

Effecten van verdrogingbestrijdende maatregelen en klimaatverandering op extreem hoge afvoeren

Effecten van verdrogingbestrijdende maatregelen en klimaatverandering op extreem hoge afvoeren

Een modelstudie met SIMGRO voor het Stortelersbeekgebied

D.G. Cirkel

E.P. Querner

P.J.J.F. Torfs

H.A.J. van Lanen

Alterra-rapport 844

Alterra, Wageningen, 2003

REFERAAT

Cirkel, D.G., E.P. Querner, P.J.J.F. Torfs, H.A.J. van Lanen, 2003. *Effecten van verdrogingbestrijdende maatregelen en klimaatverandering op extreem hoge afvoeren; Een modelstudie met SIMGRO voor het Stortelersbeekgebied*. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 844. 145 blz. 60 fig.; 36 tab.; 52 ref.

Verdroging vormt met name in hoog Nederland een probleem. Beleid van zowel de Rijksoverheid als de lagere overheden is gericht op het terugdringen van verdroging. De laatste jaren wordt echter steeds duidelijker dat naast verdroging ook wateroverlast door extreme neerslag een steeds groter probleem gaat vormen. Verdrogingbestrijdende maatregelen kunnen de kans op extreem hoge afvoeren doen toenemen, dit effect kan in de toekomst nog worden versterkt door klimaatverandering. De doelstelling van dit onderzoek is het kwantificeren van de effecten van zowel verdrogingbestrijdende maatregelen als klimaatverandering op de herhalings tijden van extreme afvoeren. Als onderzoeksgebied is gekozen voor het stroomgebied van de Stortelersbeek, nabij Winterswijk.

Trefwoorden: hydrologie, SIMGRO, verdrogingbestrijding, Waternood, statistische analyse van piekafvoeren, extreme waarden verdelingen

ISSN 1566-7197

Dit rapport kunt u bestellen door € 44,- over te maken op banknummer 36 70 54 612 ten name van Alterra, Wageningen, onder vermelding van Alterra-rapport 844. Dit bedrag is inclusief BTW en verzendkosten.

© 2003 Alterra

Postbus 47; 6700 AA Wageningen; Nederland

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

Niets uit deze uitgave mag worden veelevoudigd 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	9
Samenvatting	11
1 Inleiding	15
1.1 Kader	15
1.2 Doelstelling en onderzoeksvraag	16
1.3 Onderzoeksmethode	17
1.4 Opbouw van het rapport	17
2 Gebiedsbeschrijving	19
2.1 Ligging van het onderzoeksgebied	19
2.2 Geologie	19
2.2.1 Tertiair	20
2.2.2 Kwartair	20
2.3 Hoogteligging plateau's en geulen	21
2.4 Watersysteem	22
2.4.1 Grondwater	22
2.4.2 Oppervlaktewater	23
2.5 Bodem	24
2.6 Landgebruik en ecologie	25
3 Traditionele benadering en Waternoodprocedure	29
3.1 Traditionele werkwijze waterhuishouding	29
3.1.1 Inleiding	29
3.1.2 Waterwensen landbouw	29
3.1.3 Ontwatering	30
3.1.4 Drooglegging en afwatering	31
3.1.5 Gevolgen	32
3.2 Waternood	32
3.2.1 Inleiding	32
3.2.2 Werkwijze	33
4 Statistische analyse beekafvoeren	37
4.1 Inleiding	37
4.2 Extreme waarden verdelingen	37
4.2.1 Generalised Extreme Value verdeling	37
4.2.2 Parameterschatting	39
4.3 Tijdreeksmethode	40
4.4 Stochastenmethode	41
5 Het Stortelersbeekmodel	47
5.1 Inleiding	47
5.2 Theoretische achtergronden SIMGRO	47

5.2.1	Grondwaterstroming in de verzadigde zone	47
5.2.2	Grondwaterstroming in de onverzadigde zone	50
5.2.3	Af- en ontwatering	51
5.3	Modelschematisatie	53
5.3.1	Ruimtelijke en temporele discretisatie	53
5.3.2	Schematisatie van de ondergrond	53
5.3.3	De onverzadigde zone en meteorologische gegevens	54
5.3.4	Schematisatie van het oppervlaktewatersysteem	55
6	Aanpassingen, gevoeligheidsanalyse en calibratie	57
6.1	Aanpassingen aan het bestaande model	57
6.2	Gevoeligheidsanalyse en calibratie	57
6.2.1	Inleiding	57
6.2.2	Referentiesituatie	59
6.2.3	Gevoeligheidsanalyse	61
6.2.4	Calibratie en validatie	63
6.2.5	Conclusies	67
7	Actueel grond- en oppervlaktewaterregime	69
7.1	Inleiding	69
7.2	Grondwater	70
7.2.1	Inleiding	70
7.2.2	Actueel grondwaterregime	70
7.2.3	Opbrengstdepressies en doelrealisatie landbouw	75
7.2.4	Doelrealisatie terrestische natuur	77
7.3	Analyse afvoeren Stortelersbeek	79
7.3.1	Inleiding	79
7.3.2	Algemene analyse afvoeren	80
7.3.3	Analyse extreme afvoeren met de tijdreeksmethode	82
7.3.4	Analyse extreme afvoeren met de Stochastenmethode	87
7.3.5	Vergelijking resultaten van beide methoden	89
8	Scenario's	91
8.1	Inleiding	91
8.2	Beschrijving scenario's	91
8.2.1	Scenario A Verhogen drainagebasis watergangen	91
8.2.2	Scenario B Klimaatsverandering	92
8.2.3	Scenario C Verhogen drainagebasis in combinatie met klimaatsverandering	93
8.3	Resultaten	93
8.3.1	Verandering grondwaterstanden	93
8.3.2	Doelrealisatie landbouw	94
8.3.3	Doelrealisatie natuur	96
8.3.4	Afvoer van de Stortelersbeek	98
9	Conclusies, aanbevelingen en discussie	103
9.1	Conclusies	103
9.1.1	Hoofdconclusies	103
9.1.2	Toelichting op de hoofdconclusies	104

9.2 Discussie en aanbevelingen	107
Literatuur	109
<i>Bijlagen</i>	
1 Stratigrafische tabel	113
2 Bodemkaart	115
3 Grondwatertrappen	117
4 Gevoeligheidsanalyse	119
5 GXG- kaarten	121
6 HELP-tabel	125
7 Grondwaterstandsverlopen en duurlijnen	127
8 R-script voor GEV verdeling	131
9 Gebeurtenissen en frequenties	133
10 Grondwaterstanden scenario's	135
11 Nat- en droogteschade scenario's	139
12 Verandering doelrealisatie landbouw	143
13 Herhalingstijden en afvoeren	145

Woord vooraf

Het rapport dat voor u ligt, vormt de afsluiting van het afstudeervak Hydrologie door de eerste auteur. Het onderzoek is uitgevoerd bij Alterra. De afgelopen 6 maanden heb ik mij bezig gehouden met verdroging en het analyseren van extreem hoge afvoeren. Hierbij heb ik gebruik gemaakt van SIMGRO, het Waternood-instrumentarium en statistische technieken.

Samenvatting

In veel gebieden in hoog Nederland treedt verdroging op. Dit probleem wordt al enige jaren door de politiek onderkend. Beleid van zowel de Rijksoverheid als de lagere overheden is gericht op het terugdringen van verdroging. De laatste jaren wordt echter steeds duidelijker dat in de toekomst naast verdroging, ook wateroverlast door extreme neerslag een steeds groter probleem gaat vormen. Verdrogingsbestrijdende maatregelen kunnen de kans op extreem hoge afvoeren doen toenemen, dit effect kan in de toekomst nog worden versterkt door klimaatverandering.

De doelstelling van dit onderzoek is het kwantificeren van de effecten van zowel verdrogingsbestrijdende maatregelen als klimaatverandering op extreem hoge afvoeren. In de studie wordt gebruik gemaakt van het niet stationaire hydrologische model SIMGRO, in combinatie met het Waternood instrumentarium en een tweetal statistische technieken.

Als onderzoeksgebied is gekozen voor het stroomgebied van de Stortelersbeek in de Achterhoek. Het gebied kenmerkt zich door de aanwezige glaciële geulen en plateau's. Het stroomgebied van de Stortelersbeek reageert voor Nederlandse begrippen zeer snel op neerslag. De snelle reactie van het systeem wordt veroorzaakt door het zeer ondiep voorkomen van Tertiaire klei en keileem. Op de Stortelersbeek kunnen hierdoor extreem hoge afvoeren optreden. Een recent voorbeeld is de periode oktober/november 1998, maar ook in de jaren 60 zijn extreem hoge afvoeren op de beek opgetreden. Het stroomgebied is sterk verdroogd. De verdroging uit zich in het droogvallen van de Stortelersbeek en het te diep wegzakken van grondwaterstanden.

Van het ca. 3400 ha grote modelgebied is met SIMGRO een hydrologisch model opgesteld. De gevoeligheid van het model voor de gebruikte parameters is onderzocht. Het model is doorgerekend met gegevens van meteostation Aalten en vervolgens handmatig gecalibreerd op gemeten afvoeren van de Stortelersbeek en grondwaterstanden van dertien peilbuizen. Calibratie van het model was vooral voor de afvoeren vrij moeilijk, gezien de complexe aard van het modelgebied en het gebrek aan gedetailleerde gegevens over bijvoorbeeld doorlaatfactoren.

Met het gecalibreerde model is vervolgens een reeks (periode 1951-1999) met meteogegevens van station De Bilt doorgerekend. Er is voor De Bilt gekozen omdat er voor dit station eveneens aan klimaatverandering aangepaste reeksen beschikbaar waren. Op basis van deze reeks is de referentie situatie vastgelegd, waarbij is gekeken naar de grondwaterstanden, nat- en droogteschade van de landbouw, de doelrealisatie natuur en de afvoeren van de Stortelersbeek. De afvoer is allereerst op een algemene manier geanalyseerd. Vervolgens zijn met een tweetal statistische technieken (de tijdreeksmethode en de stochastenmethode) de herhalingstijden van extreem hoge afvoeren bepaald. Voor de tijdreeksmethode is de berekende afvoerreeks van 49 jaar

gebruikt. Voor de stochastenmethode is het model doorgerekend met 112 9-daagse gebeurtenissen. De vastgelegde referentiesituatie is gebruikt om de effecten van de scenario's te bepalen. Voor de analyse is het onderzoeksgebied beperkt tot het gebied bovenstrooms van de meetstuw in de Stortelersbeek. Dit gebied wordt verder aangeduid als het 'interessegebied'.

Uit de analyse van de referentiesituatie blijkt dat het interessegebied vrij droog is. Het blijkt dat droogteschade vooral optreedt op de dekzandruggen aan randen van de plateau's. Natschade komt in het interessegebied slechts beperkt voor op plaatsen waar keileem of Tertiaire klei ondiep voorkomt en op lokale laagtes langs de Stortelersbeek. De doelrealisatie (100%-(droogteschade+natschade) voor landbouw valt vrijwel overal binnen de klasse 75%-90%. Alleen op plaatsen waar veel droogteschade optreedt, komt de doelrealisatie beneden de 75%. De doelrealisatie natuur kon in dit onderzoek door het ontbreken van een gedetailleerde kaart met natuurdoeltypen niet met voldoende betrouwbaarheid worden bepaald.

De afvoer van de Stortelersbeek blijkt sterk te variëren. Tijdens de simulatieperiode is de minimale afvoer voor de referentiesituatie 0.003 m³/s. De gemiddelde afvoer bedraagt 0.046 m³/s, afvoerpieken zoals de maximale berekende afvoer van 1.018 m³/s wijken sterk af van het gemiddelde. Met behulp van de tijdreeksmethode en de stochastenmethode zijn de herhalingstijden van piekafvoeren geanalyseerd. Bij een herhalingstijd van 100 jaar hoort volgens de tijdreeksmethode een afvoer van 0.941 m³/s en volgens de stochastenmethode een afvoer van 0.942 m³/s. Bij een herhalingstijd van 250 jaar lopen de uitkomsten van beide methoden iets verder uiteen en bedragen de afvoeren bij een herhalingstijd van 100 jaar respectievelijk 1.113 m³/s en 1.145 m³/s.

Nadat de referentiesituatie is vastgelegd zijn er drie scenario's doorgerekend:

- Verhogen van de drainagebasis
- Klimaatverandering
- Verhogen van de drainagebasis en klimaatverandering

Het scenario verhogen drainagebasis bestaat uit het verondiepen van 7 watergangen in het meest verdroogde deel van het interessegebied. Bij de aanpassing is gestreefd naar een bodemdpte van 75 cm-mv. Het scenario klimaatverandering omvat het doorrekenen van het model met meteorologische gegevens volgens het 'klimaatscenario midden' uit de WB 21 studie. Voor het laatste scenario zijn de twee voorafgaande scenario's gecombineerd.

Het verhogen van de drainagebasis blijkt een geschikt middel om lokaal verdroging te bestrijden. Het effect is echter beperkt tot het invloedsgebied van de waterlopen. De droogteschade neemt door de maatregel af terwijl de natschade slechts zeer beperkt toe neemt. Klimaatverandering heeft een sterke stijging van de GHG tot gevolg, terwijl de GLG juist sterk daalt. Klimaatverandering heeft dus voor het Stortelersbeekgebied een vergroting van de dynamiek van het grondwatersysteem tot gevolg. Door de daling van de GLG en de stijging van de GHG nemen zowel droogte- als natschade toe.

Door het verhogen van de drainagebasis kunnen de negatieve effecten (toename droogteschade) als gevolg van het dalen van de GLG door klimaatverandering lokaal worden gecompenseerd. De natschade neemt door het verhogen van de drainagebasis echter toe.

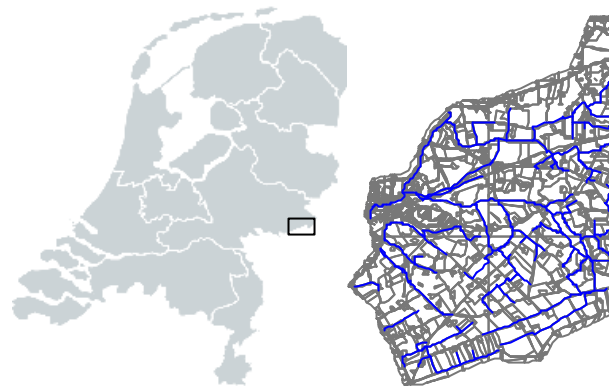
Door het verhogen van de drainagebasis neemt de kans op piekafvoeren op de Stortelersbeek toe. Een afvoer van 1 m³/s heeft in de referentie situatie een herhalingsstijd van ongeveer 150 jaar. Bij het verhogen van de drainagebasis neemt de herhalingsstijd af naar ongeveer 120 jaar. Bij klimaatverandering neemt de herhalingsstijd behorende bij een afvoer van 1 m³/s zelfs af naar 40 jaar. Klimaatverandering samen met het verhogen van de drainagebasis leidt tot een herhalingsstijd van 35 jaar voor een afvoer van 1 m³/s.

Het blijkt dat de herhalingsstijden berekend met de Stochastenmethode en met de tijdreeksmethode voor de referentie situatie vergelijkbare uitkomsten geven. Dit gaat echter alleen op als de initiële condities voor de Stochasten correct zijn. De uitkomsten van de Stochastenmethode blijken erg gevoelig voor de initiële grondwaterstanden en daarmee voor de initiële vochttoestand van de bodem. Bij goed gebruik blijkt het met beide methoden mogelijk om uitspraken te doen over piekafvoeren met een herhalingsstijd van bijvoorbeeld 100, 150 of 250 jaar.

1 Inleiding

1.1 Kader

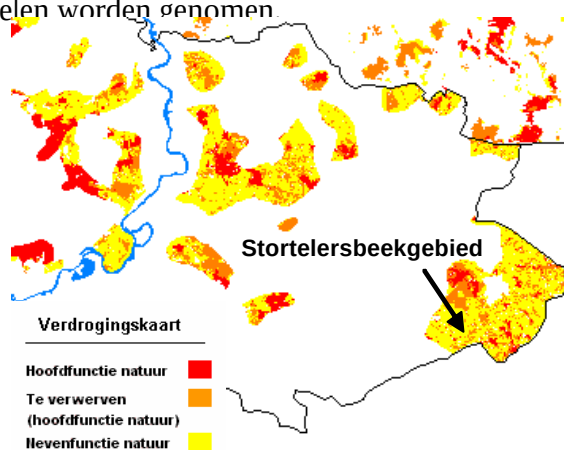
Het stroomgebied van de Stortelersbeek ligt in het uiterste zuidoosten van de Achterhoek tussen Aalten en Winterswijk. De zuidgrens van het gebied wordt gevormd door de rijksgrens met Duitsland. Het totale onderzoeksgebied heeft een oppervlakte van 3410 hectare. In figuur 1.1 is de ligging van het onderzoeksgebied in Nederland weergegeven.



Figuur 1.1 Ligging van het onderzoeksgebied in Nederland

Het stroomgebied van de Stortelersbeek heeft te maken met zowel verdroging als wateroverlast. Op de verdrogingskaart van Nederland [Werkgroep verdrogingskaart, 2000] is het gehele gebied aangegeven als verdroogt (zie figuur 1.2). Voorbeelden van verdroging in het gebied zijn: verdroging van landbouw- en bospercelen op landgoed 't Kreijl en het droogvallen van de Stortelersbeek en een aantal poelen [Hanhart, 2001]. Wateroverlast wordt veroorzaakt door het optreden van extreem hoge grondwaterstanden en piekafvoeren op de Stortelersbeek, zoals in het najaar van 1998. De extreme piekafvoeren en het periodiek droogvallen van de beek zijn, gezien het feit dat de Stortelersbeek door de provincie Gelderland als een HEN-water¹ is aangemerkt [Werkgroep Water wijzer, 2002], zeker niet wenselijk. Ook voor de verdroging in het omliggende gebied moeten maatregelen worden genomen.

Om de verdroging in het stroomgebied van de Stortelersbeek te bestrijden, is een analyse met de methode Waternood waarschijnlijk een geschikt middel. De methode houdt in dat de waterbeheerder voor elk gebied 'eigen' criteria opstelt. Deze criteria leunen sterk op de grondwaterwensen, behorende bij verschillende bodemtypen en bodemgebruik en de vertaling van deze wensen van grond- naar oppervlaktewater.



Figuur 1.2 Verdroogde natuurgebieden in de Achterhoek

¹ HEN-water = Water met de functie 'hoogst ecologisch niveau'

De methode Waternood is gericht op jaargemiddelde situaties en momenteel nog sterk gericht op het grondwater. Binnen de methode Waternood is het oppervlaktewatersysteem een beetje het ondergeschoven kindje, zoals zal blijken in paragraaf 3.2. Het gevaar van een te eenzijdige benadering (alleen kijken naar grondwater) is dat, door bijvoorbeeld maatregelen om het grondwaterregime te verbeteren, er problematische situaties ontstaan voor het oppervlaktewater. Het is dus belangrijk om naast de effecten van maatregelen op het grondwater, ook de effecten op het oppervlaktewater te bepalen. In deze studie ligt bij het onderdeel oppervlaktewater het accent vooral bij op het bepalen van de herhalingstijden van extreem hoge afvoeren. De effecten van klimaatverandering zijn niet standaard in de methodiek opgenomen. Het kan dat maatregelen volgens uit de Waternood-procedure leiden tot het optreden of vergroten van wateroverlast als gevolg van veranderende weersomstandigheden. Een aanvulling op Waternood met een toetsing op het effect van de maatregelen op piekafvoeren en grondwaterstanden als gevolg van extreme weersomstandigheden is hierdoor gewenst.

1.2 Doelstelling en onderzoeksvraag

Doelstelling:

Het bepalen van:

- De mogelijkheden om met behulp van de methode Waternood verdroging en wateroverlast in het stroomgebied van de Stortelersbeek te kwantificeren.
- De effecten op de beekafvoeren van een op basis van de waternoodanalyse voorgesteld maatregelenpakket en klimaatverandering.

Onderzoeksvraag:

Hoe kan de verdroging in het stroomgebied van de Stortelersbeek het beste worden bestreden en wat zijn de effecten van de maatregelen op de beekafvoeren rekening houdend met klimaatverandering?

Deelvragen:

- Hoe is het gebied opgebouwd ten aanzien van hydrogeologie, bodem, waterhuishouding, landgebruik en ecologie?
- Is de betrouwbaarheid van het bestaande SIMGRO-model voldoende?
- Als de betrouwbaarheid onvoldoende blijkt, in hoeverre is het SIMGRO-model dan te calibreren?
- In welke mate treedt er nat en droogteschade op in het gebied?
- Wat is een goede methode om extreem hoge beekafvoeren statistisch te analyseren
- Wat zijn de effecten van de Waternood-maatregelen en klimaatverandering op de beekafvoeren?
- Kunnen er uitspraken gedaan worden over overschrijdingskansen voor bijvoorbeeld perioden van 100, 150 of 250 jaar bij een rekenperiode van ten hoogste 50 jaar.

- Wat zijn de overschrijdingskansen bij de huidige (referentie) situatie, bij maatregelen en bij klimaatverandering?

1.3 Onderzoeksmethode

Het onderzoek bestaat globaal uit twee onderdelen: een theoretisch deel en een toepassing in de vorm van een modelstudie, waarbij gebruik wordt gemaakt van het programma SIMGRO (programma voor het modelleren van regionale hydrologische systemen). In het theoretische deel wordt allereerst de opbouw van het onderzoeksgebied beschreven. Behandeld worden onder andere de geologie, het hydrologische systeem en het landgebruik. Verder wordt in het theoretische deel een beschrijving gegeven van het hydrologische model SIMGRO dat in de modelstudie gebruikt wordt. Vervolgens wordt de theorie achter de methode Waternood en een tweetal statistische technieken voor het analyseren van extreem hoge afvoeren behandeld. De gebruikte statistische technieken zijn: een tijdreeksanalyse gebruikmakend van extreme waarden verdelingen en de Stochastenmethode.

In de modelstudie wordt het al bestaande SIMGRO model van het Stortelersbeekgebied geanalyseerd en waar nodig aangepast. Vervolgens wordt het model gecalibreerd en gevalideerd op zowel grondwaterstanden als afvoeren. Voor het onderzoek worden naast de referentie situatie een drietal scenario's met het model doorgerekend:

1. Verdrogingbestrijdende maatregelen
2. Klimaatverandering (klimaatscenario midden)
3. Verdrogingsbestrijdende maatregelen in combinatie met klimaatverandering.

Allereerst wordt van de referentie situatie de mate van nat- en droogteschade in kaart gebracht. Hierbij wordt gekeken naar zowel landbouw als natuur en wordt gebruik gemaakt van de methode Waternood. Ook wordt met behulp van de twee statistische technieken de kansen op piekafvoeren bepaald. Van de drie scenario's wordt vervolgens bepaald in hoeverre de nat- en droogteschade veranderd ten opzichte van de referentie situatie. Ook wordt bepaald hoe de kans op extreem hoge afvoeren veranderd als gevolg van de scenario's. Met behulp van de uitkomsten uit zowel het theoretische deel als de modelstudie wordt vervolgens zoveel mogelijk antwoord te geven op de onderzoeksvraag en de verschillende deelvragen.

