



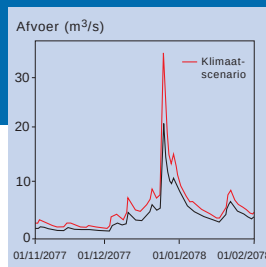
ALTERRA

WAGENINGEN UR

Water vasthouden in zandgebieden

Een verkennende studie naar de hydrologische effecten van stuwende duikers in het detailontwateringssysteem

M. Tilma, P.E.V. van Walsum, P.J.T. van Bakel, A.G.M. Hermans & L.C.P.M. Stuyt



Alterra-rapport 923, ISSN 1566-7197

Water vasthouden in zandgebieden met behulp van stuwende duikers

Water vasthouden in zandgebieden

**Een verkennende studie naar de hydrologische effecten van stuwende
duikers in het detailontwateringssysteem**

**M. Tilma, P.E.V. van Walsum, P.J.T. van Bakel, A.G.M. Hermans en
L.C.P.M. Stuyt**

Alterra-Rapport 923

Alterra, Wageningen, 2004

REFERAAT

Tilma, M., P.E.V. van Walsum, P.J.T. van Bakel, A.G.M. Hermans en L.C.P.M. Stuyt. 2004. *Water vasthouden in zandgebieden; een verkennende studie naar de hydrologische effecten van stuwende duikers in het detailontwateringssysteem*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 923. 35 blz. 19 fig.; 1 tab.; 8 ref.

De wateroverlastsituaties in het laatste decennium van de vorige eeuw hebben de vraag opgeworpen: is Nederland waterhuishoudkundig op orde? De Commissie Waterbeheer 21^e eeuw (Cie. WB21) komt in haar advies aan de regering overwegend tot de conclusie dat veel stroomgebieden *niet* op orde zijn en dat door de verwachte klimaatveranderingen een aantal zaken nog zullen verslechteren.

Aan de hand van modelberekeningen in het stroomgebied van de Beerze en de Reusel is geconcludeerd dat het vasthouden van water door middel van stuwende duikers de piekafvoeren aanzienlijk kan reduceren. Bij verkeerde plaatsing en/of dimensionering kunnen de piekafvoeren echter juist stijgen. Stuwende duikers hebben ook effecten op grondwaterstanden. Over het algemeen vallen die effecten mee. Bij de dimensionering en plaatsing van de duikers moet echter zorgvuldig te werk worden gegaan, anders lopen de effecten op grondwaterstanden uit de hand en wordt op landbouwgronden extra natschade veroorzaakt.

Trefwoorden: WB21, vasthouden, hydrologie, piekafvoer, Beerze en Reusel

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door € 18,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 923. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2004 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

Tel.: (0317) 474700; fax: (0317) 419000; e-mail: info@alterra.wur.nl

Niets uit deze uitgave mag worden veeleelvoudigd 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.

Inhoud

Woord vooraf	7
Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding	11
1.2 Probleem- en doelstelling	12
1.3 Leeswijzer	12
1.4 Begrippenkader	12
2 Studiegebied Beerze en Reusel	13
2.1 Gebiedsbeschrijving	13
2.2 Waterhuishouding	14
3 Simulatiemodel	17
3.1 SIMGRO	17
3.2 Beerze en Reusel in SIMGRO	19
3.3 De stuwende duikerconstructie	21
4 Resultaten	25
4.1 Rekenvarianten	25
4.2 Effecten oppervlakte water	26
4.3 Grondwater	31
5 Conclusies en discussie	33
5.1 Conclusies	33
5.2 Discussie	34
Literatuur	35

Woord vooraf

Tijdens de stage van Martijn Tilma bij Wageningen UR-Alterra heeft hij een verkennende studie verricht naar het effect van stuwende duikers in de detailontwateringsloten op piekafvoeren en grondwaterstanden. De stage was onderdeel van de opleiding tot hydroloog aan de Wageningen Universiteit. Vanuit Alterra was de dagelijkse begeleiding in handen van Paul van Walsum met ondersteuning van Ellen Hermans. Samen met Jan van Bakel en ondergetekende vormden we een begeleidingsgroepje. Vanuit Wageningen Universiteit is de stage begeleid door Sake van der Schaaf.

De resultaten duiden op een goede potentie van deze maatregel om piekafvoeren te reduceren. Dit was aanleiding het stageverslag te ‘promoveren’ tot een Alterra-rapport.

Lodewijk Stuyt
Projectleider

Samenvatting

De wateroverlastsituaties in het laatste decennium van de vorige eeuw hebben de vraag opgeworpen: is Nederland waterhuishoudkundig op orde? Er zijn diverse (model)onderzoeken uitgevoerd om antwoord te geven op die vraag. De Commissie Waterbeheer 21^e eeuw komt in haar advies aan de regering overwegend tot de conclusie dat veel stroomgebieden *niet* op orde zijn en dat door de verwachte klimaatveranderingen een aantal zaken nog zullen verslechteren. In het onlangs afgesloten Bestuursakkoord Water is veel geld gereserveerd om vooral het probleem ‘te veel’ op te lossen. De trits vasthouden-bergen-afvoeren is daarbij het *Leitmotiv*.

Doel van dit project is om nut, noodzaak en realisatiemogelijkheden van water vasthouden in zandgebieden nader te analyseren aan de hand van een voorbeeldstudie. Daarmee levert het een bijdrage aan één van de doelstellingen van het LNV-DWK-onderzoeksprogramma Transitie Waterbeheer: kennis genereren ten behoeve van herstel van watersystemen.

Het studiegebied behoort tot het stroomgebied van de Dommel en omvat het volledige stroomgebied van de Beerze en de Reusel. Het gebied heeft een omvang van circa 45 000 ha. Voor dit gebied is er een bestaand SIMGRO-model (Van Walsum et al., 2002) dat de regionale waterhuishouding op een geïntegreerde manier kan simuleren. Het vasthouden van water speelt zich af in de haarvaten van het hydrologische systeem. Voor een goede weergave van deze haarvaten is het bestaande model van de Beerze en de Reusel te grof. Daarom is gekozen voor het gebruik van (eveneens reeds bestaand) submodel dat *inzoomt* op “de Smalbroeken”, een gebiedje van 1200 ha in het noorden van het stroomgebied. Dit submodel sluit beter aan bij de schaal waarop de processen van het vasthouden zich afspelen.

De ‘stuwende duiker’-constructie wordt in SIMGRO beschreven door middel van twee parallelle subtrajecten: de ene met een duiker onderin een afgedamde sloot, en de andere met een maaiveldsdam. Net voor de duiker splitst de waterloop zich (in het model) in de twee subtrajecten, die vervolgens een paar meter verderop weer samenstromen. Onder normale omstandigheden stroomt er alleen water door de duiker. Bij hoge opstuwning voor de duiker kan er water over de slootafdamming heen gaan stromen. Deze overloop is in model gebracht met een stuw die op verschillende hoogten kan worden ingesteld. Daarmee kan ook het effect van een additionele maaiveldsdam worden gesimuleerd.

Uit de berekeningen blijkt dat de stuwende duiker in de meeste gevallen zorgt voor een duidelijke afname van de piekafvoer. Voor hogere piekafvoeren is deze reductie groter dan voor kleinere piekafvoeren. Dat is met name het gevolg van de ‘wortel-formule’ die de hydraulica van de duiker beschrijft, en van het feit dat opkomende benedenwaterstanden een direct remmend effect hebben op de afvoer door de duiker. Het regionaal hydrologisch model SIMGRO is – na aanpassing – in staat gebleken om deze processen goed te simuleren.

Uit de berekeningen blijkt verder dat bij onjuiste plaatsing en/of dimensionering van de duikers de piekafvoeren juist omhoog kunnen gaan. Voorzichtigheid is dus geboden. Dat geldt ook ten aanzien van de veroorzaakte effecten op grondwaterstanden, en dan met name de effecten op de GHG, de Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand. Over het algemeen vallen die effecten mee. Maar ook daar kunnen bij niet zorgvuldig gekozen maatregelen de effecten uit de hand lopen en extra natschade veroorzaken op landbouwgronden.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De wateroverlastsituaties in het laatste decennium van de vorige eeuw hebben de vraag opgeworpen: is Nederland waterhuishoudkundig op orde? De Commissie Waterbeheer 21^e eeuw (Cie WB21) komt in haar advies aan de regering overwegend tot de conclusie dat veel stroomgebieden *niet* op orde zijn en dat door de verwachte klimaatveranderingen een aantal zaken nog zullen verslechteren.

De vraag van het orde zijn is opgesplitst naar de aspecten te veel, te weinig, te vies en te star:

- 'te veel' is verbonden met wateroverlast en met de trits vasthouden-bergen-afvoeren;
- 'te weinig' met verdroging en droogteschade en met de trits vasthouden-(seizoens)bergen-*aan*voeren;
- 'te vies' met grond- en oppervlaktewaterkwaliteit en met de trits schoon houden-scheiden-zuiveren, en
- 'te star' met het (on)vermogen van het systeem te reageren op veranderende omstandigheden.

In het onlangs afgesloten Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) is veel geld gereserveerd om de zaken op orde te krijgen, vooral om het probleem 'te veel' op te lossen.

Er zijn diverse (model)onderzoekingen uitgevoerd om antwoord te geven op de vraag van het op orde zijn (Van Bakel et al., 2002; Luijendijk en Peerboom, 2002). Een cruciale complicatie is dat er nogal wat potentiële tegenstellingen zitten in de genoemde 'te'-aspecten. Als er te veel water is en als daar maatregelen tegen worden genomen, dan is de kans groot dat er verdroging wordt geïntroduceerd. Alleen hydrologisch zorgvuldig gekozen maatregelenpakketten kunnen beide doelstellingen wellicht verenigen. De vraag is dan hoe dan een dergelijk pakket samen te stellen. Een expertoordeel volstaat meestal niet en alleen via geïntegreerde, niet-stationaire beschouwingen is regionaal maatwerk te leveren. Ook de tegenstelling tussen verdrogingsbestrijding en waterkwaliteit is een bekende, getuige de slogan: verdrogen of vervuilen. 'Te star' tenslotte heeft raakvlakken met de andere aspecten vanwege o.a. het mechanisme dat technische maatregelen veelal effectgericht zijn (en daardoor effectief) maar een negatieve uitwerking kunnen hebben op de veerkracht. Een belangrijk vraagstuk van te star is hoe het systeem reageert op klimaatveranderingen.

Een begin van een analyse is reeds gemaakt in de genoemde studies. Deze analyse dient echter te worden aangevuld met een nader onderzoek naar de mogelijkheden van waterconservering in zandgebieden en de mogelijke positieve en negatieve bijdrage aan de 4 'te'-thema's. Daarnaast krijgen de uitvoeringstechnische aspecten van voorgestelde maatregelen de mogelijke implementatie via het Blauwe Dienstenconcept expliciet aandacht.

