

Zoek-Ruimte voor waterberging



## **Zoek-Ruimte voor waterberging**

**GISSurf, een GIS-methodiek voor het bepalen van zoekgebieden voor waterberging**

**J.W.J. van der Gaast**

**Alterra rapport 281**

**Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen, 2002**

## REFERAAT

Gaast, J.W.J. van der, 2002. *Zoek-Ruimte voor waterberging; GISSurf, een methodiek voor het bepalen van zoekgebieden voor waterberging*. Wageningen, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte. Alterra rapport 281. 54 blz., 35 fig.; 3 tab.; 15 ref.

Voor het bepalen van de zoekruimte voor waterberging is aan de hand van een pilotproject een GIS-methodiek ontwikkeld. Voor het in kaart brengen van het oppervlaktewaterstelsel is gebruik gemaakt van een Digitaal Terrein Model (DTM), welke op geheel kunstmatige wijze is opgezet. Bij de bepaling van de waterhoogte is gebruik gemaakt van dwarsprofielen die gegenereerd worden op basis van maaiveldhoogtegegevens en normen voor het oppervlaktewater. Vervolgens is de zoekruimte voor waterberging met behulp van GIS-technieken bepaald.

Trefwoorden: AHN, Dommel, DTM, Inundatie, Noord-Brabant, Waterberging, Zoekruimte.

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door € 30,52 over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-Waterberging rapport 281. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2002 Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte,  
Postbus 47, NL-6700 AA Wageningen.  
Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: [postkamer@alterra.wag-ur.nl](mailto:postkamer@alterra.wag-ur.nl)

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Alterra.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra is de fusie tussen het Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek (IBN) en het Staring Centrum, Instituut voor Onderzoek van het Landelijk Gebied (SC). De fusie is ingegaan op 1 januari 2000.

## Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	13
2 Maaiveldgegevens	15
3 Digitaal terrein model	21
4 Bepaling van de waterberging aan de hand van peilgegevens	27
4.1 Peilgegevens	27
4.2 Bepaling van de overstromingsgebieden	28
5 Bepaling van de zoekruimte voor waterberging aan de hand van Q(h)-relaties.	33
5.1 Bepaling van de Afvoer	33
5.2 Verhanglijn	36
5.3 Dwarsprofiel van de waterloop	36
5.3.1 Bodemtype	37
5.3.2 K-Manning	38
5.3.3 Debiet	39
5.3.4 Dalhelling	39
5.3.5 Berekeningsprincipe	39
5.4 Dwarsprofiel van het maaiveldsdeel	40
5.5 Bepaling van de waterhoogte	41
5.6 Bepaling van de zoekruimte	44
5.7 Gevoeligheidsanalyse	45
6 Conclusies en aanbevelingen	49
Literatuur	53



## Woord vooraf

In de partiële herziening van het streekplan worden de diverse onderdelen van de ruimtelijke discussie van het reconstructieproces aan de orde gesteld. Eén van de onderdelen van de ruimtelijke discussie is het waterbergingsvraagstuk. In dit kader is door de provincie Noord-Brabant aan Alterra een opdracht verleend voor een pilot studie voor de bepaling van de zoekruimte voor waterberging.

Projectleider en uitvoerder van het onderzoek was drs. ing. J.W.J. van der Gaast. De studie is begeleid door een begeleidingsgroep bestaande uit de volgende personen:

F. Helmich	Provincie Noord-Brabant
T. Huijsmans	Provincie Noord-Brabant
C. Kwakernaak	Alterra
M. van de Wouw	Waterschap de Dommel
M. van Betuw	Waterschap de Dommel





## Samenvatting

In de partiële herziening van het streekplan worden de diverse onderdelen van de ruimtelijke discussie van het reconstructieproces aan de orde gesteld. Eén van de onderdelen van de ruimtelijke discussie is het waterbergingsvraagstuk. In dit kader is door de provincie Noord-Brabant aan Alterra een opdracht verleend voor een pilot studie voor de bepaling van de zoekruimte voor waterberging. Om de zoekruimte voor waterberging te kunnen bepalen is het GIS-systeem GISSurf ontwikkeld.

Voor het in kaart brengen van het oppervlaktewaterstelsel is gebruik gemaakt van een Digitaal Terrein Model (DTM). Een Digitaal Terrein Model is een digitale weergave van het maaiveld, welke zodanig is aangepast dat berekeningen van het watersysteem mogelijk zijn. Om een Digitaal Terrein Model op te zetten wordt gebruik gemaakt van maaiveldshoogtegegevens. De stroomrichting van het water wordt afgeleid uit het maaiveldsverloop. Deze methode is alleen bruikbaar indien de maaiveldshoogteverschillen niet te gering zijn en er niet te veel aanpassingen in het oppervlaktewatersysteem hebben plaatsgevonden welke het natuurlijk verloop van de afwatering doorkruisen.

Aan de hand van vergelijking van oude en nieuwe maaiveldshoogtegegevens is gebleken dat de breuken in de provincie Noord-Brabant nog steeds actief zijn. Op basis van de maaiveldshoogtegegevens kan geconcludeerd worden dat de verschillen in maaiveld tussen het oude en het nieuwe bestand gedeeltelijk verklaard kunnen worden door de verticale verschuiving tussen de Centrale Slenk en de horsten aan weerszijde van de slenk. Kwantificering van de maaiveldshoogteverschillen door verticale bewegingen is gezien het ingewikkelde breukenpatroon echter zeer moeilijk. Om meer inzicht in de maaiveldveranderingen te krijgen zal er aanvullend onderzoek plaats moeten vinden, waarin naast bovengenoemde veranderingen ook rekening gehouden wordt met de schaalverschillen en meetfouten van de gebruikte bronbestanden.

Voor dit project is er een methodiek ontwikkeld voor het genereren van een fictief DTM. Het fictieve DTM wordt opgezet op basis van de kortste afstand tot een waterloop gecombineerd met bestaande kennis over de begrenzing van grotere afwateringseenheden. Hierbij wordt uitgegaan van de hypothese dat de waterscheiding tussen twee waterlopen precies in het midden tussen de waterlopen ligt.

Bij de bepaling van overstromingsgebieden speelt de waterhoogte een cruciale rol. Naast het gebruik van peilschaalgegevens is ook gebruik gemaakt van  $Q(h)$ -relaties bij de bepaling van de waterhoogte voor een bepaalde herhalingstijd. Bij het gebruik van  $Q(h)$ -relaties is naast de afvoer informatie van het dwarsprofiel noodzakelijk. Voor het bepalen van de dwarsprofielen van waterlopen zijn 2 methoden denkbaar:

- Dwarsprofiel informatie van het Waterschap;
- Berekeningen op basis van normen.

Het gebruik van de dwarsprofielinformatie van de waterschappen geeft een enorme vraag aan informatie die niet op eenvoudige wijze in digitale vorm beschikbaar zijn. Om deze praktische reden is er voor dit project voor gekozen om de dwarsprofielen van de waterlooptrajecten te berekenen op basis van normen. Daarnaast kan gesteld worden dat de dwarsprofielinformatie van waterlopen bij piekafvoeren met inundaties minder bepalend is dan bij lage afvoeren. Het dwarsprofiel van het omringende maaiveld is bij inundatie situaties immers bepalend voor het verloop van de  $Q(h)$ -relatie. Indien dwarsprofielinformatie wel beschikbaar is, geniet het gebruik van deze informatie de voorkeur.

Bij de berekening van de dwarsprofielen is gebruik gemaakt van het model StreamES (Stream Morphology Evaluation System). Het systeem is opgezet om een koppeling te kunnen leggen tussen de morfologie van beken en de afvoer. Aan de hand van normen kunnen met het model potenties voor hermeandering van beken voorspeld en gekwantificeerd worden. Voor de toepassing in dit project is het model uitgebreid voor genormaliseerde waterlopen. Deze aanpassing maakt het model geschikt voor de toepassing in dit project.

Het bergingsvraagstuk is onder te verdelen in de volgende twee onderdelen:

- Berging bij de bron;
- Berging in de beekdalen.

### ***Berging bij de bron***

Berging bij de bron bestaat uit de berging in de bodem, op het maaiveld en in het oppervlaktewaterstelsel. De gebruikte neerslag-afvoer relatie heeft een constante maaiveldsberging en is derhalve niet geschikt voor scenarioanalyse. Voor de berging in de bodem is alleen gebruik gemaakt van een initiële grondwaterstand en de bijbehorende bergingscoëfficiënt. Aangezien het voor deze toepassing voornamelijk gaat om piekafvoeren speelt ook berging op het maaiveld een belangrijke rol. Voor deze vorm van berging is 5 mm aangehouden.

### ***Berging in de beekdalen***

Voor berging in de beekdalen is het maaiveldverloop in de beekdalen van groot belang. In dit project is een methodiek ontwikkeld om de  $Q(h)$ -relatie voor beken die buiten hun oevers treden vast te kunnen stellen. In het pilot project zijn de beektrajecten met de bijbehorende  $Q(h)$ -relaties niet onderling gekoppeld. Door het afzonderlijk doorrekenen van de beektrajecten en het ontbreken van de koppeling kan opstuwning niet meegenomen worden. Voor scenarioanalyse is een koppeling van de beektrajecten en eventuele kunstwerken noodzakelijk.

Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat het geïnundeerde areaal niet sterk toeneemt bij hogere oppervlaktewaterstanden. De beekdalen in het studiegebied zijn relatief smal en hebben een steil verloop. Bij de bepaling van het inundatiegebied is het wel of niet buiten de oevers treden de meest bepalende factor. Indien het waterpeil boven de oever uitkomt ligt het areaal dat inundeert door de relatief steile beekdalen min of meer vast.

Uit de gevoeligheidsanalyse is ook naar voren gekomen dat de uitkomsten schaalafhankelijk zijn. Indien de dichtheid van de beschouwde waterlopen toeneemt neemt ook de versnippering van de inundatiegebieden toe. Deze relatie is het gevolg van de ligging van de grenzen van afwateringseenheden.

Samenvattend kan gesteld worden dat het pilot project de volgende conclusies heeft opgeleverd:

- De gebruikte neerslag-afvoer relatie is erg globaal en geeft weinig ruimte voor scenarioanalyse;
- Het afzonderlijk doorrekenen van de dwarsprofielen levert niet de gewenste resultaten. Opstuwing en beperkende kunstwerken kunnen bij de huidige opzet niet meegenomen worden;
- Het gebruik van een DTM geeft de mogelijkheid om de afwateringsstructuur op verschillende schaalniveaus in de vingers te krijgen;
- Het maaiveldverloop is in hoge mate bepalend voor de ruimtelijke verbreiding van inundatiegebieden;
- De ruimtelijke verbreiding van inundatiegebieden is schaalafhankelijk.



# 1 Inleiding

In de partiële herziening van het streekplan worden de diverse onderdelen van de ruimtelijke discussie van het reconstructieproces aan de orde gesteld. Eén van de onderdelen van de ruimtelijke discussie is het waterbergingsvraagstuk. In dit kader is door de provincie Noord-Brabant aan Alterra een opdracht verleend voor een pilot project. Het pilot project stelt de volgende twee doelen:

- Het bepalen van de zoekruimte voor waterberging;
- Het ontwikkelen van een methodiek voor het evalueren van de benutting van de zoekruimte voor waterberging.

In het vooroverleg met provincie en waterschap is duidelijk geworden dat de benodigde afvoergegevens en gegevens omtrent dwarsprofielen niet op zeer korte termijn in een bruikbare vorm beschikbaar kunnen worden gesteld, terwijl de bepaling van de zoekruimte wel zeer urgent is als bouwsteen voor het koepelplan reconstructie. De gevraagde gegevens zijn (in combinatie met een digitaal terrein model (DTM)) essentiële data voor het bepalen van het peil tijdens piekafvoeren. Vastgesteld is dat in eerste instantie uitgegaan zal moeten worden van peilgegevens. Om de zoekgebieden voor waterberging te bepalen is het gebruik van afvoergegevens en dwarsprofielinformatie evenwel niet strikt noodzakelijk, indien uitgegaan wordt van peilgegevens.

Voor het definiëren en toepassen van scenario's, waarmee mogelijke maatregelen in het kader van reconstructieplannen kunnen worden doorgerekend op hun effectiviteit voor waterberging, is het echter wel van belang om gebruik te maken van een DTM. Het DTM verschaft inzicht in het afwateringssysteem. Met een DTM kan voor ieder willekeurig punt in een waterloop het achterliggende gebied bepaald worden. Deze informatie is noodzakelijk om de aanvoer van water te kunnen bepalen. Aan de hand van informatie van het dwarsprofiel van waterlopen kan vervolgens bekeken worden wat de effecten van waterberging op het peil is. Zonder de dwarsprofielinformatie of  $Q(h)$ -relaties voor een groot aantal punten is het doorrekenen van scenario's niet mogelijk. Bij het gebruik van peilgegevens wordt de zoekruimte immers bepaald aan de hand van historische gegevens. Uitgaande van deze informatie ligt het voor de hand om, gezien het te hanteren tijdschema, het project op te delen in twee fasen:

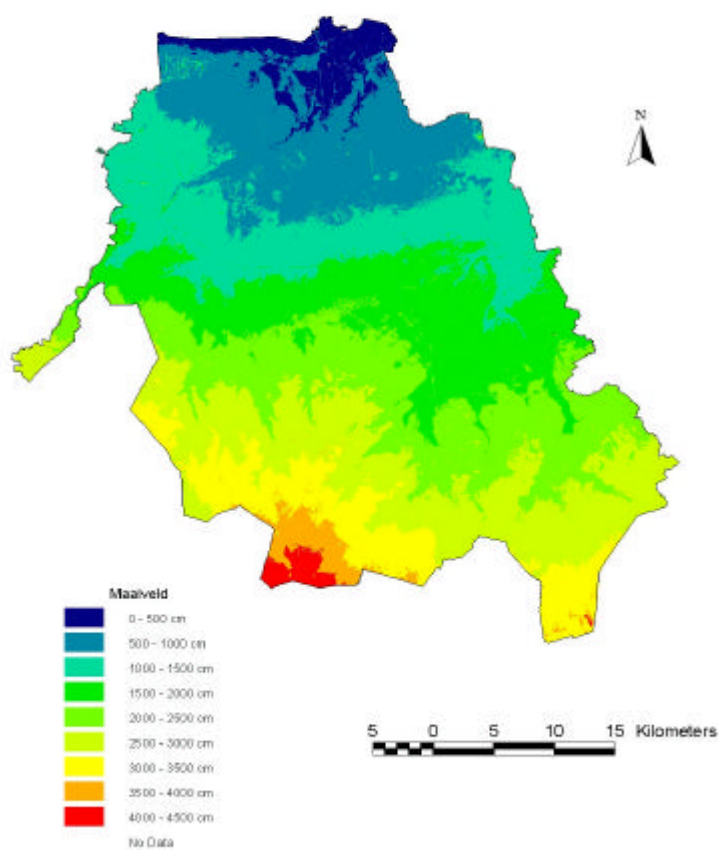
- Fase 1. Bepaling zoekruimte aan de hand van peilgegevens;
- Fase 2. Bepaling zoekruimte aan de hand van dwarsprofielen.

Dit document geeft een beschrijving van de werkzaamheden en bevindingen naar aanleiding van de pilotstudie.



## 2 Maaiveldgegevens

Om de zoekruimte voor waterberging te kunnen bepalen zijn maaiveldgegevens noodzakelijk. Voor dit project is gebruik gemaakt van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). In het AHN-bestand blijkt het stedelijk gebied een grote spreiding van maaiveldhoogten te hebben. Naast de maaiveldhoogten komen in het stedelijk gebied namelijk ook hoogten van gebouwen voor. In het kader van de GT-actualisatie is daarom het stedelijk gebied uit het AHN-bestand gefilterd. In dit pilot project, waarin o.a. naar overstromingsgebieden gekeken wordt is een correcte maaiveldhoogte inclusief het stedelijk gebied van belang. Voor het pilot project is naast het AHN-bestand het TOPHOOGTE-bestand gebruikt om de maaiveldhoogten voor het stedelijk gebied in te vullen (fig. 1).



