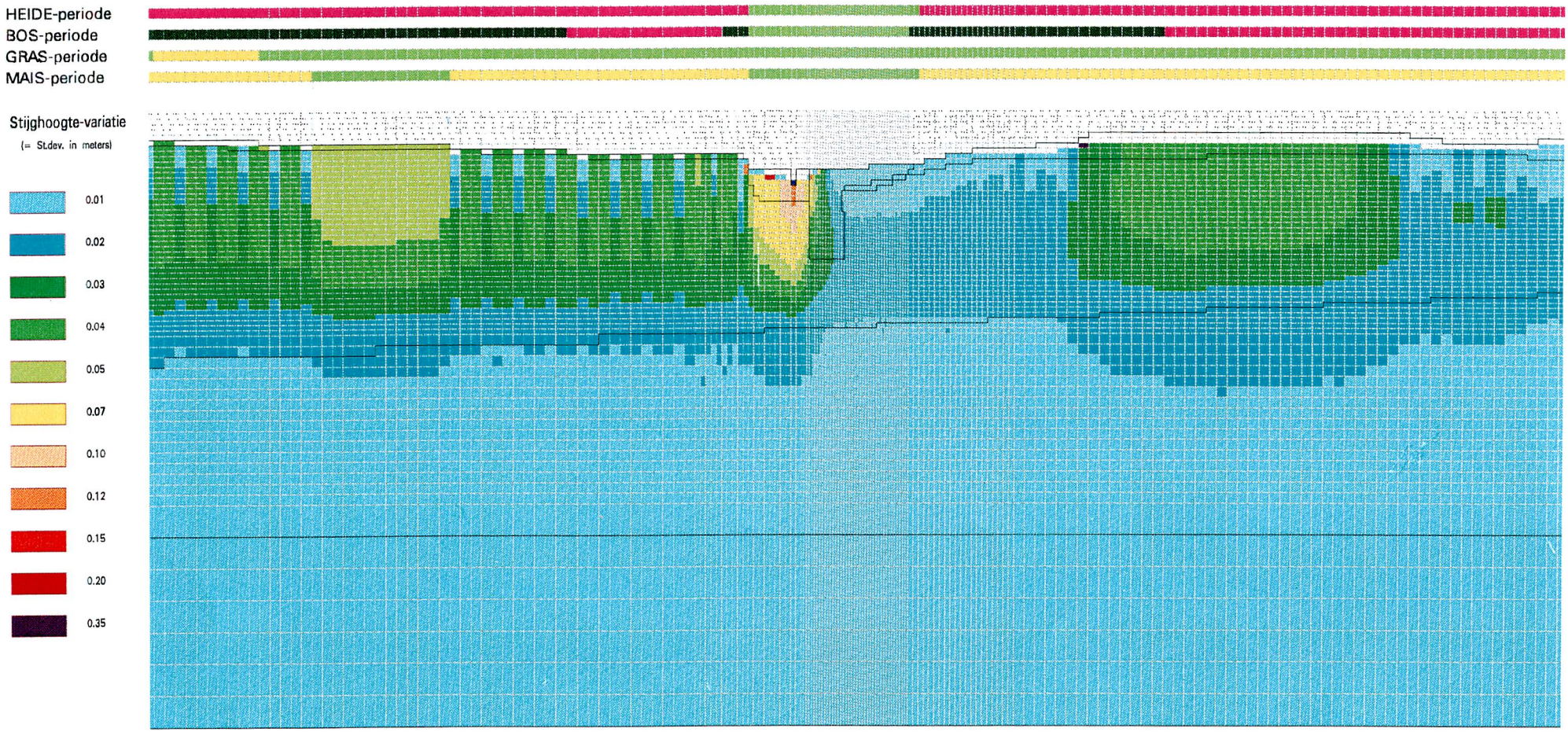
- Ruimtelijke verbreiding Heide
- Ruimtelijke verbreiding Bos
- Ruimtelijke verbreiding Gras
- Ruimtelijke verbreiding Mais

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

## Gevoeligheid v/d stijghoogte agv tijds-afhankelijk Beekpeil (Merkske)

Ontwaterings-stelsel = GRAS-periode (1950-1986)




'95-07-05 - TK

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

*Bijlage 6*

Legenda:

4

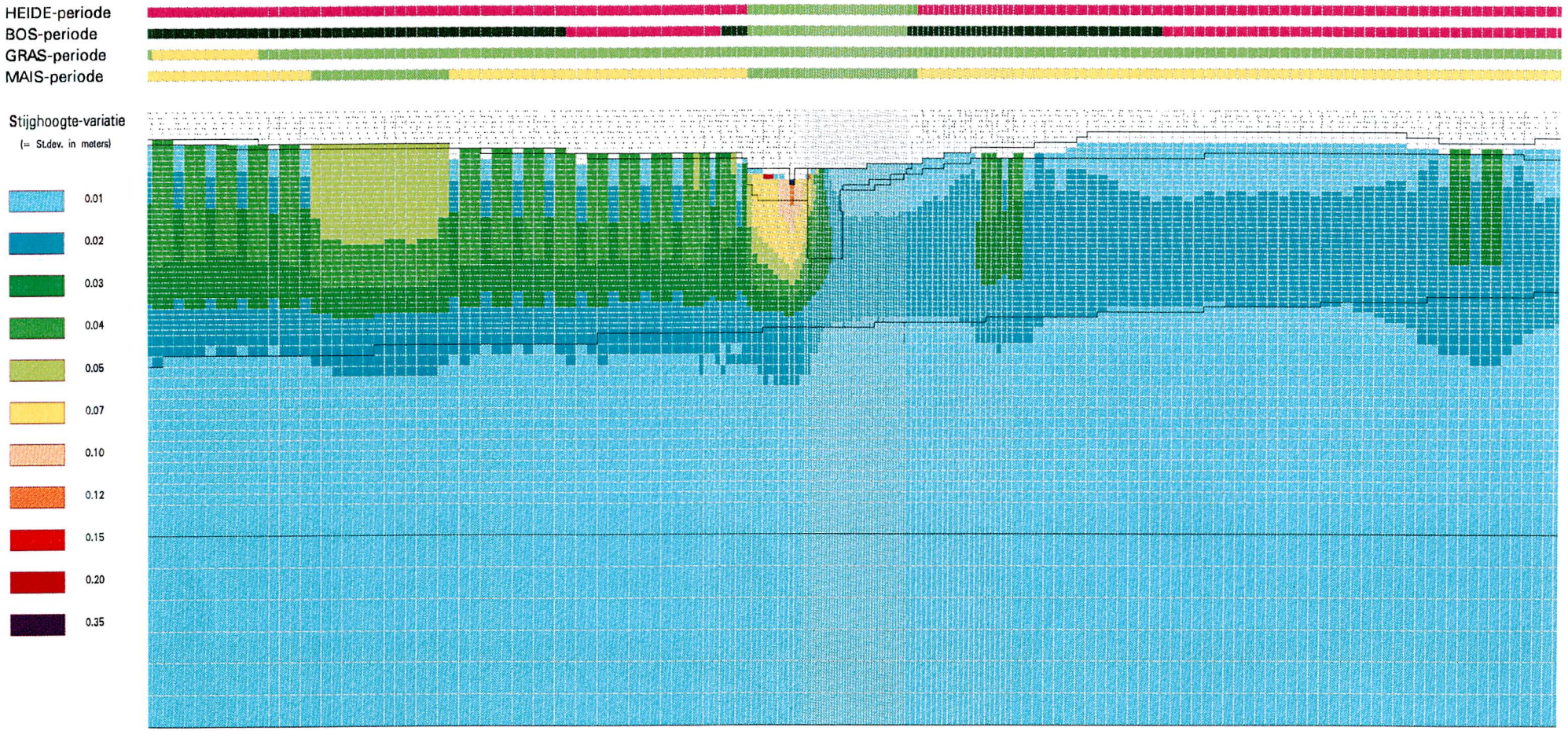
Ruimtelijke verbreiding Heide
Ruimtelijke verbreiding Bos
Ruimtelijke verbreiding Gras
Ruimtelijke verbreiding Mais

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

## Gevoeligheid v/d stijghoogte agv tijds-afhankelijk Beekpeil (Merkske)

Ontwaterings-stelsel = MAIS-periode (1986-1990)




'95-07-05 - TK/

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

*Bijlage 7*

Legenda:

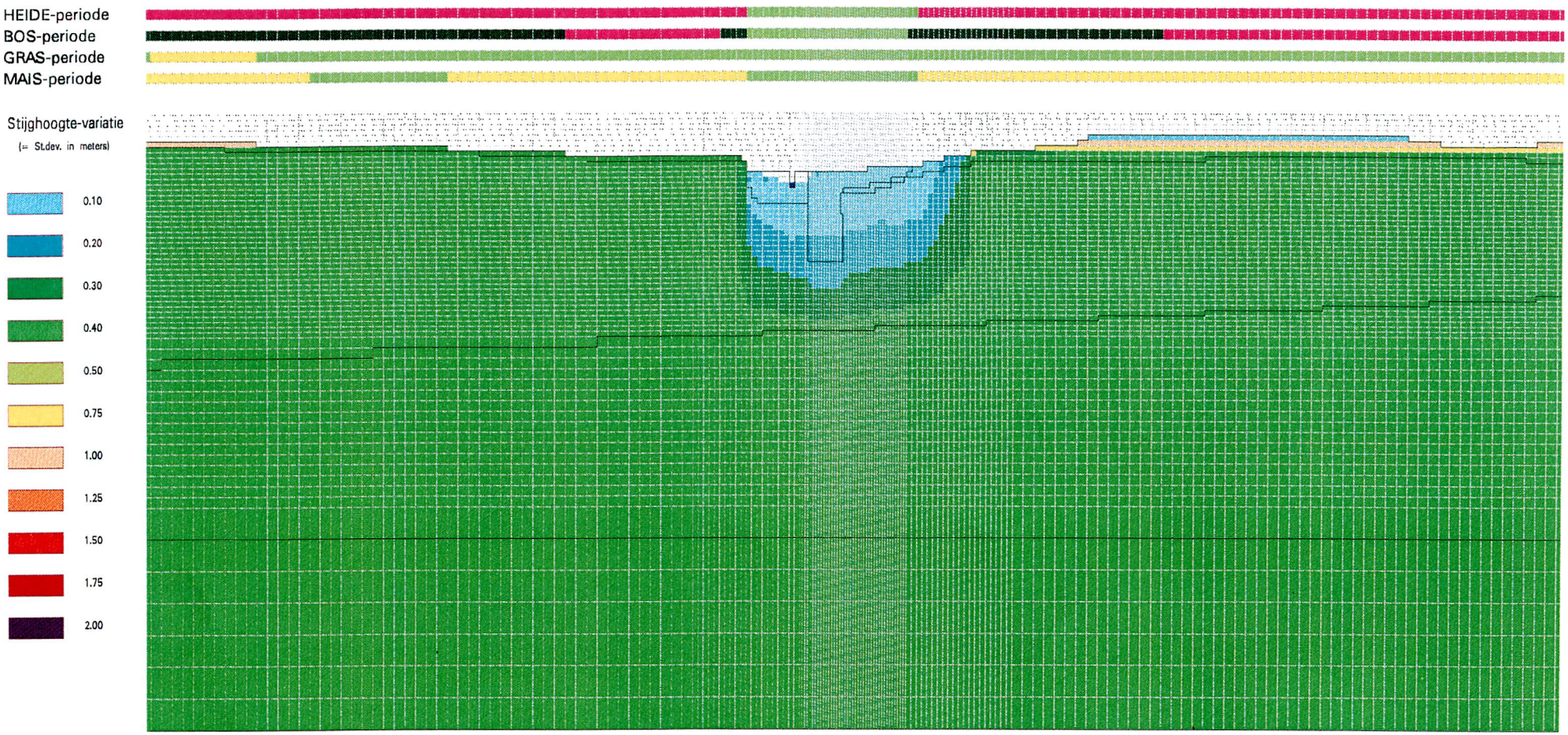
- Ruimtelijke verbreiding Heide
- Ruimtelijke verbreiding Bos
- Ruimtelijke verbreiding Gras
- Ruimtelijke verbreiding Mais

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

## Gevoeligheid v/d stijghoogte agv tijds-afhankelijke stijghoogte in Wvp 1 (Maassluis)

Ontwaterings-stelsel = HEIDE-periode (1861-1894)




'95-06-14 - TK

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

*Bijlage 8*

Legenda:

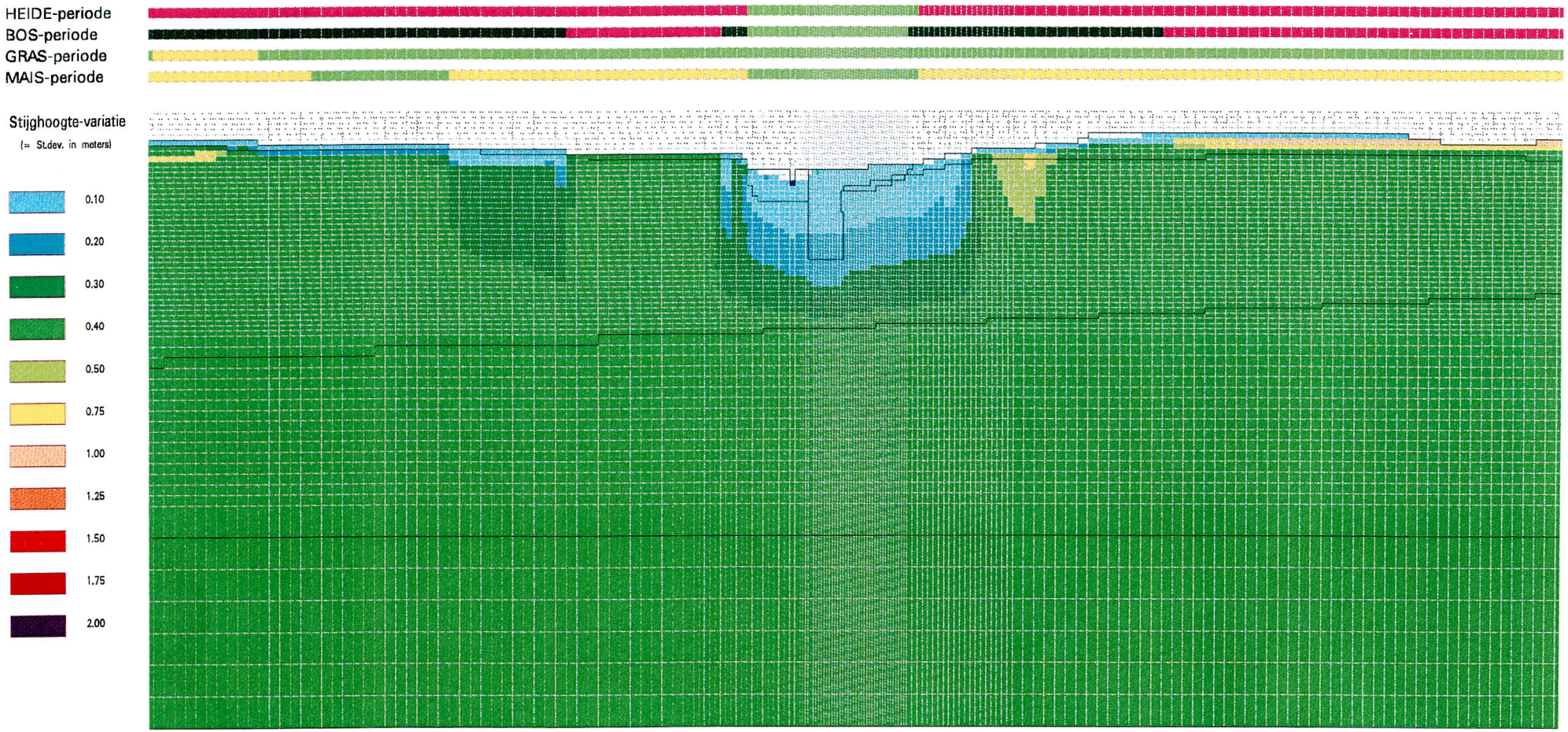
- Ruimtelijke verbreiding Heide
- Ruimtelijke verbreiding Bos
- Ruimtelijke verbreiding Gras
- Ruimtelijke verbreiding Mais

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

## Gevoeligheid v/d stijghoogte agv tijds-afhankelijke stijghoogte in Wvp 1 (Maassluis)

Ontwaterings-stelsel = BOS-periode (1894-1950)




'95-06-02 - TKi

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor "Het Merkske"

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

*Bijlage 9*

Legenda:

LANDGEBRUIK

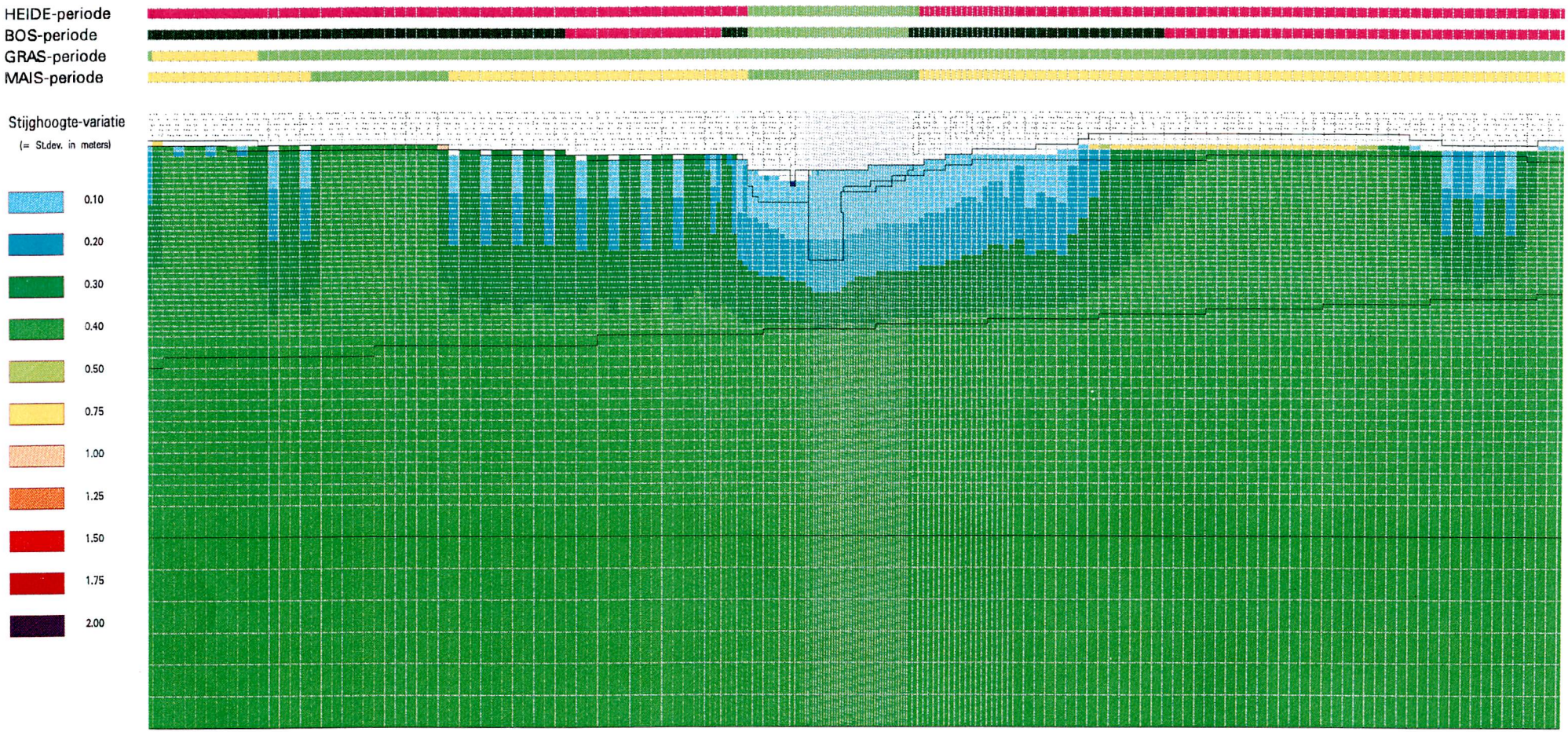
- Ruimtelijke verbreiding Heide
- Ruimtelijke verbreiding Bos
- Ruimtelijke verbreiding Gras
- Ruimtelijke verbreiding Mais