1.2 Probleem- en doelstelling

Door de zogenoemde verbetering van de waterhuishouding in Nederland zijn ongewenste effecten opgetreden, in de vorm van verdroging van terrestrische natuur, meer verdroging in de landbouw en hogere piekafvoeren. De vraag is op welke manier de ongewenste effecten kunnen worden verminderd. Daarbij komt onvermijdelijk de vraag aan de orde of de destijds gewenste ‘verbeteringen’ nog wel als zodanig worden gezien, en in hoeverre aan nieuwe wensen tegemoet kan worden gekomen. Deze nieuwe wensen kunnen een gevolg zijn van de te verwachten klimaatverandering of andere autonome ontwikkelingen.

Doel van het project is om nut, noodzaak en realisatiemogelijkheden van water vasthouden in zandgebieden nader te analyseren aan de hand van een voorbeeldstudie. Daarmee levert het een bijdrage aan één van de doelstelling van het LNV-DWK-onderzoeksprogramma Transitie Waterbeheer: kennis genereren ten behoeve van herstel van watersystemen

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt het studiegebied beschreven wat betreft de waterhuishouding, geografie en geologie. Het gebruikte model wordt beschreven in hoofdstuk 3. Tevens wordt ingegaan op de geanalyseerde maatregelen en de wijze waarop die in model zijn gebracht. De resultaten van het onderzoek worden behandeld in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt afgesloten met conclusies en een discussie.

1.4 Begrippenkader

Voor de duidelijkheid worden hieronder een aantal begrippen nader omschreven.

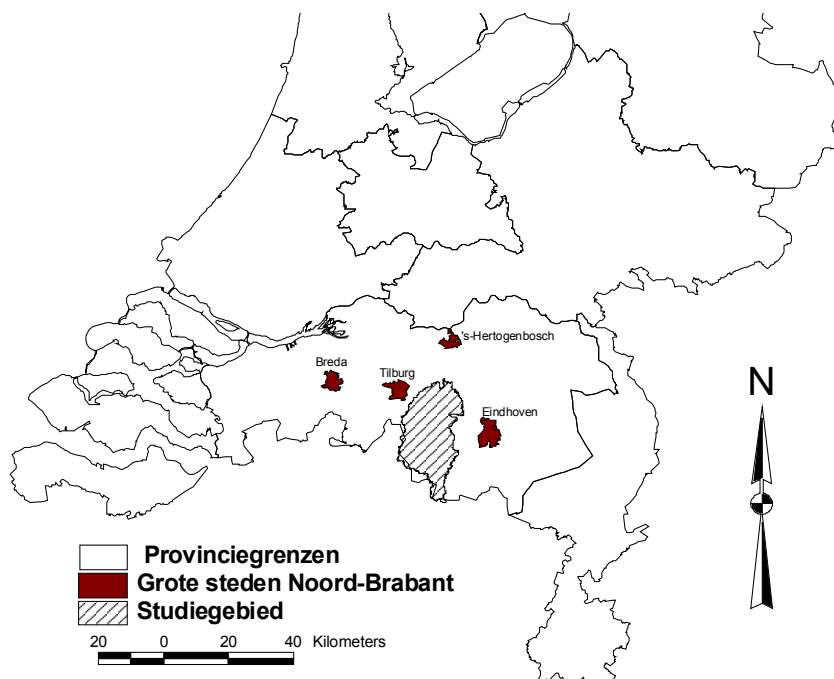
Vasthouden heeft als doelstelling de reductie van afvoerpieken in het middentraject en aan de uitgang van regionale watersystemen. Het gaat daarbij om (tijdelijke) opslag van het neerslagoverschot aan de bron (bovenstrooms gelegen regio) van een watersysteem, op plekken waar een waterschap (formeel) geen beheerstaak heeft. Om aan het doel te beantwoorden moet het vasthouden vooral actief zijn tijdens afvoerpieken met een herhalingstijd van 1 jaar en langer, gedurende een tijdsinterval van enkele dagen. Het verschil met tussen ‘vasthouden’ en ‘bergen’ is dat laatstgenoemde plaatsvindt in de *wel* door het waterschap beheerde waterlopen.

Maatgevende afvoer: Dit is die afvoer die gemiddeld eens per jaar wordt bereikt of overschreden.

Blaauwe diensten: Dit zijn een aan water gerelateerde activiteiten of beheersmaatregelen gericht op realisatie van verdergaande maatschappelijke wensen, waarvoor de ondernemer beloond moet worden.

2 Studiegebied Beerze en Reusel

Het studiegebied behoort tot het stroomgebied van de Dommel en omvat het volledige stroomgebied van de Beerze en de Reusel. Het gebied heeft een omvang van circa 45 000 ha (zie Figuur 1 voor de ligging en Figuur 2 voor het gebied zelf) en ligt gedeeltelijk in België. De zuidgrens wordt daarbij gevormd door de waterscheiding tussen het stroomgebied van de Maas en de Schelde; de westgrens valt samen met de waterscheiding tussen de Reusel en de Poppelsche Loop; de oostgrens wordt gevormd door de waterscheiding tussen het dal van de Kleine Beerze en de Dommel. De noordgrens ligt ter hoogte van het punt waar de Beerze in de Essche Stroom uitmondt.



Figuur 1 Ligging van het studiegebied

2.1 Gebiedsbeschrijving

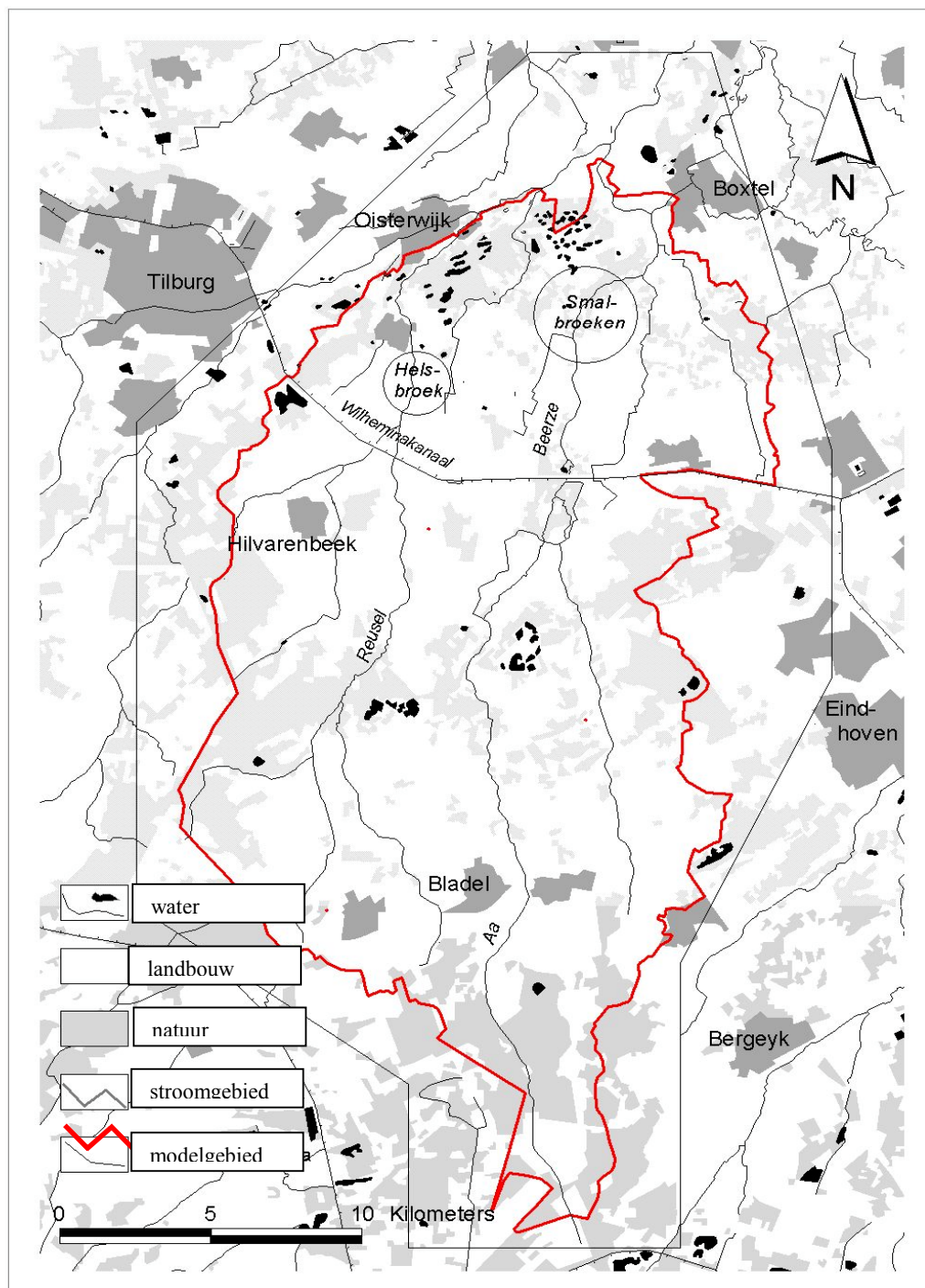
De hydrologische gesteldheid heeft grote invloed gehad op de ontwikkeling van het landschap. De bewoners vestigden zich op plaatsen met relatief droge gronden, geschikt voor bouwland, met in de nabijheid vochtige weidegronden en hooiland. Door mest uit potstallen (mest vermengd met heideplaggen en/of bosstrooisel) op de bouwlanden te brengen zijn de cultuurgronden met een humushoudende bovengrond ontstaan. De mest was overwegend afkomstig van schapen die op heidevelden (ontstaan door ontbossing) graasden. Door ontbossen en het steken van heideplag-

gen door de mens zijn plaatselijk (op leemarme, hooggelegen droge gronden) stuifzanden ontstaan. Aan het eind van de negentiende eeuw is het landschap sterk veranderd door ontginningen en bebossing van de heidevelden. Dit werd mogelijk door de uitvinding van kunstmest waardoor de heidevelden hun functie verloren en als bouwland konden worden gebruikt. De nieuwe ontginningsgronden hebben een dunner humeus dek. BEbossing is uitgevoerd om stuifzanden vast te leggen, om erosie van heidevelden te voorkomen en om hout voor de steenkoolmijnen te produceren. Het landschapsbeeld is ten gevolge van deze landbouwkundige ontwikkelingen afwisselend. De beekdalgronden bestaan overwegend uit grasland met plaatselijk moerasbosjes. De jonge ontginningsgronden worden gebruikt als grasland; op enkele plaatsen zijn deze gronden beplant met naaldbos. De stuifzanden zijn eveneens begroeid met naaldbos. Plaatselijk komen nog restanten van de heidevelden voor.