1.4 Opbouw van het rapport

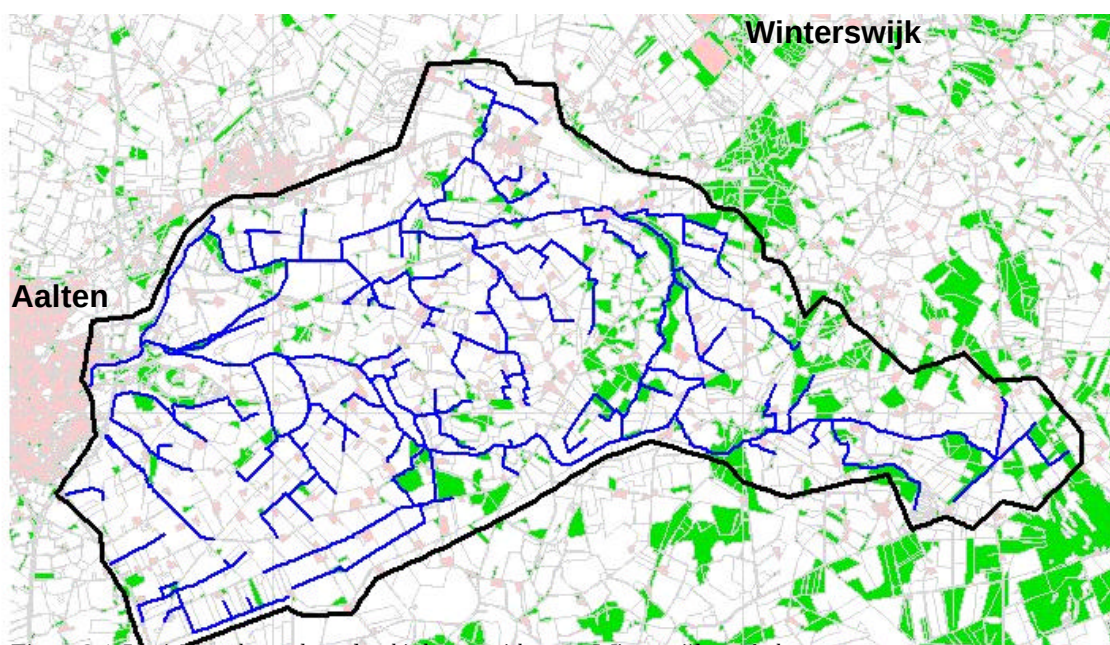
In hoofdstuk 2 wordt het onderzoeksgebied beschreven, behandeld worden onder andere de geologie, het watersysteem de bodem, het landgebruik en de ecologie. In hoofdstuk 3 wordt kort de traditionele benadering ten aanzien van de waterhuishouding beschreven. Vervolgens wordt de lezer in dit hoofdstuk bekend gemaakt met de werkwijze volgens de methode Waternood. Een van de hoofdvragen in dit onderzoek is wat het effect is van verdrogingbestrijdende maatregelen en klimaatverandering op de kans van voorkomen van extreem hoge afvoeren. In

hoofdstuk 4 worden twee methoden behandeld waarmee de kansen op extreem hoge afvoeren kunnen worden bepaald. Om uitspraken over de hydrologie van het gebied te kunnen doen en de effecten van scenario's te onderzoeken, is een model van het gebied opgesteld met behulp van SIMGRO. In hoofdstuk 5 wordt de theorie achter SIMGRO en de modelschematisatie besproken. Aanpassingen aan het model, een gevoeligheidsanalyse en calibratie worden in hoofdstuk 6 besproken. In hoofdstuk 7 is vervolgens met het opgestelde en gecalibreerde model de referentie situatie bepaald. De resultaten van de scenario's worden in hoofdstuk 8 besproken. Tenslotte worden in hoofdstuk 9 uit de resultaten een aantal conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

2 Gebiedsbeschrijving

2.1 Ligging van het onderzoeksgebied

In deze paragraaf wordt een algemene beschrijving gegeven van de ligging van het onderzoeksgebied. In de volgende paragrafen wordt met meer detail ingegaan op onder andere de geologie, bodem, ecologie en het watersysteem van het onderzoeksgebied ingegaan. Zoals al aangegeven in de inleiding is het onderzoeksgebied gelegen in het uiterste zuidoosten van de Achterhoek, op de grens met Duitsland. In figuur 2.1 is de ligging van het onderzoeksgebied ten opzichte van de plaatsen Aalten en Winterswijk weergegeven.



Figuur 2.1 Ligging van het onderzoeksgebied ten opzichte van Winterswijk en Aalten

2.2 Geologie

Voor Nederlandse begrippen is de Achterhoek een geologisch zeer rijk gebied. Het gebied rond Winterswijk wordt ook wel de 'mozaïekvloer van Nederland' genoemd omdat hier afzettingen uit veel verschillende perioden aan het oppervlak komen. De beschrijving van de geologie zal in dit rapport beperkt blijven tot de bovenste lagen van het onderzoeksgebied (Tertiair en Kwartair). Voor de beschrijving van de geologie van het onderzoeksgebied is gebruik gemaakt van het boekje *Winterswijk, geologie deel 1* [Peletier & Kolstee, 1986] en het rapport *De geologie van de gemeente Winterswijk* [Van Dijk, 1980]. In aanhangsel 1 is een stratigrafische tabel opgenomen.

2.2.1 Tertiair

De oudste afzettingen die in het onderzoeksgebied aan de oppervlakte komen zijn van Tertiaire ouderdom. Het Tertiaire sediment is in het onderzoeksgebied over het algemeen afgezet in een ondiep, marien milieu. De hydrologische basis van het gebied wordt gevormd door de afzettingen uit het Midden Oligoceen. Het Midden Oligoceen is in het onderzoeksgebied door een drietal afzettingen vertegenwoordigd. De oudste Oligocene afzetting is de Afzetting van Ratum. Deze fijnzandige, soms kleiige afzetting komt in het uiterste oosten van het onderzoeksgebied aan de oppervlakte. Een andere naam voor deze afzetting is Onder-Rupelien zand. Boven de Afzetting van Ratum zijn vervolgens de Afzettingen van Brinkheurne en Winterswijk afgezet. Deze afzettingen worden ook wel de Septariënklei of Boomse klei genoemd. De afzettingen komen in het oosten van het onderzoeksgebied, op het Plateau van het Woold aan de oppervlakte. De Afzettingen van Brinkheurne en Winterswijk bestaan respectievelijk uit zeer vette, stugge klei met een zeer laag gehalte aan fijn zand en wat meer zandige klei.

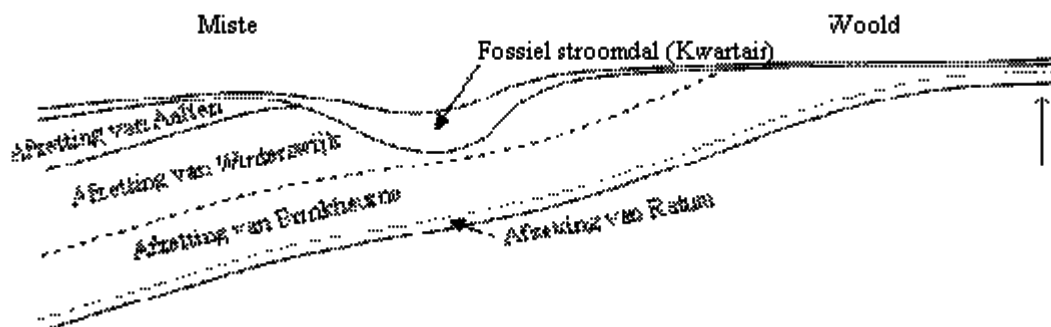
In het Onder Mioceen had de zee zich ver terug getrokken en zijn op het drooggevalen land de Boven Oligocene afzettingen door erosie verdwenen. In het Midden Mioceen kwam de zee weer terug en is de Afzetting van Aalten op de Midden Oligocene klei afgezet. De Afzetting van Aalten bestaat uit een tweetal lagen, de Laag van Miste en de Laag van Stermerdink. De Laag van Miste bestaat uit zandige afzettingen met aan de basis een laag met vrij grof zand en daarboven een zandig pakket met een toenemend lutumgehalte. De dikte van de laag varieert tussen de 5 en 8 meter. De Laag van Miste kan als watervoerend worden beschouwd.

De Laag van Stermerdink is een directe voortzetting op de laag van Miste, de afzettingen hebben echter een kleiig karakter. Het sediment gaat van zandige klei over in tamelijk zware klei. De dikte bedraagt ongeveer 5 tot 10 meter. In het westen van het onderzoeksgebied bevindt zich boven de Afzetting van Aalten, de Afzetting van Eibergen. Deze afzetting verschilt qua opbouw vrijwel niet van de Laag van Stermerdink.

2.2.2 Kwartair

De huidige vorm van het landschap in de Achterhoek is ontstaan in het Pleistoceen. Tijdens perioden waarin de zeespiegel ongeveer 100 meter lager stond dan nu, zijn door smeltwaterstroming diepe geulen in het Tertiair uitgesneden. Hierdoor ontstonden een aantal plateaus. Voorbeelden in het onderzoeksgebied zijn het Plateau van Woold en het Plateau van Haart. Deze plateaus worden van elkaar gescheiden door een ongeveer 10 meter diepe geul die zich vanuit Duitsland noordwaarts tot ongeveer de Boven-Slinge uitstrekt. In deze geul is tevens de Stortelersbeek gelegen. Bij de Boven-Slinge komt de geul samen met een andere vrijwel even diepe geul, die loopt van Winterswijk tot Miste. Bij Miste komt de geul uit in een ongeveer 100 meter diepe geul die vanaf Dinxperlo via Aalten naar het Noordzeebekken loopt. In de loop van het Pleistoceen werden de geulen vrijwel geheel met smeltwaterzand opgevuld [Hanhart, 2001].

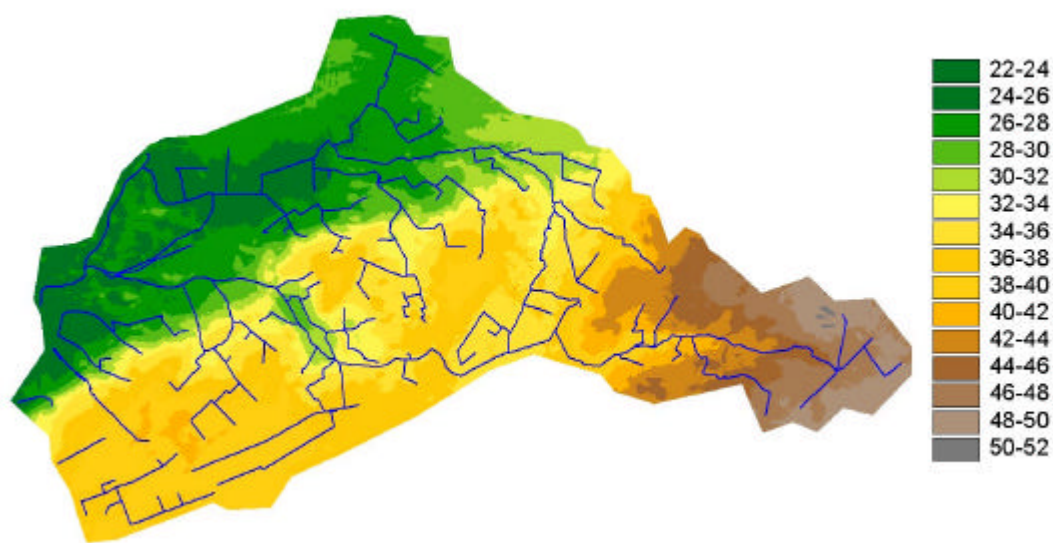
In de voorlaatste ijstijd (Saalien) was het gehele onderzoeksgebied bedekt met landijs. Door het ijs is over het gehele gebied een laag keileem afgezet (Formatie van Drenthe). Later is door afstroming van smeltwater de keileem ter plaatse van de geulen grotendeels geërodeerd. Op de plateaus is de keileem op veel plaatsen nog aanwezig. In de keileem worden uit Scandinavië afkomstige zwerfkeien gevonden. In het Weichselien zijn in het gebied dekzanden afgezet (Formatie van Twenthe). Op de plateaus zijn deze dekzanden vaak van zeer geringe dikte of zelfs afwezig [Peletier & Kolstee, 1986]. In figuur 2.2 is een globale doorsnede van het gebied weergegeven



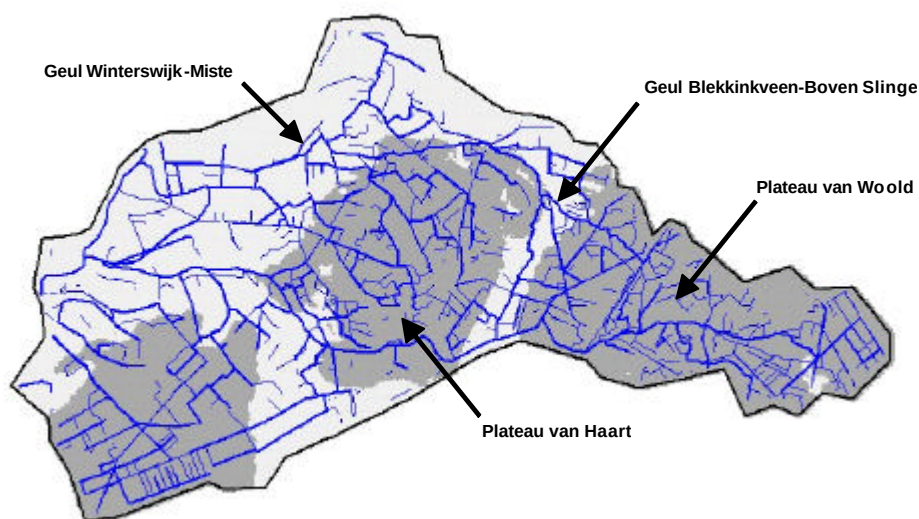
Figuur 2.2 Globale geologische doorsnede (west-oost) van het onderzoeksgebied [naar: Van Dijk, 1980]

2.3 Hoogteligging plateau's en geulen

De hoogte van het onderzoeksgebied varieert van ongeveer 23 m+NAP in het westen tot ongeveer 50 m+NAP in het oosten van het onderzoeksgebied. De lokale hoogteverschillen zijn voor Nederlandse begrippen vrij fors. In figuur 2.3 is de maaiveldhoogte in m+NAP weergegeven. De groene delen op de kaart zijn het laagst (vanaf 22 m+NAP) en de bruine delen het hoogst (tot 50 m+NAP). In figuur 2.4 zijn ter verduidelijking de geulen en plateau's weergegeven. In de figuur zijn ook de beken weergegeven, te zien is dat de beekjes op de plateau's ontstaan en via de kleinere geulen naar de grote geul Winterswijk-Miste stromen.



Figuur 2.3 Maaiveldhoogtes (m+NAP) in het onderzoeksgebied



Figuur 2.4 Overzicht geulen en plateau's binnen het onderzoeksgebied

2.4 Watersysteem

2.4.1 Grondwater

Voor de grondwaterstroming zijn vooral de met fluvioglaciaal zand opgevulde geulen en de dekzanden van belang (zie paragraaf 2.2). In de geulen kan de dikte van het watervoerende pakket meer dan 10 m bedragen. Op de plateaus neemt de dikte van het watervoerende pakket sterk af en is het watervoerende pakket slechts enkele decimeters dik of zelfs in het geheel afwezig. In het westelijke deel van het

onderzoeksgebied bevindt zich onder de dunne laag dekzand op de plateaus een laag slecht doorlatende keileem en de Miocene klei van de Laag van Stermerdink. Onder deze scheidende laag bevindt zich een watervoerend pakket in de vorm van de Laag van Miste. Onder de Laag van Miste vormt de afzetting van Winterswijk hier de hydrologische basis. In het oostelijke deel van het gebied bevindt de hydrologische basis (Oligocene klei) zich direct onder de fluvioglaciale zanden en dekzanden. Uit het voorafgaande blijkt dat het grondwatersysteem in het onderzoeksgebied grotendeels zeer ondiep is. Alleen ter plaatse van de geulen is tot op wat grotere diepte grondwaterstroming mogelijk. Door de geringe dikte van de laag dekzand zijn de plateaus zeer gevoelig voor verdroging. In de tot 100 m diepe geul Dinxperlo-Aalten zijn drinkwaterwinningen aanwezig, deze winningen hebben waarschijnlijk geen invloed op het grondwater in het onderzoeksgebied.

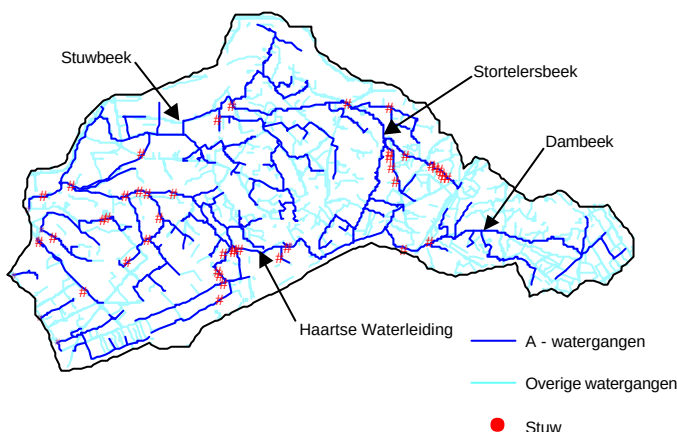
2.4.2 Oppervlaktewater

Zoals al eerder opgemerkt zijn de mogelijkheden voor grondwaterstroming in het onderzoeksgebied zeer beperkt, neerslag wordt hierdoor voornamelijk via het oppervlaktewater afgevoerd. Het oppervlaktewatersysteem in het gebied wordt gekenmerkt door een zeer fijn vertakt netwerk van sloten en beken. Op de plateaus vindt de afvoer van neerslag voornamelijk plaats via ondiepe greppels en slootjes die vervolgens uitmonden in de beken in de lagere delen van het gebied.

Waterberging in de dunne laag dekzand op de plateaus is erg gering, waardoor de reactietijd zeer kort is. De plateaus in het gebied behoren hierdoor tot de snelst reagerende systemen in Nederland. Het is bekend dat extreem hoge afvoeren van de beken in het verleden zoals in juni en december 1965 [Bon, 1967] en meer recentelijk

in oktober en november 1998 [Hanhart, 2001] flinke wateroverlast veroorzaakt hebben. De belangrijkste beken in het onderzoeksgebied zijn de Stortelersbeek, de Dambeek, de Stuwbeek en de Haartse waterleiding. Tot in de 19^e eeuw werd de Stortelersbeek gevoed vanuit het Blekkinkveen. Nadat het Blekkinkveen was ontgonnen, is in het begin van de 20^e eeuw de Dambeek met de Stortelersbeek verbonden.

In figuur 2.6 is te zien dat de Dambeek en de Stortelersbeek rond 1900 nog met elkaar verbonden zijn. De Haartse waterleiding is op deze kaart nog niet gegraven. In de jaren 50 van de vorige eeuw is de huidige situatie ontstaan waarin de Dambeek is losgemaakt van de Stortelersbeek en verbonden met de Haartse waterleiding. Ook



Figuur 2.5 Afwateringspatroon Stortelersbeekgebied

het water van het Blekkinkveen stroomt deels via het grondwater af naar de Haartse waterleiding.



Figuur 2.6 Gebied rond het Blekkinkveen rond 1900 [Knol et al, in prep]

In het verleden voerde de Stortelersbeek gedurende het gehele jaar water. De laatste jaren valt de beek vrijwel elke zomer droog. Het droogvallen van de beek wordt waarschijnlijk veroorzaakt door verbetering van de ontwatering ten behoeve van de landbouw, zowel in het onderzoeksgebied als verder benedenstrooms.

Naast de vele slootjes en beken zijn er een aantal poelen in het gebied te vinden. Veel van deze poelen zijn ontstaan door het winnen van Tertiaire klei voor de productie van bakstenen en dakpannen. Na het beëindigen van de werkzaamheden liepen veel van deze groeven vol met water en ontstonden kleine poelen. In figuur 2.6 zijn de vele steenovens en bakkerijen duidelijk te onderscheiden.

2.5 Bodem

Het onderzoeksgebied kan ten aanzien van de bodem globaal in twee delen worden opgedeeld: de geulen en de plateaus. Op de plateaus komen voornamelijk zwak lemige, fijnzandige veldpodzolgronden (Hn21) voor. Op enkele plaatsen komt zeer ondiep keileem (KX) voor. Op de randen van de plateaus en in de geulen zijn op dekzandruggen bruine en sterk lemige fijnzandige zwarte enkeerdgronden (bEZ23, zEZ23) te vinden, die ontstaan zijn door potstalbemesting. In de beekdalen komen voornamelijk sterk lemige, fijnzandige beekeerdgronden (pZg23) voor. In de lagere delen van het beekdal komen op een aantal plekken moerige eerdgronden (vWz) en koopveengronden (hV) voor. Ter plaatse van het voormalige Blekkinkveen zijn nog resten van het voormalige hoogveen te vinden in de vorm van een moerige eerdgrond met moerige tussenlaag (zWz). In de bodem van het Blekkinkveen is over een oppervlakte van 2 hectare moeraskalk aanwezig. De vorming van deze kalklaag is begonnen in het Laat Weichselien, ongeveer 11.000 jaar geleden. De kalklaag is geologisch uniek voor Nederland [Van Dijk, 1980]. In aanhangsel 2 is de bodemkaart

opgenomen. Voor deze bodemkaart is voor het oostelijke deel van het onderzoeksgebied gebruik gemaakt van de recent uitgevoerde bodemkartering schaal 1:10:00 [Kleijer & Ten Cate, 1998], voor het westelijke deel is echter noodgedwongen gebruik gemaakt van de bodemkaart schaal 1:50:000 [Harbers & Rosing, 1983].

De grondwatertrappen in het onderzoeksgebied variëren tussen grondwatertrap III (GHG < 40 cm-mv, GLG 80-120 cm-mv) en VII* (GHG >140 cm-mv, GLG > 160 cm-mv). Grondwatertrap VII* komt voor op de dekzandruggen. In de lagere delen van de beekdalen en in voormalige veentjes komt grondwatertrap III voor. De grondwatertrappen die het meest voorkomen zijn grondwatertrap V en VI. In aanhangsel 3 is een kaart opgenomen met de in het onderzoeksgebied voorkomende grondwatertrappen.

2.6 Landgebruik en ecologie

Het landschap is zeer kleinschalig; grasland en akkerbouwpercelen worden afgewisseld door houtwallen en bossen. In het landschap zijn veel glooiende essen (enkeerdgronden) aanwezig die bijdragen aan de waarde van het landschap. Het bodemgebruik in het onderzoeksgebied is voor 65% grasland, 17% akkerbouw (voornamelijk maïs), 8% loofhout, 3% naaldhout en 7% bebouwing en wegen. De loofbospercelen bestaan voornamelijk uit oude opstanden van inlandse eik en beuk [Hanhart, 2001].

De beken in het onderzoeksgebied zijn ecologisch van groot belang, ze behoren tot het ecotype plateaubeken. Door de provincie Gelderland [Provincie Gelderland, 1996] zijn de Stuwbeek en de Dambeek als wateren van het Hoogst Ecologische Niveau (HEN) aangewezen. De functie HEN benadert het meest de natuurlijke situatie. Ook de Stortelersbeek is aangemerkt als een HEN water, maar dan als droogvallende of temporeaire beek. In werkelijkheid was de Stortelersbeek tot een aantal jaren terug gedurende het gehele jaar watervoerend en dus eveneens aan te merken als een plateaubek. De Haartse waterleiding heeft de functie Specifiek Ecologische Doelstelling (SED) gekregen. Bij de functie SED is er meer sprake van onnatuurlijke beïnvloedingen, bijvoorbeeld door landbouw.



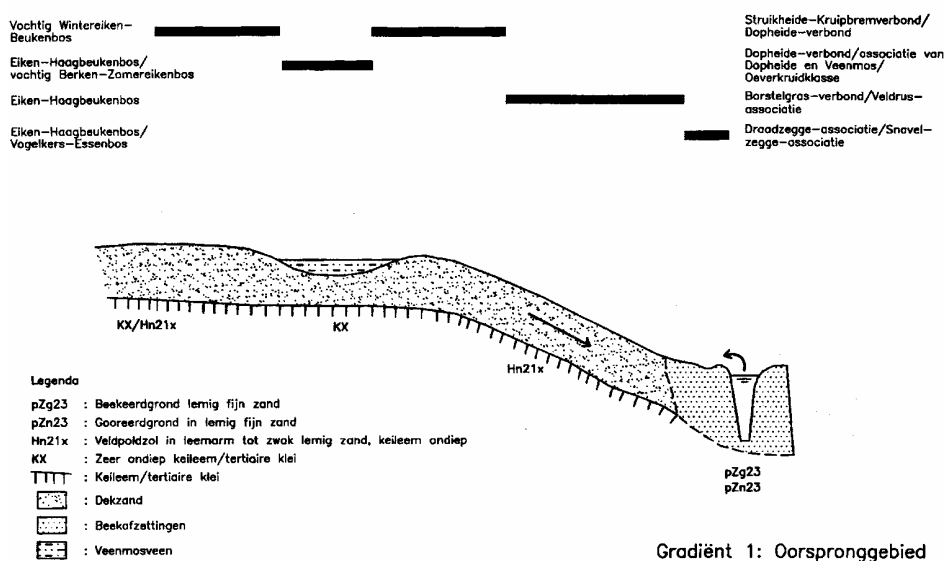
Figuur 2.7 Meander in de Stortelersbeek

De vegetatie in het gebied is over het algemeen niet grondwaterafhankelijk. Alleen direct langs de Stortelersbeek worden kwelwaterafhankelijke gemeenschappen gevonden. Ook in het Blekkinkveen komen in een verdroogd ven enkele kwelwaterafhankelijke soorten voor, bijvoorbeeld enkele zegge-soorten en kleine

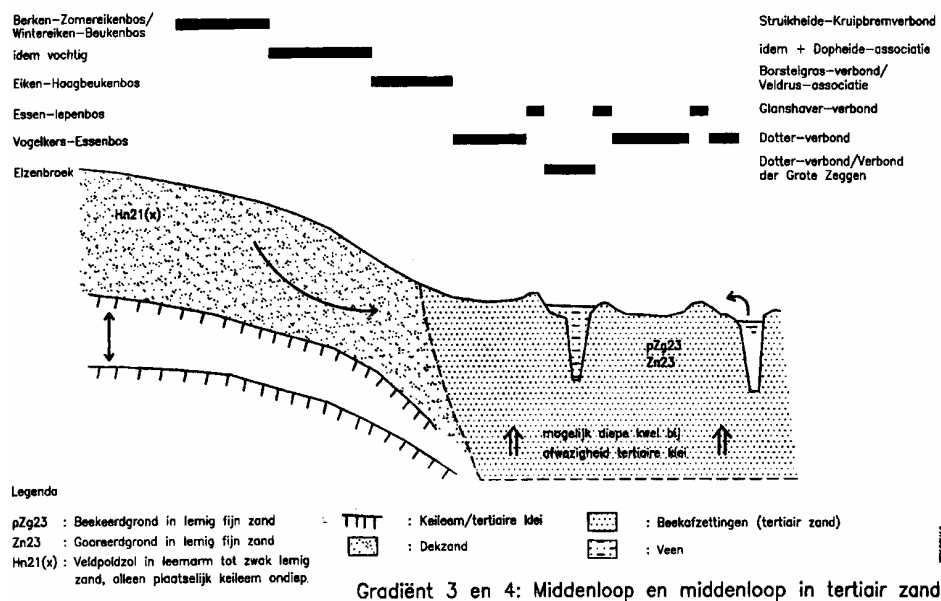
valeriaan. De aanwezigheid van moeraskalk in de ondergrond van het Blekkinkveen kan hier een verklaring voor zijn.