*Fig 1 Maaiveldhoogte voor het beheersgebied van waterschap de Dommel*

Het TOPHOOGTE-bestand bestaat uit waterpasgegevens met een gemiddelde dichtheid van 1 punt per hectare. Voor het invullen van het stedelijk gebied zijn deze maaiveldgegevens geïnterpoleerd. De kaartbladen binnen het beheersgebied van waterschap de Dommel zijn over het algemeen gekarteerd tussen 1955 en 1965. Het

AHN-bestand is recentelijk met behulp van laserscanning gekarteerd. Voor dit project zijn de AHN-gridbestanden met een resolutie van 25 x 25 meter gebruikt. Ter controle zijn de gegevensbestanden van elkaar afgetrokken (fig. 2).

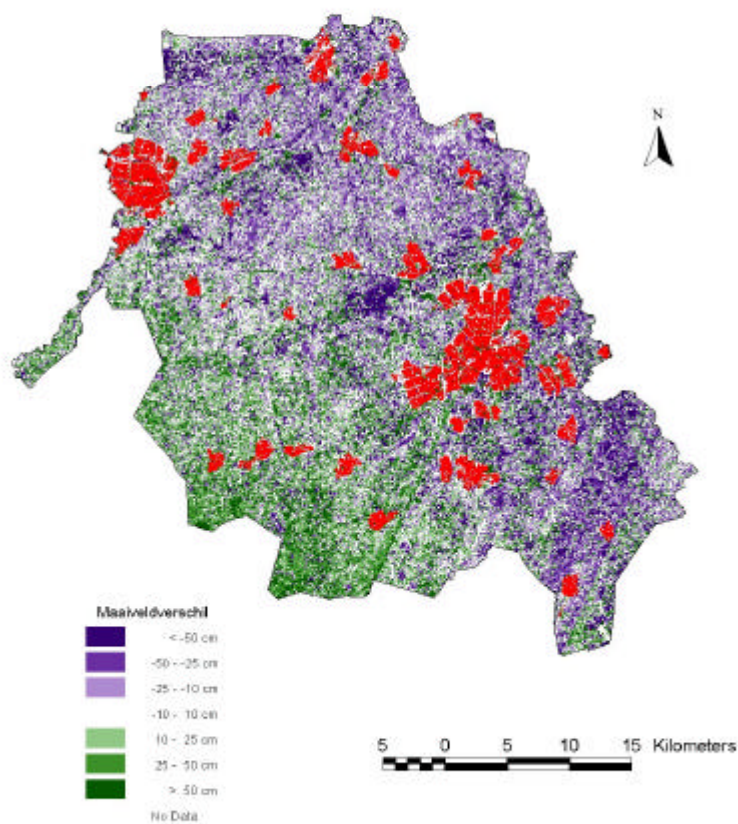


Fig 2 Maaiveldhoogteverschil tussen AHN en Tophoogtebestand voor het beheersgebied van waterschap de Dommel.

In bovenstaande kaart is het verschil tussen de oude en de nieuwe maaiveldhoogtegegevens weergegeven. Het witte gebied heeft een relatief geringe afwijking van plus of min 10 cm. De paarsgetinte gebieden geven een afwijking van meer dan -10 cm weer. In deze gebieden is het maaiveld in het nieuwe AHN-bestand beduidend lager dan het maaiveld in het TOPHOOGTE-bestand uit de jaren 50 en 60. Voor de groene gebieden is dit precies andersom. Opvallend in de kaart is de sterke scheiding tussen de gebieden met grote afwijkingen tussen de oude en de nieuwe kaart. Lokaal zijn de afwijkingen te verklaren door bijvoorbeeld wegen, meertjes en stuifzandgebieden. Vooral bij de Drunensche duinen in het noordwesten van het gebied en de Oirschotsche heide in het centrum van het beheersgebied van waterschap de Dommel is het huidige maaiveld lager.

De gevonden afwijkingen zijn echter niet willekeurig verdeeld. Een aannemelijke verklaring voor de afwijking die verschillend is in verschillende delen van het



beheersgebied is misschien de Feldbiss breuk, die van zuidoost naar noordwest door het gebied lopen. De breuk van Vessem markeert de grens tussen het Kempisch hoog en de Centrale Slenk (fig. 3 en 4). Dit zou echter wel betekenen dat de breuk nog actief is en de Centrale Slenk nog zakt en het Kempisch plateau stijgt.

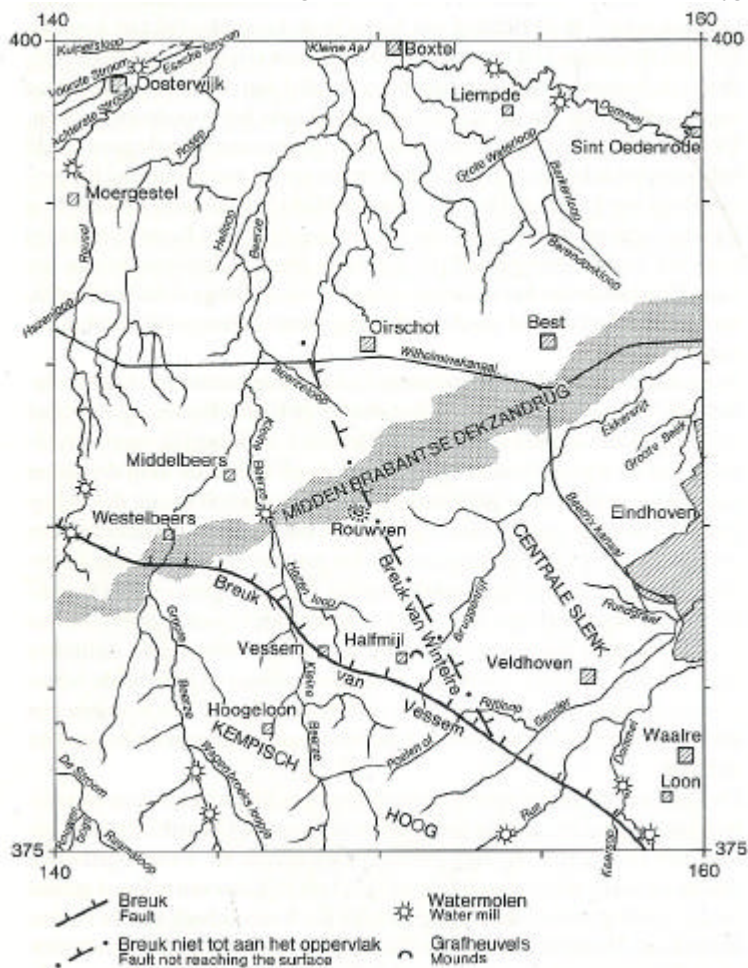


Fig 3 Geografisch overzicht van het kaartbladgebied Eindhoven West (Bisschops et al., 1985)

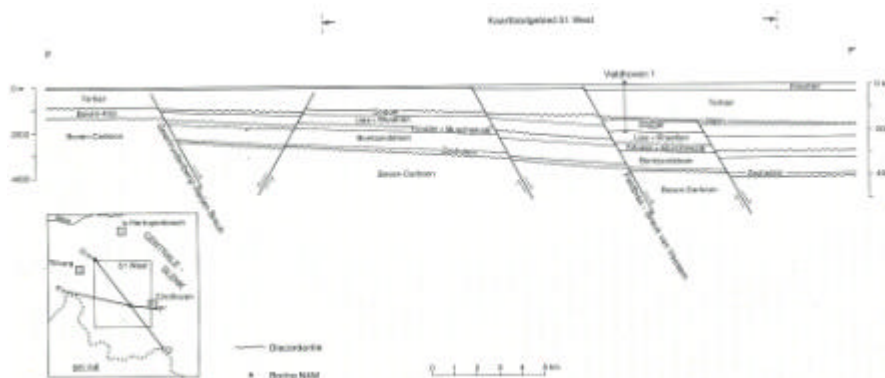


Fig 4 Geologisch profiel PP' door het zuidwestelijk deel van de Centrale Slenk (Bisschops et al., 1985)

Om meer inzicht in de maaiveldhoogteverschillen te krijgen zijn de verschillen voor de gehele provincie Noord-Brabant bepaald. In figuur 5 is te zien dat de Centrale

Slenk over het algemeen gezakt is en het Kempisch plateau en de Peelhorst omhoog gekomen zijn.

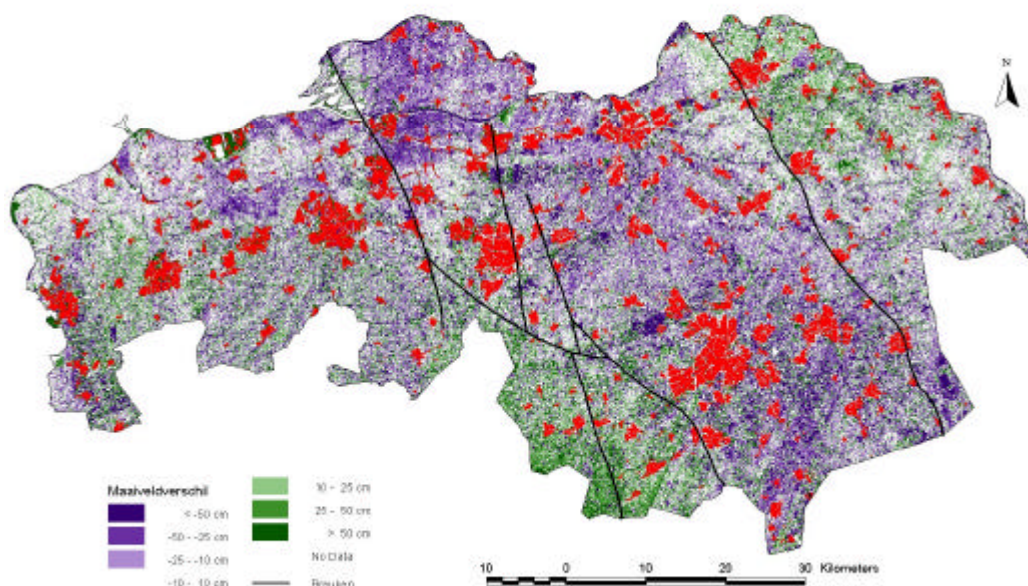


Fig. 5 Maaiveldhoogteverschil tussen AHN en Tophoogtebestand voor de provincie Noord-Brabant

Het horsten en slenkensysteem is actief sinds het Laat-Oligoceen. De toename van het hoogteverschil tussen de Centrale Slenk en de Peelhorst was gemiddeld 0,01 mm/jaar. De verschuivingsnelheid is in het Kwartair toegenomen, deze bedraagt nu ongeveer 0,8 mm/jaar (Geluk et al., 1994; van den Berg et al., 1994). Deze geringe verticale verschuiving is echter een gemiddelde, welke gebaseerd is op geologische gegevens. Hoogstwaarschijnlijk vindt de verticale verschuiving niet continu maar schoksgewijs plaats. In April 1992 is er in Nederland een aardbeving geweest met het epicentrum nabij Roermond (fig. 6). Deze aardbeving had een kracht van 5.8 op de schaal van Richter, met vele naschokken. Het betrof een aardbeving met voornamelijk een verticale verschuiving tussen de horsten en de slenk. Als gevolg van de aardbeving zijn grote delen in de Centrale Slenk (nabij Roermond) met ongeveer 20-30 cm gezakt (Eck en Davenport, 1994; Camelbeeck et al., 1994).

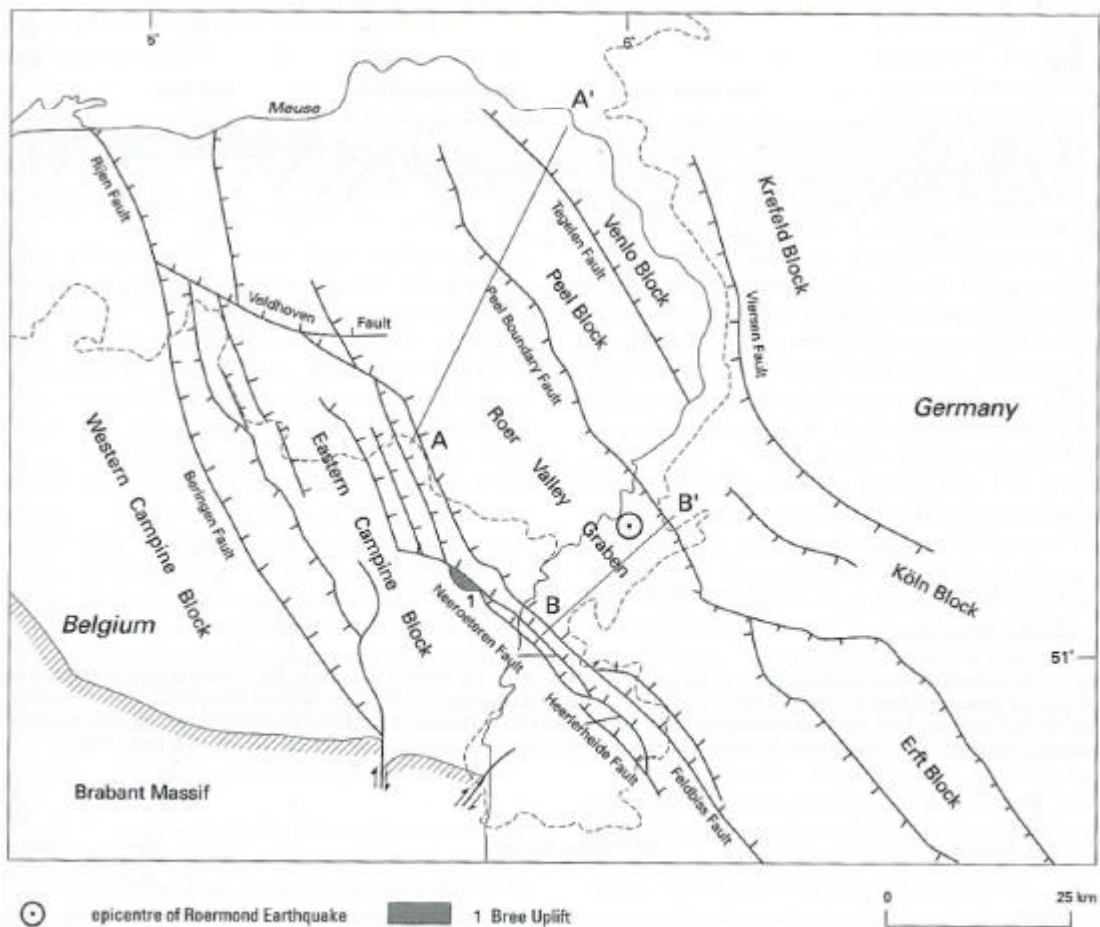


Fig 6 Kaart met de voornaamste breuken, horsten en slenken (Geluk et al., 1994).

Op basis van de bovenstaande gegevens kan geconcludeerd worden dat de gevonden verschillen in maaiveld tussen het oude en het nieuwe bestand gedeeltelijk verklaard kunnen worden door de verticale verschuiving tussen de Centrale Slenk en de horsten aan weerszijde van de slenk. Indien uitgegaan wordt van de gemiddelde verschuivingsnelheid van 0.8 mm/jaar is het maaiveldhoogteverschil tussen de opnamedata van de twee gebruikte kaarten ongeveer 4 cm. Kwantificering van de maaiveldhoogteverschillen door verticale bewegingen is gezien het ingewikkelde breukenpatroon echter zeer moeilijk (Fig. 7). Om meer inzicht in de maaiveldveranderingen te krijgen zal er aanvullend onderzoek plaats moeten vinden, waarin naast bovengenoemde veranderingen ook rekening gehouden wordt met de schaalverschillen en meetfouten van de gebruikte bronbestanden. In het beheersgebied van waterschap Mark en Weerijds komen ook grote maaiveldverschillen voor. Deze lijken echter wel random verdeeld. Wellicht geeft een geringe verticale verschuiving tussen de Centrale Slenk en de horsten al genoeg effect om het gevonden kleurpatroon in de kaart te kunnen verklaren.