De oude cultuurgronden, die in grote blokken rond de oude woonkernen voorkomen, zijn binnen de gemengde bedrijfsvoering altijd als bouwland gebruikt. Later zijn veel van deze percelen door de uitbreiding van de melkveehouderij omgezet in grasland of bebouwd met maïs. Door de introductie van kunstmatige beregening is ook grasland op hoger gelegen gronden ontstaan. In de (gedraineerde) beekdalen is grasland omgezet in bouwland of maïsland. De intensieve veehouderij is flink toegenomen, en heeft in de van oudsher 'arme' zandgebieden welvaart gebracht. Het gebied is een concentratiegebied van vooral de varkenshouderij. Wat betreft recreatie is vooral de verblijfrecreatie dominant en ook 'recreatief groen'. Het gebied vervult een belangrijke recreatieve functie voor de steden Tilburg, Den Bosch en Eindhoven, die er net buiten liggen.

2.2 Waterhuishouding

De stroomgebieden van de Beerze en de Reusel liggen in het zwak golvende Brabantse dekzandgebied. Het gebied helt van het zuiden (de Kempen) naar het noorden (rivierengebied); op het hoogste punt van de zuidelijke waterscheiding is de hoogteligging 44 m +NAP; daar waar de Beerze en Essche Stroom samenvloeien is de hoogte 6 m +NAP. Het gebied wordt doorsneden door een aantal beekdalen waarvan de dalen van de Beerze en Reusel de grootste zijn. De beekdalen zijn diep in het glooiende landschap ingesneden. Bij het doorsnijden van de dekzandruggen zijn de dalen smal en zijn de hellingen steiler. Het reliëf van de hoger gelegen delen is onregelmatig glooiend. Relieffrije stuifzandgronden komen voor, naast vrijwel vlakke gebieden (Teunissen van Manen, 1985).



Figuur 2 Overzicht van het studiegebied Beerze en Reusel

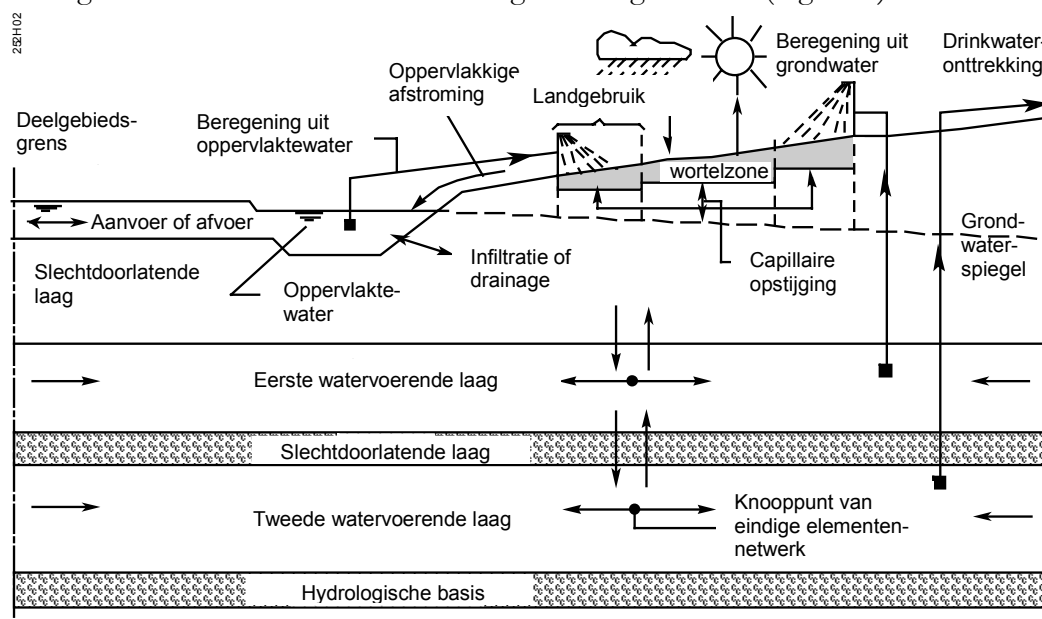
3 Simulatiemodel

In deze studie is gebruik gemaakt van een geïntegreerd hydrologisch model voor grond-, bodem- en oppervlaktewater, SIMGRO (Querner en Van Bakel, 1989; Veldhuizen et al., 1998; Van Walsum et al., in voorbereiding). SIMGRO is door Alterra ontwikkeld om regionale grondwaterstroming in relatie tot drainage, beregening, irrigatie en peilbeheer te simuleren. Het model is te bedienen vanuit AlterraAqua. Dat is een ArcView-schil waarmee de invoerbestanden van SIMGRO kunnen worden aangemaakt en waarmee tevens de uitvoer kan worden gepresenteerd.

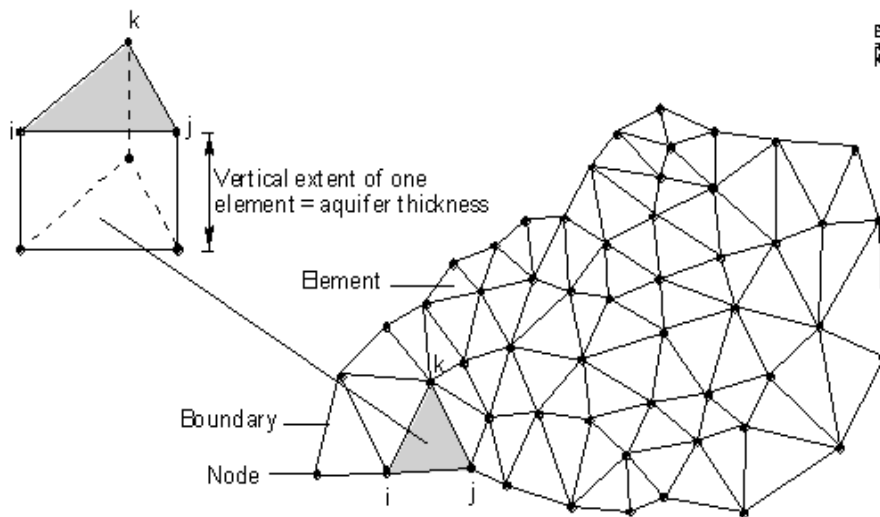
In het navolgende wordt eerst kort ingegaan op het model zelf, gevolgd door een beschrijving van de toepassing op het voorbeeldgebied. Specifieke aandacht wordt besteed aan de manier waarop de stuwende duikerconstructie in model is gebracht.

3.1 SIMGRO

In Figuur 3 is een overzicht gegeven van de in SIMGRO gemodelleerde processen. Voor de grondwatersimulatie wordt gebruik gemaakt van de eindige-elementenmethode. Daartoe wordt een gebied opgedeeld in een netwerk van driehoeken (Figuur 4). De modelformulering van de waterbalans maakt gebruik van zogenaamde invloedsgebieden die vanuit het driehoeksnetwerk worden geconstrueerd. De invloedsgebieden vormen samen een honingraatachtig mozaïek (Figuur 5).



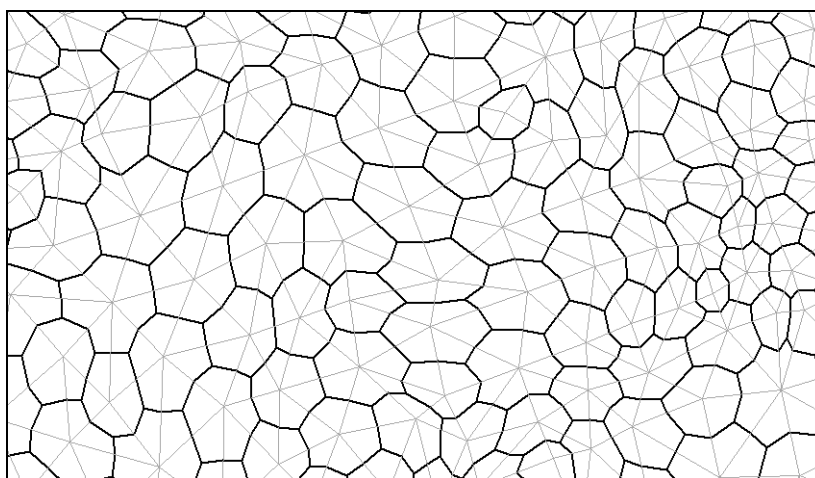
Figuur 3 Schematische voorstelling van de processen in het regionaal hydrologisch model SIMGRO



Figuur 4 Netwerk volgens de eindige-elementenmethode.

De stroming van grondwater wordt in SIMGRO beschreven door de ondergrond in verticale zin te beschouwen als een opeenvolging van watervoerende en scheidende lagen. Daarbij wordt verondersteld dat de stroming in de watervoerende lagen tweedimensionaal in het horizontale vlak plaatsvindt, en dat de stroming in de scheidende lagen ééndimensionaal in het verticale vlak verloopt. Door deze aanname wordt de oplossing van de transportprocessen een stuk eenvoudiger, waardoor een forse besparing op de benodigde rekentijd wordt gerealiseerd ten opzichte van een volledige 3-D-simulatie. Aangenomen wordt dat het effect van deze aanname op de berekende potentialen (en grondwaterstand) te verwaarlozen is.

De invloedsgebieden worden ook gebruikt als grondslag voor de simulatie van het vochttransport in de onverzadigde zone. Het SIMGRO-model maakt daarbij gebruik van 'voorgekookte' relaties die zijn afgeleid uit experimenten met een meer geavanceerd model voor stroming in de onverzadigde zone.



Figuur 5 Meetkundige relatie tussen 'invloedsgebieden' (een honingraatstructuur met dikke lijnen) en het eindige elementennetwerk van driehoeken (dunne lijnen)

Het oppervlaktewater wordt gesimuleerd met een netwerk van reservoirs en de aangekoppelde afwateringseenheden. Een afwateringseenheid wordt gevormd door een cluster van invloedsgebiedjes. De waterbalans van een afwateringseenheid wordt gesimuleerd met één reservoir voor het geheel van grotere en kleinere waterlopen. De reservoirs stromen in elkaar over als een cascade.