Voor de Achterhoek zijn door Athmer de belangrijkste ecologische gradiënten beschreven [Athmer *et al*, 1997, *fide* van Walsum & Veldhuizen, 1999]. In het onderzoeksgebied worden twee gradiënten aangetroffen. Deze gradiënten zijn in de figuren 2.8 en 2.9 weergegeven. In de figuren wordt onderscheid gemaakt tussen een bosvariant (geen beheer) en een variant waarbij een vegetatiebeheer wordt uitgeoefend (o.a. maaien of begrazen).

De in figuur 2.8 weergegeven gradiënt is kenmerkend voor de delen van het onderzoeksgebied waar de keileem en/of Tertiaire klei ondiep voorkomt. Door de ondiepe ligging van de slechtdoorlatende lagen kan lokaal stagnatie van regenwater optreden, waardoor hoogveenvorming (ketelveentjes) kan plaatsvinden. Door vervening in het verleden zijn vennen ontstaan, zoals het ven in het Blekkinkveen. De potentieel natuurlijke vegetatie betreft vooral vochtig wintereiken/beukenbos of heidevegetaties. De tweede gradiënt is weergegeven in figuur 2.9. De keileem of Tertiaire klei is dieper in de ondergrond gelegen of ontbreekt. De vegetatie lijkt sterk op die van de eerste gradiënt. In het centrale deel van het beekdal kan echter mogelijk basenrijke kwel optreden waardoor zich onder zeer natte omstandigheden elzenbroekbos of dotterbloemhooiland kan ontwikkelen.



Figuur 2.8 Gradient kenmerkend voor gebieden met keileem of tertiaire klei ondiep in het profiel [uit: Athmer *et al*, 1997]



Figuur 2.9 Gradient kenmerkend voor beekdalen [uit: Athmer et al, 1997]

3 Traditionele benadering en Waternoodprocedure

3.1 Traditionele werkwijze waterhuishouding

3.1.1 Inleiding

Tot in de jaren '60 was het met de waterhuishoudkundige situatie van grote gebieden van Nederland, gezien vanuit het toenmalige beleid slecht gesteld. Om de voedselproductie te vergroten, is vooral na de tweede wereldoorlog begonnen met het op grote schaal verbeteren van de waterhuishoudkundige situatie voor de landbouw. Bij de projecten ter verbetering van de waterhuishoudkundige situatie lag het accent op het minimaliseren van de kans op wateroverlast. Voor de dimensionering van het waterbeheersingssysteem zijn in de loop van de tijd normen ontwikkeld welke in 1965 zijn vastgelegd in



Figuur 3.1 Aanleg van een watergang rond 1960

het Cultuurtechnisch vademecum [Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum, 1988]. Nadien hebben er een aantal herzieningen van het vademecum plaatsgevonden waarbij aan de benadering van de waterhuishouding weinig veranderde. In deze paragraaf worden allereerst de waterwensen van de landbouw besproken (subparagraaf 3.1.2). Vervolgens wordt er ingegaan op de normen die zijn ontwikkeld om aan de eisen van de landbouw ten aanzien van de waterhuishouding te kunnen voldoen. Bij de normen wordt onderscheid gemaakt tussen normen ten aanzien van ontwatering (subparagraaf 3.1.3) en normen ten aanzien van drooglegging en afwatering (subparagraaf 3.1.4).

3.1.2 Waterwensen landbouw

In het algemeen streeft men in de agrarische sector naar een zo lang mogelijk groeiseizoen, waarbij de bedrijfsvoering onbelemmerd kan plaatsvinden en waarbij de groeiomstandigheden van het gewas optimaal zijn. De afhankelijkheid van weersomstandigheden is bij voorkeur zo beperkt mogelijk. Om het groeiseizoen optimaal te benutten, wil men in het voorjaar zo vroeg mogelijk het land op. Het streven is daarom om vanaf ongeveer 15 maart het vochtgehalte in de bovengrond op een zodanig niveau te brengen dat beweiding, berijding en bewerking geen problemen opleveren voor de bodemstructuur. In het najaar wil men het liefst het vee zo laat mogelijk opstallen en zolang mogelijk wachten met het oogsten van gewassen. Een langer groeiseizoen betekent een hogere gewasopbrengst en meer flexibiliteit in de bedrijfsvoering. De gewenste waterhuishoudkundige situatie voor de

landbouw hangt vooral samen met de draagkracht van de bovengrond, bewerkbaarheid van de grond en de vochtvoorziening van het gewas. Naast het vocht in de bodem is ook de hoeveelheid beschikbaar water voor beregening van belang.

3.1.3 Ontwatering

De term ontwatering is gedefinieerd als de afvoer van water uit percelen over en door de grond en eventueel door drainbuizen en greppels naar een stelsel van grotere waterlopen. In tabel 3.1 staan de ontwateringsnormen gegeven volgens het Cultuurtechnisch vademecum [Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum, 1988]. De normen hebben betrekking op een stationaire stromingssituatie en houden géén rekening met verschillen in grondsoort en de effecten van kwel of wegzijging.

Tabel 3.1: Praktijknormen voor ontwatering bij verschillende vormen van bodemgebruik [Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum, 1988]

Grondgebruik	Afvoer (mm/d)	Grondwaterstandsdiepte (cm-mv)
Grasland	7	30
Bouwland	7	50
Vollegrondstuintbouw	7	50
Fruitteelt	7	70
Bos	5-7	30-50
Sportvelden	15	50

Naast de normen voor ontwatering vormt de optimale draindiepte een belangrijke norm. In tabel 3.2 zijn de optimale draindieptes weergegeven. Blijkens de tabel wordt voor grasland uitgegaan van een optimale draindiepte van 75 of 80 cm-mv, ongeacht de grondsoort. Voor bouwland is de optimale draindiepte wel afhankelijk van de grondsoort. De draindiepte loopt uiteen van minimaal 85 cm bij een moerige of zandige bovengrond op een ondergrond van leemarm zand tot maximaal 120 cm bij homogene bodems bestaande uit klei of lichte zavel.

Omdat de drains vrij moeten kunnen lozen, vanwege de ontwateringsbasis (en vanwege mogelijkheid tot controle op het functioneren) is de draindiepte direct van invloed op het toelaatbare waterpeil in de sloten.

Tabel 3.2: Optimale draindiepte voor gedraineerd bouwland en grasland, [Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum, 1988]

Bovengrond*	Ondergrond	Draindiepte** (cm-mv)	
		Bouwland	Grasland
Moerig	Moerig (veen)	95	75
	Leemarm zand	85	75
	Zwak lemig zand	90	75
	Sterk lemig zand	100	80
Zand	Moerig	95	75
	Leemarm zand	85	75
	Zwak lemig zand	90	75
	Sterk lemig zand	100	80
Lichte zavel	Lichte zavel	120	80
	Zware zavel	115	80
	Klei	110	80
Zware zavel	Lichte zavel	110	80
	Zware zavel	105	80
	Klei	105	80
Klei	Lichte zavel	110	80
	Zware zavel	115	80
	Klei	120	80

* Bovengrond betreft de eerste 35 cm vanaf maaiveld

** Bij horizontale ligging van de drains

3.1.4 Drooglegging en afwatering

Drooglegging wordt gedefinieerd als het hoogteverschil tussen de waterspiegel in een waterloop en het grondoppervlak. Afwatering wordt gedefinieerd als de afvoer via een stelsel van open waterlopen naar een lozingspunt van het afwateringsgebied. Droogleggingsnormen spelen een centrale rol bij het ontwerpen van waterlopen. Er worden bij afvoersituaties drie normen onderscheiden:

- Hoogwater-normpeil: het peil geldend bij de maatgevende afvoer (Q_m).
- Normaalwater-normpeil: het peil geldend bij de halve maatgevende afvoer ($1/2 \cdot Q_m$).
- Maximaalwater-normpeil: het peil geldend bij de maximale afvoer ($2 \cdot Q_m$).

Bij het ontwerpen van de waterlopen wordt voor de afmetingen uitgegaan van de halve maatgevende afvoer, dit komt overeen met een situatie die ongeveer 15 keer per jaar voorkomt. Als norm voor de drooglegging geldt hierbij dat het waterpeil 10 cm onder de uitmonding van de drains blijft. In de praktijk mag de berekende drooglegging bij halve maatgevende afvoer ($1/2 \cdot Q_m$) slechts 10 à 20 dagen per jaar worden bereikt of overschreden. Het ontworpen waterlopenstelsel wordt vervolgens belast met de maatgevende afvoer voor poldergebieden en de maximale afvoer voor hellende gebieden. Hieruit blijkt of respectievelijk het hoog- of maximaalwater-normpeil wordt overschreden. De bovenstaande normen hebben vooral betekenis voor hellende gebieden, in vlakke gebieden zijn de waterlopen met het oog op waterberging veelal ruimer gedimensioneerd. Ten aanzien van vochttekort bestaan er in de traditionele aanpak geen normen voor het ontwerpen van waterlopen. Ook op het gebied van peilbeheer bestaan voor perioden, waarin vochttekorten voorkomen

geen normen. In de praktijk wordt meestal uitgegaan van een zomer-streefpeil dat 30 à 40 cm hoger is dan het voor het betreffende gebied vastgestelde winterpeil.

3.1.5 Gevolgen

Uit het door de provincie Gelderland verrichte verdrogingsonderzoek [Provincie Gelderland, 1996] is gebleken dat de grondwaterstand in bepaalde gebieden 20 tot 30 cm is gedaald ten opzichte van de situatie rond 1950. Uit de resultaten van het onderzoek kan geconcludeerd worden dat het gehele grondwaterregime zich op een lager niveau heeft ingesteld. Ook het onderzoeksgebied is, zoals al in de inleiding werd aangegeven, matig tot sterk verdroogt.

De gehanteerde normen blijken niet voldoende rekening te houden met lokale verschillen in onder andere de bodemstructuur, ook werd de gewenste transportcapaciteit vooral gerealiseerd door dimensionering in de diepte, met als argument het geringere beslag op kostbare landbouwgrond. Gevolg van deze aanpak was echter dat in veel gebieden, de drooglegging gedurende een groot deel van het jaar groter was dan volgens de norm noodzakelijk. Hierdoor ontstond droogteschade bij gewassen. In het huidige beleid van het waterbeheer worden de normen vanwege de verdrogingproblematiek vaak al minder strikt toegepast dan in het verleden. Dit hangt samen met de verbreding van de doelstellingen voor het landelijke gebied, waarbij steeds vaker waterhuishoudkundige wensen van verschillende functies gecombineerd dienen te worden.

Voor natuurfuncties zijn de waterwensen veelal tegengesteld aan die van de landbouw. Dit is voornamelijk het geval in de nattere gebieden. In Nederland zeldzame vegetaties zoals blauwgraslanden zijn, in tegenstelling tot landbouwgewassen juist gebaat bij hoge grondwaterstanden en een natuurlijke dynamiek in de grondwaterstand. Doordat de nadruk binnen het waterbeheer vooral op de landbouwproductie lag, is de natte natuur in Nederland sterk achteruitgegaan.

3.2 Waternood

3.2.1 Inleiding

De werkwijze waarbij de 'traditionele' normen en criteria werden toegepast, blijkt niet meer te voldoen aan de meest recente inzichten op het gebied van waterbeheer zoals deze geschetst zijn in de *Vierde Nota waterhuishouding* [Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1998]. De belangrijkste aanbeveling was het gaan werken vanuit de watersysteembenadering, dit houdt in dat het waterhuishoudkundige beleid tot stand komt in goed overleg met andere beleidsvelden, bestuurslagen, grondgebruikers en eigenaren. Om een methode te ontwikkelen, die aansluit op de aanbevelingen in de *Vierde Nota waterhuishouding*, is door de Unie van Waterschappen en de Dienst Landelijk Gebied een werkwijze ontwikkeld om de vraagstukken, die spelen bij inrichting en beheer van watersystemen, op een systematische wijze op te lossen.

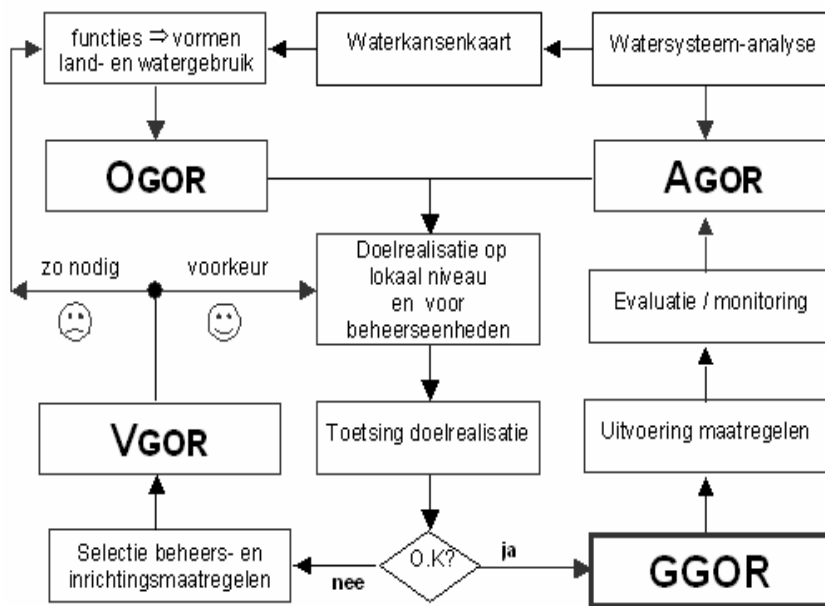
De werkwijze heeft de naam ‘**Waternood**’ meegekregen wat staat voor: **WATER**stelsysteemgericht **NO**rmeren, **O**ntwerpen en **D**imensioneren. Centraal staat de gedachte dat de wensen ten aanzien van het grondwater het uitgangspunt vormen voor het ontwerp van oppervlaktewatersystemen. Door ingrepen in het watersysteem worden functies mogelijk gemaakt of geoptimaliseerd. De werkwijze is uitvoerig beschreven in de leidraad *Grondwater als leidraad voor het oppervlaktewater* [Projectgroep Waternood, 1998].

3.2.2 Werkwijze

De aanpak is gericht op het realiseren van gewenste grond- en oppervlaktewaterregimes voor de verschillende in het gebied aanwezige (potentiële) functies. De globaal te volgen werkwijze is als volgt: allereerst dient er een inventarisatie plaats te vinden van de verschillende functies binnen het gebied. Met behulp hiervan kan het optimale grond- en oppervlaktewaterregime (OGOR) worden opgesteld. Deze optimale situaties worden vergeleken met de actuele situaties (AGOR) en tevens wordt gekeken naar de relatie tussen het grond- en oppervlaktewater. Vervolgens wordt gekeken in hoeverre er voldaan wordt aan de doelrealisatie. Als blijkt dat de doelrealisatie niet optimaal is dienen er aanpassingen plaats te vinden aan het waterbeheersings- of ontwateringssysteem. Als er maatregelen nodig zijn wordt er gekeken naar het verwachte grond- en oppervlaktewaterregime (VGOR) bij de uit te voeren maatregelen.

Uiteindelijk mondt een en ander in een set beheers- en inrichtingsmaatregelen die leidt tot een grond- en oppervlaktewaterregime waarmee aan alle criteria wordt voldaan. Dit regime is gedefinieerd als het gewenste grond- en oppervlaktewaterregime (GGOR). Als het GGOR is vastgesteld kunnen de maatregelen om deze te realiseren worden uitgevoerd. Weergegeven. In figuur 3.2 is het stroomschema voor de methode Waternood

Waternood is vooral als filosofie of denkwijze gepresenteerd. Om toch de denkwijze in de praktijk te kunnen toepassen, is het waternood instrumentarium ontwikkeld. Deze GIS-applicatie is in deze studie gebruikt. Een verschil met de in de leidraad beschreven systematiek is dat het onderdeel OGOR enigszins losgelaten wordt. In het instrumentarium wordt verondersteld dat de doelrealisatie voor landbouw “optimaal” identiek aan 100% is. Als er schade (in %) optreedt wordt dit van de 100% afgetrokken en ontstaat de actuele doelrealisatie [Van Bakel *et al*, 2003]. De landbouwschades worden bepaald met behulp van de HELP-tabel. In aanhangsel 4 wordt wat meer informatie over de HELP-tabel gegeven. Er wordt nog van de (verouderde) HELP-tabel uitgegaan omdat er tot op heden nog geen goede alternatieven beschikbaar zijn.



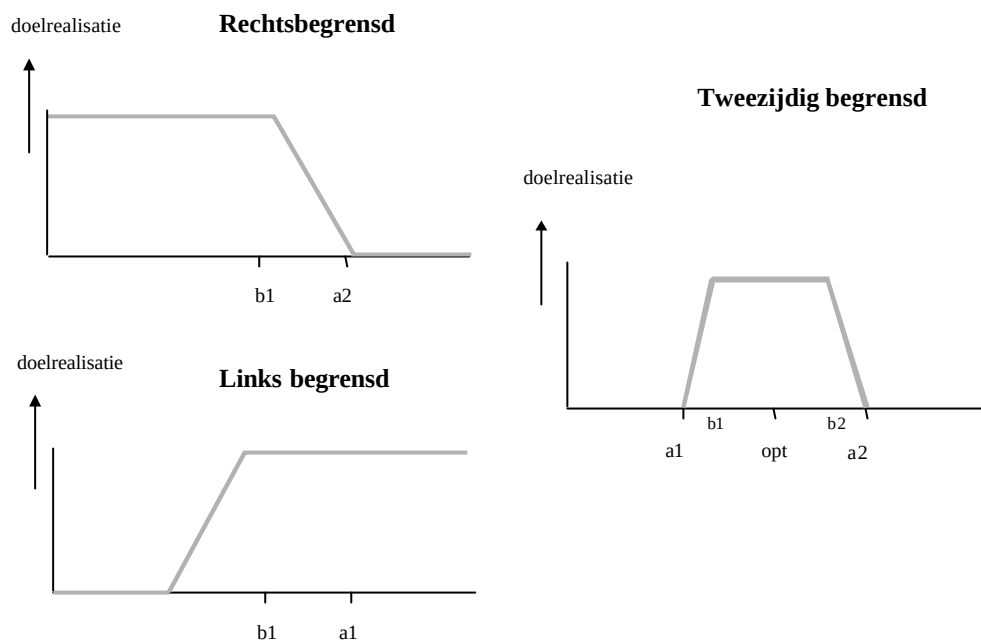
Figuur 3.2 Stroomschema Waterlood [Van Bakel et al, 2003]

Voor natuurfuncties betekent een doelrealisatie van 100% dat het geplande natuurdoeltype zonder beperkingen kan worden gerealiseerd. Bij een doelrealisatie van 0% zijn de hydrologische condities zodanig dat het natuurdoeltype niet kan worden gerealiseerd [Runhaar & Hennekens, juli 2002]. Voor het bepalen van de waarden die tussen 0 en 100 procent in liggen worden doelrealisatiefuncties gebruikt. Doelrealisatiefuncties zijn lineaire functies die aangeven binnen welke grenzen een bepaald natuurdoeltype kan voorkomen. De vorm van de doelrealisatiefuncties wordt bepaald door de volgende parameters:

- a1 buitengrens waar beneden het type niet meer kan voorkomen
- b1 knikpunt waar boven het type optimaal voorkomt
- b2 knikpunt waar beneden het type optimaal voorkomt
- a2 buitengrens waar boven het type niet meer kan voorkomen

In figuur 3.3 zijn een aantal mogelijke doelrealisatiefuncties weergegeven. De doelrealisatiefuncties worden opgesteld voor de hydrologische stuurvariabelen waarvan bekend is dat deze bepalend zijn voor het al dan niet voorkomen van soorten. In de methode Waterlood wordt uitgegaan van de volgende stuurvariabelen:

- De gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG)
- Het gemiddeld aantal dagen droogtestress
- De gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG)
- De aanwezigheid van kwel



Figuur 3.3 Doelrealisatiefuncties zoals gebruikt bij de bepaling van de doelrealisatie voor terreestische natuur [Runhaar & Hennekens, juli 2002]

Het gevaar bestaat bij het volgen van de methode Waternood dat de nadruk sterk komt te liggen op het grondwater en het oppervlaktewater wordt vergeten. Ook de effecten van verdrogingsbestrijdende maatregelen op extreme afvoeren worden niet meegenomen in de Waternoodmethodiek.

4 Statistische analyse beekafvoeren

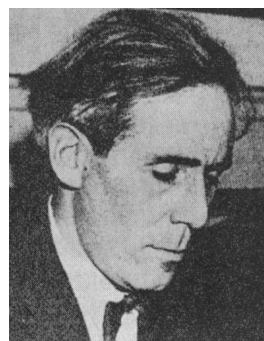
4.1 Inleiding

Zoals al in de inleiding is beschreven, is een van de doelstellingen van dit onderzoek het in kaart brengen van de effecten van verdrogingsbestrijdende maatregelen en klimaatverandering op extreem hoge afvoeren van de Stortelersbeek. Vooral extreem hoge afvoeren zijn van belang, gezien de schade die ze kunnen veroorzaken. Probleem is echter dat juist deze extreme gebeurtenissen maar weinig voorkomen, bijvoorbeeld 1 keer in 200 jaar. Meetreeksen, bijvoorbeeld voor neerslag, met een dergelijke lengte komen helaas vrijwel niet voor. Dus zelfs met een rekenmodel als SIMGRO is het niet mogelijk directe uitspraken te doen over de kansen op zeer extreme gebeurtenissen. In dit hoofdstuk worden technieken besproken die het toch mogelijk maken om uitspraken te doen over de weinig voorkomende extreme waarden. Allereerst worden de traditionele extreme waarden verdelingen besproken, vervolgens wordt ingegaan op een tweetal methoden om de kansen op extreem hoge afvoeren in te schatten: de tijdreeksmethode en de stochastenmethode. In beide methoden wordt gebruik gemaakt van extreme waarden verdelingen. Het grote verschil tussen beide methoden is dat bij de tijdreeksmethode de statistiek op de output wordt toegepast en bij de stochastenmethode op de input.

4.2 Extreme waarden verdelingen

4.2.1 Generalised Extreme Value verdeling

Historisch gezien is de hydrologie altijd een belangrijk toepassingsgebied geweest voor kansmodellen. Vooral het bepalen van de T-jaar piekafvoer (of waterstand) is een belangrijke toepassing. Met de T-jaar piekafvoer wordt de piekafvoer bedoeld die 1 keer in de T jaar voorkomt. Ook voor de Stortelersbeek is het belangrijk inzicht te krijgen in de herhalingstijd van extreme piekafvoeren. In bijvoorbeeld 1998 is duidelijk gebleken dat extreme afvoeren op de Stortelersbeek flinke schade aan kunnen richten. Probleem is echter dat dergelijke extreme afvoeren slechts spaarzaam optreden. Om uitspraken te kunnen doen over een afvoer met een frequentie van 1 keer per 100 jaar is een zeer lange reeks nodig, en deze zal vaak niet voorhanden zijn. Om toch uitspraken te doen over extreme afvoeren zijn een aantal statistische technieken ontwikkeld, de zogenaamde extreme waarden verdelingen. Extreme waarden zijn geselecteerde minimale of maximale waarden uit een gegevensset, bijvoorbeeld de jaarmaxima van neerslagintensiteiten of afvoeren. Deze gegevensset moet zowel statistisch homogeen als onafhankelijk zijn. Door de jaarmaxima uit de gegevensset



Figuur 4.1 Emil J. Gumbel

kan een verdeling worden gefit. Met behulp van deze gefitte verdeling kunnen vervolgens uitspraken worden gedaan over de kans op voorkomen van zeer extreme gebeurtenissen. De algemene vorm voor de verdelingen voor extreme waarden wordt gegeven door de GEV (Generalized Extreme Value) verdeling [Jenkinson, 1955 *fide* Stephenson, 2003]:

$$G(x) = \exp \left\{ - \left[1 + x(x-m)/a \right]^{1/x} \right\} \quad \text{vergelijking 4.1}$$

waarin:

$G(x)$	verdelingsfunctie
m	locatie parameter
a	schaal parameter
x	vorm parameter

Als $x > 0$ dan heeft de GEV verdeling het volgende bereik: $(m - a/x \dots + \infty)$

Als $x < 0$ dan heeft de GEV verdeling het volgende bereik: $(-\infty \dots m - a/x)$

De geparameteriseerde vorm van de GEV verdeling omvat de Gumbel, Fréchet en de reversed Weibull verdelingen. De Gumbel verdeling (vergelijking 4.2) wordt verkregen als $x \rightarrow 0$. De Fréchet verdeling (vergelijking 4.5) en de Weibull verdeling (vergelijking 4.6) worden verkregen als respectievelijk $x > 0$ en $x < 0$.