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

## Gevoeligheid v/d stijghoogte agv tijds-afhankelijke stijghoogte in Wvp 1 (Maassluis)

Landgebruik + Ontwaterings-stelsel = GRAS-periode (1950-1986)




'95-06-02 - TK.

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

*Bijlage 10*

Legenda:

2

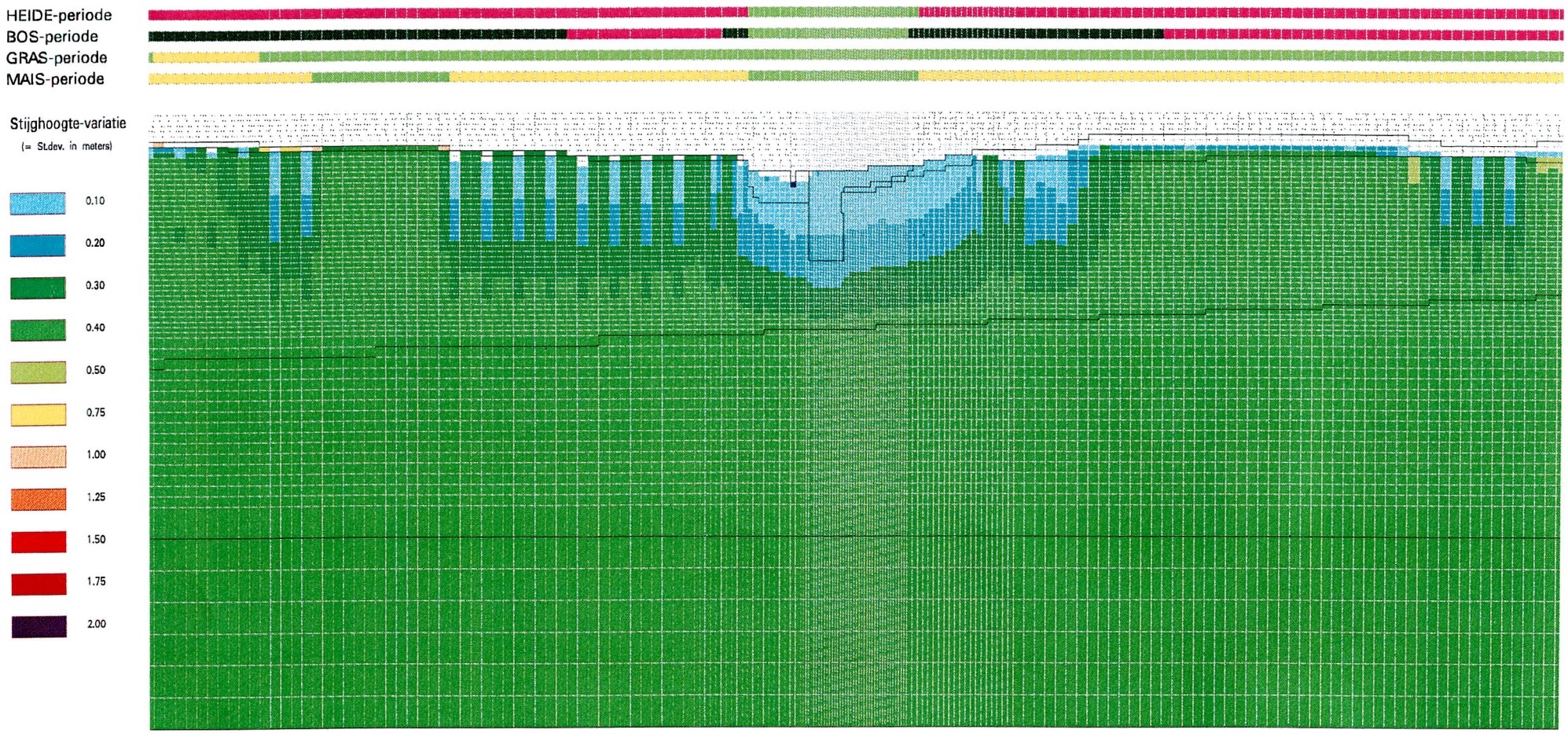
Ruimtelijke verbreiding Heide
Ruimtelijke verbreiding Bos
Ruimtelijke verbreiding Gras
Ruimtelijke verbreiding Mais