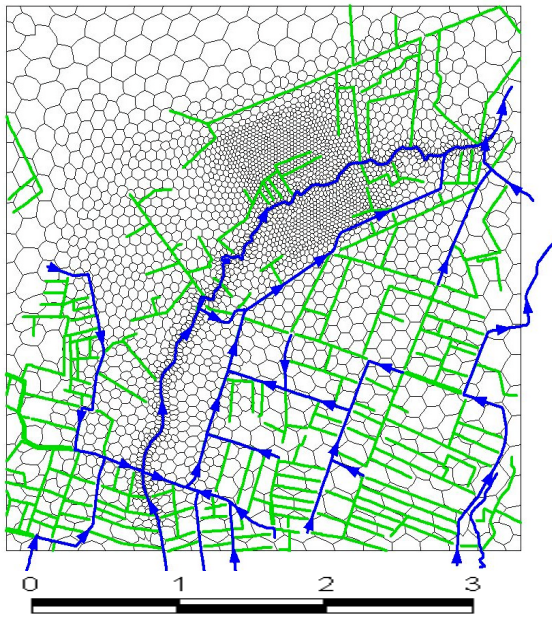
Stromingsweerstand worden in model gebracht via zogenaamde afvoer-peil relaties, die via de invoerbestanden aan het model worden toegevoegd. Deze relaties kunnen eventueel zijn verkregen door middel van rekenexperimenten met een hydraulisch model. Maar voor een hellend gebied kan goed worden volstaan met relaties die zijn afgeleid met de Manning-formule. Daarbij wordt eenparige stationaire stroming verondersteld. Het model simuleert dus de oppervlaktewaterdynamiek als een opeenvolging van stationaire situaties, rekeninghoudend met de bergingseffecten om van de ene situatie naar de andere te komen. Behalve met de stromingsweerstand van leidingen kan het model ook rekening houden met stuwen die al of niet van een automatische peilregeling zijn voorzien. Voor deze studie is vooral van belang dat ook rekening kan worden gehouden met terugstuwning vanuit benedenstroomse panden.

Voor het modelleren van terugstuwningseffecten zijn er meerdere modelopties beschikbaar, die afhankelijk van het soort situatie kunnen worden ingezet. In gewone leidingen wordt verondersteld dat wanneer het benedenstroomse peil tot boven het bovenstroomse peil dreigt te stijgen, er tijdelijk een afvoerblokkade optreedt totdat de normale situatie van een aflopende verhanglijn is hersteld. In situaties waarbij het benedenstroomse pand wordt gevoed door wateraanvoer kan er zelfs transport in de omgekeerde richting gaan plaatsvinden. In deze studie is vooral de optie voor terugstuwning bij een duiker interessant. In dat geval wordt de terugstuwning gemodelleerd door middel van een relatie tussen de afvoer en het *verschil* tussen het boven- en benedenstroomse peil, van net voor en net na de duiker. Ook hier kan er transport in de omgekeerde richting plaatsvinden, waarbij gebruik wordt gemaakt van dezelfde afvoer-verschilpeilrelatie die kenmerkend is voor de duiker.

3.2 Beerze en Reusel in SIMGRO

Voor deze studie is gebruik gemaakt van het SIMGRO-model dat voor het Beerze en Reusel gebied is opgezet door Van Walsum et al. (2002). Verdere details over modelopzet en calibratie zijn dan ook te vinden in dat rapport. Het modelgebied van 45 000 ha is opgedeeld in 12 000 invloedsgebieden.

Het vasthouden van water speelt zich af in de haarvaten van het hydrologische systeem. Voor een goede detailweergave van deze haarvaten is het model van de Beerze en de Reusel te grof. Daarom is gekozen voor een dochtermodel dat *inzoomt* op het gebiedje “de Smalbroeken”, in het noorden van het Beerze en Reusel gebied (zie Figuur 2). Dit submodel van 1200 ha sluit beter aan bij de schaal waarop de processen van het vasthouden zich afspelen. Het submodel krijgt randvoorwaarden aangeleverd vanuit het moedermodel van het hele stroomgebied van de Beerze en Reusel. Het gaat daarbij om grondwaterstijghoogten en oppervlaktewaterafvoeren.



Figuur 6 Invloedsgebieden, hoofdwaterlopen en detailafwatering in de Smalbroeken.

maaielveldhoogte toegekend aan de invloedsgebieden en is uitgerekend wat de bergingscapaciteit op maaiveld per invloedsgebied is.

Grondwatermodellering

Het oorspronkelijke inzoom-model omvatte slechts 3 van de 15 lagen van het moedermodel. Dit werd gezien als een potentiële bron van fouten. Daarom is het inzoom-model uitgebreid naar de 15 lagen. De geohydrologische gegevens zijn overgenomen van het moedermodel.

Oppervlaktewatermodellering

Het vasthouden van water speelt zich af in de detailontwatering. Daarom zijn alle sloten expliciet in model ingebracht (zie Figuur 6). Daarbij is gebruik gemaakt van het TOP10-vector bestand. Aangezien in dat bestand de waterlopen niet als een afwateringsstructuur zijn opgeslagen, was het nodig om die structuur via een handmatige bewerking aan te brengen. Dat is gedaan met gebruikmaking van de schematische detailafwateringskaart van het waterschap. Vervolgens is met een rekenprogramma de detailontwatering opgedeeld in waterlooptrajecten met een maximumlengte van 75 meter. Binnen de detailontwatering zijn er uit de TOP10 3 klassen van waterlopen gedefinieerd. Aan de hand van deze klassen zijn de dimensies (talud, diepte, breedte) toegekend. De bodemhoogte van de beneden- en bovenstroomse punten zijn toegekend met behulp van de maaiveldhoogte die zijn bepaald uit het gefilterde AHN.

Rekenperiode

De studie is uitgevoerd met een reeks van 11 jaar. Gekozen is voor de periode 1989 tot 2000 omdat hierin een aantal interessante meteorologische gebeurtenissen plaatsvindt en omdat de periode resulteert in klimaatrepresentatieve waarden voor de GHG, de Gemiddeld Hoogst Grondwaterstand (Van Walsum et al., 2002).

De invloedsgebieden binnen de Smalbroeken (zie Figuur 6) zijn overgenomen van Van Walsum et al. (2002). Om het model geschikt te maken voor deze studie zijn een aantal zaken aangepast met betrekking tot de grond- en oppervlaktewatermodellering. Daar wordt hieronder op ingegaan.

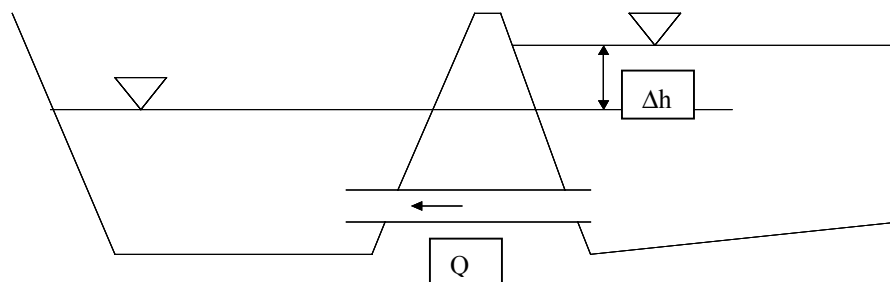
Maaiveldhoogte

De maaiveldhoogte is per invloedsgebied bepaald aan de hand van het AHN (Actueel Hoogtebestand Nederland; 5×5 m grid). Dit grid is gefilterd volgens de procedure van AlterraAqua om oneffenheden zoals bomen en gebouwen te verwijderen. Daarna is via AlterraAqua de

3.3 De stuwende duikerconstructie

Principe en werking

De stuwende duiker is een heel simpel te realiseren constructie die niet veel onderhoud vergt. De constructie bestaat uit een dam in een sloot. In deze dam bevindt zich een duiker (zie Figuur 7). Bovenop de dam in de sloot kan eventueel een maaiveldsdam aanwezig zijn, die om effectief te zijn dan wel moet doorlopen langs de maaiveldcontour. Bij lage afvoeren stroomt het water vrijwel ongemoeid door de duiker. Bij hogere afvoeren gaat de duiker steeds meer stremmen, vooral als de bene-



Figuur 7 De stuwende-duikerconstructie.

denwaterstand boven de drempel van de duiker uitstijgt. De effectiviteit van dat laatste mechanisme is terug te voeren op de hydraulische karakteristieken van een duiker, waarbij de afvoer recht evenredig is met de wortel uit het peilverschil voor/na de duiker. De stremmende werking is wel afhankelijk van een juiste dimensionering:

- bij te krappe dimensionering wordt de bovenstroomse situatie permanent vernat, en is er geen ‘vrije’ bergingscapaciteit tijdens een neerslagpiek;
- bij te ruime dimensionering worden ook hoge afvoeren zonder stremming doorgelaten.

Teveel stremming kan dus averechts werken. Het systeem – bestaande uit oppervlaktewater en grondwater – raakt in dat geval te snel verzadigd, waardoor het als ‘racebaan’ gaat fungeren. Extra hoge afvoerpieken zijn dan het gevolg.

Modelleren in SIMGRO

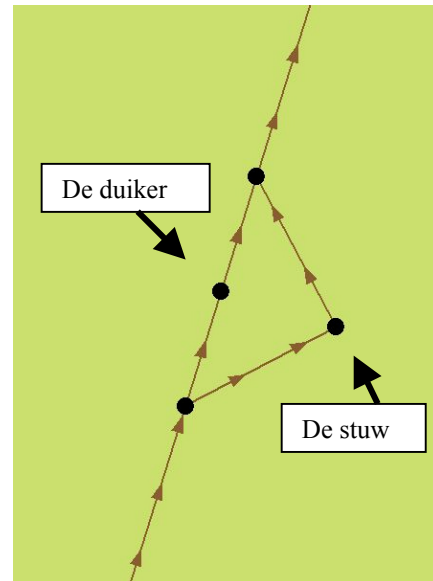
Binnen SIMGRO wordt de stuwende duikerconstructie beschreven door de combinatie van een stuw en een duiker. De functies van de stroming door de duiker en de stroming over de stuw zijn voor de simulatie dus gescheiden. Dit is gedaan door in twee waterlopen apart een duiker en een stuw te simuleren, zoals aangegeven in Figuur 8. Dit zijn relatief kleine waterloopjes (twee meter ten opzichte van standaardlengte van 75 meter). Door deze modelmatige constructie is het mogelijk om de afvoer-peil relatie van de stroming over de maaiveldsdam nader te specificeren. Indien eenvoudigweg wordt aangenomen dat bij peilstijging tot boven de dam het water weerstandsloos afstroomt, dan kan worden volstaan met een veel minder rekenintensieve modeloptie. Gezien het voorbeeldkarakter van deze studie is er echter voor gekozen om via de splitsing in twee takken de constructie gedetailleerd in beeld te brengen.