Eén van de bekendste methoden voor het analyseren van extremen is de Gumbel verdeling [Gumbel, 1954]. Deze verdeling wordt vaak aangewend als verdeling voor extreem lage of extreem hoge debieten. De vorm van de Gumbel verdeling kenmerkt zich door een scheefheid naar rechts. De vergelijking van de Gumbel verdeling is als volgt:

$$G_{m,a}(x) = \exp \left(- e^{-(x-m)/a} \right) \quad \text{vergelijking 4.2}$$

Met als kansdichtheid:

$$g_{m,a} = G'_{m,a}(x) \quad \text{vergelijking 4.3}$$

$$g_{m,a} = \frac{1}{a} e^{-(x-m)/a} \exp \left(- e^{-(x-m)/a} \right) \quad \text{vergelijking 4.4}$$

De Fréchet verdeling is net als de Gumbel verdeling scheef naar de rechterkant. De vergelijking van de Fréchet verdeling is als volgt:

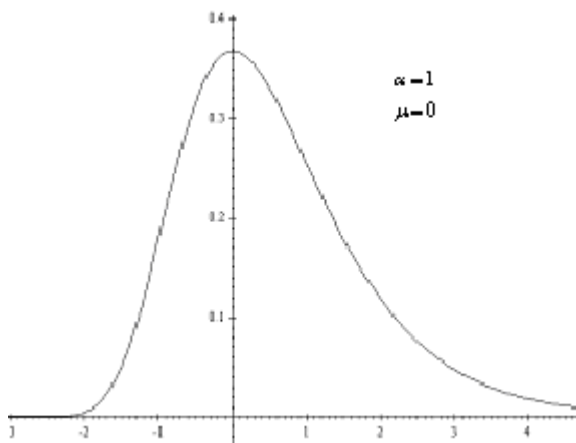
$$\begin{aligned} G(x) &= 0 & \text{voor: } x \leq m \\ G(x) &= \exp \left\{ - \left[(x-m)/a \right]^{-x} \right\} & \text{voor: } x > m \end{aligned} \quad \text{vergelijking 4.5}$$

De Weibull verdeling is een verdeling die veel verschillende vormen aankan. Hij kan vrijwel symmetrisch zijn maar ook scheef, zowel naar links als naar rechts. De vergelijking van de Weibull verdeling is als volgt:

$$\begin{aligned} G(x) &= \exp \left\{ - \left[- (x - m / a) \right]^x \right\} & \text{voor: } x < x & & \text{vergelijking 4.6} \\ G(x) &= 1 & \text{voor: } x \geq x & \end{aligned}$$

4.2.2 Parameterschatting

Een methode voor het schatten van de parameters: μ , a en γ in de bovenstaande vergelijkingen, is de methode van de momenten. In deze methode wordt uitgegaan van de veronderstelling dat de parameters van de verdeling kunnen worden bepaald, door de waarschijnlijkheidsmomenten van de verdeling (gemiddelde, variantie) gelijk te stellen aan de overeenstemmende momenten van de waargenomen reeks. Om de parameters te optimaliseren wordt de Maximum Likelihood methode aangewend. Als voorbeeld kunnen de locatie en de schaal parameter (a en μ) van de Gumbelverdeling (vergelijking 4.2) geschat worden met behulp van de variantie en het gemiddelde volgens:



Figuur 4.2 Gumbel verdeling in de meest eenvoudige vorm

$$\begin{aligned} a &= \frac{\sqrt{6} s_x}{p} \\ m &= \bar{x} - 0.5772a \end{aligned}$$

Waarin:

S_x = Variantie

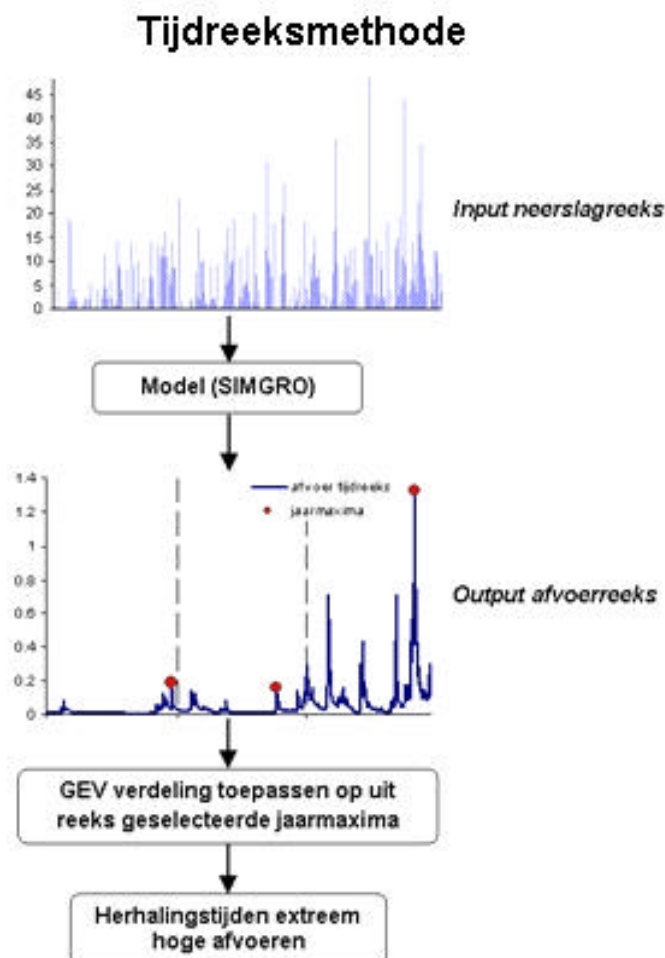
$\bar{x}$ = Gemiddelde

In figuur 4.2 is een voorbeeld van de Gumbel verdeling in de meest eenvoudige vorm weergegeven, met als waarden voor a en μ respectievelijk 1 en 0. Wat meteen opvalt, is de scheefheid van de verdeling naar de rechterkant.

4.3 Tijdreeksmethode

Een van de bekendste en meest gebruikte methoden voor het inschatten van de kansen op extreem hoge afvoeren is de tijdreeksmethode. Deze methode wordt al sinds het ontstaan van de extreme waarden verdelingen, in de jaren 50 van de vorige eeuw, toegepast binnen de hydrologie.

De methode maakt, de naam zegt het al, gebruik van een tijdreeks. Deze reeks kan bestaan uit meetwaarden of gesimuleerde waarden uit een rekenmodel. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van met een rekenmodel gesimuleerde reeksen. Voor het modelleren en doorrekenen van het hydrologische systeem is in dit onderzoek het programma SIMGRO gebruikt. In figuur 4.3 is een schema van de gebruikte methode weergegeven. Als invoer voor het SIMGRO model wordt een langjarige meteorologische reeks (bijvoorbeeld 50 jaar neerslag en verdampingsgegevens van De Bilt) gebruikt. Met het model wordt vervolgens een langjarige afvoerreeks berekend.



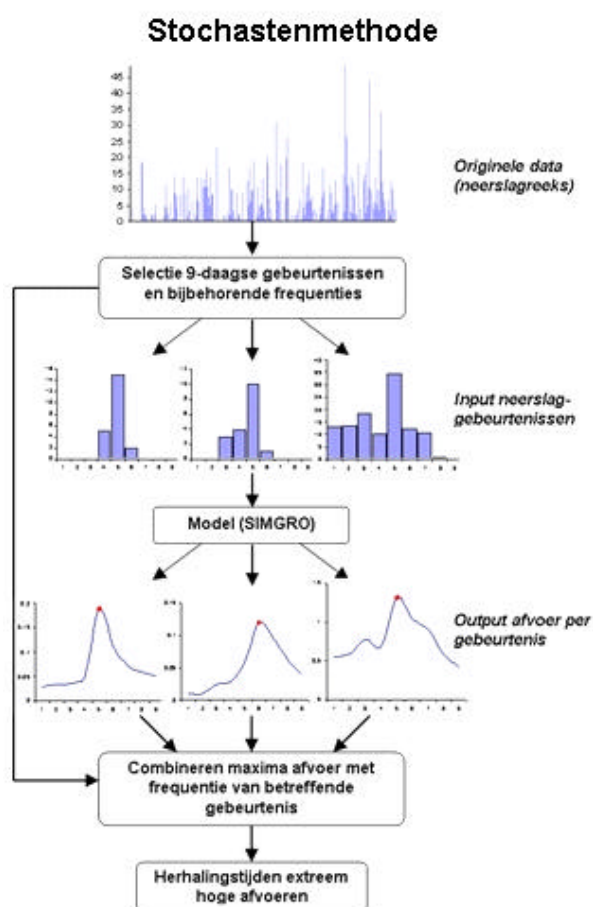
Figuur 4.3 Schematische weergave van de tijdreeksmethode

Uit de in SIMGRO berekende afvoerreeks worden vervolgens de jaarmaxima van de afvoeren geselecteerd. Dit omdat de in paragraaf 4.2 besproken extreme waarden verdelingen gebruik maken van minimale of maximale waarden uit een gegevensset. Op de reeks jaarmaxima wordt de GEV verdeling gefit. Afhankelijk van de statistische kenmerken van de reeks jaarmaxima wordt gekozen voor een Gumbel, Fréchet, of Weibull verdeling. Met de gefitte kansverdeling kunnen vervolgens de herhalingstijden van de extreem hoge afvoeren worden bepaald

4.4 Stochastenmethode

Een wat nieuwere techniek voor het voorspellen van extremen binnen de hydrologie is de stochastenmethode. De stochastenmethode is in het verleden al toegepast voor het bepalen van faalkansen van bijvoorbeeld dijken [Technische Adviescommissie voor de waterkeringen, 2000]. Door *HKV lijn in water* is de methode verder uitgewerkt voor het bepalen van overschrijdingskansen van waterstanden [Kolen *et al*, 2001, Kok *et al*, juni 2000]. De methode blijkt echter met enkele kleine aanpassingen ook toepasbaar voor het bepalen van de kansen op extreem hoge afvoeren. In deze paragraaf wordt de methode kort beschreven.

Een extreme gebeurtenis blijkt vrijwel altijd te worden beïnvloed door meerdere factoren. Zo is bijvoorbeeld voor het optreden van een extreme afvoer de hoeveelheid neerslag van belang, maar ook de intensiteit van de neerslag en de vochttoestand van de bodem. Elk van deze afzonderlijke factoren heeft een kans van voorkomen. Door de factoren samen te voegen tot gebeurtenissen, is ook de kans op de desbetreffende gebeurtenis bekend. In figuur 4.4 wordt dit schematisch weergegeven door de selectie van een drietal verschillende neerslaggebeurtenissen uit een langjarige neerslagreeks. In werkelijkheid zijn dit erg veel gebeurtenissen, bijvoorbeeld 100. Voor de duur van een gebeurtenis is gekozen voor 9 dagen, omdat

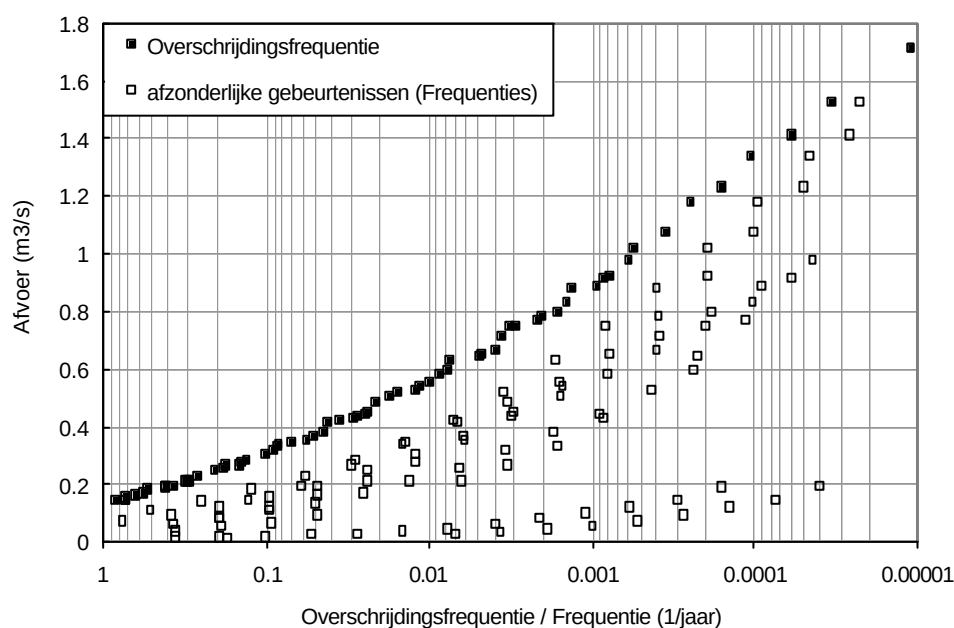


Figuur 4.4 Schematische weergave van de stochastenmethode

dan de neerslaggebeurtenissen als onafhankelijk kunnen worden verondersteld [Kolen *et al*, 2001].

De gebeurtenissen met korte duur (alle mogelijke combinaties van stochasten) worden vervolgens doorgerekend met een model. In deze studie wordt hiervoor het programma SIMGRO gebruikt. Hiermee is de relatie gelegd tussen een afzonderlijke gebeurtenis met een frequentie van voorkomen en bijvoorbeeld de bijbehorende maximale afvoer. De maximale afvoeren behorende bij de afzonderlijke gebeurtenissen kunnen vervolgens worden uitgezet tegen de frequenties. De overschrijdingsfrequentie wordt vervolgens verkregen door de frequenties van gebeurtenissen, die liggen boven een bepaalde waarde, bij elkaar op te tellen. In figuur 4.5 is hiervan een voorbeeld gegeven. Voor een nadere uitleg wordt verwezen naar de Leidraad Hoogwaternormering regionale watersystemen [Kok *et al*, juni 2000]

Een nadeel van de stochastenmethode is dat er vele berekeningen moeten worden uitgevoerd. Dit kan ondervangen worden door onderdelen te automatiseren en door het aantal klassen waarin de stochasten worden ingedeeld beperkt te houden. Risico van het beperken van het aantal klassen is dat de nauwkeurigheid van de uitkomsten wordt aangetast [Kolen *et al*, 2001]. In dit onderzoek is de methode gevolgd zoals die door HKV en Alterra is gebruikt voor de hoogwaternormering binnen het herinrichtingproject in het kader van de reconstructiewet in Brabant [Kolen *et al*, 2001].



Figuur 4.5 Voorbeeld van de samenhang tussen de frequenties van afzonderlijke gebeurtenissen en de overschrijdingsfrequenties van afvoeren

Per gebeurtenis zijn de volgende input stochasten in de studie meegenomen:

- Neerslagvolume
- Neerslagpatroon
- Bergingscapaciteit in de bodem

De stochast neerslagvolume wordt verkregen door langjarige (dag)neerslag-tijdreeksen afkomstig van KNMI stations statistisch te bewerken. Per jaar wordt met behulp van een 'schuivend venster' van 9 dagen de maximale 9-daagse neerslagsom bepaald. Neerslaggebeurtenissen die langer duren dan 9 dagen worden meegenomen in de beginsituatie (in de vorm van een initiële grondwaterstand). Gebeurtenissen die korter duren worden meegenomen in de stochast neerslagpatroon. Per jaar wordt vervolgens het maximum geselecteerd. De geselecteerde jaarmaxima worden vervolgens gekoppeld aan een kans bepaald met de empirische formule van Chegodayev [Chow *et al*, 1988 *fide* Kolen *et al*, 2001].

$$P_i = P(X \geq x_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad \text{vergelijking 4.7}$$

waarin:

P_i	de kans dat X (het 9-daagse neerslagvolume) groter is dan de waarneming x_i (jaarmaxima dus kans per jaar)
i	rangnummer van de waarneming (gesorteerd van hoog volume naar laag volume)
n	aantal waarnemingen (bij jaarmaxima: aantal jaren)

De frequentie per jaar is vervolgens bepaald uit de kans met de volgende vergelijking:

$$f_i = -\ln(1 - P_i) \quad \text{vergelijking 4.8}$$

Met behulp van de Gumbelverdeling (zie paragraaf 4.2) is vervolgens de reeks mathematisch geëxtrapoleerd. De Gumbelverdeling wordt door het KNMI gebruikt voor de kansverdeling van de Bilt. De parameters van de Gumbelverdeling worden met de methode van momenten bepaald [Kolen *et al*, 2001]. In de praktijk wordt vaak gesproken over herhalingstijden van gebeurtenissen in plaats van frequenties. De gemiddelde herhalingstijd en de overschrijdingsfrequentie zijn elkaars reciproke [Kolen *et al*, 2001]:

$$\text{Gemiddelde herhalings tijd} = \frac{1}{\text{Overschrijdingsfrequentie}} \quad (\text{jaar})$$

Een *gemiddelde* herhalingstijd van bijvoorbeeld 100 jaar betekent dat er tussen twee opeenvolgende afvoeren met een zelfde waarde, gemiddeld 100 jaar ligt. Het kan echter voorkomen dat de tijd tussen de gebeurtenissen langer, of juist korter is. Over een lange periode beschouwd zal het gemiddelde 100 jaar zijn.

De neerslag die binnen een periode van 9 dagen valt, is niet uniform verdeeld in de tijd. De verdeling van de hoeveelheden neerslag per dag over de 9-daagse periode wordt het neerslagpatroon genoemd. Door HKV en het KNMI is uitgebreid onderzoek gedaan naar neerslagpatronen [Kolen et al, 2001 *fide* HKV et al, 1997-1999]. Een patroon bestaat uit een piekneerslag en een verdeling van de overige neerslag over de andere dagen. Er zijn vier patronen opgesteld. De vier patronen zijn: uniform, gemiddeld laag, gemiddeld hoog en extreem. In tabel 4.1 is per patroon de kans van voorkomen weergegeven.

Tabel 4.1 Neerslagpatronen en bijbehorende kansen

Patroon	Kans
Uniform	0.1
Gemiddeld laag	0.6
Gemiddeld hoog	0.2
extreem	0.1

In deze studie wordt in navolging van het rapport van Kolen *et al* [2001] uitgegaan van twee verschillende patronen. Het eerste patroon in 'gemiddeld laag', dit patroon heeft een vrij uniform verdeelde neerslag maar met een duidelijke piek. Voor dit patroon is gekozen omdat het de grootste kans van voorkomen heeft. Het tweede patroon waarvoor is gekozen is genaamd 'extreem'. Dit patroon is een niet uniform verdeelde neerslag met één extreme piek. Voor dit patroon is gekozen wegens de invloed van sterk geconcentreerde buien. Voorwaarde is dat de gesommeerde kans van de patronen 1 is. Hierdoor is de kans op een gemiddeld laag patroon 0.8 en op een extreem patroon 0.2.

De bergingscapaciteit van de bodem is een belangrijke factor binnen het afvoerproces. Naarmate de grondwaterstand en het vochtgehalte hoger is (en dus de bergingscapaciteit lager) kan er minder water in de bodem worden geborgen. Grondwaterstanden veranderen relatief traag, het is hierdoor van belang de beginsituaties van de 9-daagse gebeurtenissen goed in te schatten.

Het gebruikte model, SIMGRO, bepaalt de initiële conditie van de berging in de wortelzone en de onverzadigde zone (3^e stochast) aan de hand van een evenwichtsituatie bij een bepaalde opgelegde grondwaterstand. Voor het vastleggen van de initiële berging aan het begin van een gebeurtenis volstaat daarom het opleggen van een initiële grondwaterstand. Om de beginsituaties in te schatten wordt gebruik gemaakt van de grondwatertrappenkaart. Uit deze kaart worden vervolgens beginsituaties afgeleid.

De beginsituaties die worden gebruikt zijn:

- GHG: Gemiddeld hoogste grondwaterstand (zeer nat)
- GVG: Gemiddelde voorjaars grondwaterstand (nat)
- GG: Gemiddelde grondwaterstand (gemiddeld)
- GLG: Gemiddeld laagste grondwaterstand (droog)

Bij het gebruik van grondwatertrappen voor het bepalen van de beginsituaties treden er een aantal problemen op. Een van de problemen is dat de grondwatertrappen

worden uitgedrukt met een range van GLG en GHG's. In tabel 4.2 zijn deze ranges per grondwatertrap (oude indeling 1:50.000) weergegeven. Er is voor de oude indeling gekozen omdat vrijwel alle grondwatertrappen kaarten nog op deze indeling gebaseerd zijn.

Tabel 4.2 Definitie grondwatertrappen in cm-mv [Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum, 1988]

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

Door Van der Sluijs [1982] is per grondwatertrap een gemiddelde waarde uitgerekend. In tabel 4.3 zijn deze referentiewaarden weergegeven. Uit een test met een groot aantal stambuizen blijkt dat de referentiewaarden zeer goed voldoen [Van der Sluijs, 1982 *fide* Noordhuis et al, 1990].

Tabel 4.3 Gemiddelde GHG en GLG (cm-mv) per grondwatertrap. Tevens staat in de tabel de bandbreedte behorend bij de waarden weergegeven [Van der Sluijs, 1982]

Gt	Gemiddelde	
	GHG	GLG
I	-5 ± 4	38 ± 7
II	7 ± 3	66 ± 4
II*	32 ± 7	67 ± 11
III	17 ± 1	103 ± 3
III*	32 ± 3	102 ± 4
IV	56 ± 3	104 ± 4
V	17 ± 3	135 ± 5
V*	32 ± 3	142 ± 4
VI	61 ± 1	155 ± 2
VII	101 ± 2	190 ± 3
VII*	185 ± 3	281 ± 4

Uit de GHG en GLG kunnen vervolgens de GG en GVG worden afgeleid. Omdat de grondwatertrappen veelal uit de jaren zeventig of begin jaren tachtig dateren en de grondwaterstanden inmiddels vrijwel overal gedaald zijn is een correctie toegepast om tot de huidige situatie te komen. In tabel 4.4 zijn de gecorrigeerde gemiddelde waarden weergegeven. Deze gemiddelde waarden zijn gemaakt door resultaten van de Gt-actualisatie te combineren met de Gt-indeling volgens de oude bodemkaart. De verkregen waarden kunnen buiten de klassengrenzen van de Gt-indeling vallen [Kolen et al, 2001].

Tabel 4.4 Actuele (correctie voor verdroging) gemiddelde GHG, GVG, GG en GLG in cm-mv voor de Gt-indeling van de oude bodemkaart [Kolen et al, 2001]

Gt	I	II	II*	III	III*	IV	V	V*	VI	VII	VII*
GHG	23	40	55	55	60	67	65	61	83	128	176
GVG	43	60	75	76	82	88	88	87	107	153	202
GG	66	84	85	99	100	103	118	114	136	183	234
GLG	109	127	114	143	140	138	171	166	189	237	292

Als de tabellen 4.3 en 4.4 worden vergeleken blijkt dat deze zeer sterk verschillen. Wat bijvoorbeeld opvalt, is dat grondwatertrap II in tabel 3.4 een GHG van 40 cm-mv heeft gekregen. In tabel 4.3 bedraagt deze waarde 7 cm-mv met een bandbreedte

van 3 cm. Het is dus de vraag in hoeverre deze verschillen te verantwoorden zijn. De kansen per klasse staan in tabel 4.5 weergegeven. De kans op voorkomen van iedere klasse is met behulp van duurlijnen bepaald.

Tabel 4.5 Kans op gebeurtenissen in zomer- en winterperiode bij gebruik van 4 klassen

	zomer	winter
GHG (zeer nat)	0.00	0.30
GVG (nat)	0.15	0.30
GG (gemiddeld)	0.45	0.40
GLG (droog)	0.40	0.00

Nadat zowel de neerslag stochasten als de uitgangssituatie zijn toegekend kan de hoogwaterberekening worden uitgevoerd. Met behulp van SIMGRO worden de verschillende gebeurtenissen doorgerekend. In totaal worden er 4 uitgangssituaties * 14 neerslag volumes * 2 neerslag patronen = 112 9-daagse berekeningen uitgevoerd. De uitkomsten kunnen vervolgens worden verwerkt tot de grafiek zoals in figuur 4.5 is weergegeven.

5 Het Stortelersbeekmodel

5.1 Inleiding

Het eerste SIMGRO-model van het Stortelersbeekgebied is in 1999 in het kader van het DTO- project Duurzaam Landgebruik opgesteld. Het model is gebruikt om inzicht te krijgen in de sturingsmogelijkheden van water ten behoeve van waterconservering en multifunctioneel landgebruik in het gebied. Het gemodelleerde gebied was 464 hectare groot en bestond uit 37 deelstroomgebieden [Van Walsum & Veldhuizen, 1999]. Na onder andere een studie van Hanhart Consult [Hanhart, april 2001] in opdracht van een landgoedeigenaar, bleek dat de randen van het in 1999 opgestelde model te veel invloed op de grondwaterstanden en afvoeren in het gebied hadden. Vervolgens is er een nieuw model met een grotere oppervlakte (3410 hectare) voor het gebied opgezet. Dit nieuwe model is als uitgangspunt voor deze studie gebruikt. In paragraaf 5.3 wordt de schematisatie van dit nieuwe model besproken. In paragraaf 5.2 zullen de theoretische achtergronden van SIMGRO worden besproken.