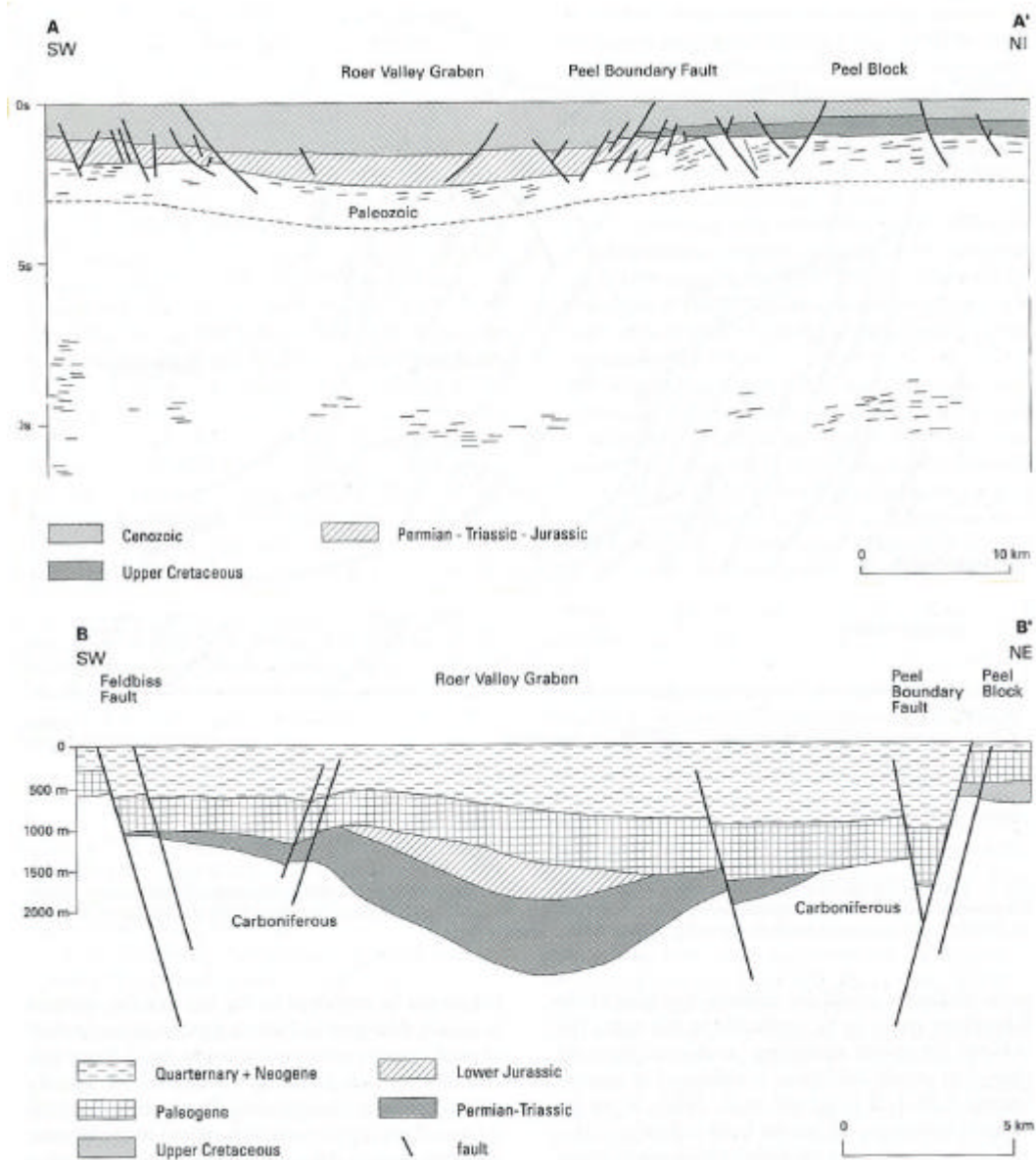


Fig 7 Dwarsprofielen A en B (Geluk et al., 1994).

### 3 Digitaal terrein model

Voor het in kaart brengen van het oppervlaktewaterstelsel kan een Digitaal Terrein Model (DTM) worden gebruikt. Een Digitaal Terrein Model is een digitale weergave van het maaiveld, welke zodanig is aangepast dat berekeningen van het watersysteem mogelijk zijn. Om een Digitaal Terrein Model op te zetten wordt gebruik gemaakt van maaiveldshoogtegegevens. De stroomrichting van het water wordt afgeleid uit het maaiveldsverloop. Deze methode is alleen bruikbaar indien de maaiveldshoogteverschillen niet te gering zijn.

De Digitale Terrein Modelling wordt in het buitenland veelvuldig toegepast bij de schematisering van het oppervlaktewater. Met standaard GIS-technieken zijn voor hellende gebieden talloze toepassingsmogelijkheden beschikbaar. Onder Nederlandse omstandigheden geeft het gebruik van de maaiveldhoogten bij de bepaling van de stroomrichting van het water alleen in de hellende zandgebieden redelijk goede resultaten. Toch wordt er in Nederland nog maar weinig gebruik gemaakt van deze DTM-technieken. Door Heuven en van Bakel (1995) zijn een aantal toepassingen voor het Nederlandse waterbeheer geschetst. In het bovenstaande onderzoek wordt naast de toepassingsmogelijkheden ook het probleem van vlak Nederland aangestipt.

Over het algemeen zijn de maaiveldshoogteverschillen in Nederland gering en het oppervlaktewatersysteem is veelal niet meer natuurlijk, maar is sterk antropogeen beïnvloed. In Nederland zijn in de loop der tijden veelvuldig aanpassingen in het waterhuishoudkundige systeem doorgevoerd. Indien een dergelijke aanpassing in het systeem niet volgens het natuurlijke verloop van de maaiveldhoogte is aangelegd kan de stroomrichting van het water met de traditionele methode van digitale terrein modellering, waarbij alleen gebruik gemaakt wordt van hoogtegegevens, niet correct in beeld gebracht worden. Voor toepassing van een DTM in Nederland is het derhalve noodzakelijk om naast maaiveldhoogtegegevens ook gebruik te maken van de ligging van waterlopen. Alleen door combinatie van deze gegevens kan rekening gehouden worden met afwijkende situaties zoals bijvoorbeeld een waterloop die een hogere zandrug doorsnijdt.

Het beschikbaar komen van basisgegevens met een hoog detailniveau maakt het mogelijk om Digitale Terrein Modellen op te zetten voor verschillende schaalniveaus. Het AHN-bestand heeft voor een dergelijke toepassing een zeer hoog detailniveau. Bij de bepaling van een DTM, waarin de stroomrichting van het water wordt vastgelegd, zijn maaiveldverschillen de drijvende kracht. Bij het gebruik van maaiveldhoogtegegevens met een hoog detailniveau kunnen bijvoorbeeld binnen percelen locale laagten (sinks) voorkomen. Bij de opzet van het DTM worden het hoogtebestand zodanig aangepast dat deze laagten worden opgevuld totdat de laagte kan afwateren op een waterloop. Dit heeft tot gevolg dat de waterscheiding van het oppervlaktewater op locale schaal een grillig verloop kan vertonen. Het is afhankelijk van de verdere toepassing van het DTM of men inderdaad geïnteresseerd is in de op

deze manier gegenereerde waterscheiding van het oppervlaktewater. De informatie over locale laagten is echter wel bruikbaar voor de bepaling van maaiveldsberging.

In sterk hellende gebieden worden de waterscheidingen van het oppervlaktewater op regionale schaal voornamelijk door het maaiveld bepaald (Fig. 8).

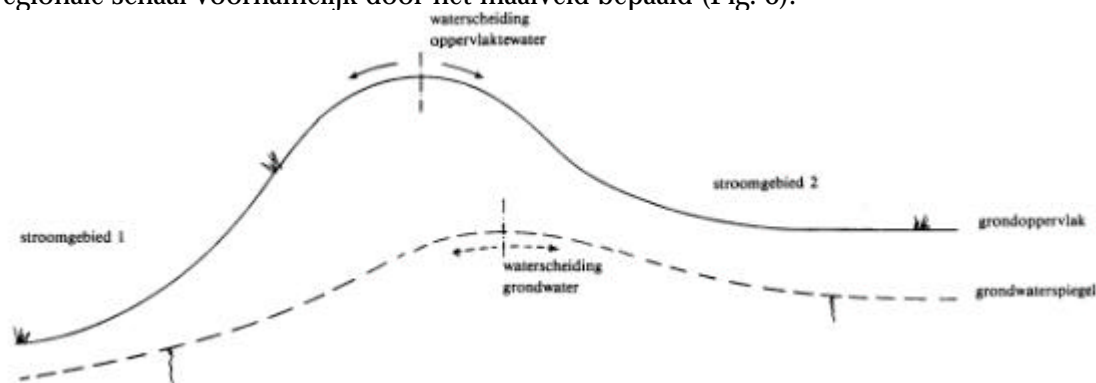


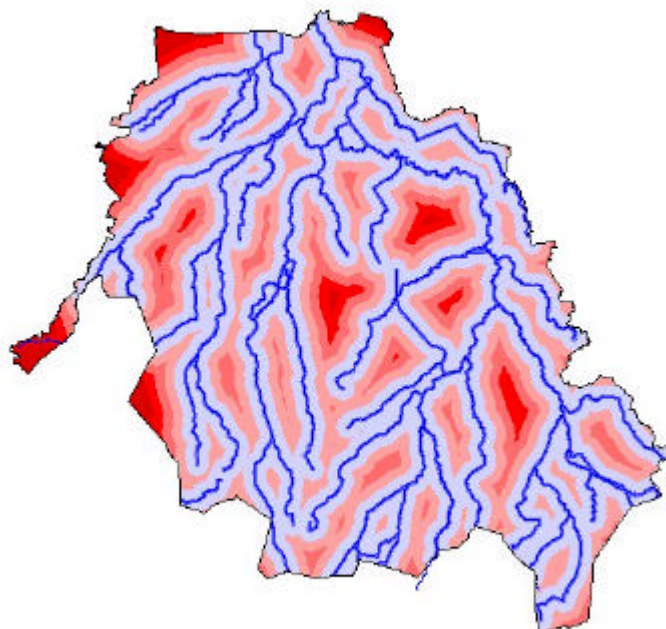
Fig. 8 Waterscheiding (Commissie voor Hydrologisch Onderzoek, 1986.)

De waterscheiding van het grondwater hoeft echter niet overeen te komen met de waterscheiding van het oppervlaktewater. De waterscheiding van het grondwater wordt in dit soort gebieden (gebieden zonder zichtbare afvoer) voornamelijk bepaald door het peilverschil tussen de waterlopen en de drainageweerstand. Bij het bepalen van afwateringseenheden is het van belang om op voorhand rekening te houden met de toepassing. Afwateringseenheden worden veelal gebruikt voor het bepalen van de af te voeren hoeveelheid water. Indien uitgegaan wordt van de waterscheiding van het oppervlaktewater zal het neerslagoverschot in het gebied tussen de waterscheiding van het oppervlaktewater en de waterscheiding van het grondwater toegekend worden aan de afwateringseenheid die het water niet daadwerkelijk afvoert. De ligging van waterscheiding en het afwaterend oppervlak kan zelfs per situatie verschillen. In droge perioden is de waterscheiding van het freatisch vlak bepalend voor de waterscheiding, terwijl tijdens piekafvoeren de waterscheiding op basis van het maaiveld veelal bepalend is.

De bovenstaande beschouwing heeft er toe geleid dat er een methodiek is ontwikkeld voor het genereren van een fictief DTM. Het fictieve DTM wordt opgezet op basis van de kortste afstand tot een waterloop gecombineerd met bestaande kennis over de grotere afwateringseenheden. Hierbij wordt uitgegaan van de hypothese dat de waterscheiding tussen twee waterlopen precies in het midden tussen de waterlopen ligt. Deze aanname voldoet echter niet altijd. In sterk hellende gebieden worden de waterscheidingen van het oppervlaktewater op regionale schaal voornamelijk door het maaiveld bepaald (Fig. 8).

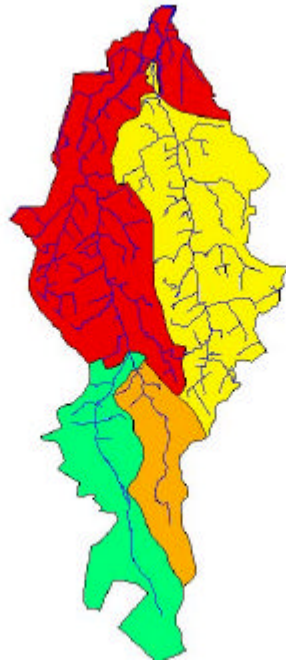
Bij het genereren van het fictieve Digitaal Terrein Model wordt een bestand gegenereerd met fictieve hoogteinformatie. Het fictieve DTM wordt gegenereerd op basis van de gemakkelijkste en kortste afstand tot het uitstroompunt. Het bestand wordt zodanig opgezet dat een punt dat ver van het uitstroompunt verwijderd is een hoge getalswaarde heeft, en een punt in een waterloop nabij het uitstroompunt een lage getalswaarde (Fig. 9). Op deze manier kan een bestand gegenereerd worden

waarin de afwateringsstructuur is vastgelegd. Er bestaat echter geen enkele relatie meer met de maaiveldhoogtegegevens. Bij het genereren van het fictieve DTM is in eerste instantie gebruik gemaakt van de ligging van de waterlopen en de uitstroompunten aan de rand van het gebied (Fig. 9).



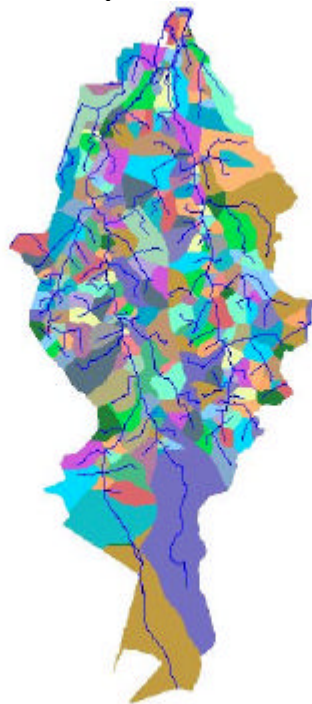
*Fig 9 Fictief Digitaal Terrein Model (DTM) voor een hellend gebied.*

Om de werkelijke afwateringsstructuur beter te kunnen beschrijven is de procedure voor de opzet van het fictieve DTM in de tweede fase van het project uitgebreid. Door aanpassing van de procedure kunnen de ligging van bestaande en bekende grenzen van afwateringseenheden (waterscheidingen) en barrières in de bepaling van het fictieve DTM meegenomen worden. In de onderstaande kaart zijn een aantal afwateringseenheden uit het Waterstaatkundig Informatie Systeem (WIS) weergegeven (fig. 10).



*Fig. 10 Afwateringseenheden uit het Waterstaatkundig Informatie Systeem (WIS).*

Door gebruik te maken van het kunstmatige DTM kunnen de bekende afwateringseenheden op eenvoudige wijze neergeschaald worden. De bepaling van de afwateringseenheden kan voor ieder gewenst punt op een waterloop plaatsvinden. In de onderstaande kaart is voor iedere waterloop de bijbehorende afwateringseenheid weergegeven (fig. 11). Bij ieder samenstroompunt van twee waterlopen zijn de afzonderlijke afwateringseenheden bepaald.



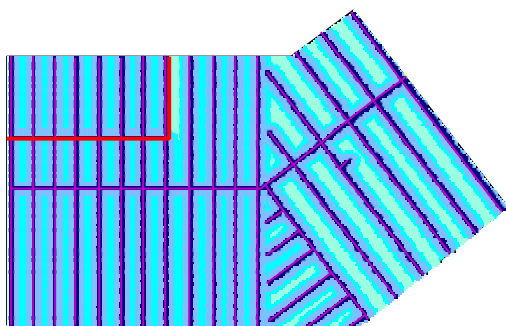
*Fig. 11 Gegeneerde afwateringseenheden voor iedere afzonderlijke waterloop.*



Het genereren van een kunstmatig DTM is een manier om de afwateringsstructuur van een gebied in digitale vorm vast te leggen. Hiermee ligt zowel de herkomst als de afwateringsrichting van een gebied vast. Aan de hand van nabewerkingen kan de afwateringssituatie voor ieder willekeurig punt in een gebied bepaald worden.