Stroming door de duikers wordt in SIMGRO gesimuleerd door middel van een per duiker vastgestelde afvoerrelatie. Bij deze relatie wordt gekeken naar het verschil in waterhoogte boven- en benedenstrooms van een duiker (Δh) (zie Figuur 7). Aan de hand van dit verschil in waterhoogte wordt per duiker door middel van een wortelfunctie (1) het debiet bepaald.

$$Q = C\sqrt{\Delta h} \quad (1)$$

waarin

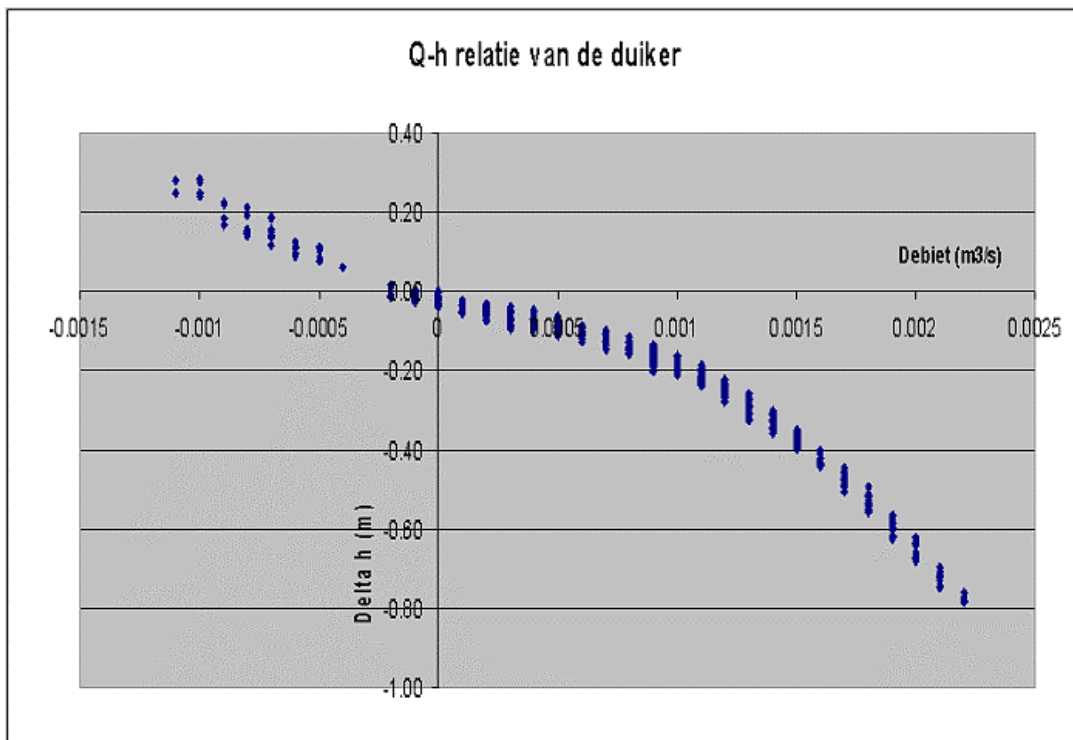
- Q = debiet (m^3/s)
- C = coëfficiënt, afhankelijk van de dimensionering van de duiker ($\text{m}^{2.5}\text{s}^{-1}$)



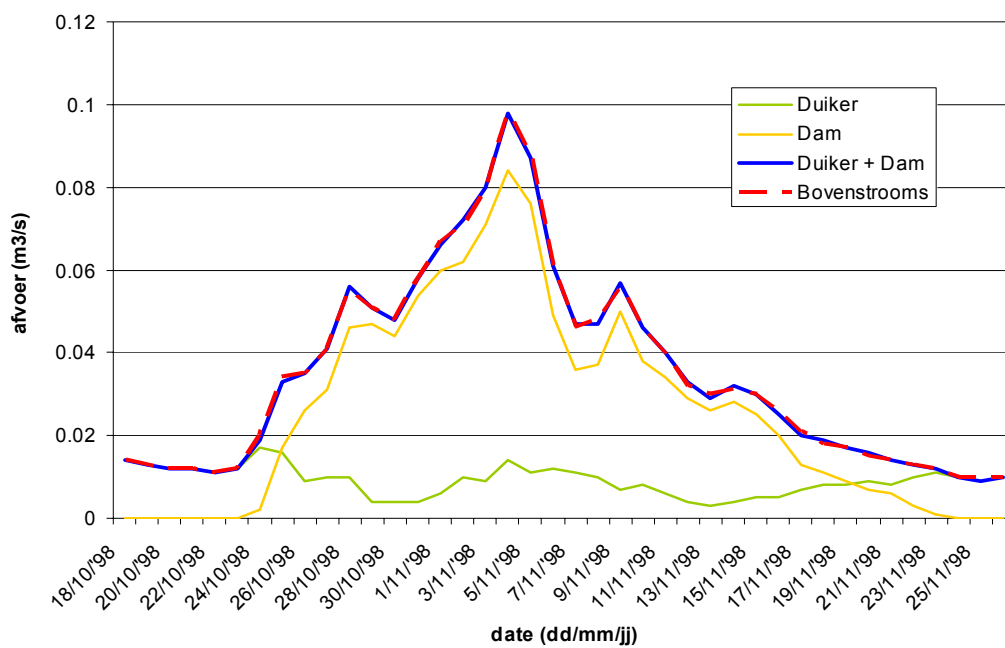
Figuur 8 Splitsing van de functies van de stuwende duiker in SIMGRO

Bovenstaande formule geldt alleen voor een ‘verdronken’ duiker, met een benedenstrooms peil tot boven het niveau van de afvoerdrempel. In niet-verdronken situaties wordt in (1) het peilverschil Δh vervangen door de diepte h van het water in de sloot ten opzichte van de duikerdrempel. Er is een test gedaan om te zien of het model de afvoer correct simuleert, voor zowel de stroming in de normale afvoerrichting als in de situatie met een stroming in omgekeerde richting. Dat laatste doet zich voor wanneer een hoge afvoergolf passeert in de hoofdwaterloop van de Beerze. In Figuur 9 zijn de berekende afvoeren uitgezet tegen de berekende peilverschillen voor/na de duiker. Howel er enige numerieke ruis aanwezig is, blijkt de grafiek het karakteristieke verloop van een ‘wortelformule’ goed te volgen.

Ter verdere verificatie van de werking van het model zijn de berekende afvoerlopen uitgezet in de tijd in Figuur 10, inclusief die van ‘bovenstrooms’. Te zien is ondermeer dat er geen water verloren gaat, en dat de duiker tijdens de piek wordt gestremd, kennelijk als gevolg van hoge benedenstroomse waterstanden. Maar in dit geval wordt de stremming geheel weggecijferd als gevolg van de afvoer die over de maaiveldsdram stroomt. Dit is duidelijk een voorbeeld van niet-effectieve stremming.



Figuur 9 De Q - Δh relatie van de duiker (nl 1921, gedimensioneerd op $1,5 \times$ maatgevende afvoer).



Figuur 10 Stroming door de stuwende-duikerconstructie, opgesplitst in de verschillende subtrajecten

4 Resultaten

4.1 Rekenvarianten

Aangezien het hier slechts een verkenning betrof zijn alleen een aantal schematisch gedefinieerde varianten doorgerekend. De berekeningen hadden derhalve meer het karakter van een soort gevoeligheidsanalyse. In alle varianten is per waterlooptraject een duikerconstructie geplaatst. Bij een trajectlengte van 75 m is dat een voor de praktijk wel erg hoge dichtheid. Maar het levert wel informatie op over wat maximaal bereikbaar is, en is daarom in het kader van een gevoeligheidsanalyse wel relevant. In de varianten zijn een aantal combinaties doorgerekend van:

- de dimensionering van de duiker;
- de hoogte van de maaiveldsdam.

Om een ruimtelijk zo consistent mogelijke duikerdimensionering te krijgen is gebruik gemaakt van de maatgevende afvoer (die berekend is voor de uitgangssituatie). Tevens is de slootdiepte bij de dimensionering betrokken. De meest effectieve dimensionering maakt namelijk maximaal gebruik van de aanwezige bergingsruimte in oppervlakte- en grondwater. Hoe dieper de sloot, hoe groter het peiltraject waarover die ruimte kan worden ‘aangesproken’, en hoe gevoeliger de Q-h relatie dus moet zijn voor de afvoer. Met beide aspecten (maatgevende afvoer en slootdiepte) wordt rekening gehouden in de volgende dimensioneringsformule, waarin alleen de dimensioneringsfactor per rekenvariant verschillend is:

$$Q = f \cdot Q_{ma} \sqrt{\frac{\Delta h}{d}} \quad (2)$$

waarin:

- Q = afvoer ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
- Q_{ma} = maatgevende afvoer ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
- f = dimensioneringsfactor (-)
- Δh = peilverschil voor/na de duiker (m)
- d = diepte van de sloot (m)

Als afvoerrelatie van de maaiveldsdam is de standaard stuwformule gebruikt:

$$Q = 1,7 \cdot b \cdot (h - h_s)^{1,5} \quad (3)$$

waarin:

- Q = afvoer ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
- $1,7$ = afvoercoëfficiënt van een korte overlaat ($\text{m}^{0,5} \text{s}^{-1}$)
- b = breedte van de overlaat (m)
- h = oppervlaktewaterpeil (m)
- h_s = drempelhoogte van de overlaat in maaiveldsdam (m)

Als breedte voor de overloop in de maaiveldsdam is standaard 5 m genomen. Er is een matrix met rekenvarianten opgesteld, waarin de dimensionering van de duiker en de hoogte van de maaiveldsdam is gevarieerd. Daarin is de hoogte van de maaiveldsdam genomen ten opzichte van het maaiveld-referentieniveau, dat een van de invoer-

gegevens van SIMGRO is. Dit referentieniveau is per waterlooptraject bekend. Via de GIS-schil is het niveau afgeleid aan de hand van het gemiddelde maaiveldsniveau van het knooppunt dat het dichtst bij het einde van het waterlooptraject ligt.