5.2 Theoretische achtergronden SIMGRO

Voor het Stortelersbeekmodel is gebruik gemaakt van het programma SIMGRO (SIMulatie van GROndwaterstroming en oppervlaktewaterstanden). Het programma is ontwikkeld om regionale grondwaterstroming in relatie tot drainage, beregening, irrigatie en peilbeheer te simuleren [Querner & Van Bakel, 1989].

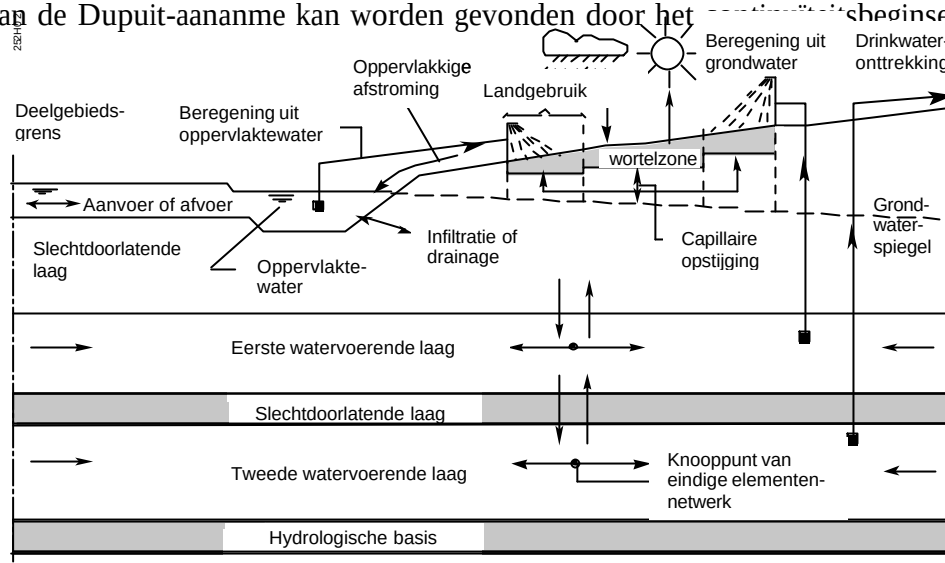
Het programma SIMGRO wordt gerund binnen een arcview-schil genaamd Alterraqua.

In figuur 5.1 is de schematisatie van het hydrologische systeem in SIMGRO weergegeven. Het programma schematiseert het hydrologische systeem in een drietal onderdelen: de verzadigde zone, de onverzadigde zone en het oppervlaktewater. In deze paragraaf worden een aantal onderdelen kort beschreven. De werking van SIMGRO is in meer detail beschreven door Querner [1993].

5.2.1 Grondwaterstroming in de verzadigde zone

In SIMGRO berekent verzadigde grondwaterstroming op een pseudo-driedimensionale manier, met behulp van de zogenaamde Dupuit aanname. De Dupuit aanname veronderstelt dat er in watervoerende lagen (aquifers) geen gradiënt is in de stijghoogte. $dH/dz=0$). Er wordt verondersteld dat de grondwaterstroming in watervoerende lagen als horizontaal is te beschouwen. Bij stroming met een vrije waterspiegel kan de Dupuit-aanname worden toegepast als de helling van het freatisch vlak klein is. De differentiaalvergelijking voor grondwaterstroming op basis

van de Dupuit-aanname kan worden gevonden door het



Figuur 5.1 Schematisatie in SIMGRO van het hydrologisch systeem [Querner & Van Bakel, 1989]

passen op een controlevolume langs de verticaal en vervolgens de wet van Darcy in te vullen. Voor een gedetailleerde afleiding wordt verwezen naar [Koopmans, 2000]. Voor grondwaterstroming in een (gedeeltelijk) afgesloten watervoerend pakket wordt de vergelijking als volgt:

$$k_x D \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \right) + k_y D \left(\frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) + P + W = S \frac{\partial H}{\partial t} \quad \text{vergelijking 5.1}$$

Waarin:

- H stijghoogte (m)
- D lokale dikte van de doorlatende laag (m)
- x, y coördinaten van het 2-D horizontale coördinatenstelsel (m)
- S bergings coëfficiënt (-)
- P, W voedingstermen (bijvoorbeeld neerslag en kwel) (m/d)
- t tijdstap (d)

Voor freatische grondwaterstroming wordt de vergelijking als volgt:

$$k_x D \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y D \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + P + W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{vergelijking 5.2}$$

Waarin:

- h stijghoogte
- D gemiddelde doorstroomde dikte
- S_y freatische bergingscoëfficiënt

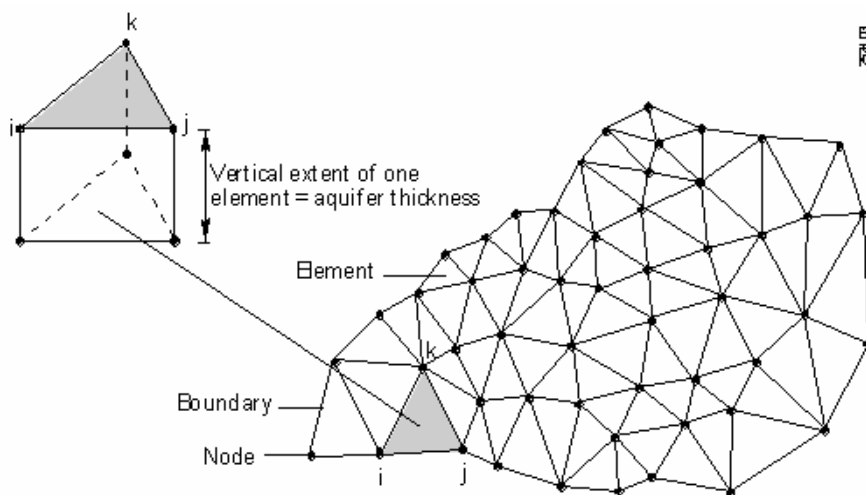
In de bovenstaande vergelijkingen zijn de voedingstermen P en W behandeld als constanten. In het geval van gedeeltelijk afgesloten grondwater zijn de voedingstermen echter een functie van de stijghoogte. De voeding wordt dan bepaald door het stijghoogteverschil en de weerstand van de semi-doorlatende laag volgens:

$$P_j = \frac{H_{j+1} - H_j}{c_j} \quad \text{vergelijking 5.3}$$

Waarin:

- P_j voeding aan de bovenzijde van watervoerend pakket j (m/d)
- H_j stijghoogte in watervoerend pakket j (m)
- H_{j+1} stijghoogte in het bovenliggende watervoerend pakket (m)
- c_j weerstand van de slecht doorlatende laag boven watervoerend pakket j (d)

In het bovenstaande is uitgegaan van voeding aan de bovenzijde van het watervoerende pakket, voeding aan de onderzijde wordt op dezelfde manier berekend. Een overzicht van alle binnen SIMGRO berekende fluxen is in figuur 5.1 weergegeven.



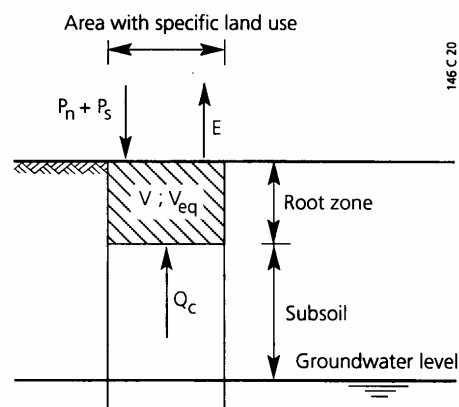
Figuur 5.2 Eindige elementennetwerk

De vergelijking voor de verzadigde grondwaterstroming wordt numeriek opgelost met de eindige elementenmethode. Daarvoor wordt een netwerk van elementen over het gebied gelegd. De hoekpunten van deze elementen worden knooppunten genoemd. Op deze manier kan op knooppuntsniveau de grondwaterstromingsfluxen worden berekend. In figuur 5.2 is een voorbeeld weergegeven van een eindige elementennetwerk. De verzadigde zone wordt in het model gebracht op basis van de volgende karakteristieke kenmerken: doorlaatvermogen, dikte en bergingscoëfficiënt van de watervoerende lagen en de verticale weerstand van de slechtdoorlatende

lagen. Op de randknooppunten moet een randvoorwaarde opgegeven worden als een vaste flux (Neumann) of een vaste stijghoogte (Dirichlet) en voor alle knooppunten een initiële grondwaterstand.

5.2.2 Grondwaterstroming in de onverzadigde zone

De stroming van water in de onverzadigde zone wordt over het algemeen beschreven als één-dimensionaal en in de verticale richting, waarbij gebruik wordt gemaakt van de Richard's vergelijking. In SIMGRO wordt de niet-stationaire stroming in de onverzadigde zone benaderd door een aaneenschakeling van stationaire situaties (pseudo-dynamische situatie). Hierbij wordt de onverzadigde zone beschouwd als twee reservoirs, een voor de wortelzone en een voor het gebied tussen de wortelzone en de grondwaterspiegel [Rijtema, 1971; De Laat, 1980]. Het reservoir van de wortelzone simuleert de berging van



Figuur 5.3 Schematisatie van de onverzadigde zone in SIMGRO. Met P_n = netto neerslag, P_s = beregning, E = evapotranspiratie, V = vochtgehalte, V_{eq} = evenwichtsvochtgehalte en Q_c

van vocht, met instroom en uitstroom van bijvoorbeeld neerslag, actuele evapotranspiratie, oppervlakkige afstroming en capillaire opstijging of percolatie. Oppervlakkige afstroming wordt berekend als de neerslagintensiteit de infiltratiecapaciteit overschrijdt of als er water op het maaiveld staat. Water dat op verhard oppervlak valt kan via riolering naar een RWZI worden gevoerd of direct aan een dichtbij gelegen sloot worden toegekend.

Percolatie wordt berekend wanneer het vochtgehalte van de wortelzone het zogenaamde evenwichtsvochtgehalte overschrijdt. Het evenwichtsvochtgehalte is het vochtgehalte dat in evenwicht is met de diepte van de grondwaterstand, in afwezigheid van stroming. Capillaire opstijging vanuit het grondwater wordt berekend wanneer het vochtgehalte beneden de evenwichtswaarde blijft. Het balansmodel van de wortelzone maakt gebruik van rekenresultaten (o.a. Q_c , V_{eq} en μ) die vooraf met het één-dimensionale numerieke model CAPSEV zijn verkregen [Wesseling, 1991]. Het model CAPSEV heeft als invoer de opbouw van lagen en de bijbehorende bodemfysische parameters.

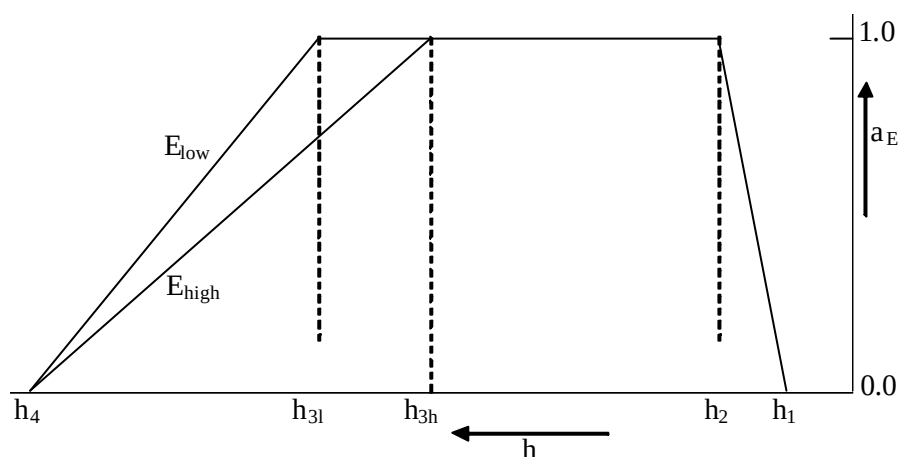
Het andere reservoir wordt gebruikt voor de berekening van de freatische bergingscoëfficiënt (zie figuur 5.3). In het model wordt met een variërende waarde van de freatische bergingscoëfficiënt in de ondergrond gewerkt. Deze coëfficiënt wordt geheel afhankelijk gesteld van de diepte van de grondwaterstand. In werkelijkheid is de bergingscoëfficiënt ook afhankelijk van het vochtgehalte van de wortelzone. De gevolgde methode is voor het modelleren op regionale schaal echter voldoende nauwkeurig [Van Walsum & Veldhuizen, 1999]. De waarde van de freatische bergingscoëfficiënt als functie van de grondwaterstandsdiepte is eveneens

met CAPSEV berekend, door een serie van berekeningen te maken voor verschillende grondwaterstandsdiepten.

Voor het berekenen van de verdamping heeft SIMGRO de potentiële evapotranspiratie van een referentie gewas als invoer nodig. Van andere vegetatietypen wordt de potentiële verdamping berekend met gewasfactoren ontleend aan Feddes [1987]. Voor open water is een gewasfactor van 1.25 aangehouden. Voor bos wordt de potentiële verdamping berekend als de som van transpiratie en interceptie. De potentiële verdamping van het referentiegewas wordt berekend uit meteorologische data, gebruik makend van de Makkink-vergelijking voor gras. Reductie van de potentiële verdamping van het referentiegewas tot de actuele verdamping wordt in SIMGRO gebaseerd op de vochtspanning in de wortelzone volgens:

$$E = a_E * E_r \quad \text{vergelijking 5.4}$$

Met: a_E als functie van vochtspanning en potentiële transpiratie E_p volgens figuur 5.4



Figuur 5.4 Reductiecoëfficiënt voor wateropname door wortels a_E , als functie van bodemvochtspanning en potentiële transpiratie E_p . Bij h_4 (verwelkingspunt) is er geen wateropname, tussen h_3 en h_2 is de evapotranspiratie maximaal (potentieel) tussen h_2 en h_1 is er weer reductie als gevolg van zuurstof tekort [Feddes et al, 1978]

5.2.3 Af- en ontwatering

In SIMGRO is het afwateringssysteem geschematiseerd als een aaneenschakeling van reservoirs, een per traject van een grotere waterloop. De reservoirs worden gereguleerd door een stuw (of imaginaire stuw) bij het uitstroompunt van het reservoir. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een Q - h relatie, zoals vergelijking 5.5.

$$Q = c \cdot (\Delta h)^n$$

vergelijking 5.5

Waarin:

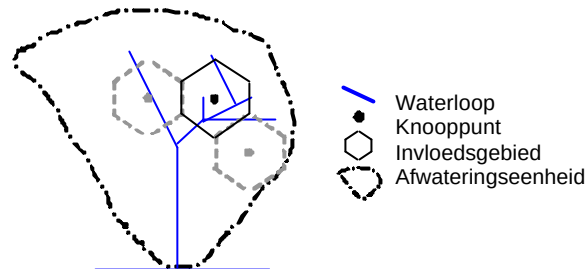
Q = oppervlaktewater debiet (m^3d^{-1})

c = constante ($\text{m}^{3-n}\text{d}^{-1}$)

Δh = overstorthoogte (m)

n = afvoer factor (-)

De Q-h relatie vat alle hydraulische kenmerken binnen het reservoir samen op een 'black box' manier. De door een waterloopvak en bijbehorende drainagemiddelen gedraineerde oppervlakte die gedraineerd wordt een afwateringseenheid genoemd. Deze afwateringseenheden visualiseren de al besproken reservoirs. De inhoud van een reservoir wordt bepaald door de dimensies van alle binnen de afwateringseenheid aanwezige waterlopen. Aan elkaar gekoppelde afwateringseenheden vormen een cascade die overeenkomt met de natuurlijke route van het oppervlaktewater in het betreffende gebied. De afwateringseenheden omvatten minimaal één invloedsgebied (van een knooppunt). Voor het berekenen van de ontwatering wordt in SIMGRO de formule van Ernst gebruikt:



Figuur 5.5 Interactie tussen grond- en oppervlaktewater

$$q_w = \frac{(h_g - h_{sw})}{aY}$$

vergelijking 5.6

Waarin:

q_w = drainage flux (md^{-1})

h_g = gemiddelde grondwaterspiegel (m)

h_{sw} = waterpeil van het oppervlaktewater (m)

a = geometrie factor, afhankelijk van de vorm van de grondwaterspiegel tussen de sloten, waarde: 0,65-0,85

Y = drainage- of infiltratieweerstand (d)

De waarde van de weerstand (Y) is zowel afhankelijk van de kenmerken van de waterloop (dimensies en intreeweerstand) als van de doorlatendheid van de pakketten die de waterloop aansnijdt. In figuur 5.5 is het af- en ontwateringssysteem zoals in SIMGRO geschematiseerd weergegeven. Van alle ontwateringsmiddelen (zoals kleine sloten, greppels en drainage wordt binnen een afwateringseenheid, per invloedsgebied de drainageflux of infiltratieflux berekend. De drainage of infiltratiefluxen van de verschillende ontwateringsmiddelen worden vervolgens bij

elkaar opgeteld en als debiet aan het reservoir toegevoegd. De drainage of infiltratie wordt berekend afhankelijk van het oppervlaktewaterpeil en de grondwaterstand. Ontwateringsmiddelen functioneren als het oppervlaktewaterpeil en/of de grondwaterstand boven de bodemhoogte van de ontwateringsmiddelen liggen. [Van Walsum & Veldhuizen, 1999]. Oppervlakte-afvoer wordt in SIMGRO berekend als de neerslagintensiteit de infiltratiecapaciteit overschrijdt, of als de grondwaterstand boven het maaiveld stijgt.

5.3 Modelschematisatie

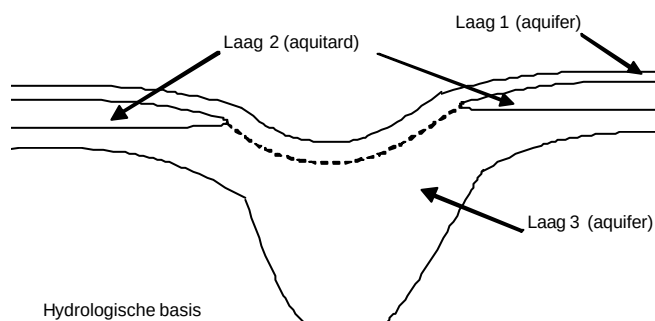
5.3.1 Ruimtelijke en temporele discretisatie

Voor de numerieke benadering van de grondwaterstroming wordt een eindig-elementennetwerk gebruikt. Het driehoeksnetwerk is gelijkmatig verdeeld over het gebied; er zijn geen verdichtingen in het netwerk aangebracht. Aan de hand van het driehoeksnetwerk kan voor ieder knooppunt een zeshoekig invloedsgebied of gridcel worden bepaald. In SIMGRO worden deze gridcellen weer gegroepeerd tot afwateringseenheden. Het aantal knooppunten bedraagt 9850 met een onderlinge afstand van ongeveer 60 m. Het totale gebied is opgedeeld in 127 deelstroomgebieden die weer onderverdeeld zijn in afwateringseenheden. De oppervlakte van een gridcel is ca. 3600 m² en de gemiddelde oppervlakte van een afwateringseenheid is gemiddeld ongeveer 10 ha.

In het model wordt voor grond- en oppervlaktewaterstroming met verschillende tijdstappen gewerkt. De keuze voor de tijdstaplengthte is bepaald aan de hand van de reactietijd van de verschillende deelsystemen. De tijdstap voor berekeningen in de grondwatermodule bedraagt 0,5 dag; voor het oppervlaktesysteem bedraagt de tijdstap 0,05 dag. De in- en uitvoer van het model worden per dag gegeven [Querner, 2002; Van Walsum & Veldhuizen, 1999].

5.3.2 Schematisatie van de ondergrond

De ondergrond van het Stortelersbeekgebied is geschematiseerd in 3 lagen. De eerste laag wordt begrensd door het maaiveld en de bovenkant van de keileem. De laag bestaat uit dekzand met een k -waarde van 10 md⁻¹. De dikte van de laag varieert van 0,4 m bovenop de plateaus, waar de keileem dik is, tot ongeveer een meter in de overige delen van het gebied. De tweede laag bestaat uit keileem en is slechts in een deel van het gebied aanwezig. Deze slechtdoorlatende laag heeft

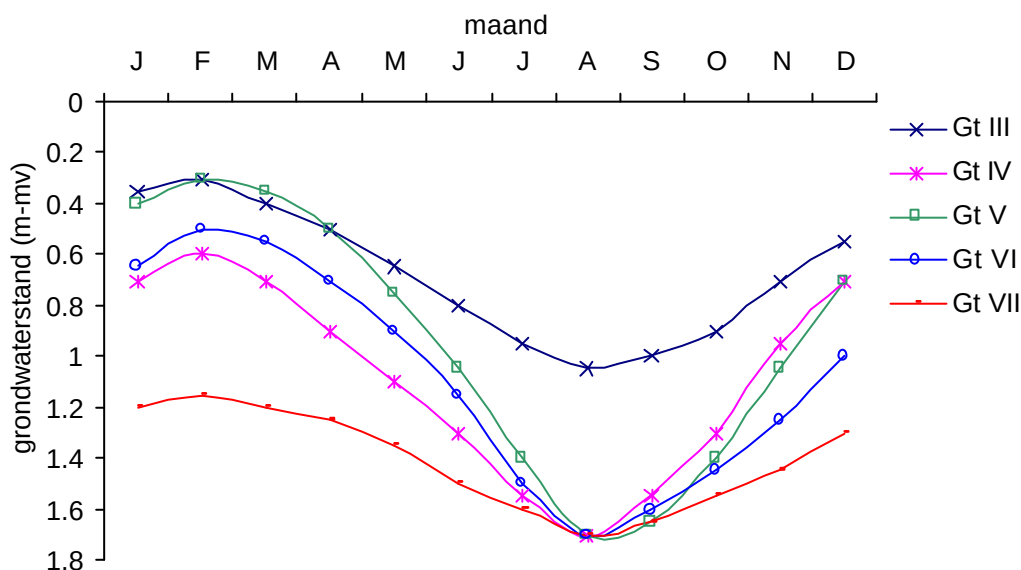


Figuur 5.6 Schematisatie ondergrond

een dikte van ongeveer 0,4 m tot 2,7 meter. De keileemlaag heeft een k -waarde tussen de 0,005 en 0,01 md^{-1} . De c -waarde varieert tussen ongeveer 40 en 540 dagen. Op plaatsen waar de keileemlaag ontbreekt, is een c -waarde van 10 dagen aangebracht. De dikte van de lagen is geïnterpoleerd uit boringen in het gebied [Kleijer & Ten Cate, 1998].

De derde laag wordt aan de bovenkant begrensd door de keileemlaag en aan de onderkant door de Tertiaire klei. Deze watervoerende laag bestaat uit fluvioglaciale afzettingen, de Laag van Miste en de Afzetting van Winterswijk. De dikte van de laag varieert tussen 1 en 20 m. De k -waarden variëren tussen 5 md^{-1} en 20 md^{-1} . De Tertiaire klei wordt beschouwd als de hydrologische basis.

De specifieke bergingscoëfficiënt voor het gespannen water heeft een standaardwaarde van 0,00001 m^{-1} . Voor het simuleren van de regionale grondwaterstroming is het nodig om aan de randen van het model randvoorwaarden toe te kennen. Waar het watervoerende pakket op de rand dikker is dan 5 m, is als randvoorwaarde een stijghoogte aangebracht (Dirichlet randvoorwaarde). Deze stijghoogte verloopt over het jaar op basis van de daar aanwezige grondwatertrap. De variatie van de grondwaterstanden op de randen over het jaar per grondwatertrap is in figuur 5.7 weergegeven. Op randknopen waar het watervoerende pakket dunner is dan 5 m wordt de randflux op 0 gesteld (Neumann randvoorwaarde).



Figuur 5.7 Variatie van de randstijghoogten (in m-mv) over het jaar

5.3.3 De onverzadigde zone en meteorologische gegevens

Voor de schematisering van de onverzadigde zone is gebruik gemaakt van een recente bodemkartering 1:10.000 [Kleijer & Ten Cate, 1998]. Deze kaart is echter niet gebiedsdekkend. Voor het westelijke deel van het gebied is hierdoor gebruik gemaakt van een wat gedateerde bodemkaart 1:50.000 [Harbers & Rosing, 1983]. De eenheden op de bodemkaart zijn vertaald naar bodemfysische profielen op het

niveau van de invloedsgebieden, waarbij gebruik is gemaakt van bouwstenen uit de Staringreeks [Wösten, 2001]. Deze bodemfysische profielen worden in SIMGRO gebruikt voor het berekenen van de dynamiek van het vochtgehalte in de onverzadigde zone (zie subparagraaf 5.2.2 voor de methode).