De nauwkeurigheid van het kunstmatige DTM is voornamelijk afhankelijk van het aantal waterlopen en waterscheidingen die meegenomen worden in de procedure. De procedure kan wellicht ook gebruikt worden in combinatie met het TOP10-Vector bestand. De enorme hoeveelheid aan waterlopen in dit bestand zou de nauwkeurigheid van de gegenereerde afwateringsstructuur sterk kunnen verhogen.

Het genereren van een kunstmatig gegenereerd DTM zonder het gebruik van maaiveldhoogtegegevens maakt de methode ook geschikt voor vlakke gebieden. Poldergrenzen, dijken en verhoogde wegen kunnen in de procedure meegenomen worden in de vorm van barrières (fig. 12).



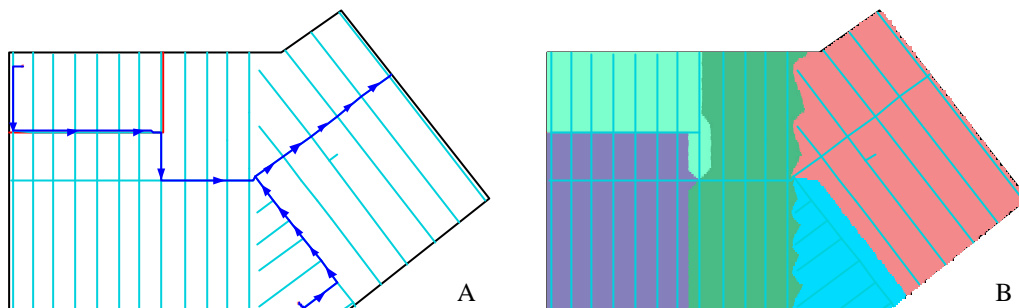
*Fig. 12 Fictief-DTM voor een poldergebied.*

Ook in vlakke gebieden hoeft de aanname dat de waterscheiding precies tussen twee waterlopen ligt niet altijd op te gaan. De waterscheiding kan in dit soort gebieden bijvoorbeeld bepaald worden door relatief hoog gelegen wegen. Om deze problemen te ondervangen is GisSurf zodanig opgezet dat bekende waterscheidingen kunnen worden meegenomen. Indien de waterscheidingen op regionale schaal niet bekend zijn kunnen deze voor hellende gebieden bepaald worden aan de hand van de maaiveldhoogtegegevens. Op deze schaal kan het gebruik van een DTM op basis van de maaiveldhoogte en de ligging en stroomrichting van de A-watgangen goede resultaten geven (Querner et al., 1998). Om het aantal locale laagten te beperken kan het AHN opgeschaald worden door gebruik te maken van het gemiddelde maaiveld voor grids van bijvoorbeeld 100 meter.

Voor het genereren van een fictief DTM zijn de volgende gegevens noodzakelijk:

- Ligging van de waterlopen;
- Uitstroompunten uit het gebied;
- Ligging van bestaande afwateringseenheden of barrières (optioneel).

In een DTM is de afwateringsstructuur van een gebied in digitale vorm vastgelegd. Hiermee ligt zowel de herkomst als de afwateringsrichting van het water in een gebied vast. Aan de hand van nabewerkingen kan de afwateringssituatie voor ieder willekeurig punt in een gebied bepaald worden (fig. 13). Deze eigenschap maakt een DTM geschikt voor de bepaling van de af te voeren hoeveelheid water.



*Fig. 13 Afwateringsstructuur voor een poldergebied; A stromingsrichting B afwateringseenheden*

## 4 Bepaling van de waterberging aan de hand van peilgegevens

### 4.1 Peilgegevens

Door het waterschap De Dommel zijn peilschaalgegevens beschikbaar gesteld. Het betreft de volledige reeksen voor 22 peilschalen in het beheersgebied en lijsten met overschrijdingsniveaus voor de overige peilschalen in het gebied. Zoals verwacht geven de peilschaalgegevens een scheve verdeling te zien (fig. 14). De hoge peilen komen relatief weinig voor. Voor dit pilot project zijn we echter voornamelijk geïnteresseerd in de piekafvoeren met hoge peilen. Voor de extrapolatie van de peilgegevens is gebruik gemaakt van de Gumbel-verdeling. De Gumbel-verdeling is een scheve verdeling die uitermate geschikt is voor statistische analyses van extreme waarden.

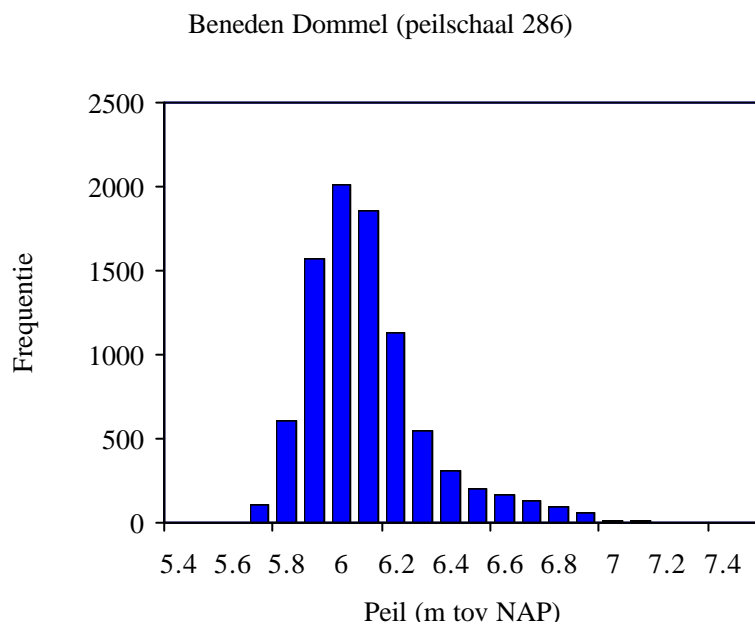


Fig. 14 Frequentieverdeling voor peilschaal 286

Om te kunnen extrapoleren zijn de statistische grootheden van de Gumbel-verdeling voor de peilschaalallocaties bepaald aan de hand van het peil met een herhalingstijd van jaarextremen van 1 jaar en het peil met een herhalingstijd van jaarextremen van 5 jaar. Voor deze analyse is alleen gebruik gemaakt van peilschalen die 10 jaar of langer waargenomen zijn. In figuur 15 zijn de locaties van de peilschalen weergegeven. In de linker figuur zijn alle peilschalen weergegeven. In de rechter figuur zijn de peilschalen die langer dan 10 jaar waargenomen worden weergegeven.

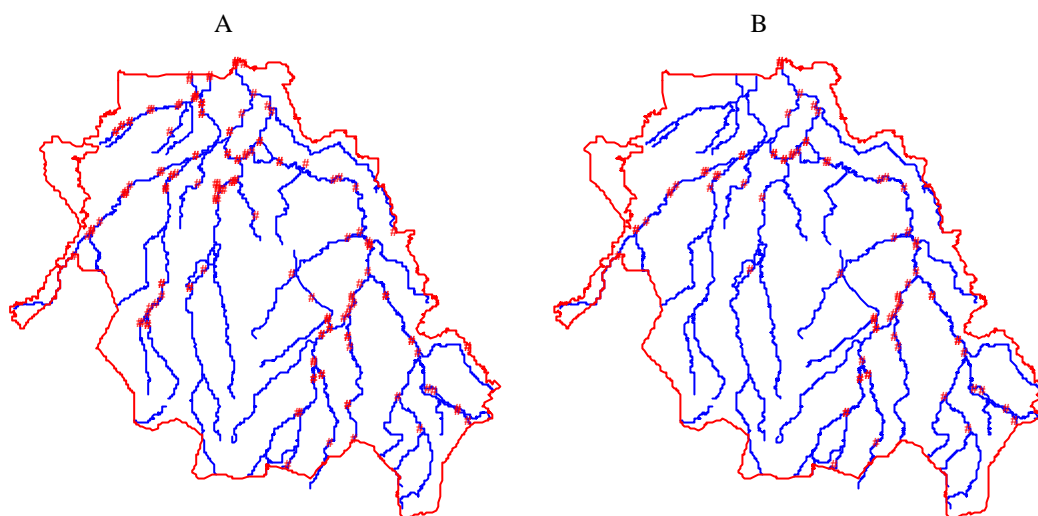


Fig. 15 Locatie van de peilschalen: A Alle peilschalen B Peilschalen die langer dan 10 jaar zijn waargenomen.

Het aantal te gebruiken peilschalen is voornamelijk in het Beerze en Reusel gebied gering.

## 4.2 Bepaling van de overstromingsgebieden

Voor de bepaling van de zoekruimte aan de hand van peilgegevens is de GIS-procedure GisSurf ontwikkeld. Bij de procedure zijn de volgende stappen te onderscheiden:

1. Bepaling van het bovenstroomse gebied per peilschaal
2. Toekenning van het peil aan de bovenstroomse trajecten
3. Bepaling van het overstromingsgebied

### *Ad 1) Bepaling van het bovenstroomse gebied per peilschaal*

Om het gebied te bepalen waarvoor een peilschaal representatief is moet het bovenstroomse gebied voor iedere peilschaal bepaald worden. Om dit op een eenvoudige wijze mogelijk te maken is in het kader van dit pilot project een procedure ontwikkeld om een fictief Digitaal Terrein Model te genereren (hoofdstuk 3). Voor de bepaling van de bovenstroomse gebieden van de peilschalen is per peilschaal de afwateringseenheid bepaald (fig. 16).

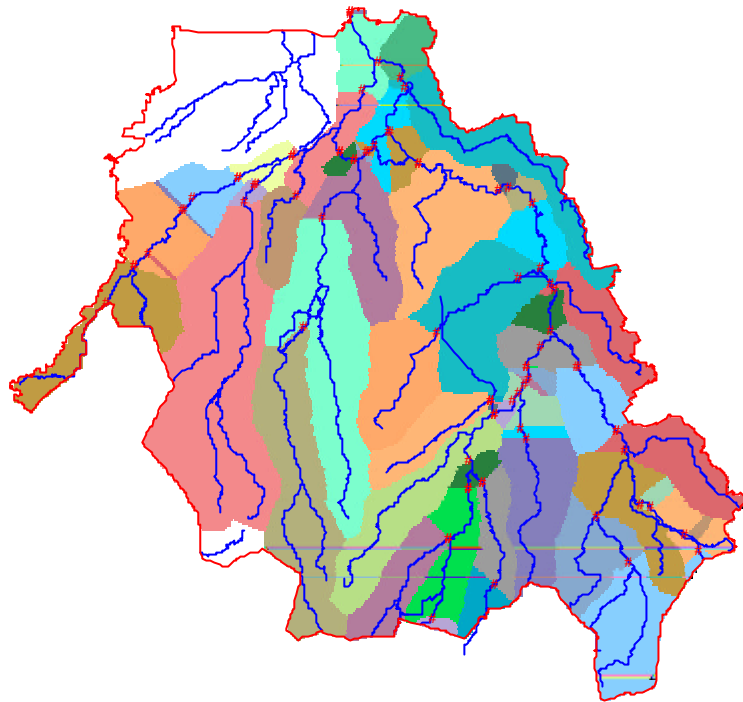


Fig. 16 Afwateringseenheden per peilschaal.

*Ad 2) Toekenning van het peil aan de bovenstroomse trajecten*

Indien de bovenstroomse gebieden per peilschaal bekend zijn kan het peil toegekend worden aan de waterlopen. Het benedenstroomse peil per kunstmatig gegenereerde afwateringseenheid is bekend. Voor de toekenning van het peil in de waterloop wordt er van uitgegaan dat het waterpeil het gemiddelde maaiveldverloop volgt (fig. 17).

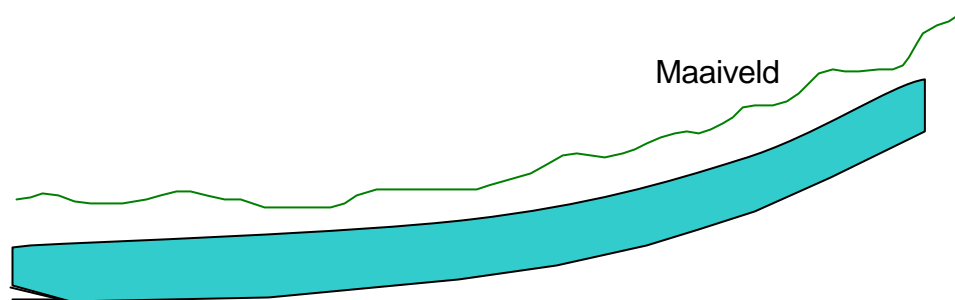
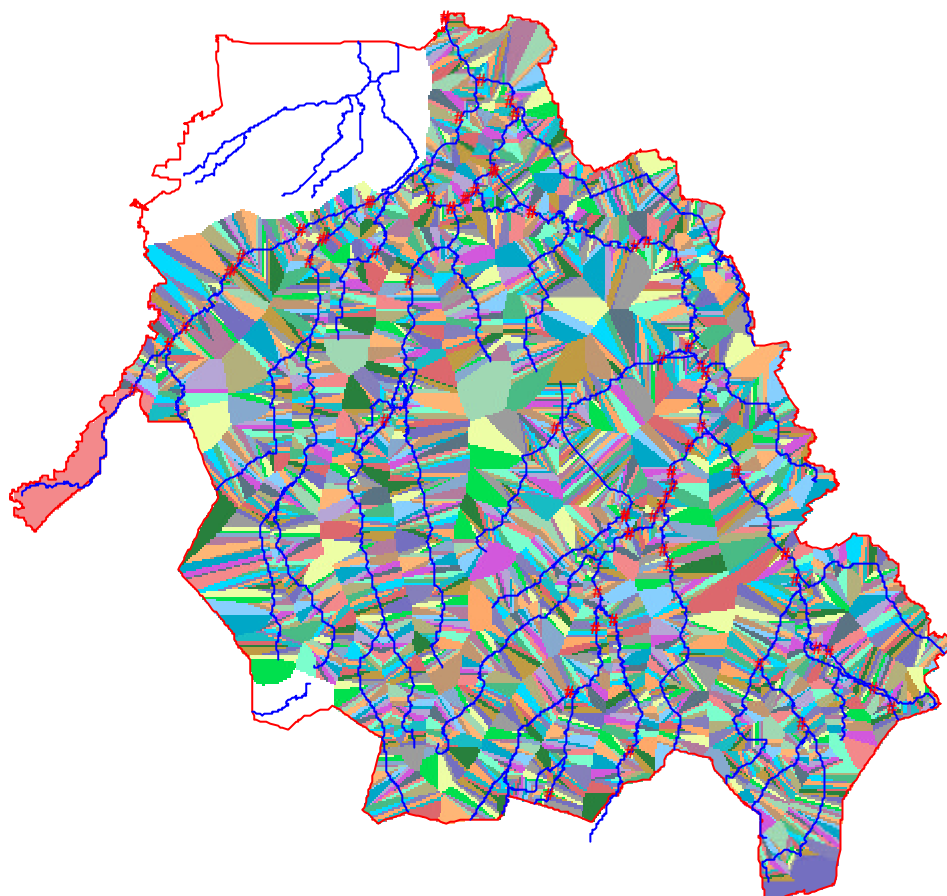


Fig. 17 Verhanglijn van een waterloop

Binnen de kunstmatig gegenereerde afwateringseenheid is voor iedere waterloop aan de hand van het AHN de gemiddelde helling van de waterloop bepaald. De gemiddelde maaiveldshelling en de afstand tot de benedenstrooms gelegen peilschaal zijn vervolgens gebruikt voor de toekenning van het waterpeil. Binnen een afwateringseenheid is het verband tussen de verhanglijn en het maaiveldsverhang lineair.