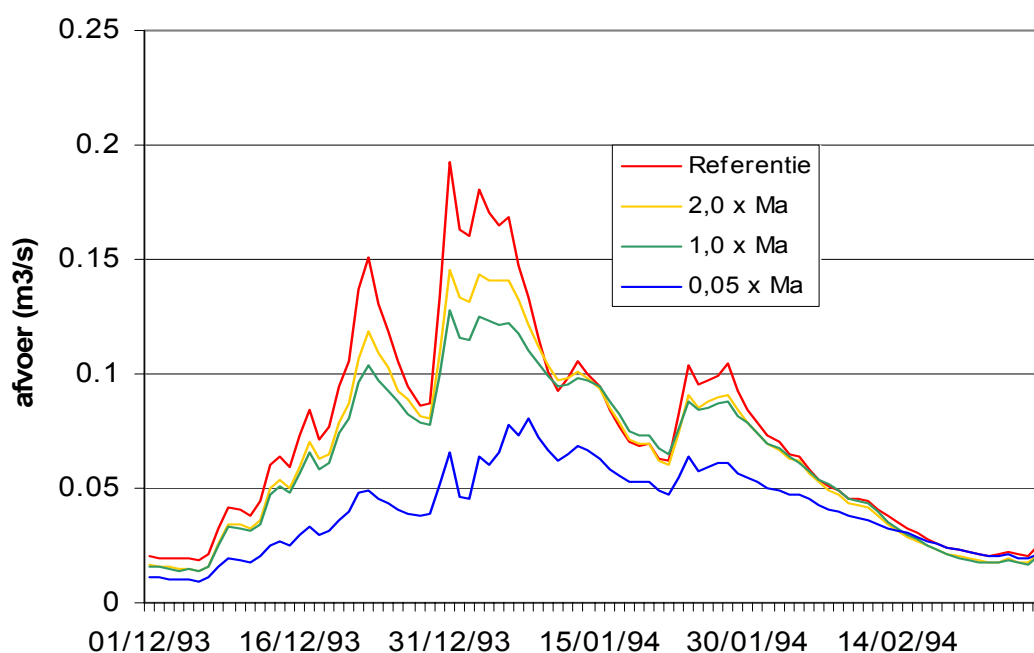
Tabel 1 Matrix van rekenvarianten. Alleen de van een '×' voorziene varianten zijn doorgerekend. Voor de hoogte van de dam is als referentieniveau genomen het zogenaamde maaiveld-referentieniveau van een waterlooptraject in SIMGRO (zie ook tekst). Voor de definitie van de f-factor zie vergelijking (2).

	hoogte maaiveldsdam ten opzichte maaiveld-referentieniveau (m)				
f-factor (-)	0,00	0,10	0,20	0,35	0,50
0,05	×	×	×	×	×
1,00		×			
1,50		×			
2,00		×			

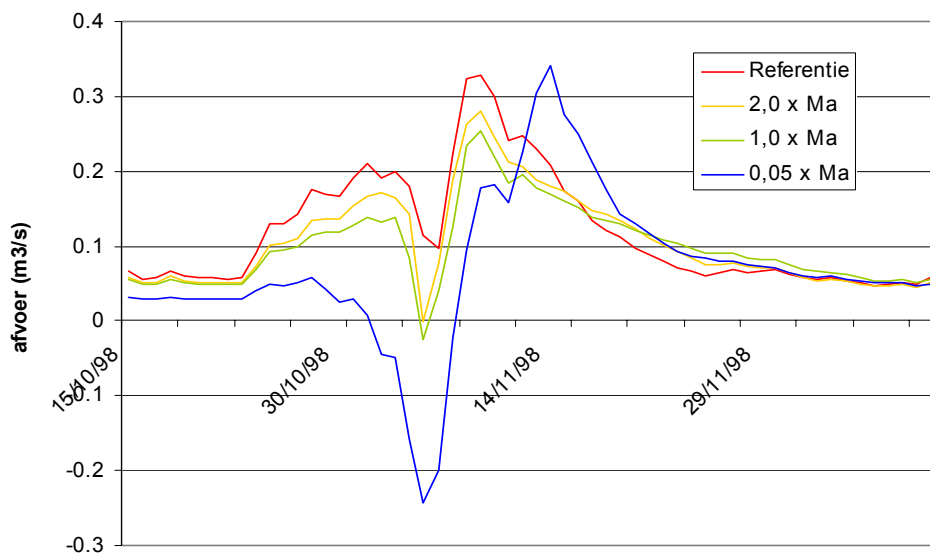
De effecten op zowel het oppervlaktewater als het grondwater worden hieronder besproken.

4.2 Effecten op het oppervlaktewater

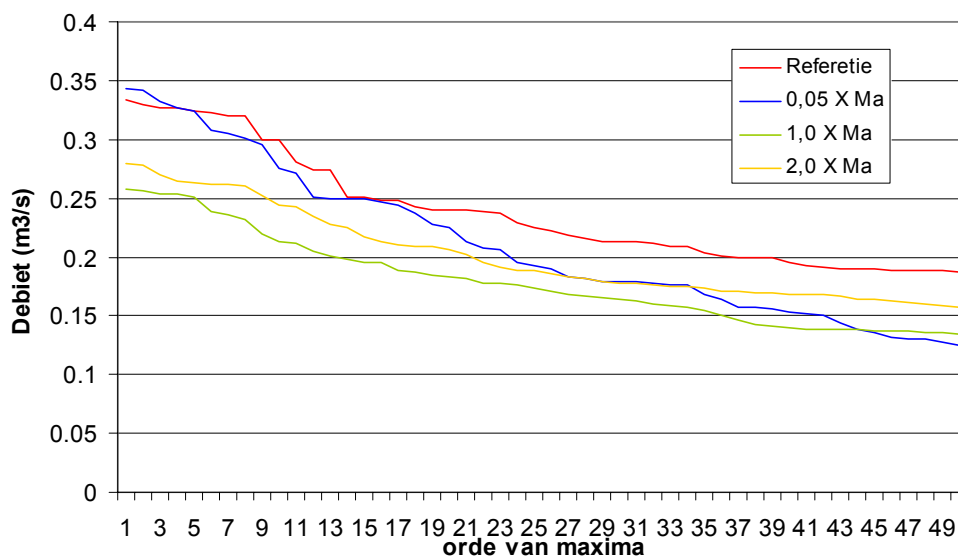
De stuwende duiker zorgt in de meeste gevallen voor een duidelijke afname van de afvoer. Ook hebben verschillende constructies verschillende effecten op de afvoer. In Figuur 11 is te zien dat de afvoeren bij stremming van de duiker afnemen. Voor hogere afvoeren is deze reductie groter dan voor kleinere. In Figuur 11 vindt vrije afstroming plaats. In de Figuur 12 wordt een voorbeeld gegeven van een situatie waarin als gevolg van de nabijheid van de hoofdwaterloop een extreme vorm van stremming plaatsvindt. In een van de varianten is er zelfs een duidelijke omkering van de stromingsrichting (bij $f=0,05$).



Figuur 11 Afvoeren van een deelstroomgebied (vl 323) in Smalbroeken rond de jaarwisseling van 1993, voor een dammetje van 10 cm en 3 varianten van de duiker, met variërende f-factor in de dimensionering (zie ook vgl 2.)



Figuur 12 Afvoeren van een deelstroomgebied (vl 323) in Smalbroeken (winter 1998) voor een dammetje van 10 cm en 3 varianten van de duiker.

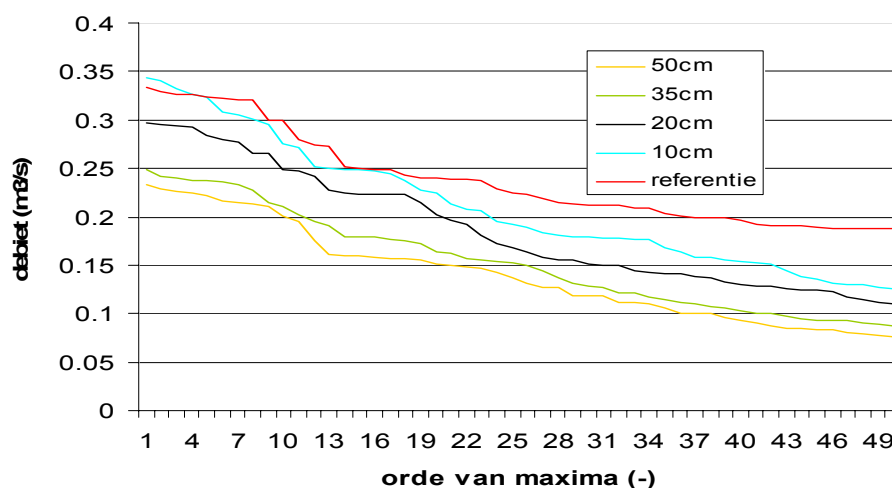


Figuur 13 De rangorde (van grootste naar kleiner) van gesimuleerde waarden van een deelstroomgebiedje binnen Smalbroeken voor verschillende duikervarianten en een dam van 10 cm

Uiteindelijk gaat het niet om de effecten op individuele pieken, maar om de invloed op de afvoerstatistieken. Daarom zijn in Figuur 13 de afvoerstatistieken uitgezet, voor de rekenvarianten met een maaiveldsdam van 0,10 m (ten opzichte van het maaiveldreferentieniveau). Dat is hier gedaan in termen van de rangorde van een dagafvoer en de hoogte daarvan, voor de 11-jarige rekenreeks. Te zien is dat voor kleinere duikers (lage f -factor) de piekafvoeren afnemen, behalve voor de hoogste afvoeren in de meest extreem afgeknepen situatie ($f=0,05$). De verklaring hiervoor is dat door die extreme stremming bijna al het water wordt vastgehouden, totdat op een

gegeven moment de berging vol zit, en dat water over de dammetjes begint af te stromen. Dan neemt de piekafvoer ook heel snel toe, zelfs tot boven de referentie.

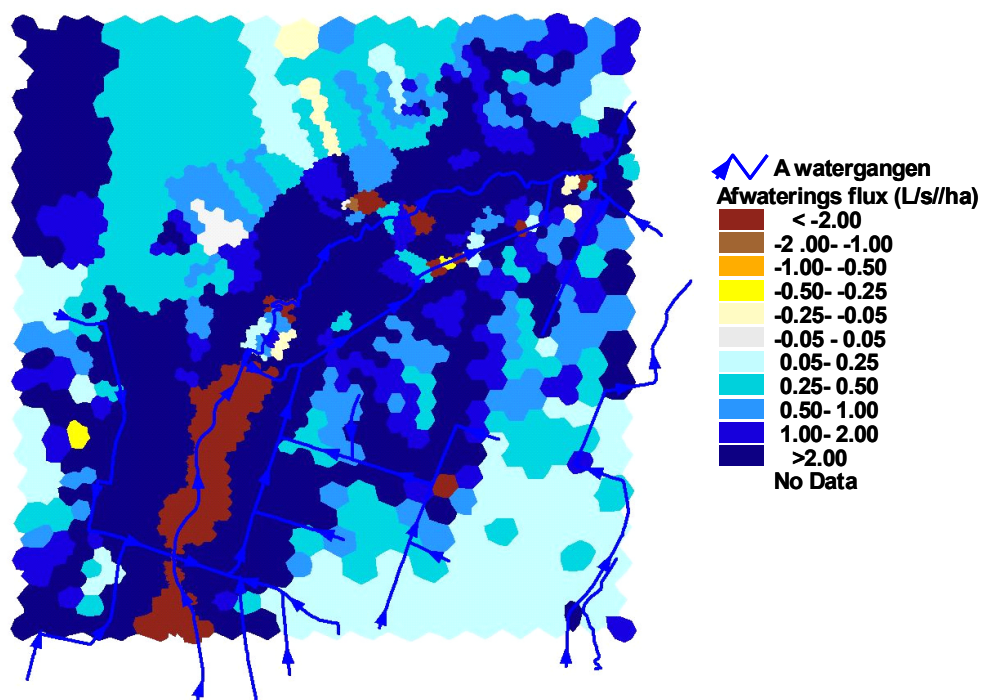
In Figuur 14 is te zien dat ook een grotere hoogte van de dam de piekafvoer kan verlagen. In dit geval is een zeer extreem kleine duiker ($f = 0,05$) gebruikt. Het is waarschijnlijk dat het effect van de dam groter wordt naar mate er harder geknepen wordt. Door de zeer extreme stremming wordt de bergingsmogelijkheid beter benut. Maar wanneer deze eenmaal gevuld is gaat het systeem heel snel reageren waardoor juist hoge piekafvoeren ontstaan.