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

## Gevoeligheid v/d stijghoogte agv tijds-afhankelijk ~~Beekpeil~~ (~~Merkske~~) stijghoogte in Wupt (Maas-Shine

Ontwaterings-stelsel = MAIS-periode (1986-1990)




'95-05-31 - TK

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

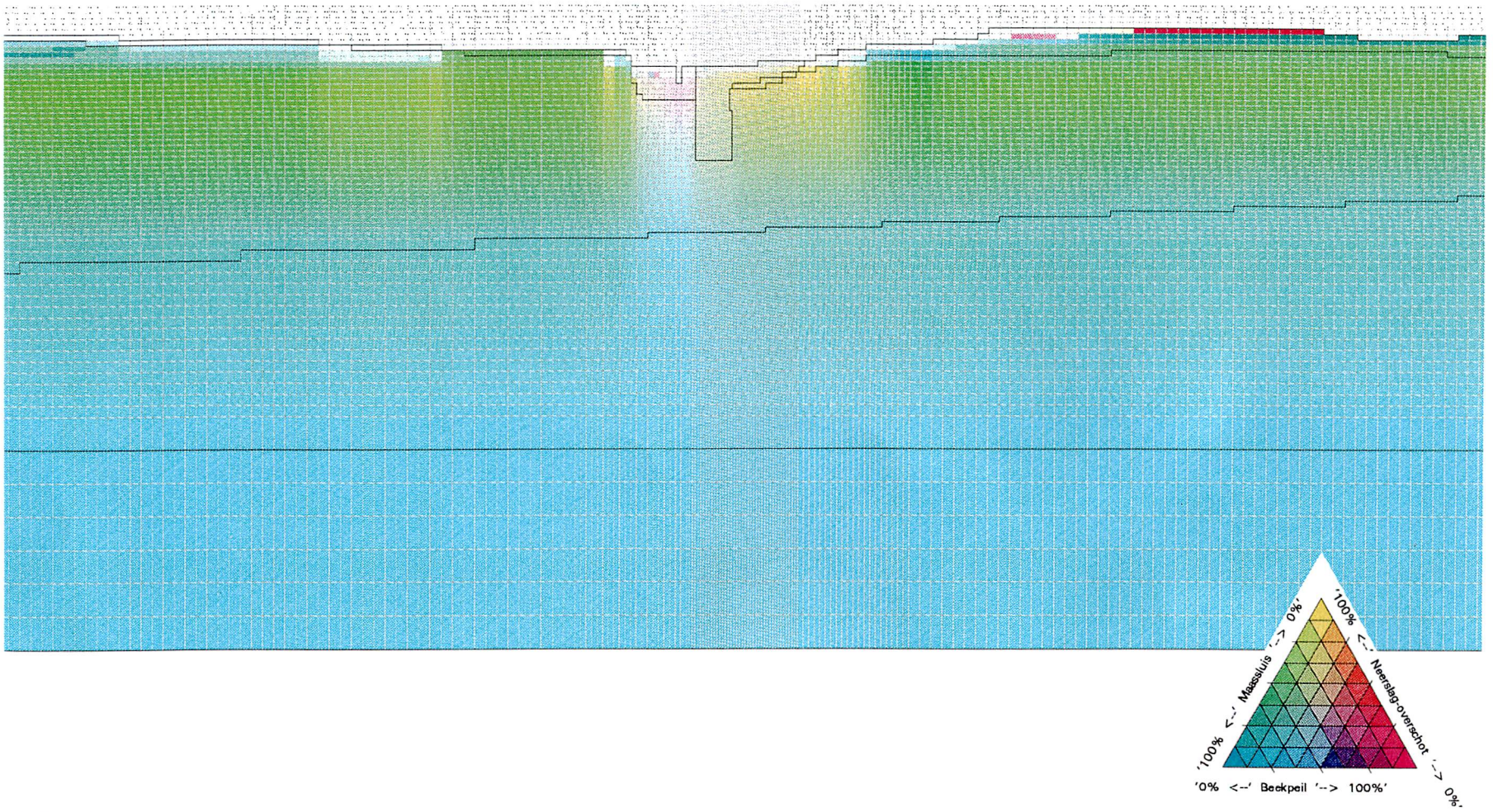
*Bijlage 11*

Legenda:

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

Ontwaterings-stelsel = BOS-periode (1894-1950)




'95-07-17 - TNO

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

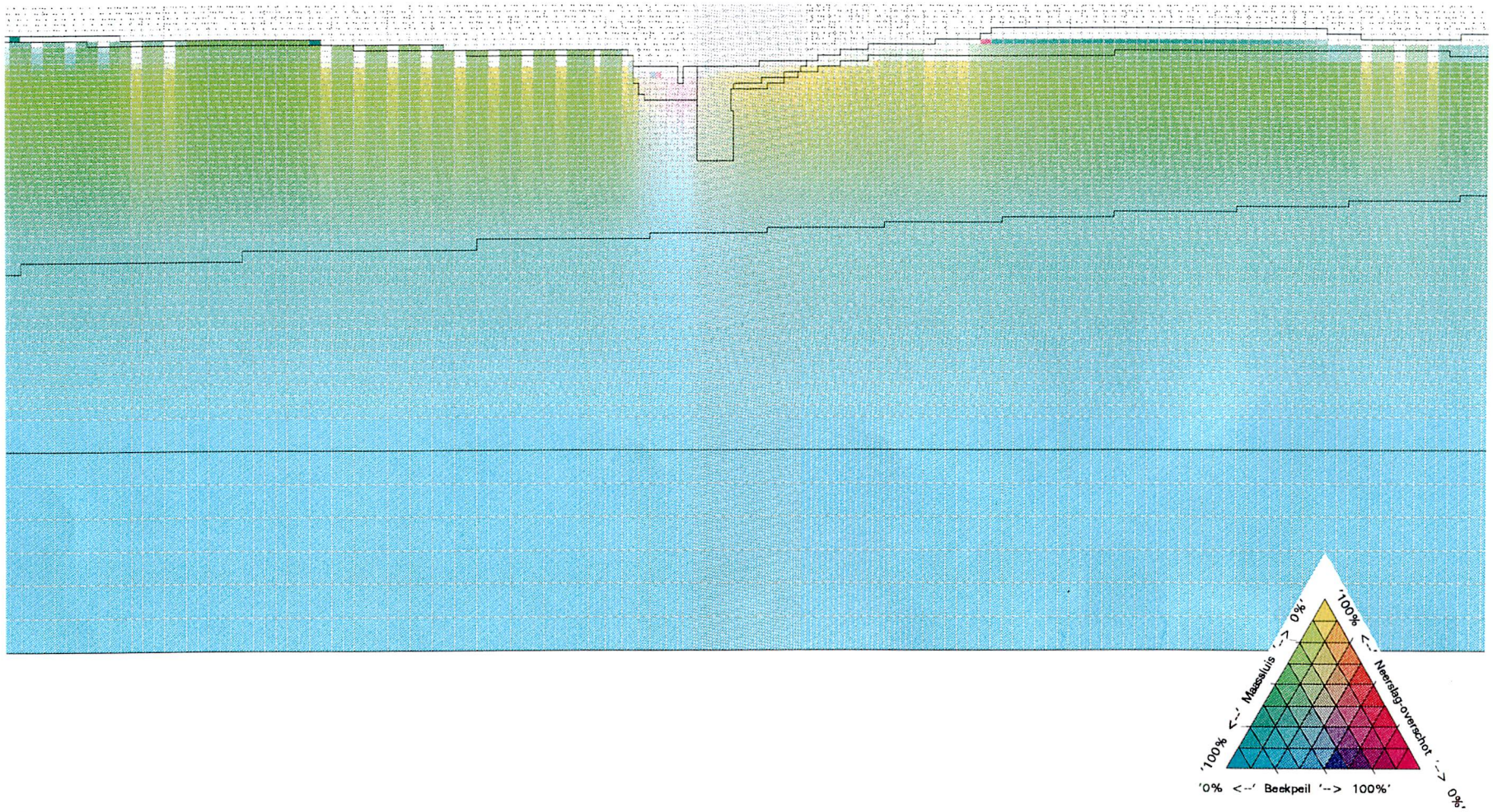
*Bijlage 12*

Legenda:

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

Ontwaterings-stelsel = GRAS-periode (1950-1986)




'95-07-07 / TNO


C o l o f o n :

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

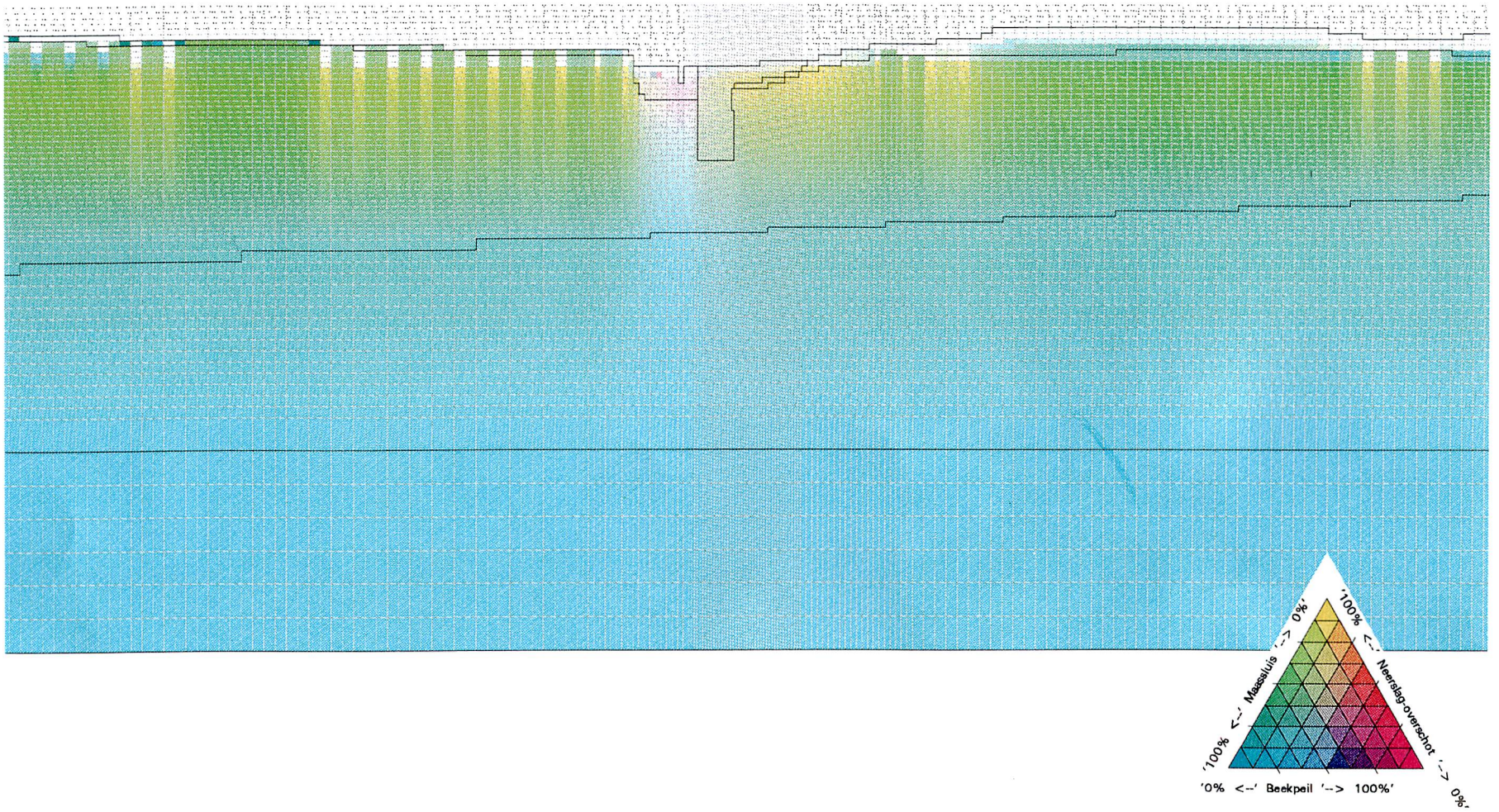

*Bijlage 13*

Legenda:

Titel:

# HALSCHE BEEMDEN

Ontwaterings-stelsel = MAIS-periode (1986-1990)




'95-07-17 - TKI.

Colofon:

TNO Grondwater en Geo-energie

Onderzoek: 'Tijdsafhankelijke Stromings-stelsels
Uitwerking voor 'Het Merkske'

In opdracht:
Rapport-nr.: OS-95/xxx

*Bijlage 14*