### *Ad 3) Bepaling van het overstromingsgebied*

Voor de bepaling van het overstromingsgebied is een procedure ontwikkeld die gebruik gemaakt van de kortste afstand tot de waterloop. Iedere waterloop is opgedeeld in trajecten. De trajectindeling heeft plaatsgevonden op basis van het waterpeil. Bij iedere centimeter stijging van het waterpeil is een traject scheiding neergelegd. Vervolgens is voor ieder traject van de waterloop het gebied bepaald dat via de kortste afstand afwatert op het desbetreffende leidingtraject (fig. 18).

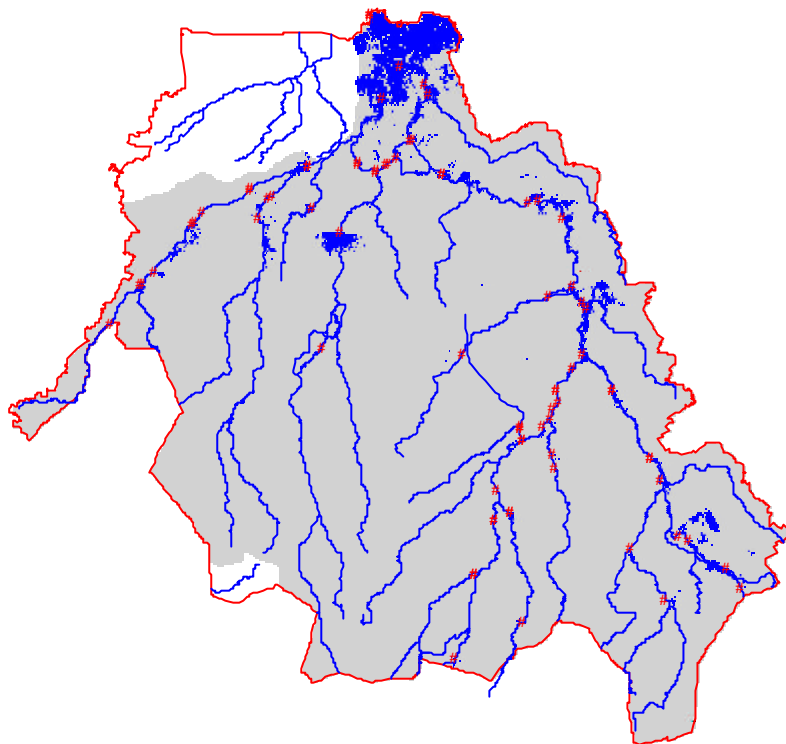


*Fig. 18 Afwaterend oppervlak per leidingtraject.*

Voor de bepaling van de zoekruimte voor waterberging is bepaald welk gebied lager ligt dan het peil in de waterloop. In de kaart (herhalingstijd 1 maal per 100 jaar) is te zien dat er maar weinig overstromingsgebieden zijn. Hiervoor zijn de volgende twee aspecten verantwoordelijk:

- De dichtheid aan peilschaalgegevens met een meetreeks die langer is dan 10 jaar is voor het bovenstroomse gebied te gering. In de Kleine en Beneden Dommel is de dichtheid van peilgegevens relatief groot. In dit gebied zijn met de ontwikkelde procedure wel overstromingsgebieden bepaald. In het Beerze en Reusel gebied zijn echter maar weinig peilschaalgegevens beschikbaar.
- De peilgegevens zijn gebaseerd op historische peilschaalgegevens. Het gevonden verschil in maaiveld dat zonder aanvullend onderzoek moeilijk te kwantificeren is

geeft een verstoring in de uitkomsten te zien. Het omhoog komen van het Kempisch plateau en het gebruik van de nieuwe maaiveldhoogtegegevens geeft wellicht een verschil tussen het peil op basis van historische reeksen en het huidige peil. Een geringe verticale verschuiving tussen de Centrale Slenk en de horsten in combinatie met het geringe aantal peilgegevens kan bij de gebruikte methode al problemen veroorzaken. In fase 2 van het onderzoek, waarbij gebruik is gemaakt van dwarsprofiel gegevens en afvoeren komen dit soort problemen niet meer voor. In deze fase van het onderzoek wordt het peil op basis van de afvoer, de helling en het dwarsprofiel berekend.



*Fig. 19 Inundatiegebied, bepaald aan de hand van peilschaalgegevens*





## 5 Bepaling van de zoekruimte voor waterberging aan de hand van Q(h)-relaties.

Bij de bepaling van overstromingsgebieden speelt de waterhoogte een cruciale rol. Naast het gebruik van peilschaalgegevens kan ook gebruik gemaakt worden van Q(h)-relaties bij de bepaling van de waterhoogte voor een bepaalde herhalingstijd.

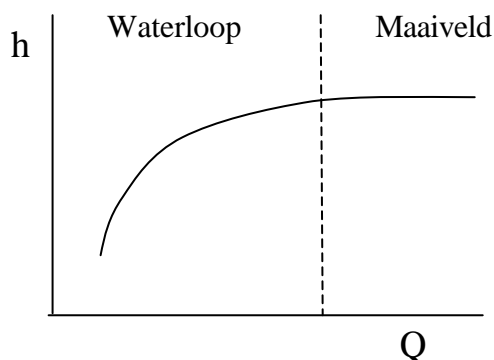


Fig. 20 Q(h)-relatie

Onder natte omstandigheden is de Q(h)-relatie op te splitsen in een Q(h)-relatie voor de waterloop en een Q(h)-relatie naast de waterloop (boven maaiveld).

Om de Q(h)-relatie voor trajecten van waterlopen vast te kunnen stellen zijn de volgende gegevens noodzakelijk:

- Afvoer;
- Verhanglijn;
- Dwarsprofiel (van zowel de waterloop als het gedeelte boven maaiveld).

### 5.1 Bepaling van de Afvoer

Voor de bepaling van de afvoer is gebruik gemaakt van de systematiek die gebruikt is bij de Waterbergingskansenkaart (Duel et al., 2000). Aan de hand van de volgende formule is de afvoer bepaald:

$$\text{Afvoer} = \text{Neerslag} - (\text{Bodemberging} + \text{maaiveldberging})$$

#### **Neerslag:**

In de onderstaande figuur zijn jaarextremen van De Bilt (1906-1977) gegeven. De neerslaghoeveelheden bij een bepaalde herhalingstijd berusten op aangepaste Gumbelverdelingen (Buishand en Velds, 1980).

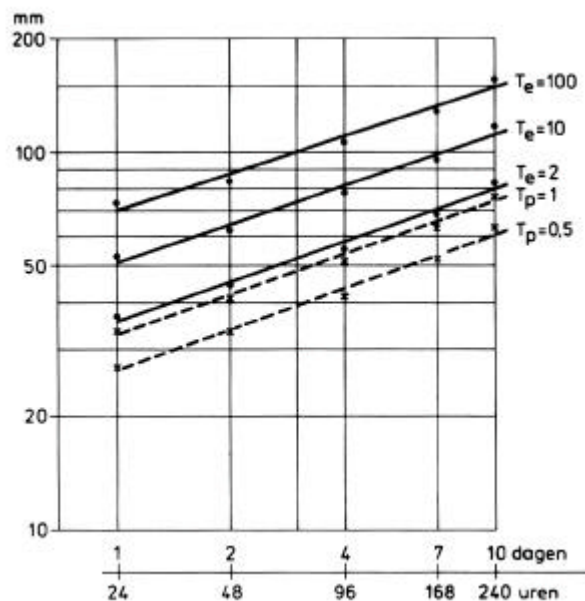


Fig. 21 Jaarextremen van De Bilt (1906-1977) voor duren van 24 uur tot 10 dagen. De herhalings tijden  $T_p$  en  $T_e$  zijn uitgedrukt in jaren (Buishand en Velds, 1980).

Voor dit onderzoek is uitgegaan van een 24 uursneerslag met een herhalings tijd van 1 maal per 10 en 1 maal per 100 jaar. Bij een herhalings tijd van 10 jaar is de maatgevende neerslaghoeveelheid ongeveer 50 mm/etmaal. Voor een extreem natte situatie met een herhalings tijd van 1 maal per 100 jaar geldt een neerslaghoeveelheid van ongeveer 75 mm/etmaal.

### **Bodemberging**

De bergingscapaciteit in de onverzadigde zone is afhankelijk van de initiële grondwaterstand, het bodemtype en de richting en grootte van de flux. Voor de initiële grondwaterstand is uitgegaan van GHG-niveau uit de bodemkaart 1 : 50.000. Voor de bepaling van de bodemfysische kenmerken van de bodem zijn de bodemeenheden vertaald naar 21 PAWN-eenheden (Wösten e.a., 1988). Deze bodemfysische eenheden bevatten de schematische laagopbouw van de bodem, met de bijbehorende bouwstenen van de Staringreeks (Wösten e.a., 1994). De bergingsfractie in de onverzadigde zone is berekend uit het verschil in vochtgehalte en poriënvolume in de onverzadigde zone tussen GHG-niveau en maaiveld. Met gebruikmaking van de bovengenoemde gegevens is de bergingsfractie met het programma CAPSEV bepaald. Hierbij is uitgegaan van een neerwaartse flux van 1 mm/dag, gezien de natte omstandigheden in de uitgangssituatie (GHG). Vervolgens is de bergingscapaciteit bepaald door de bergingsfractie te vermenigvuldigen met de dikte van de onverzadigde zone (GHG).

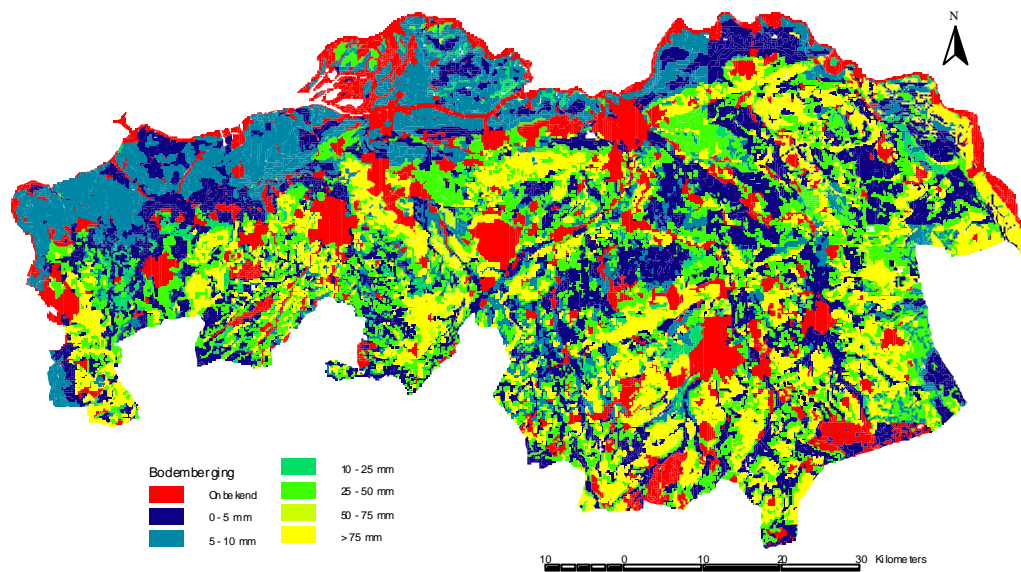


Fig 22 Bodemberg

**Maaiveldsberging:**

Berging op het maaiveld = 5 mm.

Combinatie van de berekende afvoer met het Digitale Terrein Model geeft de mogelijkheid om voor ieder willekeurig punt in het gebied de cumulatieve gebiedsafvoer te bepalen. In de onderstaande kaart is per afwateringseenheid de cumulatieve afvoer weergegeven (fig. 23).

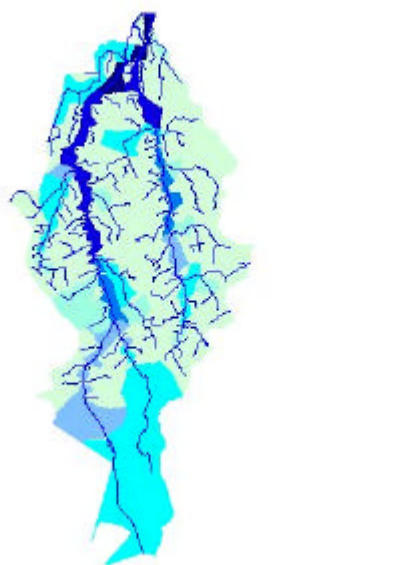


Fig 23 Cumulatieve afvoer per afwateringseenheid

## 5.2 Verhanglijn

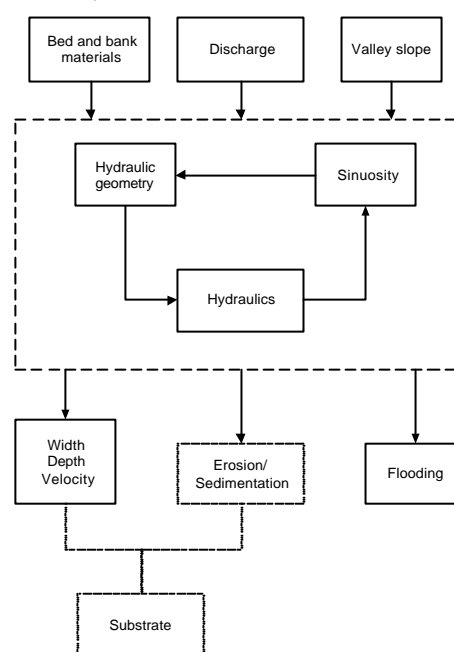
Voor de bepaling van het waterpeil bij de piekafvoeren met een herhalingstijd van 1 maal per 10 en 1 maal per 100 jaar is er van uitgegaan dat de verhanglijn van de beek het maaiveldverloop volgt en de stuwen gestreken zijn. Uitgaande van deze aannamen kan de verhanglijn bepaald worden op basis van het maaiveldverloop. Binnen de afwateringseenheden van de waterlopen is het gemiddelde maaiveldverloop op de plaats van de waterlopen aan de hand van het AHN bepaald.

## 5.3 Dwarsprofiel van de waterloop

Voor het bepalen van de dwarsprofielen van waterlopen zijn 2 methoden denkbaar:

- Dwarsprofiel informatie van het Waterschap;
- Berekeningen op basis van normen.

Het gebruik van de dwarsprofielinformatie van de waterschappen geeft een enorme vraag aan informatie die niet op eenvoudige wijze in digitale vorm beschikbaar zijn. Om deze praktische reden is er voor dit project voor gekozen om de dwarsprofielen van de waterlooptrajecten te berekenen op basis van normen. Daarnaast kan gesteld worden dat de dwarsprofielinformatie van waterlopen bij piekafvoeren met inundaties minder bepalend is dan bij lage afvoeren. Het dwarsprofiel van het omringende maaiveld is bij inundatie situaties immers bepalend voor het verloop van de  $Q(h)$ -relatie. Indien dwarsprofielinformatie wel beschikbaar is geniet het gebruik van deze informatie de voorkeur.



Bij de berekening van de dwarsprofielen is gebruik gemaakt van het model StreaMES (Stream Morphology Evaluation System) (van der Gaast, 2001). Het systeem is opgezet om een koppeling te kunnen leggen tussen de morfologie van beken en de afvoer. Aan de hand van normen kunnen met het model potenties voor hermeandering van beken voorspeld en gekwantificeerd worden. Hierbij is er van uitgegaan dat de beken de vrije loop krijgen en weer kunnen meanderen. In het model wordt gebruik gemaakt van zowel fysische als empirische relaties, en beschrijft de hydraulische en morfologische processen voor beektrajecten. Bij het opstellen van de empirische relaties is gebruik gemaakt van kennis uit internationale literatuur en expert-kennis uit het Cultuurtechnisch Vademecum. Het model gaat o.a. uit van afvoernormen met een bepaalde herhalingstijd. Deze opzet maakt het model ook geschikt voor de toepassing in dit project.