In het model wordt gerekend met een variërende waarde van de freatische bergingscoëfficiënt. De waarden van de freatische bergingscoëfficiënt variëren globaal tussen 0 en 0,3. Waarbij de zeer kleine waarden van de bergingscoëfficiënt voorkomen als het grondwater dicht onder het maaiveld komt. Gegevens over het bodemgebruik in het proefgebied zijn ontleend aan het LGN3²-bestand [De Wit *et al*, 1999]. Met behulp van de gegevens uit het LGN3-bestand zijn de bewortelingsdiepte en de gewasfactoren voor het berekenen van de gewasverdamping vastgesteld.

Voor de meteorologische invoer is de dagneerslag van station Aalten gebruikt over de periode 1951-1999. Omdat er geen verdampingscijfers voor station Aalten beschikbaar waren, zijn de verdampingscijfers (per dag) van De Bilt voor dezelfde periode gebruikt. Er wordt aangenomen dat de neerslag gelijkmatig verdeeld over de dag valt. De hoogste dagneerslag gemeten in Aalten was 63.7 mm op 31-08-1968. Gemiddeld valt er ongeveer 2 mm per dag. Het natste jaar was 1998 met een extreem hoge neerslagsom van 1192.7 mm, het droogste jaar was 1976 met een totale neerslagsom van slechts 491.5 mm.

5.3.4 Schematisatie van het oppervlaktewatersysteem

Een overzicht van het geschematiseerde oppervlaktewatersysteem is in figuur 5.9 weergegeven. Op deze kaart is de ligging van de hoofdwaterlopen en kleinere waterlopen in het onderzoeksgebied weergegeven. Het onderzoeksgebied is opgedeeld in 127 afwateringseenheden. In het onderzoek wordt binnen elke afwateringseenheid onderscheid gemaakt tussen vier klassen van af- en ontwateringsmiddelen:

- Hoofdwaterlopen (systeem 2)
- Kleinere sloten (systeem 3)
- Greppels (systeem 4)
- Drainage (systeem 5)

Voor de hoofdwaterlopen zijn de watergangen uit de legger van het waterschap Rijn en IJssel gebruikt. Ook de dimensies van deze waterlopen zijn ontleend aan de legger. De kleinere sloten en greppels zijn ontleend aan de topografische kaart 1:10.000. Van deze kleinere sloten en greppels zijn de dimensies in tabel 5.1 weergegeven. De locaties van percelen met buisdrainage zijn ontleend uit gegevens van waterschap Rijn en IJssel. Het waterschap



Figuur 5.8 Meetstuw in de Stortelersbeek

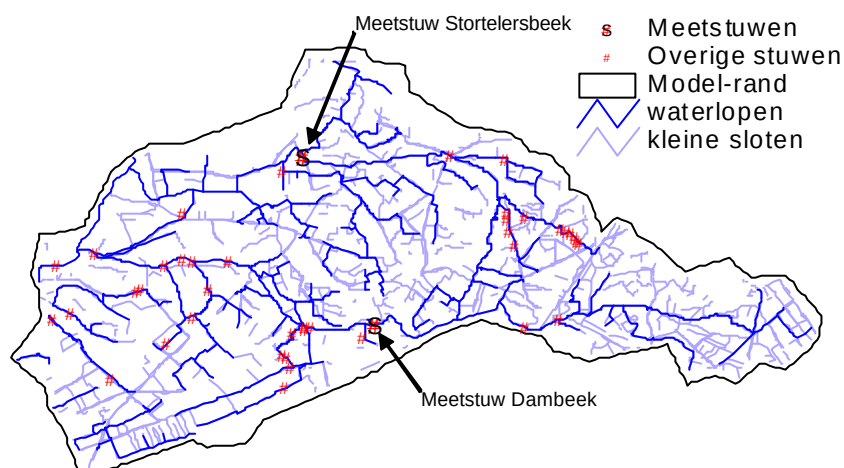
² LGN = LandGebruikskartering Nederland

gebruikt deze gegevens voor het vermijden van schade bij onderhoudswerkzaamheden.

Tabel 5.1 Dimensies van kleinere waterlopen en greppels

Type	Bodembreedte (cm)	Diepte (cm)	Talud
Kleine sloot type I	40	60	1.05
Kleine sloot type II	80	80	1.05
Greppel	25	40	0.92

Aan alle watergangen in het onderzoeksgebied zijn drainageweerstandstanden toegekend. Voor de drainageweerstand van de drainagebuizen is een waarde geschat van 20 dagen. In het onderzoeksgebied zijn een groot aantal stuwen en bodemvallen aanwezig. In figuur 5.9 staan de locaties van de (meet)stuwen in het onderzoeksgebied weergegeven. In SIMGRO wordt standaard uitgegaan van stuwen met een brede overlaat. Op basis van de stuwformule en gegevens over de waterloop wordt er voor een aantal vaste hoogtes een Q-h relatie vastgesteld; er wordt gerekend vanaf de benedenstroomse bodemhoogte van de bovenstroomse waterloop. Het absolute niveau wordt vastgesteld aan de hand van het winterpeil. Voor de meetstuw (een dubbele Rossum-stuw) in de Stortelersbeek (figuur 5.8) is de door SIMGRO berekende Q-h relatie vervangen door een geijkte Q-h relatie.



Figuur 5.9 Oppervlaktewater systeem en stuwen

6 Aanpassingen, gevoeligheidsanalyse en calibratie

6.1 Aanpassingen aan het bestaande model

Het bestaande SIMGRO-model voor het Stortelersbeekgebied bleek een aantal beperkingen te hebben. Zo bleek bij een nadere analyse dat de GHG (berekend over 10 jaar) op een aantal plaatsen meters boven maaiveld uitkwam. Deze problemen werden veroorzaakt door een aantal onvolkomenheden in de afwateringstructuur. De betreffende gebieden moesten naar een hoger liggende watergang afwateren, wat uiteraard problemen geeft. Verder bleek op een aantal plaatsen de bodemhoogte van de watergang aan maaiveld of zelf er boven te liggen. Een ander probleem dat is aangetroffen, is dat, in tegenspraak met de literatuur [Van Walsum & Veldhuizen, 1999, Kleijer & Ten Cate, 1998] op plaatsen waar de keileemlaag dun is er een hoge k-waarde is ingevoerd en op plaatsen waar de laag dik is juist een lage k-waarde is toegekend. Dit had als gevolg dat de weerstand van de keileemlaag, op de plaatsen waar de laag dik is, werd onderschat. Verder bleek dat de manier waarop in Alterraqua (GIS-schil rond SIMGRO) de drooglegging werd berekend niet te werken voor sterk hellende gebieden zoals het Stortelersbeekgebied. De drooglegging werden berekend door van de maaiveldshoogte op een bepaald punt de benedenstroomse bodemhoogte van het betreffende waterloopvak af te trekken. Dit leidde tot een drooglegging tot plaatselijk 7 meter beneden maaiveld, welke in de Achterhoek uiteraard niet voorkomen.

Na het aanpassen van de bovenstaande beperkingen in het model en de onvolkomenheid in de berekening van de drooglegging, geeft het model reële resultaten. In de volgende paragraaf wordt een gevoeligheidsanalyse en calibratie met het aangepaste model uitgevoerd.

6.2 Gevoeligheidsanalyse en calibratie

6.2.1 Inleiding

Het Stortelersbeekmodel heeft als gecombineerd oppervlakte- en grondwater stromingsmodel een groot aantal invoerparameters. Ook is de opbouw van het gemodelleerde gebied erg complex. De uitkomsten van het model zullen dus te maken hebben met een bepaalde mate van onzekerheid als gevolg van vereenvoudigingen in de schematisatie en de (on)nauwkeurigheid van de invoerdata. Het is daarom belangrijk inzicht te krijgen in de mate waarin bepaalde parameters de uitkomsten van het model beïnvloeden. Tevens geeft de analyse inzicht in met welke parameters de modelresultaten kunnen worden verbeterd. De verandering van de overeenkomst van het model met de waarnemingen als gevolg van de verandering van de waarde van een parameter, wordt samengevat in een geschikt gekozen kwaliteitskengetal. In deze studie is voor dit kengetal de RMSE (Root Mean Square Error) gekozen. Deze RMSE is een schatter voor de standaard deviatie van de residuen. De RMSE wordt als volgt berekend [Torfs, 2001]:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{NumObs} \sum_{i=1}^{NumObs} RES^2(i) \right)} \quad \text{vergelijking 6.1}$$

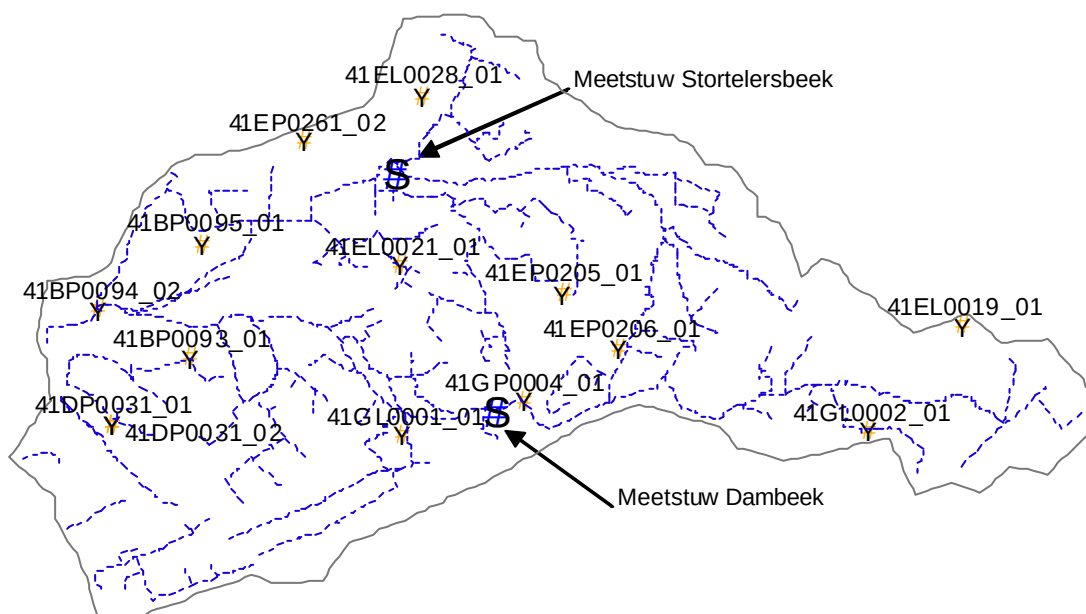
waarin:

NumObs Aantal waarnemingen

RES Waargenomen waarde minus de berekende waarde op tijdstap *i*

De RMSE heeft een bereik van 0 tot oneindig. Hoe kleiner de waarde van de RMSE, hoe beter de overeenkomst van de berekende reeks is met de gemeten waarden. De dimensie van de RMSE is hetzelfde als van de gemeten waarden, in deze studie is de dimensie in m voor de grondwaterstanden en in l/s voor de afvoer van de Stortelersbeek. Naast de RMSE zijn ook de minimale, maximale en gemiddelde verschillen tussen gemeten en berekend meegenomen in de analyse. Voor de afvoeren is verschil gemaakt tussen basisafvoer (= 0.1 m³/s) en piekafvoeren (> 0.1 m³/s). Het onderscheid is gemaakt omdat aan de lage afvoeren ander systeemgedrag ten grondslag ligt dan aan de piekafvoeren. De RMSE alleen zou voor de afvoeren van de Stortelersbeek een onvoldoende goed beeld geven, daarom zijn ook de maximale en minimale afvoeren meegenomen in de analyse.

Er worden steeds drie jaren doorgerekend; de rekenperiode loopt van 1 januari 1992 tot 31 december 1994 voor de referentiesimulatie en calibratie en van 1 januari 1996 tot 31 december 1998 voor de validatie. Om beïnvloeding van de resultaten door de begincondities te voorkomen, zijn de aan de onderzochte periode voorafgaande 2 jaar met SIMGRO doorgerekend. Als initiële conditie is de hydrologische situatie (bodemvocht, grond- en oppervlaktewater) aan het eind van deze initiële periode gebruikt.



Figuur 6.1 Locaties peilbuizen en meetstuwen

Voor 14 peilbuizen in het onderzoeksgebied is bepaald in welke mate de berekende grondwaterstanden overeenkomen met de gemeten grondwaterstanden. Deze peilbuizen zijn geselecteerd op representatieve en betrouwbare meetwaarden en zoveel mogelijk spreiding over het onderzoeksgebied.

In het gebied wordt gesproken over twee meetstuwen. Van de 'meetstuw' in de Dambeek is echter geen betrouwbare Q-h relatie bekend. Omdat de afvoer van de Stuwbeek door gebrek aan betrouwbare meetgegevens niet goed te calibreren is, zal de nadruk in dit onderzoek komen te liggen op de afvoeren van de Stortelersbeek. De berekende afvoeren van de Stortelersbeek zijn getoetst aan de hand van gemeten afvoeren ter plaatse van de meetstuw in de Stortelersbeek. Lange tijd was de Q-h relatie van de meetstuw onbetrouwbaar, de nu in SIMGRO gebruikte relatie is gecontroleerd en blijkt correct te zijn. In figuur 6.1 zijn de locaties van de onderzochte peilbuizen en de meetstuwen weergegeven

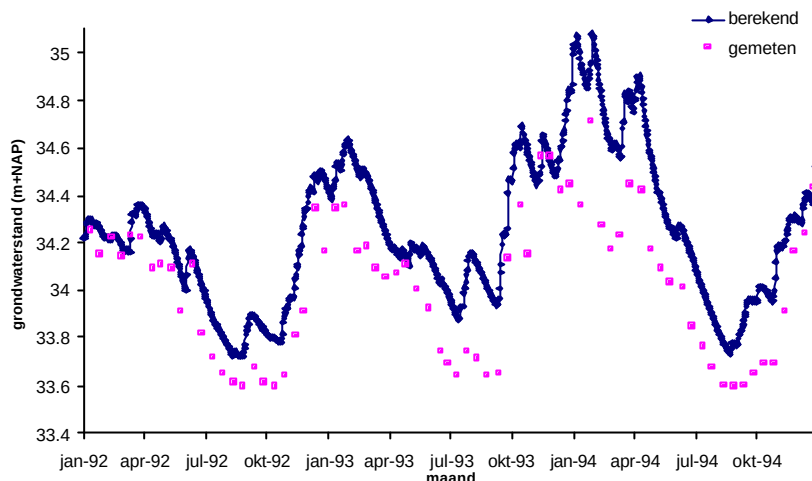
6.2.2 Referentiesituatie

Alvorens over te gaan tot de gevoeligheidsanalyse, moet eerst de referentiesituatie worden vastgesteld. Voor het vaststellen van de referentiesituatie is het model doorgerekend met de schematisatie en de parameterwaarden zoals in hoofdstuk 5 is besproken. In tabel 6.1 is voor de grondwaterstanden een overzicht weergegeven van de verschillen tussen gemeten en berekend.

Tabel 6.1 Root Mean Square Error (RMSE) en de verschillen tussen gemiddelde en standaarddeviatie van berekende en gemeten grondwaterstanden (cm) voor de jaren 1992 tot en met 1994

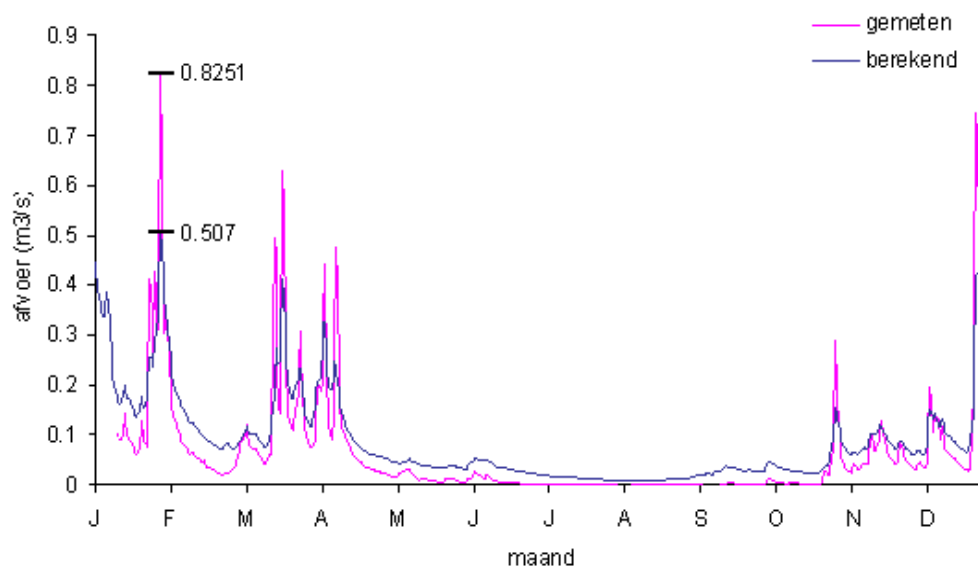
Peilbuisnummer	RMSE	Verschil tussen gemeten en berekend	
		gemiddelde	standaarddeviatie
41BP0093_01	18	-10	-5
41BP0094_02	43	40	-7
41BP0095_01	45	43	6
41DP0031_02	25	22	-1
41EL0019_01	33	26	6
41EL0021_01	153	-151	1
41EL0028_01	71	67	-7
41EP0205_01	38	31	0
41EP0206_01	26	23	2
41EP0261_02	93	92	1
41GL0001_01	42	-35	7
41GL0002_01	32	23	-5
41GL0004_01	25	22	4

Over het algemeen wordt voor de grondwaterstanden in regionale modellen van deze schaal, een RMSE van 20 cm of kleiner als een goede overeenkomst beschouwd. Echter gezien de complexiteit van het onderzoeksgebied en een aantal onzekerheden in de schematisatie wordt voor het Stortelersbeekmodel een RMSE van 30 cm als aanvaardbaar aangehouden. De RMSE tussen gemeten en berekend is voor vier peilbuizen beneden de 30 cm, voor een drietal peilbuizen komt de fout boven 50 cm. De overeenkomst tussen gemeten en berekende grondwaterstanden is dus redelijk maar zeker nog niet optimaal.



Figuur 6.2 Verloop grondwaterstand ter plaatse van peilbuis 41EP0206_01

Een voorbeeld van een grondwaterstandsverloop en de verschillen tussen gemeten en berekend is in figuur 6.2 weergegeven. Uit tabel 6.1 is op te maken dat de berekende standaarddeviatie van de grondwaterstanden over de tijd, slechts enkele cm afwijkt van de standaarddeviatie van de gemeten waarden. De verschillen tussen de gemiddelden van de gemeten en berekende reeksen kunnen echter flink verschillen. De grote fout van bijvoorbeeld peilbuis 41EL0021_01 (RMSE is 1.53 m) wordt vrijwel geheel veroorzaakt door een constante verschuiving in de diepte van de grondwaterstanden; het verloop van de grondwaterstanden over de tijd is wel correct. De oorzaak voor deze verschuiving is de schematisatie van de maaiveldhoogten in SIMGRO. Als bij alle berekende waarden 1.5 meter (maaiveldverschil) wordt opgeteld neemt de RMSE af naar 0.25 meter.



Figuur 6.3 Gemeten en berekend afvoerverloop voor 1994 van de referentiesituatie.

Als de berekende afvoeren worden vergeleken met de gemeten waarden blijkt dat de gesimuleerde basisafvoer van de Stortelersbeek te hoog is en de piekafvoeren te laag. Volgens de gemeten reeks komt het voor dat de beek geen afvoer heeft in droge perioden in de zomermaanden. De door SIMGRO berekende afvoer heeft zelf in de

droogste perioden nog een afvoer van enkele liters per seconde. De berekende piekafvoeren zijn lager dan de gemeten pieken. De berekende piek op 28 januari 1994 heeft een waarde van 507 l/s terwijl de gemeten piek een waarde heeft van 825 l/s.

De berekende afvoer van het gebied reageert niet snel genoeg op veranderingen in de neerslag. In werkelijkheid komt de afvoer bij een bui snel omhoog en zakt deze na de bui weer snel. In de berekende reeks gaat dit allemaal veel trager. In tabel 6.2 is een overzicht gegeven van een aantal kengetallen. De overeenkomst van de lage afvoeren (<100 l/s) is beter dan die van de hoge afvoeren (>100 l/s). Gemiddeld zijn de hoge afvoeren 45 l/s te laag en de lage afvoeren 21 l/s te hoog. Het verschil in standaarddeviatie is hoger voor hoge afvoeren dan voor lage afvoeren. De maximale berekende afvoer is 318 l/s lager dan de gemeten afvoer. De minimale berekende afvoer is 10 liter per seconde hoger dan de gemeten afvoer. Concluderend kan gesteld worden dat het gesimuleerde systeem gedempt reageert, hierdoor vlakken de pieken af en wordt de gesimuleerde basisafvoer te hoog.

Tabel 6.2 Root Mean Square Error (RMSE) en de verschillen tussen gemiddelde, standaarddeviatie, minimum en maximum van berekende en gemeten afvoeren (l/s) van de referentiesituatie voor de jaren 1992 tot en met 1994

	RMSE	Verschil tussen gemeten en berekend:			
		gemiddelde	standaarddeviatie	minimum	maximum
> 100 l/s	77	45	66	-10	318
< 100 l/s	31	-21	0.2		

6.2.3 Gevoeligheidsanalyse

Om een beeld te vormen van de mate waarin bepaalde parameters de modelresultaten beïnvloeden is er een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Ook kan aan de hand van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse worden bepaald welke parameter-aanpassingen kansrijk zijn om de overeenkomst van de modelresultaten met de gemeten waarden te verbeteren. In tabel 6.3 zijn de parameters weergegeven waarvan de gevoeligheid is getest. Tevens is in deze tabel de variatie van de waarde van de parameter ten opzichte van de referentiesituatie weergegeven. Voor de waarden van de parameters in de referentiesituatie wordt verwezen naar hoofdstuk 5.

Tabel 6.3 Onderzochte parameters en variatie

Parameter	Variatie		
Randstijghoogten	+0.5 m	+1.0 m	
K-waarde keileem	-50%	+50%	
K-waarde watervoerende pakket (laag 3)	-50%	+50%	
Bergingscoefficient onverzadigde zone	-25%		
Drainageweerstand hoofdwatervloeden	-50%	+50%	+100%
Drainageweerstand watervloeden (systeem 3)	-50%	+50%	
Verondiepen watervloeden (systeem 3)	-50%		
K-waarde deklaag	-50%		
Laagdikte watervoerend pakket (onder keileem)	-75%		
Berekenings-tijdstap grondwater	+0.5 d		
Tijdsfractie waarin neerslag valt	-0.8		

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn in aanhangsel 2 weergegeven. In dit aanhangsel is het verkleinen van de tijdsfractie waarin de neerslag valt (zie tabel 6.3) weggelaten, omdat het variëren van deze parameter onrealistische waarden voor de afvoer tot gevolg had. Het blijkt dat de afvoer vrij ongevoelig is voor het variëren van de overige onderzochte parameters. Alleen de lengte van de tijdstap van het berekenen van de grondwaterstroming en de waarde van de randstijghoogten hebben een duidelijk effect op de afvoer. De grondwaterstanden zijn vooral gevoelig voor de randstijghoogten en de doorlaatfactor van het watervoerende pakket. In tabel 6.4 is een samenvatting van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse weergegeven.

Tabel 6.4 Evaluatie van de resultaten van de gevoeligheidsanalyse, gebaseerd op waarden uit aanhangsel 4 met: ++ sterk positief effect, + positief effect, - negatief effect en - - sterk negatief effect op de overeenkomst tussen gemeten en berekende grondwaterstand en afvoer

Parameter en variatie		Grondwater	Piek	Afvoer basis
Randpotentiaal				
-0.5 m		+	-	+
-1.0 m		++	--	+
K-waarde keileem				
-50%		+	+	.
+50%		-	.	.
K-waarde watervoerend pakket				
-50%		+ / -	+	+
+50%		+ / -	-	-
K-waarde deklaag				
-50%		.	+	.
Drainageweerstand secundair systeem				
		+	-	-
-50%		.	+	.
+50%		-	+	+
+100%				
Drainageweerstand tertiair systeem				
-50%		.	+	.
+50%		+	-	.
Verondiepen tertiair systeem				
-50%		-	.	.
Laagdikte onder keileem				
-75%		-	+	.
Onverzadigde bergingscoëfficiënt				
-25%		.	+	+
Rekentijdstap grondwater 1 dag				
		.	++	.

Naast de in het bovenstaande beschreven parameters is het effect van het rekenen met neerslag op uurbasis onderzocht. Hiervoor zijn urengegevens voor neerslag uit het Hupselse beekgebied gebruikt. Om de rekentijd enigszins te beperken is slechts één jaar doorgerekend met SIMGRO. Het blijkt dat het systeem iets sneller reageert; de gesimuleerde basisafvoer is echter nog steeds te hoog en de pieken komen ook nu nog niet hoog genoeg. De rekentijd nam wel sterk toe. Het effect van het gebruik van neerslag op uurbasis is dus slechts zeer beperkt. De waarden van de in Hupsel gemeten reeks verschillen van de waarden van de meetreeks die in Aalten is gemeten (neerslagtotaal van 1992 in Hupsel was 755 mm tegen 838 mm in Aalten). De

resultaten kunnen dus niet zonder meer worden vergeleken met de andere gevarieerde parameters.