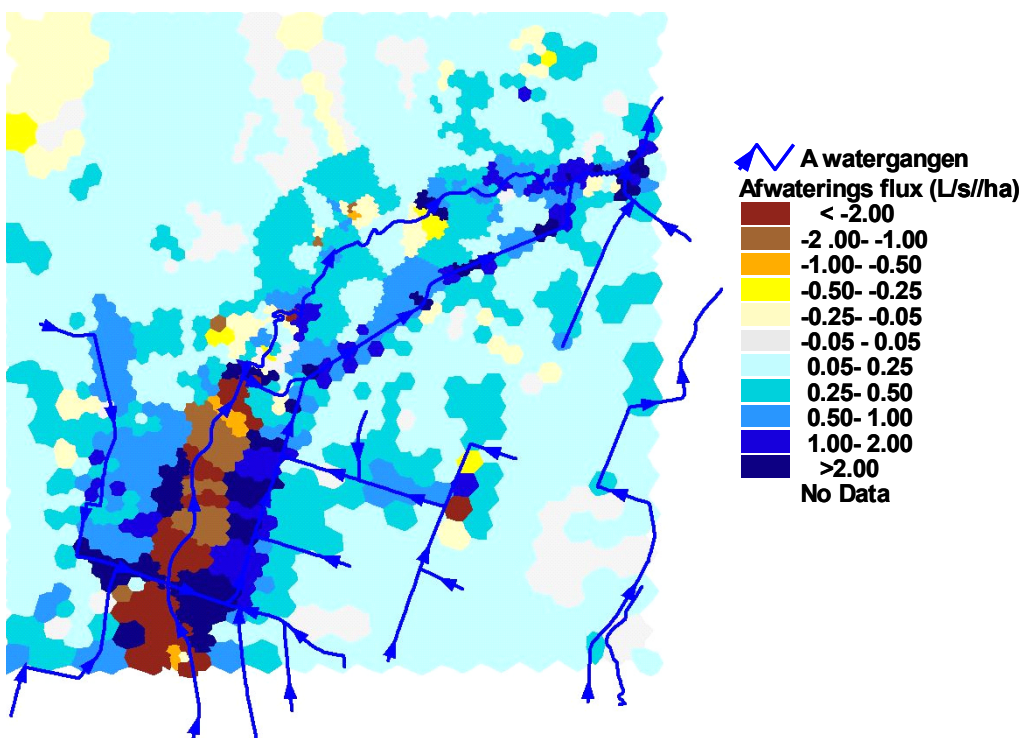
Figuur 14 De rangorde (van grootste naar kleiner) van gesimuleerde waarden van de verschillende dammetjes met een duiker gedimensioneerd op $0,05 \times$ maatgevende afvoer

De bijdrage aan de piekafvoer van ieder waterlooptraject (en de aangekoppelde afwateringseenheid) is berekend om een beter beeld te krijgen van de ruimtelijke verdeling van de stremming. Daartoe is een tijdsinterval van 2 dagen gebruikt voor de piek op 31-1-1995. Per waterloop is voor het tijdsinterval een balans gemaakt van in- en uitgaande afvoeren. Wanneer er meer water instroomt dan er uitstroomt (negatieve afwateringsflux) dan wordt er water geborgen. Wanneer er meer water uitstroomt dan instroomt, dan draagt de aangekoppelde afwateringseenheid van de waterloop bij aan de piek. Om een duidelijk beeld te krijgen zijn in Figuur 15 de bijdragen uitgezet per afwateringseenheid.

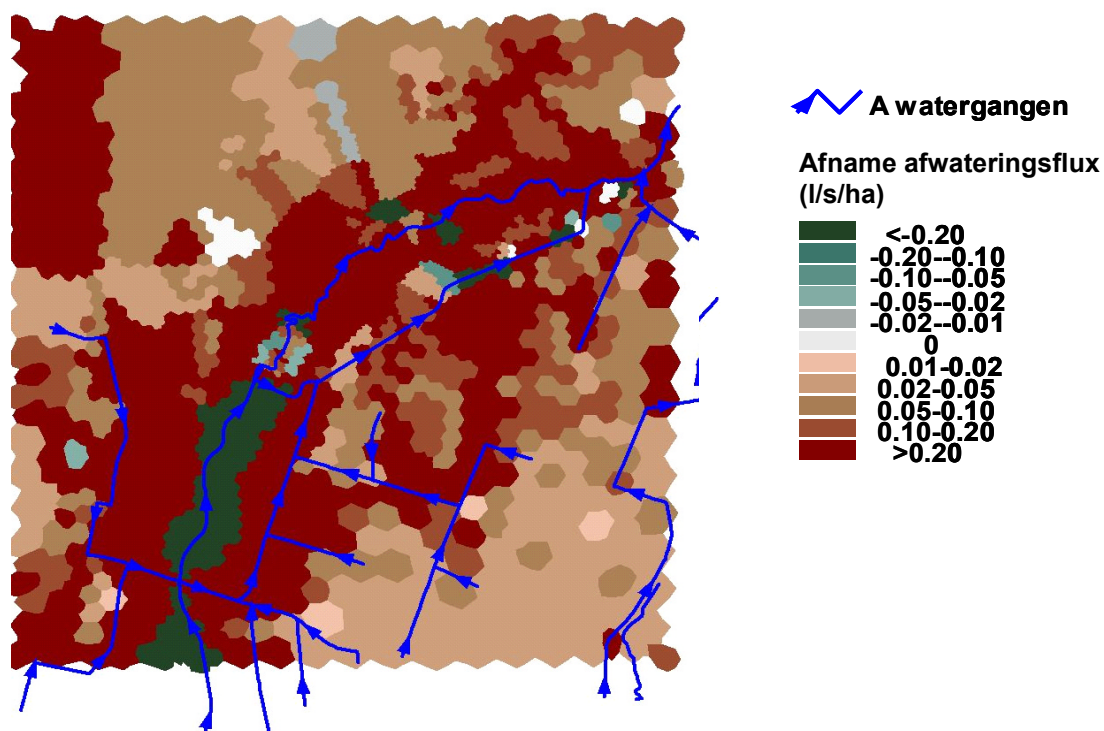
In Figuur 15 is te zien hoe het gebied afvoert zonder stremming. Goed te zien is dat in overstromingsvlakte in de zuidwesthoek van het gebied water wordt geborgen (negatieve bijdrage aan de piekafvoer zichtbaar aan de bruine inkleuring). De rest van het gebied is blauw tot donker blauw en voert dus af. Bovenstaand beeld is vergeleken met die van de variant met een duiker gedimensioneerd op een f -factor van $2,0 \times$ maatgevende afvoer, en een maaiveldsdam op $+0,10$ m ten opzichte van het maaiveld-referentie-niveau. In die variant (Figuur 16) is te zien dat het blauwe gebied over het algemeen een stuk minder blauw is. Dit wijst op een afname van de afvoer. Er wordt hier dus gestremd. Op sommige plaatsen vindt er zelfs berging plaats.



Figuur 15 Bijdrage van het gebied zonder duiker constructies aan een maatgevende piek (31-1-1995)



Figuur 16 Bijdrage van het gebied met duikerconstructies (duiker: 2,0; dam: 10 cm) aan een maatgevende piek (31-1-1995)

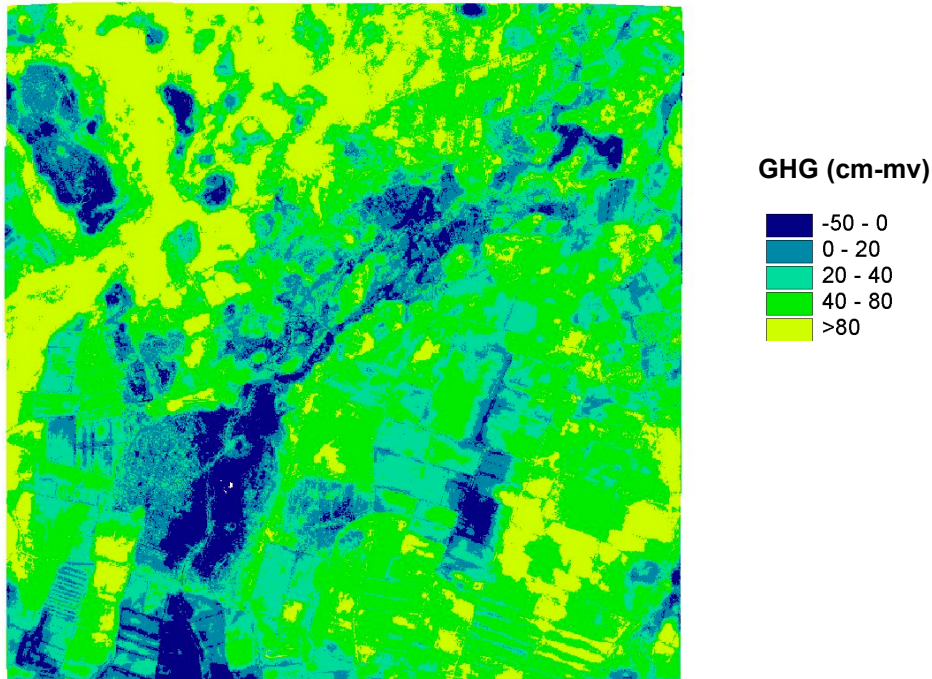


Figuur 17 Afname van de bijdrage aan een maatgevende piek (31-1-1995) als gevolg van stuwende duikers (duiker: 2,0; dam: 10 cm)

In Figuur 17 is het verschil te zien tussen de referentie en de variant waarvan de duiker met een f -factor van 2,0 is gedimensioneerd en de dam een hoogte heeft van +10 cm. Er is goed te zien dat er in vrijwel het gehele gebied sprake is van een positieve verandering: in vrijwel het gehele gebied is er een afname van de afwateringsflux. Maar in de overstromingsvlakte in de zuidwesthoek van het gebied is de afvoer juist toegenomen. Hier staat het al onder water en kan er dus geen extra water geborgen worden. Hier, en op enkele andere plekken naast de hoofdwaterloop, werkt de stremming averechts, waardoor de bijdrage aan de piekafvoer juist omhoog gaat.