Voor de bepaling van de morfologische en hydraulische kenmerken zijn de volgende invoergegevens noodzakelijk:

- Bodemtype (Substraat)
- k-Manning
- Debiet
- Dalhelling

### 5.3.1 Bodemtype

#### Talud

Het talud is afhankelijk van factoren zoals grondsoort, het potentiaalverschil tussen de grondwaterstand en het peil in de waterloop, de mate van begroeiing en de mate van erosie. In tabel ... is een inschatting gegeven voor taludhellingen onder de waterspiegel bij verschillende grondsoorten (Cultuurtechnisch Vademecum, 1988).

Tabel 1 Taludhelling (1:n) voor verschillende grondsoorten (Cultuurtechnisch Vademecum, 1988).

Grondsoort	Talud (n)
Klei, leem, loss, vast veen	1 - 2
Zavel, vast zand	1.5 - 2.5
Grof zand	1.5 - 3
Fijn zand, slap veen	2 - 4

#### Hydraulische geometrie

De hydraulische geometrie van het dwarsprofiel is in hoge mate afhankelijk van het bodemtype. In de praktijk van het ontwerpen blijkt, dat afhankelijk van de grondsoort en de diepte van instabiele grondlagen, drie typen dwarsprofielen veelvuldig voorkomen. Voor de bodembreedte-waterdiepte-verhouding bij maatgevende afvoer blijken in de praktijk de volgende relaties te bestaan (Cultuurtechnisch Vademecum, 1988):

$$B = 2 h^{5/4} \quad \text{diepe profielen}$$

$$B = 2.75 h^{3/2} \quad \text{middelbare profielen}$$

$$B = 5 h^{5/2} \quad \text{brede profielen}$$

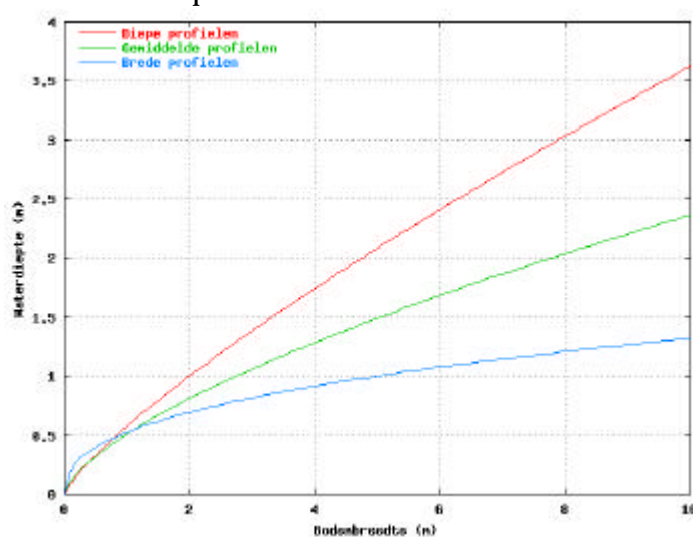


Fig. 24 Verhouding tussen de bodembreedte en de waterdiepte (Cultuurtechnisch Vademecum, 1988).

De toegekende functie voor de bodembreedte : waterdiepte verhouding en het talud op basis van het bodemtype vormen het uitgangspunt voor het bepalen van de hydraulische geometrie.

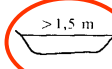
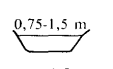
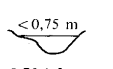
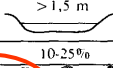
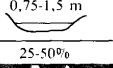
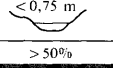
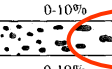
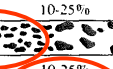
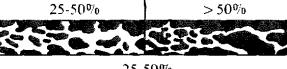
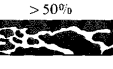
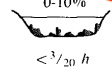
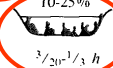
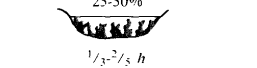

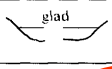
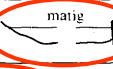
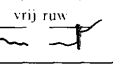
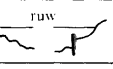
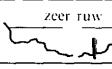

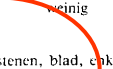
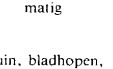
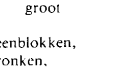

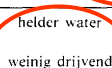
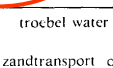
### 5.3.2 K-Manning

De stroming in open waterlopen wordt geremd door de ruwheid van bodem en taluds. De ruwheid neemt toe indien er meer plantengroei aanwezig is. Afhankelijk van de begroeiingstoestand is door de werkgroep waterlopen (1958) de volgende tabel opgesteld.

Tabel 2 K-Manning waarden voor verschillende onderhoudstoestand van waterlopen (Cultuurtechnisch Vademeccum, 1988).

Toestand waterloop	K <sub>M</sub> -waarde (m <sup>1/3</sup> /s)
Zeer schoon	45 – 30
Schoon	35 – 20
Licht begroeid	25 – 15
Matig begroeid	20 – 10
Vrij sterk begroeid	16 – 5
Zeer sterk begroeid	<10

Om de k<sub>M</sub>-waarde in de praktijk beter vast te kunnen stellen heeft Bon (1967) een taxatiemethode ontwikkeld (fig. 25):

onder-deel nr.	kolom	A	B	C	D	E	
	taxatiewaarde	1-5	5-10	10-15	15-20	20-25	
1	waterbreedte bij $h > 0,1$ m						2
	idem bij $h < 0,1$ m						
2	bodembedekking (bovenaanzicht)						3
3	verkleining doorstromingsprofiel						6
4	onderwater talud						7
5	obstakels in verhouding tot waterdiepte						5
6	materiaal transport						2

gemiddeld ≈ 4

Fig. 25 Taxatieschema voor de bepaling van de onderhoudsgraad van waterlopen (Bon, 1967).

Voor ieder onderdeel in bovenstaande schema wordt een cijferwaarde getaxeerd, zoals aangegeven in de koppen van de kolommen in het taxatieschema. Het

gemiddelde van deze waarden geeft de ‘onderhoudsgraad’ van de waterloop aan. Uit metingen, literatuurgegevens en het taxatieschema is een verband vastgesteld tussen  $k_M$ -waarde, stroomsnelheid en de onderhoudsgraad (fig. 26).

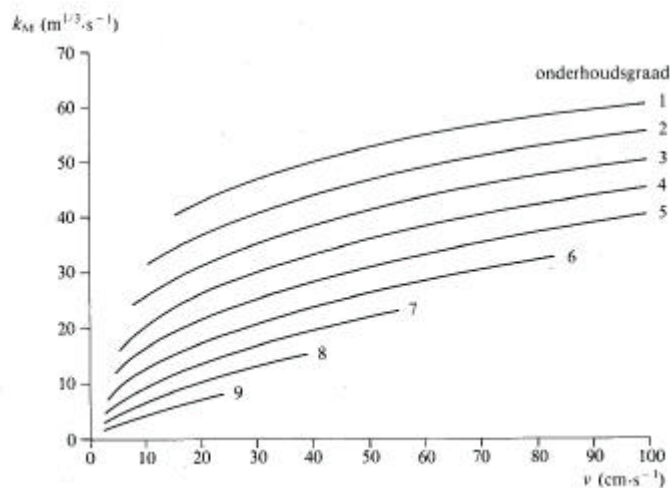


Fig. 26 Samenhang tussen  $k_M$ -waarde, stroomsnelheid en onderhoudsgraad (Bon, 1967).

Indien de onderhoudsgraad via het taxatieschema bepaald is kan men aan de hand van figuur 26 de  $k_M$ -waarde als functie van de stroomsnelheid bepalen.

### 5.3.3 Debiet

Het debiet wordt in het model beschouwd als randvoorwaarde. Het gaat hierbij om het debiet dat overeenkomt met de ‘bankfull’ situatie. Voor genormaliseerde waterlopen is de ontwerpnorm bepalend voor het debiet bij een ‘bankfull’ situatie. Voor de Bankfull discharge ( $Q_b$ ) onder natuurlijke omstandigheden wordt door Richards (1982) een herhalingstijd van 1.6 jaar aangehouden.

### 5.3.4 Dalhelling

Aan de hand van de maaiveldhoogtegegevens is de dalhelling voor de trajecten bepaald, zoals beschreven in paragraaf 4.2.

### 5.3.5 Berekeningsprincipe

Uitgaande van een afvoer met een herhalingstijd van 1,6 jaar en de bovengenoemde trajectkenmerken kan de hydraulische geometrie van de waterlopen bepaald worden. Voor de bepaling van de hydraulische trajectgegevens is een iteratieve procedure opgezet. De berekening is opgesplitst in de volgende 3 hoofdonderdelen:

- Hydraulische geometrie;
- Sinuositeit (meandering);
- Hydraulica.

In het kader van dit project is het StreaMES model enigszins aangepast om aan de hand van een bankfull situatie het dwarsprofiel te kunnen bepalen. De berekening voor de sinuositeit is er uit gehaald en op 1.1 gesteld, wat overeenkomt met een rechte waterloop. Voor de bankfull afvoer kan bijvoorbeeld de ontwerpnorm afvoer

opgegeven worden met een bepaalde herhalingstijd. Gebruik van het StreaMES-model beperkt de gegevensbehoefte. Per waterlooptraject moet alleen een herhalingstijd of de afvoer voor de bankfull situatie opgeven worden. Indien de herhalingstijd opgegeven wordt kan vervolgens met behulp van de volgende tabel (tabel 3) de afvoer bepaald worden voor de bankfull situatie.

Tabel 3 Relatie tussen de herhalingstijd en de afvoer.

Herhalingstijd	Afvoer
1 jaar	1 maal maatgevend
5 jaar	1,25 maal maatgevend
10 jaar	1,4 maal maatgevend
25 jaar	1,6 maal maatgevend
50 jaar	1,75 maal maatgevend
100 jaar	2 maal maatgevend

## 5.4 Dwarsprofiel van het maaiveldsdeel

Naast de informatie over het dwarsprofiel van de waterloop is ook de informatie over het maaiveld in de omgeving van de beken van belang bij situaties met een piekafvoer. Deze informatie is ontleend aan het AHN-bestand. In het kader van dit pilot project is een procedure ontwikkeld voor de bepaling van dwarsprofielen van het maaiveld nabij waterlopen. Voor de bepaling van de dwarsprofielen wordt bijvoorbeeld om de 100 meter loodrecht op de waterloop een dwarsprofiel bepaald. Vervolgens kunnen de maaiveldhoogte-gegevens uit het AHN-bestand aan de dwarsprofielen gekoppeld worden. In eerste instantie zijn dwarsprofielen gegenereerd met een lengte van 500 meter aan weerszijde van de waterloop (fig. 27).

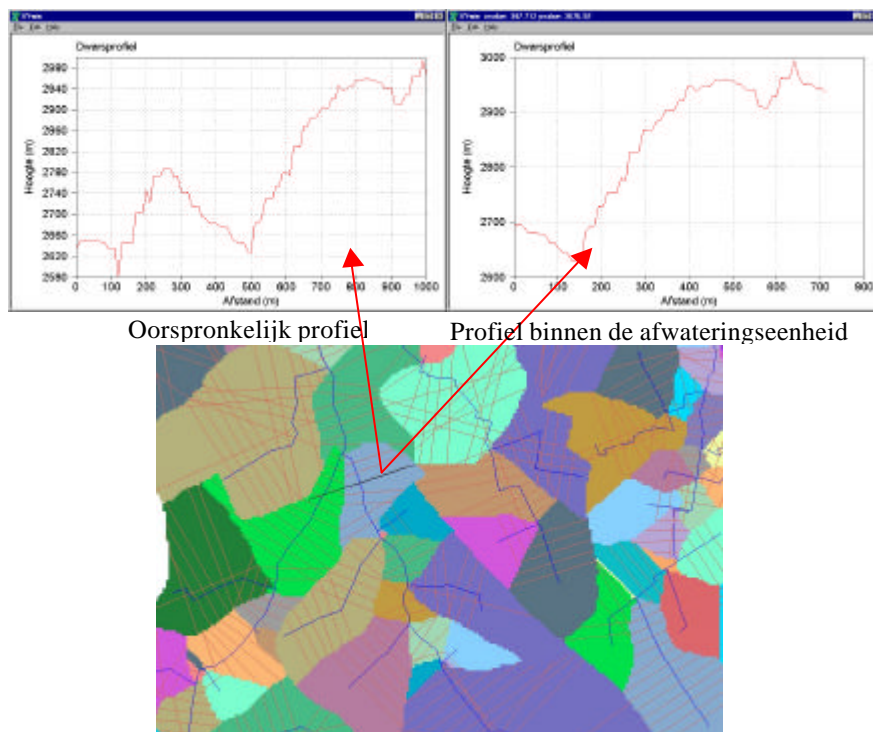


Fig. 27 Dwarsprofiel.



In een aantal gevallen blijkt echter dat de profielen te lang zijn en meerdere waterlopen aansnijden. Het aansnijden van meerdere waterlopen in één dwarsprofiel vindt plaats net bovenstrooms van een punt waar 2 waterlopen samen komen (fig. 27). Bovengenoemde probleem is opgelost door het dwarsprofiel alleen binnen de afwateringseenheid van de desbetreffende waterlopen te bepalen. Op deze manier worden dwarsprofielen gegenereerd die van waterscheiding tot waterscheiding lopen (fig. 27). Dit heeft ook als gevolg dat de waterloop niet per definitie in het midden van het dwarsprofiel gelegen is.

## 5.5 Bepaling van de waterhoogte

Nadat het dwarsprofiel voor de waterloop en het maaiveld in de omgeving bekend zijn kan de waterhoogte bepaald worden. Voor de berekening wordt het dwarsprofiel van het maaiveldverloop opgesplitst in een  $x$  aantal segmenten. Onder het dwarsprofiel is het eigenlijke profiel van de waterloop gelegen (fig. 28).

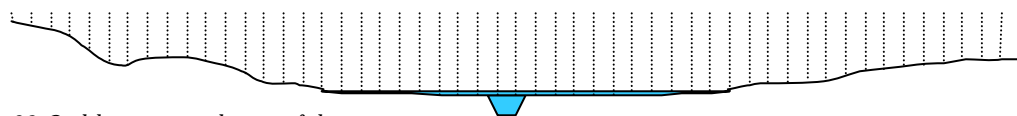


Fig. 28 Opdeling van een dwarsprofiel

De afmetingen van het dwarsprofiel van de waterloop zijn met het model StreaMES bepaald. Bij de berekening voor de waterhoogte wordt het stromingsprofiel in twee delen opgesplitst namelijk:

- De waterloop, welke wordt doorgetrokken bij inundatie;
- Berging op het maaiveld

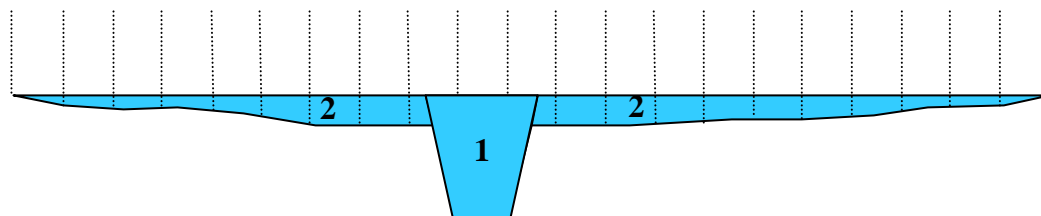
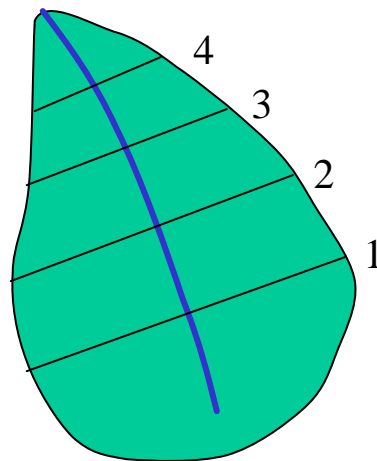


Fig. 29 Berekeningsprincipe voor een dwarsprofiel

Bij de berekening van de waterhoogte ( $h$ ) wordt de Manning-vergelijking op iteratieve wijze opgelost. Voor het waterloopgedeelte (1) is de wandruwheidscoëfficiënt ( $k_M$ ) afhankelijk van de stroomsnelheid en de onderhoudsgraad, zoals eerder beschreven. Voor het gedeelte boven maaiveld is de  $k$ -Manning afhankelijk van de waterdiepte. Door de lage Manning-coëfficiënt en de relatief grote natte omtrek doet het maaiveldsdeel bij geringe waterdiepte bijna niet mee aan de afvoer maar vindt hier voornamelijk berging plaats.