6.2.4 Calibratie en validatie

Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de randstijghoogten de grondwaterstanden sterk beïnvloeden. In het noordelijke deel van het model zijn de grondwaterstanden in vergelijking met de gemeten waarden te hoog. De randstijghoogten zullen dus naar beneden bijgesteld moeten worden. Dit wordt ondersteund door het feit dat de grondwatertrappen zoals gekarteerd door Kleijer [1998] zijn gedaald ten opzichte van de Stiboka kartering van 1966, waar de randpotentialen op gebaseerd zijn.

Het is gebleken dat het rekenen met een tijdstap van een halve dag voor het grondwatersysteem een damping tot gevolg heeft van de afvoer. Het is hierdoor beter de rekentijdstap van het grondwatersysteem gelijk te stellen met de tijdstap van de meteorologische invoer (1d).

Voor de afvoeren is het van belang dat het systeem sneller reageert. Dit kan worden bereikt door bergingscoëfficiënt te verlagen, maar ook door de drainageweerstand van de waterlopen aan te passen. Verder is gebleken dat zowel de grondwaterstanden als de afvoeren gevoelig zijn voor het veranderen van de k-waarden van het watervoerende pakket (laag 3). Omdat er echter te weinig gegevens beschikbaar zijn over de ruimtelijke spreiding van de k-waarden worden deze niet meegenomen in de calibratie.

Er is besloten tot de volgende aanpassingen ten opzichte van referentiesituatie:

- afname van de bergingscoëfficiënt van de onverzadigde zone met 25%,
- de randpotentialen met 1 m omlaag,
- de drainageweerstand van het tertiaire systeem met 50% omlaag
- de tijdstap voor de grondwaterberekening op 1 d in plaats van 0.5 d.

Er is besloten om de drainageweerstand van oppervlaktewater systeem 2 niet te verhogen. Het bleek dat een verhoging van de waarde weliswaar een geringe verbetering in het afvoerproces tot gevolg heeft maar een sterke vermindering van de overeenkomst van de gesimuleerde grondwaterstanden met de gemeten waarden. Het model is gecalibreerd voor de periode 1992 tot en met 1994, vervolgens is het model gevalideerd voor de periode 1996 tot en met 1998. Door in de validatie ook het extreem natte jaar 1998 (1240 mm neerslag in De Bilt) mee te nemen kan worden bepaald hoe het model reageert op extreme hoeveelheden neerslag.

Tabel 6.5 RMSE per peilbuis voor de referentiesituatie, de calibratie en de validatie

Peilbuisnummer	referentie	calibratie	validatie
41BP0093_01	0.18	0.21	0.29
41BP0094_02	0.43	0.23	0.27
41BP0095_01	0.45	0.34	0.30
41DP0031_02	0.25	0.22	0.18
41EL0019_01	0.33	0.32	-
41EL0021_01	0.25 (1.53)	0.23 (1.52)	0.39 (1.75)
41EL0028_01	0.71	0.32	0.38
41EP0205_01	0.38	0.38	0.36
41EP0206_01	0.26	0.26	0.20
41EP0261_02	0.93	0.20	0.25
41GL0001_01	0.42	0.45	0.36
41GL0002_01	0.32	0.32	0.32
41GP0004_01	0.25	0.24	0.21

In tabel 6.5 is een overzicht weergegeven van de resultaten van de calibratie en validatie.

Het is duidelijk te zien dat de overeenkomst van grondwaterstanden voor een aantal peilbuizen sterk is verbeterd na de calibratie. Voor peilbuis 41EL00021 is de waarde van de RMSE weergegeven als er bij de reeks 1.5 meter wordt opgeteld. Tussen haakjes is de oorspronkelijke waarde weergegeven. Ook voor de validatie periode blijken de grondwaterstanden redelijk overeen te komen met de gemeten waarden. In de lagere delen van het onderzoeksgebied (noordwesten) neemt de RMSE ten opzichte van de calibratie echter iets toe.

Ten opzichte van de referentiesimulatie is de RMSE van de afvoeren na de calibratie met 1 l/s voor de piekafvoeren en 6 l/s voor de basisafvoer afgenomen. Verder zijn de verschillen tussen minimale afvoeren en pieken ook afgenomen. Het verschil tussen de maximale afvoer (piek op 28 januari 1994) is afgenomen van 318 l/s naar 225 l/s. Het verschil in de minimale afvoeren is afgenomen van -10 l/s naar -7 l/s. In tabel 6.6 is een overzicht weergegeven van de waarden voor de calibratie.

Tabel 6.6 Root Mean Square Error en de verschillen tussen gemiddelde, standaarddeviatie, minimum en maximum van berekende en gemeten afvoeren (l/s) voor de calibratie voor de jaren 1992 tot en met 1994

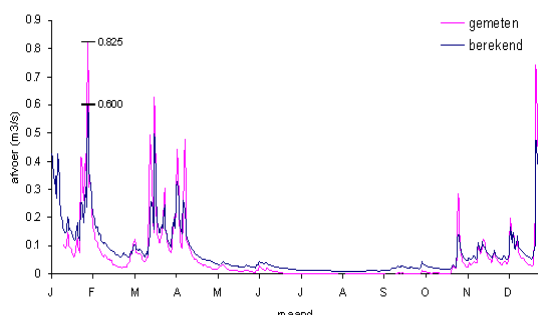
	RMSE	Verschil tussen gemeten en berekend:			
		gemiddelde	standaarddeviatie	minimum	maximum
> 100 l/s	76	40	57	-7	225
< 100 l/s	25	-16	-0.1		

De statistieken van de afvoeren voor de validatieperiode komen vrijwel overeen met die van de calibratieperiode. Wat echter opvalt, is het grote verschil tussen gemeten en berekende maximale piekafvoer, 479 l/s voor de validatie tegen 225 l/s voor de calibratie. Het grote verschil tussen gemeten en berekende afvoer op 29 oktober 1998 wordt veroorzaakt doordat door de extreme neerslag op deze dag een kade langs de Dambeek is doorgebroken. Vervolgens is er water uit de Dambeek de Stortelersbeek in gestroomd. De hierdoor sterk toegenomen afvoer is vervolgens geregistreerd door de meetstuw in de Stortelersbeek

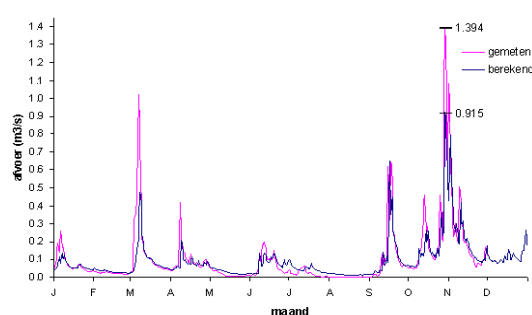
Tabel 6.7 Root Mean Square Error en de verschillen in tussen gemiddelde, standaarddeviatie, minimum en maximum van berekende en gemeten afvoeren (l/s) van de validatie voor de jaren 1996 tot en met 1998

	RMSE	Verschil tussen gemeten en berekend:			
		gemiddelde	standaarddeviatie	minimum	maximum
> 100 l/s	76	34	62	-6	479
< 100 l/s	25	-14	2		

In de figuren 6.4 en 6.5 zijn de afvoerverlopen van respectievelijk de jaren 1994 (calibratie) en 1998 (validatie) weergegeven. De gemeten en berekende afvoer komen redelijk goed overeen; de berekende pieken blijven echter te laag en de berekende lage afvoeren blijven te hoog. In figuur 6.5 is de sterke toename in afvoer op de Stortelersbeek op 29 oktober 1998 goed te zien



Figuur 6.4 Afvoerverloop voor 1994 van de gecalibreerde situatie in combinatie met de meetreeks



Figuur 6.5 Afvoerverloop voor 1998 van de validatieperiode in combinatie met de meetreeks

In tabel 6.8 en tabel 6.9 zijn respectievelijk de waterbalansen voor de calibratie- en de validatieperiode gegeven. De waterbalansen zijn opgesteld voor het stroomgebied van de Stortelersbeek en de Dambeek samen. In de waterbalansen zijn de onverzadigde zone, de verzadigde zone en het oppervlaktewater opgenomen. Zowel de calibratie- als de validatieperiode zijn vrij nat geweest. Er blijkt een substantiële hoeveelheid water als grondwater over de randen te stromen. Het modelgebied is dus zeker geen geïsoleerd gebied, wat verklaart waarom het model zo gevoelig is voor de randvoorwaarden. De term 'riolering' bestaat, zoals al eerder is aangegeven, uit neerslag welke op verharde oppervlakken valt en direct naar het oppervlaktewater wordt afgevoerd. De fout in de berekende waterbalans blijkt over een periode van 3 jaar beperkt te blijven tot ongeveer 1.5 mm en wordt vooral veroorzaakt door het oppervlaktewatersysteem.

Tabel 6.8 Waterbalans calibratieperiode (mm/jaar) over de periode 1992-1994

In		uit	
Neerslag	997.2	Interceptie	2.9
Bergingsafname	-20.1	Evapotranspiratie	489.5
Infiltratie	6.9	Oppervlakte water	417.6
Randflux	161.3	randflux	213.5
		riolering	20.4
totaal	1145.3	totaal	1143.9
		fout	1.4

Tabel 6.9 Waterbalans validatie in mm/jaar over de periode 1996-1998

In		uit	
Neerslag	907.8	Interceptie	3.3
Bergingsafname	-11.7	Evapotranspiratie	480.3
Infiltratie	7.3	Opp. water	352.6
Randflux	180.0	randflux	227.0
		riolering	18.6
totaal	1083.4	totaal	1081.8
		fout	1.6

In tabel 6.10 is een waterbalans weergegeven gemiddeld over 10 jaar. De waterbalansen termen zijn in deze balans verder uitgesplitst weergegeven. De fouten zijn ook in deze balans klein en duidelijk is te zien dat het oppervlaktewatersysteem de grootste fout veroorzaakt.

Tabel 6.10 Waterbalansen van a) de onverzadigde zone, b) de verzadigde zone en c) het oppervlaktewater, gemiddeld over de periode 1990-1999 in mm/jaar voor het stroomgebied van de Stortelersbeek en de Dambeek samen. Voor de berekening is gebruik gemaakt van meteorologische gegevens van station Aalten

a) Onverzadigde zone

In		uit	
Neerslag	902.3	Interceptie	2.9
Bergingsafname	-1.5	Evapotranspiratie	494.6
		Percolatie	384.3
		riolering	18.6
totaal	900.8	totaal	900.4
		fout	0.4

b) Verzadigde zone

In		uit	
Percolatie	384.3	Drainage sys2	194.2
Infiltratie	6.9	Drainage sys3	32.1
Randflux	135.4	Drainage sys4	40.5
Bergingsafname	-8.0	Drainage sys5	73.4
		Randflux	178.1
totaal	518.6	totaal	518.3
		fout	0.3

c) Oppervlaktewater

In		uit	
Drainage	340.2	Infiltratie	6.9
Bergingsafname	0.0	Oppervlakte water	331.7
totaal	340.2	totaal	338.6
		fout	1.6

6.2.5 Conclusies

Uit de gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de gesimuleerde grondwaterstanden gevoelig zijn voor de randstijghoogten en de k-waarde van het watervoerende pakket. De afvoeren blijken vrijwel alleen gevoelig te zijn voor de rekentijdstap van de grondwatermodule. Calibratie van het model is vrij moeilijk. Dit wordt veroorzaakt door de ongevoeligheid van het model voor de onderzochte parameters, gebrek aan gedetailleerde informatie over bijvoorbeeld de k-waarden van het watervoerende pakket en de complexe aard van het onderzoeksgebied. Naast onvolkomenheden in het model zijn ook de grote verschillen in gebiedsneerslag (tot bijna 100 mm op jaarbasis) tussen Aalten en Winterwijk aan te wijzen als oorzaak voor de verschillen tussen gemeten en berekende afvoerpieken. Verder bestaat er twijfel over de betrouwbaarheid van de afvoermetingen. In het verleden zijn er een aantal problemen met de meetstuw geweest en het is niet duidelijk of deze nog doorwerken in meetreeks. De uiteindelijke overeenkomst van de gesimuleerde en gemeten grondwaterstanden en afvoeren is redelijk, maar zou bij meer gedetailleerde gegevens en onderzoekstijd, kunnen verbeteren.

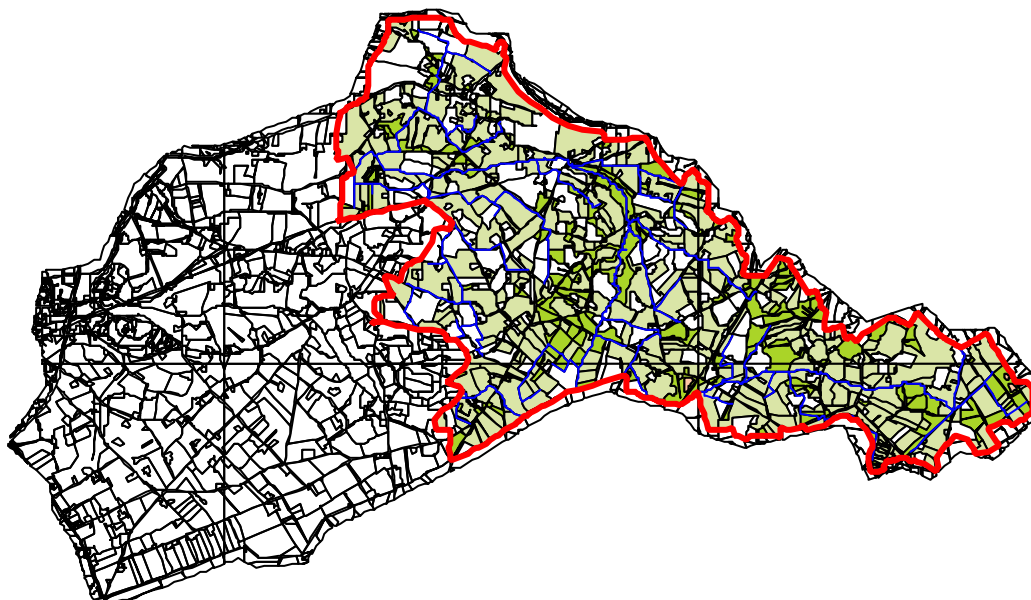
7 Actueel grond- en oppervlaktewaterregime

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de waterhuishoudkundige situatie van het huidige hydrologische systeem nader onderzocht. Voor de nadere analyse wordt het onderzoeksgebied teruggebracht tot ongeveer de helft van het oorspronkelijke SIMGRO modelgebied. Dit omdat de nadruk in dit onderzoek vooral ligt op het stroomgebied van de Stortelersbeek en de Dambeek (interessegebied). De reden hiervoor is dat er voor dit gebied de meeste gegevens beschikbaar zijn en omdat dit gebied de specifieke interesse heeft van het Waterschap Rijn en IJssel. In figuur 7.1 is het gebied weergegeven waarop een nadere analyse uitgevoerd zal worden.

Voor het onderzoek wordt onder meer gebruik gemaakt van de door Alterra en Arcadis ontwikkelde Waternoodprocedure [Van Bakel *et al*, 2003], waarbij wordt gekeken naar de waterhuishoudkundige situatie voor landbouw en natuur. In hoofdstuk 3 van dit rapport is de Waternood methode en de historische achtergronden ervan al besproken. Door gebruik te maken van de Waternoodprocedure is het mogelijk om gebiedsdekkende informatie te verkrijgen over droogte- en natschade voor landbouwgewassen, maar ook voor het bepalen van de invloed van de hydrologische omstandigheden op de verschillende natuurwaarden in het gebied.

Ook de afvoeren van de Stortelersbeek worden onderzocht. De nadruk zal vooral liggen op het onderzoeken van de kansen op voorkomen van zeer extreme afvoeren. Voor het bepalen van deze kansen zijn de twee in hoofdstuk 4 behandelde methoden gebruikt: de tijdreeksmethode met de Generalised Extreme Value (GEV) verdeling



Figuur 7.1 Interessegebied als onderdeel van het totale in SIMGRO gemodelleerde gebied

en de stochastenmethode [Kolen *et al*, 2001].

Voor de calibratie en validatie is gebruik gemaakt van meteorologische gegevens van station Aalten. Voor dit meteostation zijn echter geen reeksen voor klimaatverandering beschikbaar en ook de beschikbare neerslag-stochasten zijn op meteogegevens uit de Bilt gebaseerd. Als gevolg hiervan is er voor gekozen om de simulaties met meteogegevens van De Bilt uit te voeren. Aan het einde van het hoofdstuk zullen de resultaten worden geëvalueerd. De resultaten van het actuele grondwaterregime worden als referentie gebruikt voor de in het volgende hoofdstuk doorgerekende scenario's.

7.2 Grondwater

7.2.1 Inleiding

In deze paragraaf wordt de referentie situatie (voor de scenario studie) van het grondwatersysteem beschreven. De in deze paragraaf gepresenteerde resultaten zijn gebaseerd op een rekenperiode van 49 jaar (1951 tot en met 1999). Voor deze lange periode is gekozen, omdat er voor het bepalen van opbrengstdepressies langjarige gemiddelden (minimaal 8 jaar) voor GHG en GLG als invoer nodig zijn. [Projectgroep Waternood, 1998]. Het grondwatersysteem wordt beschreven met behulp van gebiedsdekkende informatie en aan de hand van een aantal representatieve punten. Naast een beschrijving van het grondwaterregime is in deze paragraaf ook bepaald in hoeverre het grondwaterregime van de referentiesituatie voldoet aan de eisen van landbouw en natuur.

7.2.2 Actueel grondwaterregime

In tabel 7.1 zijn waterbalansen gegeven voor de onverzadigde zone, de verzadigde zone en het oppervlaktewater. Om te bepalen wat het effect is van het toepassen van meteogegevens van station De Bilt in plaats van Aalten, is voor de waterbalans dezelfde periode (tien jaar) aangehouden als voor de waterbalans (tabel 6.10) in paragraaf 6.2.4.

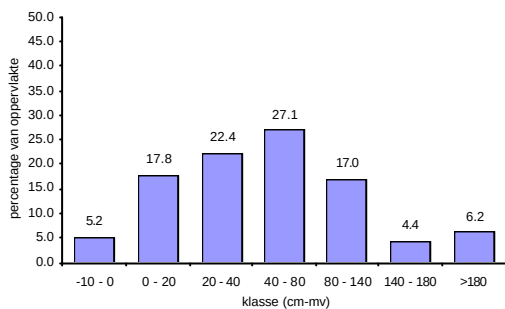
Gemiddeld over 10 jaar is er in Aalten wat meer neerslag gemeten dan in De Bilt (902.3 mm/jaar in Aalten tegen 878.6 mm/jaar in De Bilt). Ook de oppervlaktewaterafvoer is bij het toepassen van meteogegevens uit Aalten iets groter (331.7 mm/jaar tegen 317.2 mm/jaar). Globaal kan opgemerkt worden dat het gebied door het gebruik van meteogegevens uit De Bilt voor de periode 1990-1999 iets droger is. Hierin wijkt de neerslag in de waterbalansperiode af van het langjarige gemiddelde waarbij in de omgeving van Aalten juist minder neerslag valt dan in De Bilt. De stroming over de rand neemt iets toe ten opzichte van de waarde in tabel 6.10, en wordt veroorzaakt door de clip in het modelgebied. Het toepassen van meteogegevens uit De Bilt geeft een iets grotere fout voor de verzadigde zone. Het oppervlaktewater geeft een kleinere balansfout.

Tabel 7.1 Waterbalansen van a) de onverzadigde zone, b) de verzadigde zone en c) het oppervlaktewatersysteem, gemiddeld over de periode 1990-1999 in mm/jaar voor het interessegebied. Voor de berekening is gebruik gemaakt van meteogegevens van station De Bilt

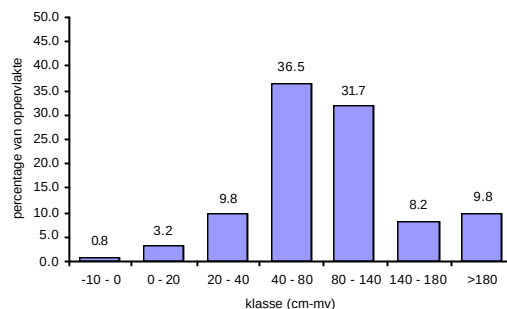
a) Onverzadigde zone			
In		uit	
Neerslag	878.6	Interceptie	2.9
Bergingsafname	-1.8	Evapotranspiratie	489.1
		Percolatie	366.5
		riolering	18.3
totaal	876.7	totaal	876.7
		fout	0.0
b) Verzadigde zone			
In		Uit	
Percolatie	366.5	Drainage sys2	188.0
Infiltratie	6.9	Drainage sys3	30.3
Randflux	164.3	Drainage sys4	39.1
Bergingsafname	-7.7	Drainage sys5	67.2
		Randflux	204.4
totaal	530.0	totaal	528.9
		fout	1.1
c) Oppervlaktewatersysteem			
In		Uit	
Drainage	324.5	Infiltratie	6.9
Bergingsafname	0	Oppervlakte water	317.2
totaal	324.5	totaal	324.1
		fout	0.4

In aanhangsel 5 is de ruimtelijke verdeling van de GHG, GVG, GG en GLG weergegeven. De weergegeven kaarten zijn gebaseerd op een rekenperiode van 49 jaar (1951-1999). Uit de kaarten komt de grote variatie in grondwaterstanden naar voren, met hogere grondwaterstanden op de plateaus en direct langs de beek en diepe

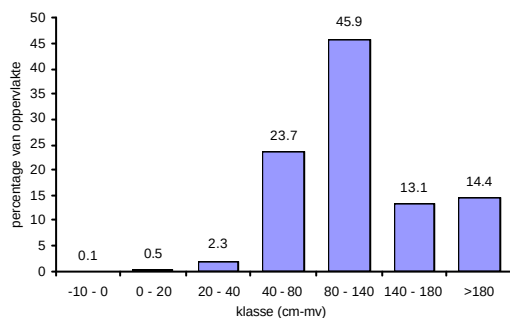
grondwaterstanden op de randen van de plateaus. In de figuren 7.2 tot en met 7.5 zijn de kaarten uit aanhangsel 5 samengevat. In de figuren zijn de grondwaterstanden in klassen uitgezet tegen het percentage van het interessegebied waarin de betreffende klasse voorkomt. Uit de figuren volgt dat het gebied vrij droog is, ongeveer 75% van het gebied heeft een gemiddelde grondwaterstand dieper dan 80 cm-mv. De gemiddeld laagste grondwaterstand is zelfs voor bijna 70% van het gebied dieper dan 140 cm-mv. Toch zijn er ook delen van het gebied waar de grondwaterstanden tot aan maaiveld komen. In 5% van het gebied ligt de GHG boven maaiveld. Dit komt voor in permanent natte delen van de beekdalen, maar met name op de plateaus waar ondiep keileem en Tertiaire klei voorkomt. Dit is goed te zien aan de GHG kaart in aanhangsel 5. De plaatsen waar het water aan of op



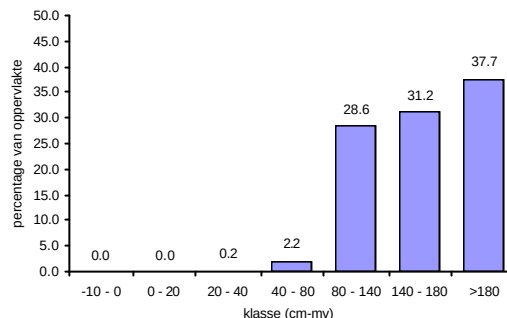
Figuur 7.2 Gemiddeld hoogste grondwaterstand



Figuur 7.3 Gemiddelde voorjaars grondwaterstand



Figuur 7.4 Gemiddelde grondwaterstand



Figuur 7.5 Gemiddelde laagste grondwaterstand

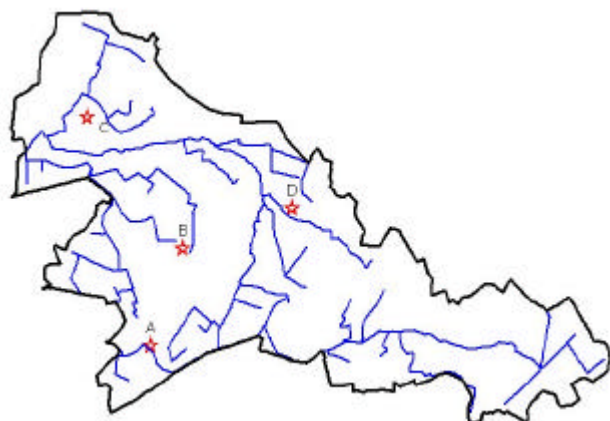
maaiveld komt liggen vrijwel allemaal op het Plateau van Haart en het Plateau van Woold.

In het bovenstaande is alleen gebiedsdekkend en gemiddeld over een lange periode gekeken naar de grondwaterstanden. Het is echter ook interessant de grondwaterstanden over de tijd te beschouwen. Juist de fluctuatie van de grondwaterstanden kan van belang zijn voor landbouwschade, maar ook voor het optreden van piekafvoeren. Het is echter niet mogelijk om voor het gehele interessegebied de grondwaterstanden uitgebreid in detail te analyseren.