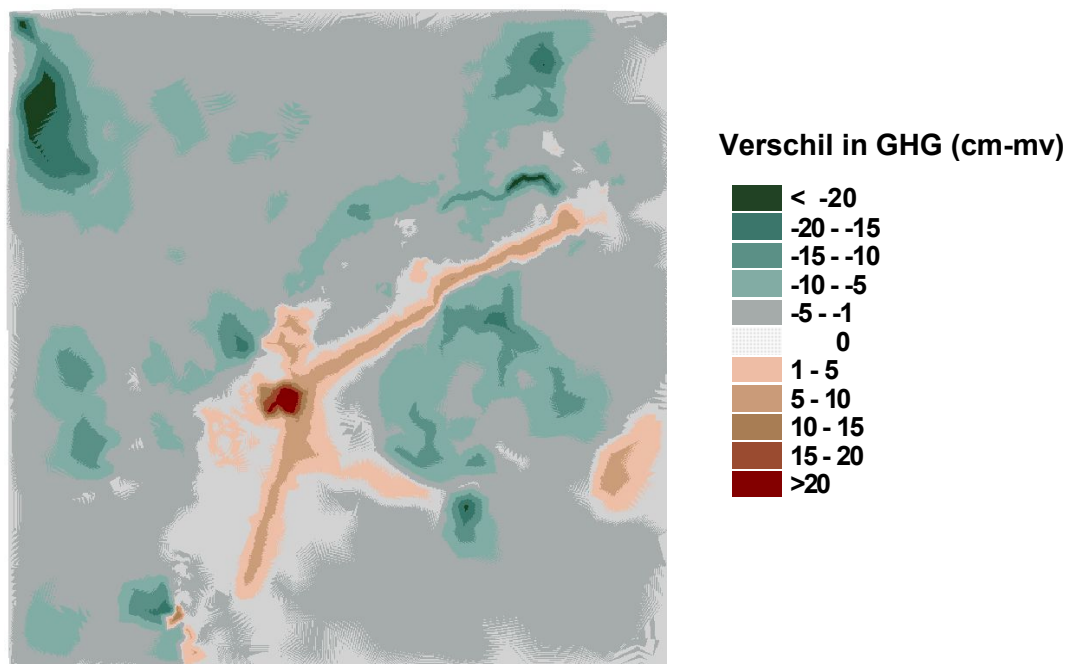
4.3 Effecten op het grondwater

Naast de effecten op het oppervlaktewater zijn er ook nog de effecten op het grondwater. Doordat de waterstanden tijdelijk worden verhoogd, wordt de drainage gestremd, of kan er in sommige situaties juist infiltratie ontstaan. Dit grondwater kan in drogere tijden ten goede komen aan het landgebruik of kan zorgen voor schade. Daarom is het belangrijk om te weten wat de effecten zijn op het grondwater.



Figuur 18 Neergeschaalde GHG kaart van een 11 jarige run van de referentiesituatie (zonder stuwende duiker constructies)

De effecten op het grondwater zijn bekeken aan de hand van de GHG (Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand). In de GHG-kaart van de referentierun (Figuur 18) is te zien dat een groot deel van het gebied erg nat wordt gesimuleerd. In het zuidwesten van het gebied ligt een overstromingsvlakte en daarom wordt daar over een groot gebied grondwater boven maaiveld gesimuleerd. Maar het vermoeden is gerezen dat een belangrijk deel van het gebied gedraineerd is, meer dan in de modelinvoerbestanden staat aangegeven. Voor het verzamelen van extra invoergegevens en invoeren in het model was in dit project geen ruimte.



Figuur 19 Verschil van de GHG in een variant (duiker: 2,0 x ma; dam: 10 cm) ten opzichte van de referentie (negatieve verschillen voor het ondieper worden van de GHG in de variant)

Het verschil in GHG is erg belangrijk voor het bepalen van de schade aan de landbouw. Daarom is de verandering uitgezet in Figuur 19. Hier is te zien dat door de maatregel er over het algemeen een verhoging van de grondwaterstand optreedt. Dit komt door de extra tijd die het water krijgt om te infiltreren en door de extra tegendruk die het water ondervindt als gevolg van de stremming bij de duikers. In het overgrote deel van het gebied is er een verhoging van de grondwaterstand berekend van 1-5 cm. Lokaal zijn er echter grotere verhogingen gesimuleerd. Dit zijn plekken waar het vóór het implementeren van de maatregel al nat was en waar, door een gebrek aan buffercapaciteit, een kleine waterbalansverandering grotere effecten kan hebben op de grondwaterstanden. Bij extremere varianten zijn op die plekken dan ook de veranderingen te merken, terwijl in de rest van het gebied de veranderingen klein blijven. Op die plekken moet men dus erg voorzichtig zijn met het neerzetten van duikerconstructies en moet men ook goed nadenken over de dimensies.

5 Conclusies en discussie

5.1 Conclusies

De stuwende duiker

Aan de hand van de berekeningen is vast te stellen dat water vasthouden op zandgebieden met behulp van stuwende duikers een nuttig instrument kan zijn voor het reduceren van afvoerpieken. Er moet echter wel voorzichtig mee omgesprongen worden: het is essentieel dat moet goed wordt nagedacht over de plaats en de dimensionering van de duikerconstructies. Bij verkeerde plaats of dimensionering kunnen er ongewenste effecten optreden, zoals een te grote verhoging van de GHG.

Het vasthouden van water kan bij extreme situaties zelfs een negatief effect hebben op het afvoerverloop. Dit kan gebeuren wanneer door het vasthouden van water de bergingscapaciteit voortijdig wordt gebruikt. Op het moment van de daadwerkelijke piek is er dan geen bergingscapaciteit meer om de afvoer te kunnen bufferen en kunnen er problemen ontstaan. Dit is voornamelijk een gevaar in hellende vrij afwaterende gebieden. Wanneer de afwatering mechanisch geregeld wordt, kan deze stop gezet worden waardoor water wordt vastgehouden. Wanneer er echter vrije afwatering plaatsvindt, zal het water een weg zoeken om tot afvoer te komen wanneer het niet geborgen kan worden.

Het is dus zaak om de kunstwerken op een manier te dimensioneren zodat er niet te snel water wordt vastgehouden. In hoofdstuk 4 is te zien dat een duiker die gedimensioneerd is op de maatgevende afvoer (f -factor=1) al een redelijke reductie (25%) op de piekafvoer kan geven. Wel is bij deze dimensionering op plekken al een effect te zien van de terugslag uit de hoofdbeek. In een meer bovenstrooms gelegen gebied zijn deze effecten natuurlijk minder.

SIMGRO

Naast deze hoofdconclusie is ook vastgesteld dat het regionaal hydrologisch model SIMGRO in staat is om een dergelijk complex proces duidelijk en goed te simuleren. Ondanks de aanwezigheid van heel kleine trajecten (2 m ten opzichte van 75 m) zijn instabiliteiten uitgebleven. Ook vindt er een goede routing plaats door het systeem, met bifurcaties en samenvloeiing. Daarbij is de verdeling van de stroming van cruciaal belang. Terugstuwning zorgt er hier voor dat een hogere benedenstroomse waterstand bovenstrooms effect heeft. Dat lijkt goed te werken.

5.2 Discussie

Er is in deze studie alleen onderzocht of vasthouden zou kunnen werken. Duidelijk is gebleken dat dit zo is, maar ook dat per geval goed moet worden gekeken naar de toepassing in verband met negatieve effecten. In deze studie was het ook erg lastig om een goed criterium te vinden om het effect te kwantificeren. Vanwege de benedenstroomse ligging van het proefgebied zijn de resultaten overigens niet representatief voor het hele stroomgebied. Interessant is daarom ook de vraag wat de piekreductie zou kunnen zijn wanneer de maatregelen op stroomgebiedniveau worden toegepast. Hierbij kunnen ook andere maatregelen zoals verdrogingsbestrijding of verandering van landgebruik bekeken kunnen worden. Hierbij kan ook het water vasthouden in natuur verder worden bekeken.

Relevant zijn verder nog de vragen:

- Hoe moet vasthouden met behulp van stuwende duikers in de praktijk vormgegeven worden?
- Wat zijn in de praktijk de effecten op de bedrijfsvoering in de landbouw?
- Is er draagvlak voor een dergelijke maatregel?

Deze vragen zijn in een modelstudie niet te beantwoorden en daarom zal er een pilotstudie plaats moeten vinden om de realiseerbaarheid te onderzoeken. Wel is van belang dat wanneer er aan vasthouden van water wordt gedacht, dit op grote schaal gebeurt; anders is het totale effect te klein.

Literatuur

- Bakel, P.J.T. van, P.E.V. van Walsum, M. Groenendijk en E.P.Querner, 2002. *Waterberging en verdrogingsbestrijding. Een nadere analyse van de mogelijkheden en beperkingen aan de hand van 2 modelberekeningen in 2 regio's*. Alterra-rapport 640. Alterra, Wageningen.
- Commissie Waterbeheer 21ste eeuw, 2000. *Waterbeleid voor de 21ste eeuw. Geef water de ruimte en aandacht die het verdient*. Advies uitgebracht aan Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag.
- Gaast J.W.J. van der, H.Th.L. Massop, J. van Os, L.C.P.M. Stuyt, P.J.T. van Bakel, C. Kwakernaak, 2002. *Waterkansen in het SGR2. Potenties voor realisatie van de wateropgaven*. Alterra-rapport 558 ISSN 1566-7197. Alterra, Wageningen.
- Luijendijk J. en J.M.P.M. Peerboom, 2002. *Tungelroyse beek: evaluatie maatregelen voor hoogwaterbestrijding en natuurherstel*. H2O # 16: 15-17.
- Querner, E.P. and P.J.T. van Bakel, 1989. *Description of the regional groundwater flow model SIMGRO* Rapport 7. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.
- Teunissen van Maanen, T.C.. 1985. *Bodemkaart van Nederland 1: 50000; Toelichting bij de kaartbladen 50 Oost Tilburg en 51 West Eindhoven*. Stiboka, Wageningen.
- Veldhuizen, A.A., A. Poelman, L.C.P.M. Stuyt en E.P. Querner, 1998. *Software documentation for SIMGRO V3.0. Regional water management simulator*. Technical Document 50. SC-DLO, Wageningen.
- Walsum P.E.V. van, P.F.M. Verdonchot en J Runhaar, 2002. *Effects of climate and land use change on lowland stream ecosystems*. Alterra-rapport 523, ISSN 1566-7197. Alterra, Wageningen.
- Van Walsum, P.E.V., A.A. Veldhuizen, P.J.T. van Bakel, F.J.E. van der Bolt, P.E. Dik, P. Groenendijk, E.P. Querner, M.F.R. Smit (in voorbereiding). *SIMGRO; theory and model implementation*. Alterra-rapport 913, Wageningen.