Op deze manier kan voor ieder dwarsprofiel op een tussenafstand  $x$  de waterhoogte bij een gegeven afvoer bepaald worden. De berekening vindt plaats voor ieder dwarsprofiel afzonderlijk. In profiel 4 is bijvoorbeeld te zien dat er waterberging

plaatsvindt in een gebied dat niet direct in contact staat met het beekdal. Er is in dit voorbeeld een hogere rug gelegen tussen het beekdal en het achter de rug gelegen lage gebied. Bij de berekening zijn de laag gelegen gebieden die niet direct in contact staan met de beek meegenomen voor de waterberging. Het laag gelegen gebied moet dan wel binnen de desbetreffende afwateringseenheid liggen. Tijdens piekafvoeren mag verwacht worden dat deze laag gelegen gebieden niet kunnen afwateren op het hoofdsysteem. Hierdoor kunnen ook afgesloten locale depressies gaan inunderen.



Afhankelijk van het maaiveldverloop in het dwarsprofiel en de hiermee samenhangende maaiveldsberging zal het waterpeil in meer of mindere mate oplopen indien de beken de afvoer niet meer aan kunnen. Ieder dwarsprofiel krijgt hierdoor een eigen  $Q(h)$ -relatie (fig. 30). In het geschetste voorbeeld is er een duidelijke versmalling te zien bij profielnummer 3. Deze versmalling heeft tot gevolg dat de  $Q(h)$ -relatie in het hoge traject steiler loopt ten opzichte van de overige profielen. De berging is relatief gering en de berekende waterstand relatief hoog. In een dergelijk geval zal er opstuwung plaatsvinden, waardoor bovenstrooms meer berging plaats zal vinden. Bij de berekening wordt niet expliciet met het opstuwungseffect gerekend.

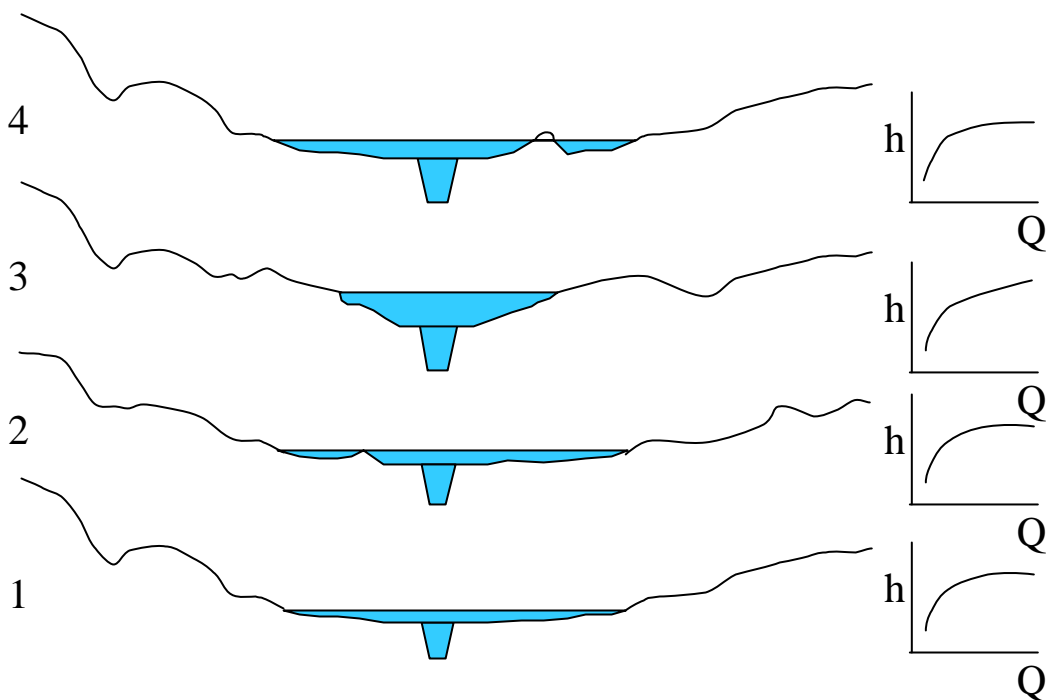


Fig. 30 Schematische weergave van een aantal opeenvolgende berekeningen

Het afzonderlijk doorrekenen van de dwarsprofielen heeft als gevolg dat de verhanglijn van het water niet in een continue daling loopt. In de onderstaande figuur is het enigszins getrapte verloop van de verhanglijn te zien. Het voorkomen van het getrapte verloop kan alleen correct gebeuren indien gebruik gemaakt wordt van een oppervlaktewater model of het gehele gebied iteratief doorgerekend wordt. Een tweede mogelijke manier om van de verhanglijn een vloeiende lijn te maken is het gebruik van een middeling. Het gebruik van een middeling kan echter waterbalansfouten introduceren. Een derde mogelijkheid om de verhanglijn vloeiend te laten verlopen is het verminderen van het aantal dwarsprofielen dat doorgerekend wordt. Hierdoor wordt de afstand tussen de profielen groter waardoor het getrapte verloop niet meer zichtbaar is. Dit is echter geen elegante oplossing.

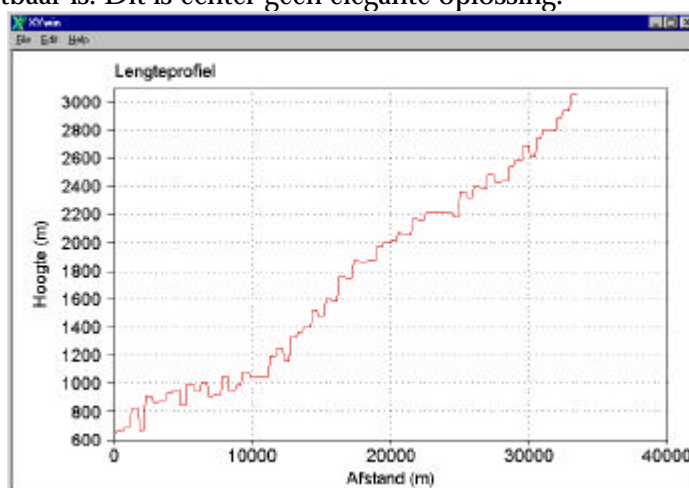


Fig. 31 Lengteprofiel van de berekende waterhoogte

Het verloop in de verhanglijn komt ook in het maaiveld terug (fig. 32). Opvallend in het lengteprofiel is de opeenvolging van concaaf naar convex naar concaaf verloop van het maaiveld en de verhanglijn vanaf bovenstrooms gezien. De overgangen hebben waarschijnlijk een geologische en geomorfologische oorsprong. Op een afstand van ongeveer 25000 meter bevindt zich namelijk de breuk van Vessem.

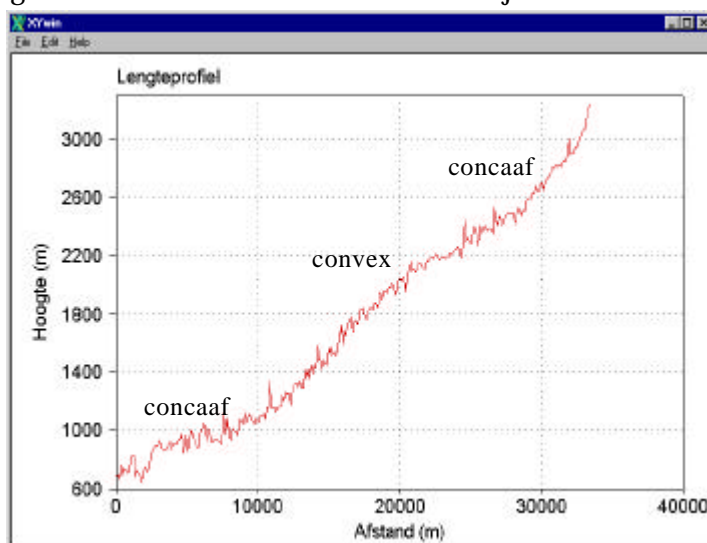
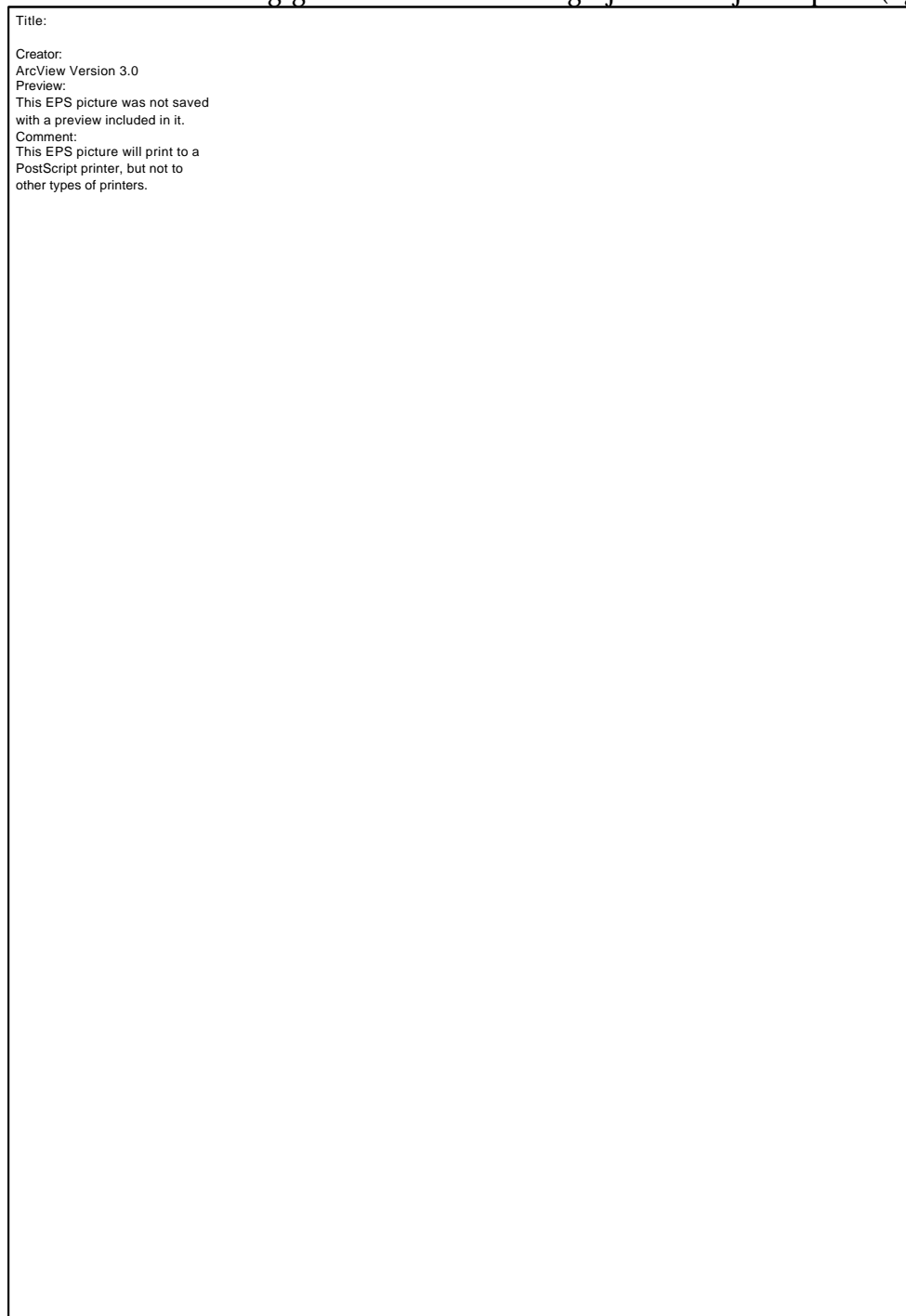


Fig. 32 Lengteprofiel van het maaiveld

## 5.6 Bepaling van de zoekruimte

De zoekruimte voor water is het gebied waar fysiek water kan worden geborgen. Hierbij wordt rekening gehouden met de af te voeren hoeveelheid water. Voor het beheersgebied van waterschap de Dommel is met de beschreven procedure het maximale overstromingsgebied met een herhalingsjijd van 100 jaar bepaald (fig. 33).



*Fig. 33 Zoekgebieden voor waterberging*

De afvoer is bepaald voor een bui van 75 mm/dag, rekeninghoudend met de bodemberging en 5 mm maaiveldsberging. Bij de berekening zijn alleen de hoofdwaterlopen meegenomen. Voor de hoofdwaterlopen is om de 500 meter een dwarsprofiel van maximaal 2500 meter gegenereerd. De cumulatieve afvoer voor de locaties van de dwarsprofielen is met behulp van het kunstmatig gegenereerde DTM bepaald. Met het model StreamMES zijn vervolgens de afmetingen van de waterlopen bepaald. Hierbij is aangenomen dat alle genormaliseerde waterlopen gedimensioneerd zijn op een afvoer van 1,4 maal de maatgevende afvoer. Voor de natuurlijke waterlopen is een overstromingsfrequentie van 1,6 jaar aangehouden. Het oppervlaktewaterpeil is voor ieder dwarsprofiel met behulp van de beschreven iteratieve procedure berekend. Als laatste stap is het inundatiegebied bepaald door binnen de afwateringseenheden per dwarsprofieltraject de lage gebieden te bepalen.

In figuur 33 is te zien dat er benedenstrooms meer inundatiegebieden zijn dan bovenstrooms. Dit kan verklaard worden door enerzijds een geringere hoeveelheid af te voeren water bovenstrooms en de relatief diepe ligging van de bovenstroomse beektrajecten. In het bovenstroomse gebied is de inundatie onderschat, waarschijnlijk is dit te verklaren doordat de aanvoer van water vanuit België niet is meegenomen. Naast de toename van het geïnundeerde areaal komen in benedenstroomse richting ook meer aaneengesloten geïnundeerde gebieden voor. Deze toename van het areaal kan verklaard worden aan de hand van het doorgerkende scenario. Bij de bepaling van de zoekruimte wordt het water dat bovenstrooms zou kunnen inunderen weer meegenomen in de benedenstroomse berekeningen. Op deze manier wordt de zoekruimte bepaald, zonder dat berging in de bovenlopen plaatsvindt. Opvallen di de kaart is het grote aaneengesloten gebied ten noordwesten van Middelbeers. Deze overschatting heeft waarschijnlijk te maken met het maaiveldsverloop.

In de kaart is op enkele plaatsen ook een streperig patroon te zien. Deze scherpe overgangen tussen geïnundeerd en niet geïnundeerd gebied wordt waarschijnlijk veroorzaakt door overgangen in het AHN-bestand en door grenzen tussen afwateringseenheden.

## **5.7 Gevoeligheidsanalyse**

Om meer inzicht in de bruikbaarheid van het digitale terrein model te krijgen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Bij deze analyse is in eerste instantie gekeken naar het effect van eventuele fouten in het oppervlaktewaterpeil. In figuur 34 zijn twee scenario's weergegeven. In de linker figuur is er van uitgegaan dat het oppervlaktewaterpeil voor alle hoofdwaterlopen 10 cm boven 'bankfull' staat. In de relatief diepe en smalle beekdalen komen bij dit scenario zeer smalle inundatie gebieden voor. De grotere inundatievlaktes liggen op de plaatsen waar relatief laag gelegen brede beekdalen voorkomen. In de rechter figuur is het oppervlaktewaterpeil 25 cm boven 'bankfull'. Het verschil tussen beide scenario's is gering. Dit betekent dat het maaiveldverloop bepalend is voor de uitkomsten. Geringe verschillen in het oppervlaktewaterpeil hebben nagenoeg geen effect op de locatie van de inundatiegebieden. Tijdens piekafvoeren is het dus belangrijk om te weten óf een

beek gaat overstromen. Het exacte peil tijdens inundatie is voor de bepaling van de zoekgebieden van minder belang.

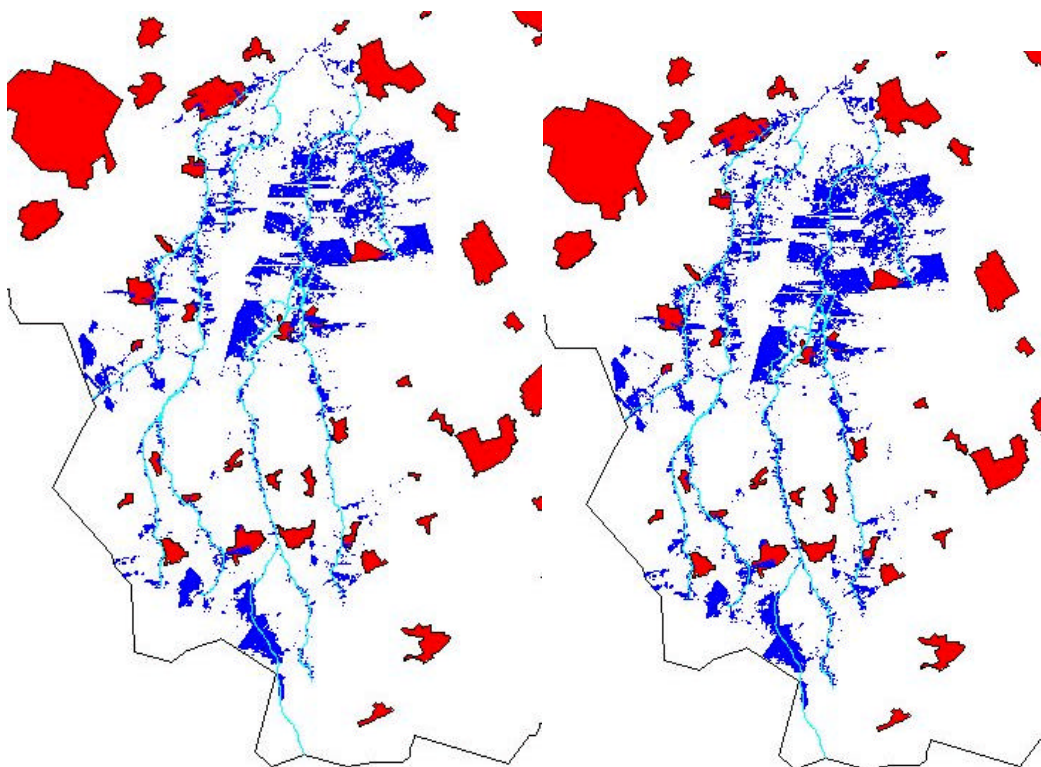
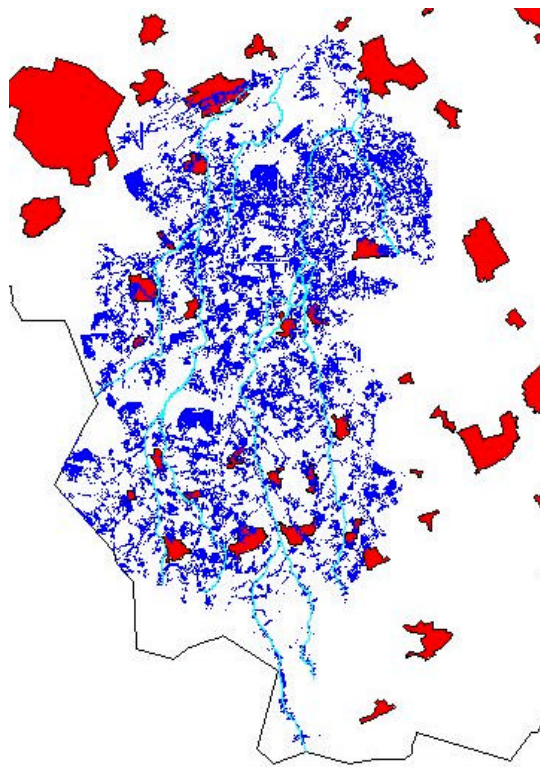


Fig. 34 Gevoeligheid voor het oppervlaktewaterpeil

Bij de bepaling van de zoekgebieden is alleen gebruik gemaakt van het hoofdsysteem van de waterlopen. Indien alle waterlopen, die in beheer zijn van het waterschap, worden meegenomen wordt het potentiële inundatiepatroon geheel anders. In de onderstaande figuur is een berekening te zien waarbij is uitgegaan dat het oppervlaktewaterpeil voor alle waterschapswaterlopen 10 cm boven 'bankfull' staat. Bij dit scenario vindt ook bovenstrooms veel inundatie plaats en komen geen grote aaneengesloten overstromingsgebieden voor. Het resultaat van de uitkomsten blijkt in hoge mate afhankelijk te zijn van het aantal waterlopen dat meegenomen wordt in de berekeningen. De uitkomsten zijn dus schaalafhankelijk. Het gevonden verschil tussen de resultaten is geheel toe te schrijven aan de gebruikte methode. Aan ieder waterlooptraject wordt immers het dichtstbijzijnde gebied gekoppeld. Het peil per waterlooptraject wordt vervolgens gebruikt om het inundatiegebied binnen deze afwateringseenheden te bepalen. Indien meer waterlopen meegenomen worden in de berekeningen zijn de afwateringseenheden kleiner. Hierdoor ontstaat de versnippering van de inundatiegebieden. Door het opleggen van een peil van 10 cm boven 'bankfull' voor het gehele gebied, komen bovenstrooms ook veel overstromingsgebieden voor. In de praktijk zullen echter de haarvaten van het oppervlaktewatersysteem dieper ingesneden zijn en veel minder vaak buiten hun oevers treden.



*Fig. 35 Gevoeligheid voor het schaalniveau*





## 6 Conclusies en aanbevelingen

Het bergingsvraagstuk is onder te verdelen in de volgende twee onderdelen:

- Berging bij de bron;
- Berging in de beekdalen.

### *Berging bij de bron*

Berging bij de bron bestaat uit de berging in de bodem, op het maaiveld en in het oppervlaktewaterstelsel. De gebruikte neerslag-afvoer relatie heeft een constante maaiveldsberging en is derhalve niet geschikt voor scenarioanalyse. Voor de berging in de bodem is alleen gebruik gemaakt van een initiële grondwaterstand en de bergingscoëfficiënt. In wekelijkheid is de berging in de bodem afhankelijk van:

- De initiële grondwaterstand;
- Het bodemtype met de bijbehorende bergingscoëfficiënt;
- De drainageweerstand;
- Het oppervlaktewaterpeil.

Bij het gebruik van een neerslag-afvoermodel is het mogelijk de specifieke afvoer gebiedsgeïndifferentieerd te bepalen. Aangezien het voor deze toepassing voornamelijk gaat om piekafvoeren speelt ook berging op het maaiveld een belangrijke rol. Deze vorm van berging zal meegenomen moeten worden bij de neerslag-afvoer modellering. Voor de bepaling van berging op het maaiveld is het wellicht mogelijk om het AHN-bestand te gebruiken. Met de gegevens uit het AHN met een resolutie van 5 bij 5 meter is het mogelijk om binnen percelen de berging te bepalen. De berging op perceelschaal kan afhangen van de regionale helling en het grondgebruik.

### *Berging in de beekdalen*

Voor berging in de beekdalen is het maaiveldverloop in de beekdalen van groot belang. In dit project is een methodiek ontwikkeld om de  $Q(h)$ -relatie voor beken die buiten hun oevers treden vast te kunnen stellen. Naast de  $Q(h)$ -relatie voor beektrajecten moeten ook  $Q(h)$ -relaties voor kunstwerken meegenomen kunnen worden.

In het pilot project waren de beektrajecten met de bijbehorende  $Q(h)$ -relaties niet onderling gekoppeld. Door het afzonderlijk doorrekenen van de beektrajecten en het ontbreken van de koppeling kan opstuwning niet meegenomen worden. Voor scenarioanalyse is een koppeling van de beektrajecten en eventuele kunstwerken noodzakelijk.

Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat het geïnundeerde areaal niet sterk toeneemt bij hogere oppervlaktewaterstanden. De beekdalen in het studiegebied zijn relatief smal en hebben een steil verloop. Bij de bepaling van het inundatiegebied is

het wel of niet buiten de oevers treden de meest bepalende factor. Indien het waterpeil boven de bedding uitkomt ligt het areaal dat inundeert door de relatief steile beekdalen min of meer vast.

Uit de gevoeligheidsanalyse is ook naar voren gekomen dat de uitkomsten schaalafhankelijk zijn. Indien de dichtheid van de beschouwde waterlopen toeneemt neemt ook de versnippering van de inundatiegebieden toe. Deze relatie is het gevolg van de ligging van de grenzen van afwateringseenheden. Bij de bepaling van het inundatiegebied worden de grenzen van de afwateringseenheden als harde grens meegenomen. Hierdoor kan er geen stroming plaatsvinden naar naastliggende afwateringseenheden. De grenzen tussen afwateringseenheden op een klein schaalniveau kunnen tijdens piekafvoeren echter vervallen.

#### *Opschaling van de methodiek voor Brabant-brede toepassing*

Voor een instrumentarium voor waterberging waarmee scenarioanalyses mogelijk zijn moet gedacht worden aan een koppeling van modellen, gecombineerd met een GIS. Voor berging bij de bron is CAPSIM geschikt. Het voordeel van het gebruik van CAPSIM ten opzichte van andere neerslag-afvoer modellen is de mogelijkheid om berging op het maaiveld mee te nemen. Analytische oplossingen 'zien' geen maaiveld. Dit heeft tot gevolg dat er geen berging op het maaiveld plaats kan vinden.

Voor berging in de beekdalen is een routing model of een hydraulisch model noodzakelijk. Het oppervlaktewater deel van SIMGRO (SIMSURF) is hiervoor het meest geschikt. Door een koppeling van het instrumentarium dat in het kader van het pilot project ontwikkeld is met SIMSURF zijn scenarioanalyses voor waterberging mogelijk. De benodigde  $Q(h)$ -relaties en bergingsrelaties voor SIMSURF kunnen door het GIS-systeem gegenereerd worden. Het oppervlaktewatermodel kan vervolgens de opstuwings en inundatie berekenen. Een dergelijke opzet maakt het ook mogelijk om niet-stationair te rekenen. Indien gewenst kunnen langere tijdreeksen doorgerekend worden. Bij het doorrekenen van tijdreeksen is het wel van belang dat de  $Q(h)$ -relaties in het model de situatie voor zowel droge als natte omstandigheden goed beschrijft. De bepaling van de  $Q(h)$ -relaties in dit project is alleen geschikt voor natte omstandigheden. Door de koppeling is het ook mogelijk om scenarioanalyses op eenvoudige wijze uit te voeren. Bij de scenarioanalyse kunnen bijvoorbeeld de  $Q(h)$ -relaties van kunstwerken aangepast worden.

De methodiek zal aangepast moeten worden om het probleem van de schaalafhankelijkheid van de uitkomsten te ondervangen. De meest logische oplossing voor dit probleem is het schaalafhankelijk maken van de invoer. Dit betekent dat er voor de te beschouwen harde grenzen van afwateringseenheden met geneste systemen gerekend moet worden. De grote van de afwateringseenheden neemt hierbij in de benedenstroomse richting geleidelijk toe.

Met de bovenstaande modelmatige opzet is het niet mogelijk om de zoekruimte voor waterberging te bepalen. Het voorgestelde instrument is alleen geschikt voor het doorrekenen van scenario's.

Samenvattend kan gesteld worden dat het pilot project de volgende conclusies heeft opgeleverd:

- De gebruikte Neerslag-afvoer relatie is erg globaal en geeft weinig ruimte voor scenarioanalyse;
- Het afzonderlijk doorrekenen van de dwarsprofielen levert niet de gewenste resultaten. Opstuwing en beperkende kunstwerken kunnen bij de huidige opzet niet meegenomen worden;
- Het gebruik van een DTM geeft de mogelijkheid om de afwateringsstructuur op verschillende schaalniveaus in de vingers te krijgen;
- Het maaiveldverloop is in hoge mate bepalend voor de ruimtelijke verbreding van inundatiegebieden;
- De bepaalde zoekruimte is schaalafhankelijk.



## Literatuur

Berg, M.W. van den, W. Groenewoud, G.K. Lorenz, P.J. Lubbers, D.J. Brus en S.B. Kroonenberg, 1994. *Pattern and velocities of recent crustal movements in the Dutch part of the Roer Valley rift system*. Geologie en Mijnbouw 73(1994)2/4 , pp.157-168.

Berg, M.W. van den, 1994. *Neotectonics of the Roer Valley rift system : style and rate of crustal deformation inferred from syn-tectonic sedimentation*. Geologie en Mijnbouw 73(1994)2/4 , pp.143-156.

Bisschops, J.H., J.P. Broertjes en W. Dobma, 1985. *Toelichting bij de geologische kaart van Nederland 1: 50.000; Blad Eindhoven West (51 W)*. Rijks Geologische Dienst, Haarlem.

Bon, J. 1967. *Bepaling van de  $k_M$  voor het ontwerp van leidingen*. Waterschapsbelangen 52(21): p.321-329.

Buishand, T.H. en C.A. Velds, 1980. *Neerslag en verdamping*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt.

Camelbeeck, T., T. van Eck, J. Loohuis, R. Pelzing, L. Ahorner, H.W. Haak, P. Hoang-Trong en D. Hollnack, 1994. *The 1992 Roermond earthquake, the Netherlands, and its aftershocks*. Geologie en Mijnbouw 73(1994)2/4 , pp. 181-197.

Commissie voor Hydrologisch Onderzoek, 1986. *Verklarende hydrologische woordenlijst*. Rapporten en nota's no 16, CHO-TNO, 's-Gravenhage.

Duel, H., C. Kwakernaak, T. Segeren en L. Stuyt, 2000. *Indicatieve zoekgebieden voor waterberging in polders en beekdalen; Globale verkenning naar kansrijke gebieden voor vermindering van de wateroverlast van regionale watersystemen*. WL-rapport T2372, WL, Alterra, IPO, Delft.

Eck, T. en C Davenport, 1994. *Seismotectonics and seismic hazard in the Roer Valley Graben; with emphasis on the Roermond earthquake of April 13, 1992*. Geologie en Mijnbouw 73(1994)2/4, pp. 91-92

Gaast, J.W.J. van der, 2001. *Stream Morphology*. In: Walsum, P.E.V. van, P.F.M. Verdonschot en J. Runhaar (eds.), 2001. *Climate change and the vulnerability of small natural riverine ecosystems* (in Prep).

Geluk, M.C., E.J.Th. Duin, R.H.B. Rijkers, M.W. van den Berg, P. van Rooijen en M. Duser, 1994. *Stratigraphy and tectonics of the Roer Valley Graben*. Geologie en Mijnbouw 73(1994)2/4, pp. 129-141

Heuven, A.A.L. en P.J.T. van Bakel, 1995. *Toepasbaarheid van een hoogtemodel in het waterbeheer*. Landinrichting, 1995/35 nr.7, pp 22-24.

Richards, K., 1982. *Rivers: Form and process in alluvial channels*, Methuen, London, 358 pp.

Querner, E.P., Th.G.C. van de Heijden en J.W.J. van der Gaast, 1998. *Beschikbaarheid grond- en oppervlaktewater voor natuur; Nadere uitwerking en toepassing in Oost-Gelderland*. Staring Centrum, werkdocument Natuurplanburo-onderzoek 1998/01.

Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988. *Cultuurtechnisch Vademecum*. Cultuurtechnische vereniging, Utrecht.