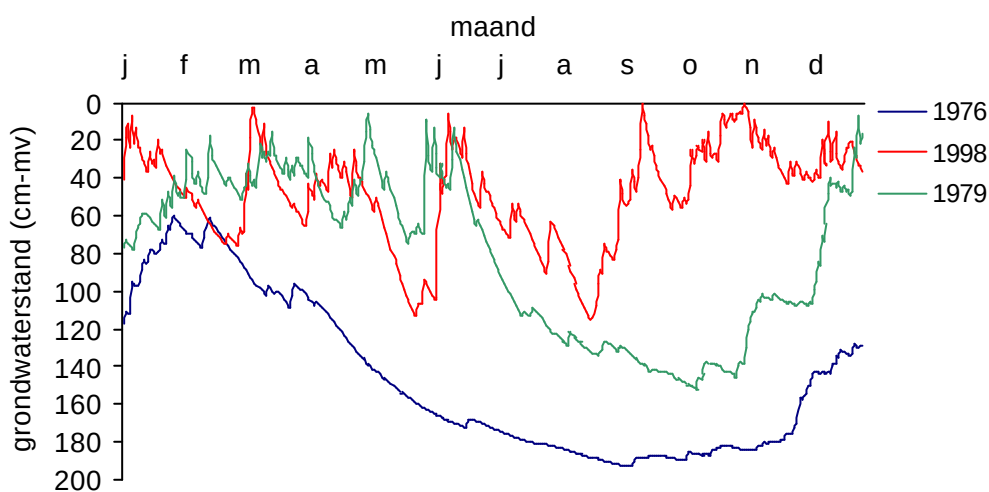
Om toch uitspraken te kunnen doen over grondwaterstandsverlopen in het interessegebied zijn een aantal punten geselecteerd. De punten zijn gekozen aan de hand van bodemtypen in het interessegebied; per meest voorkomend bodemtype is een representatief punt gekozen. Bij de selectie van de punten is verder gekeken naar de afstand tot sloten en de aanwezigheid van begreppeling of drainage. In tabel 7.2 zijn de bodemtypen en het oppervlakte als percentage van de totale oppervlakte van het interessegebied per onderzoekspunt weergegeven.

Tabel 7.2 Meest voorkomende bodemtypen en bijbehorende onderzoekspunten

Onderzoekspunt.	Bodemtype	Oppervlakte (% van totaal)
A	Veldpodzolgronden (Hn21)	47
B	Keileem (KX)	15
C	Beekeerdgronden (pZg23)	12
D	Hoge zwarte enkeerdgronden (zEZ23)	6



Figuur 7.6 Ligging onderzoekspunten grondwater



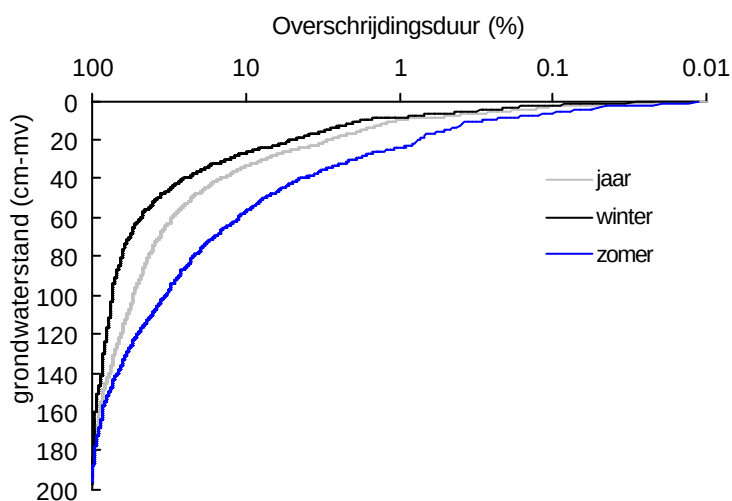
Figuur 7.7 Grondwaterstandsverlopen in de jaren 1976 (extreem droog), 1998 (extreem nat) en 1979 (gemiddeld) voor onderzoekspunt A (veldpodzolgrond)

I
n figuur 7.6 is een overzicht weergegeven van de ligging van de onderzoekspunten in het interessegebied. Voor elk van de vier punten is een duurlijn opgesteld, verder is per punt het verloop van de grondwaterstand geanalyseerd voor de volgende jaren: 1998 (extreem nat 1238 mm neerslag), 1976 (extreem droog 531 mm neerslag) en 1979 (gemiddeld 873 mm neerslag). De grondwaterstandsverlopen en duurlijnen per onderzoekspunt zijn opgenomen in aanhangsel 7. Als voorbeeld zijn in figuur 7.7 de grondwaterstandsverlopen voor onderzoekspunt A (veldpodzolgrond) weergegeven. Voor het gemiddelde jaar 1979 is goed het verschil te zien tussen de seizoenen.

Vanaf juni begint de grondwaterstand uit te zakken naar ongeveer 150 cm-mv begin oktober. De grondwaterstand komt in het jaar 1979 alleen in het voorjaar boven de 20 cm-mv uit. Het jaar 1998 vertoont een totaal ander beeld, gedurende het gehele jaar zijn er perioden waarin het water bijna aan maaiveld komt. In de zomer zakt de grondwaterstand niet verder uit dan 113 cm-mv, vooral de maand juni en het najaar zijn zeer nat. Het zeer droge jaar 1976 vertoont een totaal ander beeld, met diepe grondwaterstanden over het gehele jaar (tot 193 cm-mv eind augustus).

In figuur 7.8 zijn duurlijnen weergegeven van de grondwaterstanden ter plaatse van onderzoekspunt A. Er is onderscheid gemaakt tussen de winterperiode (september-maart), de zomerperiode (april-augustus) en het gehele jaar. De duurlijnen (vooral die van de winter) vertonen een knik bij een grondwaterstand tussen ongeveer 60 en 40 cm-mv. Deze knik wordt veroorzaakt door het feit dat bij deze grondwaterstanden ook de kleinere sloten water gaan afvoeren. Het verschijnsel van de knik in de duurlijn is vooral goed te zien in figuur A7.4 in aanhangsel 7. In de figuur zijn de duurlijnen van keileem weergegeven.

Voor de overige drie onderzoekspunten (zie aanhangsel 7) zijn eveneens de grondwaterstandsverlopen voor de jaren 1976, 1979 en 1998 onderzocht. In de figuren in het aanhangsel komen de verschillen in bodemtype en morfologie tussen de onderzoekspunten duidelijk naar voren. Onderzoekspunt C (beekerdgrond) is bijvoorbeeld gelegen in een laag gedeelte van het gebied en kent hoge grondwaterstanden. Tevens is te zien dat de grondwaterstanden in dit punt snel fluctueren. Onderzoekspunt D is gelegen op een hoge es. Deze essen kunnen tot enkele meters boven het omliggende land uitkomen. De grondwaterstanden in dit onderzoekspunt zijn dan ook zeer diep, gemiddeld rond de 3 m-mv. Door de diepe



Figuur 7.8 Duurlijnen van de grondwaterstand in onderzoekspunt A (veldpodzolgrond)

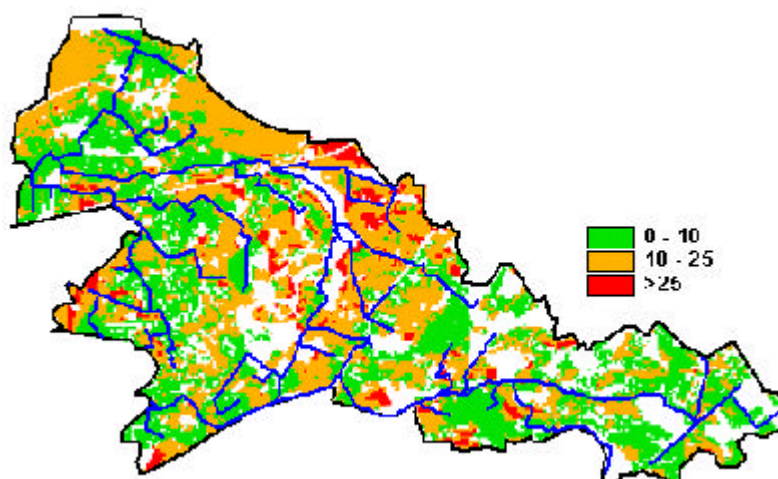
grondwaterstand is de bergingscapaciteit in de bodem ook veel groter en reageert de grondwaterstand zeer traag op neerslag. Slechts de zeer natte periode oktober-november 1998 geeft een duidelijke verhoging van de grondwaterstand.

De grondwaterstanden in onderzoekspunt B (keileem) zijn vooral in de winterperiode ondiep, ongeveer 0.3 m-mv, bij langdurige droge perioden kan de grondwaterstand echter uitzakken tot 2.6 m-mv (1976). Ook kent de grondwaterstand een sterk fluctuerend verloop. Door de lage doorlatendheid van de keileem reageert de grondwaterstand in de dunne bovenste laag dekzand zeer snel op neerslag en komen de grondwaterstanden snel aan maaiveld. Om landbouw te kunnen bedrijven is hierdoor begreppeling nodig. Deze greppels (en kleine slootjes) zijn terug te zien in de duurlijnen waar een scherpe knik in voorkomt. Door de hoge ligging op de plateaus en de geringe capaciteit van de deklaag om water vast te houden zullen de grondwaterstanden in droge perioden vrij sterk uitzakken. In de onverzadigde zone wordt gerekend met de bergingscoëfficiënt van dekzand. Als de grondwaterstand tot in de keileemlaag zakt, verandert echter de bergingscapaciteit (neemt af). Dit effect is niet meegenomen in deze studie en kan mogelijk invloed hebben op de grondwaterstanden en de lage afvoeren.

7.2.3 Opbrengstdepressies en doelrealisatie landbouw

Droogteschade

Aan de hand van de in aanhangsel 5 weergegeven GHG en GLG kaarten kunnen de opbrengstdepressies worden vastgesteld. In de methode Waternood wordt hiervoor gebruik gemaakt van de HELP-tabel waarin een relatie is gelegd tussen GHG / GLG combinaties en schade door droogte en wateroverlast. De methode is beperkt tot bouwland en grasland. Het voorkomen van het bouwland en grasland wordt bepaald met behulp van een LGN 3 kaart. In figuur 7.9 is de langjarig gemiddelde droogteschade in procenten weergegeven. De witte vlakken zijn andere functies dan grasland of bouwland. De waarden in de figuur zijn in een drietal klassen ingedeeld. Er is voor het indelen in klassen gekozen om duidelijker beeld te krijgen van de ruimtelijke verdeling van de schade over het gebied. De waarden in figuur 7.9 zijn berekend zonder rekening te houden met beregning. Beregning vanuit het grondwater is in het gebied vrijwel niet mogelijk en tevens niet toegestaan.



Figuur 7.9 Gemiddelde droogteschade landbouw (%)

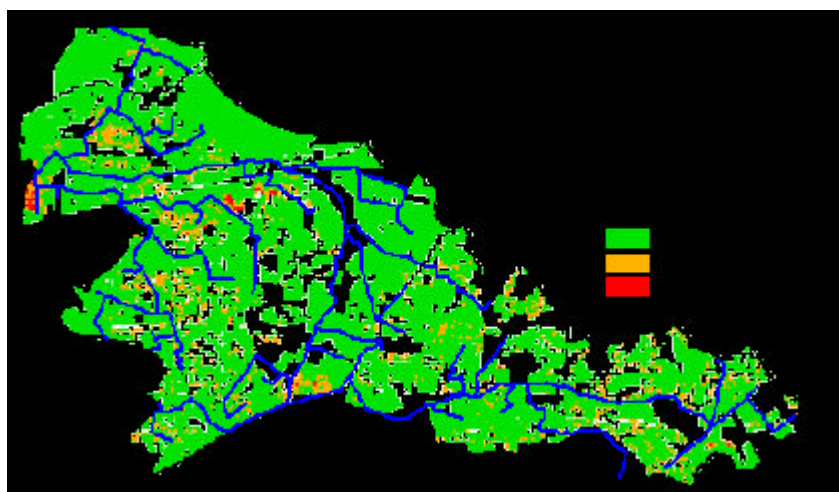
Uit de figuur blijkt dat de grootste droogteschade optreedt op de dekzandruggen aan de randen van de plateaus, globaal ten oosten en westen van de Stortelersbeek. Deze locaties zijn in een hydrologisch onderzoek van Hanhart Consult eveneens aangemerkt als verdroogt [Hanhart, 2001]. In tabel 7.3 is het aantal hectare per klasse weergegeven, tevens is in de tabel de schade in euro's per hectare weergegeven. Uit de tabel blijkt dat de droogteschade in het grootste deel van het interessegebied beneden de 25% blijft. Bijna de helft van het interessegebied heeft echter een schade groter dan honderd euro per hectare, oplopend tot een maximum van 800 tot 900 euro per hectare.

Tabel 7.3 Gemiddelde droogteschade in het interessegebied in procenten en in € / ha en het aantal hectare per klasse

Schade in %		Schade in € / ha	
Klasse	Aantal ha	Klasse	Aantal ha
0-10%	533.1	0-100	626.5
10-25%	545.3	100-200	381.5
>25%	72.2	200-300	90.3
		300-400	20.6
		400-500	12.1
		500-600	14.9
		600-700	1.6
		700-800	3.1
		800-900	0.1

Natschade

In figuur 7.10 is de natschade (%) voor de referentie situatie weergegeven; als legenda-indeling zijn dezelfde klassen gebruikt als voor de droogteschade. Duidelijk is dat natschade slechts zeer beperkt optreedt in het gebied. Ernstige natschade komt vrijwel alleen voor in zeer lage delen langs de beken en in het Blekkinkveen.



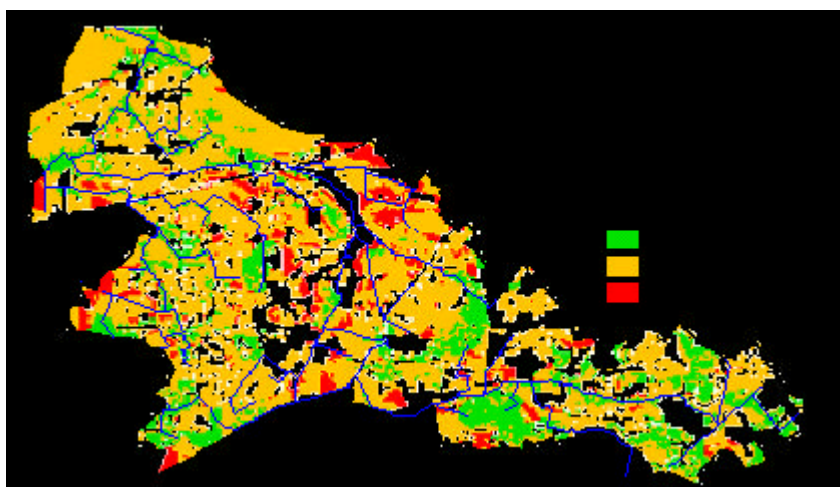
Figuur 7.10 Natschade landbouw (%)

Ook uit tabel 7.4 blijkt dat natschade vrijwel niet optreedt in het interessegebied. Vrijwel het gehele gebied heeft minder dan 10% schade. Slechts een zeer beperkt deel van het gebied heeft een natschade groter dan 100 euro per hectare.

Tabel 7.4 Natschade in het interessegebied in procenten en in € / ha en het aantal hectare per klasse

Schade in %		Schade in € / ha	
Klasse	Aantal ha	Klasse	Aantal ha
0-10%	1043.2	0-100	1078.3
10-25%	103.0	100-200	54.6
>25%	4.7	200-300	5.8
		300-400	2.9
		400-500	2.7
		500-600	2.6
		600-700	0.8
		700-800	1.2
		800-900	0.8

Voor het bepalen van de mate waarin het watersysteem voldoet aan de eisen van de functies, wordt de doelrealisatie opgesteld. Om de doelrealisatie voor landbouw te berekenen worden de droogte en natschade opgeteld en van 100 afgetrokken. Globaal kan gesteld worden dat bij een doelrealisatie van 90 tot 100% landbouw zonder beperkingen mogelijk is. Als de doelrealisatie kleiner is dan 75%, wordt een gezonde bedrijfsvoering erg moeilijk [Projectgroep Waterlood, 1998].

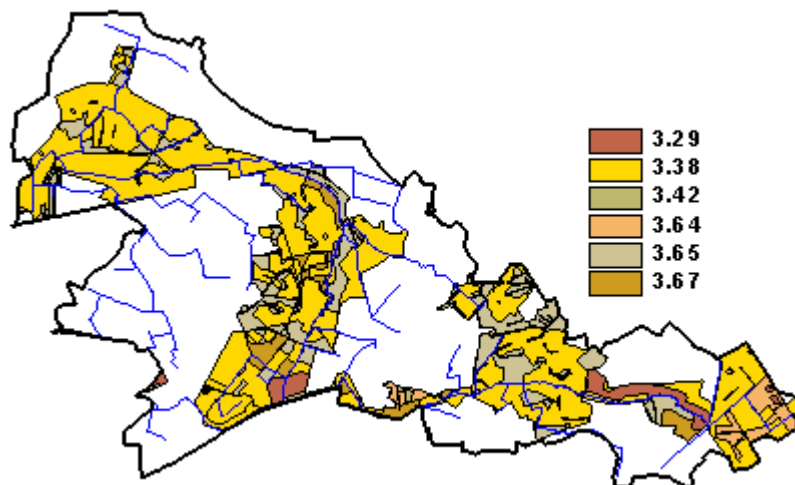


Figuur 7.11 Doelrealisatie landbouw

7.2.4 Doelrealisatie terreestische natuur

Zoals al in paragraaf 3.2 is aangegeven wordt de doelrealisatie voor terreestische natuur op een andere manier berekend dan die voor landbouw. Uitgangspunt bij de bepaling van de doelrealisatie terreestische natuur is een natuurdoeltypenkaart. Op deze kaart staan vlakken aangegeven met een bepaald natuurdoeltype. Voor het onderzoek is gebruik gemaakt van de natuurdoeltypen indeling 2001 van het EC-

LNV [Bal *et al*, 2001]. Per natuurdoeltype wordt een doelrealisatiekader opgesteld (zie paragraaf 3.2). Aan de hand van dit doelrealisatiekader kan vervolgens worden getoetst in hoeverre het grondwaterregime voldoet aan de eisen van de betreffende natuurdoeltypen. Voor het interessegebied vormde het vaststellen van de natuurdoeltypen een probleem. Er zijn alleen kaarten beschikbaar met per vlak meerdere natuurdoeltypen in plaats van één natuurdoeltype per vlak. Uiteindelijk is besloten om per vlak het meest voorkomende natuurdoeltype te kiezen, waarbij met een GIS-bewerking (op basis van de topografische kaart) onderscheid is gemaakt in bos, grasland en heide. In figuur 7.12 zijn de gebruikte natuurdoeltypen weergegeven. De omschrijvingen van de gebruikte code's staan in tabel 7.5 weergegeven.



Figuur 7.12 Natuurdoeltypenkaart Stortelersbeek

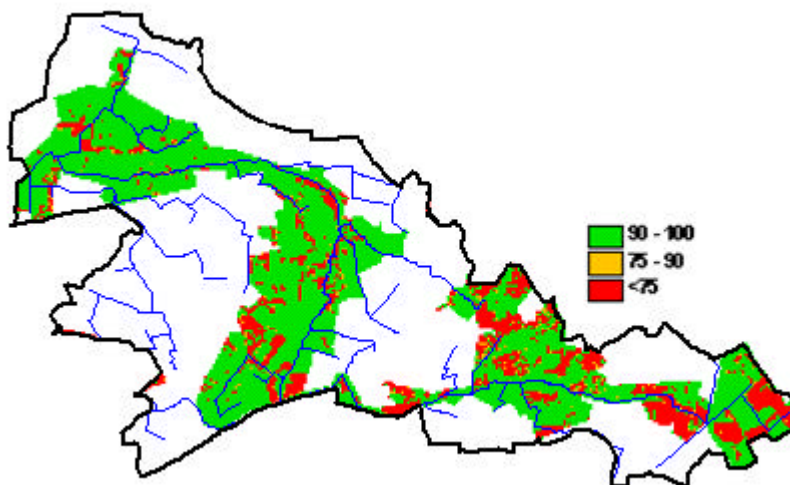
Tabel 7.5 Gebruikte natuurdoeltypen en bijbehorende doelrealisatiekaders. A1, B1, B2 en A2 zijn de vormparameters van de doelrealisatiefuncties (zie paragraaf 3.2)

Code	Omschrijving	GVG (cm-mv)				Droogte stress (d)			
		A1	B1	B2	A2	A1	B1	B2	A2
3.29	Nat schraal grasland	-20	-10	33	50			10	25
3.38	Bloemrijk grasland van het zand- en veengebied	15	25						
3.42	Natte heide	-20	-10	33	40			10	25
3.64	Bos van arme zandgronden	50	90			10	20		
3.65	Eiken- en beukenbos van lemige zandgronden	45	90			1	10		
3.67	Bos van bron en beek	-15	-8	60	80			5	20

In tabel 7.5 staan alleen de variabelen: gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand en de droogtestress weergegeven. De gemiddeld laagste grondwaterstand en kwelafhankelijkheid ontbreken. Voor de gebruikte natuurdoeltypen zijn deze twee omgevingsvariabelen niet maatgevend en kunnen weggelaten worden [Runhaar & Hennekens, juli 2002]. Op basis van de doelrealisatiekaders uit de tabel is het grondwaterregime van de referentie situatie getoetst. De resultaten staan in figuur 7.13 weergegeven.

Uit figuur 7.13 blijkt dat het grondwaterregime van de referentiesituatie in het grootste deel van het gebied voldoet aan de eisen van de betreffende

natuurdoeltypen. Van de oppervlakte van het interessegebied waarvoor natuurdoeltypen zijn opgesteld valt 76% binnen doelrealisatieklasse 90-100%, slechts 2% valt binnen doelrealisatieklasse 75- 90% en de overige 22% van het oppervlakte heeft een doelrealisatie kleiner dan 75%.



Figuur 7.13 Doelrealisatie natuur

Echter, door de grove natuurdoeltypen-indeling op basis van de meest voorkomende typen zijn de minder voorkomende en dus ook vaak meer kritische natuurdoeltypen weggelaten. Het beeld zoals geschetst in figuur 7.13 is dus te rooskleurig. Voor gebieden waar wel een meer 'kritisch' natuurdoeltype (bijvoorbeeld natuurdoeltype 3.29, 3.42 en 3.67) is aangegeven is de doelrealisatie laag. Voorbeelden van deze gebieden zijn enkele plaatsen in het gebied waar historisch gezien natte vegetaties voorkomen zoals langs de Stortelersbeek (Bos van bron en beek), het Blekkinkveen (Nat schraal grasland) en enkele kleine oorspronkelijk natte heideveldjes. Het grondwaterregime van de referentie situatie blijkt daar niet te voldoen aan de eisen van de natuurdoeltypen.

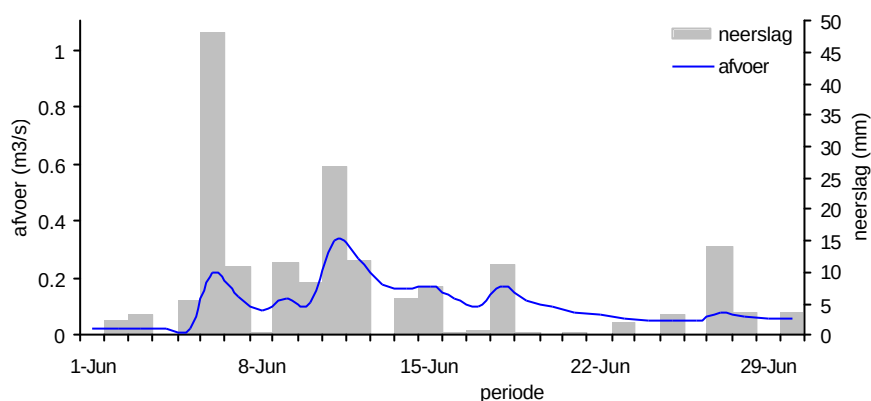
7.3 Analyse afvoeren Stortelersbeek

7.3.1 Inleiding

Om in een later stadium uitspraken te kunnen doen over de effecten van opgestelde scenario's moet eerst de referentiesituatie vastliggen. Voor het grondwatersysteem is dit al in de vorige paragraaf gebeurd. In deze paragraaf wordt de analyse van de beekafvoeren en de daaruit volgende resultaten behandeld. Allereerst zal er een algemene analyse van de afvoeren plaatsvinden. Vervolgens worden twee methoden behandeld om uitspraken te kunnen doen over de kans op voorkomen van zeer extreem hoge afvoeren. Ten slotte worden beide methoden met elkaar vergeleken en uitspraken gedaan over het voorkomen van extreem hoge afvoeren op de Stortelersbeek. De afvoeren zijn bepaald bij de meetstuw in de Stortelersbeek. In het kader van dit onderzoek was het niet mogelijk ook de lage afvoeren in beschouwing te nemen.

7.3.2 Algemene analyse afvoeren

De afvoer van de Stortelersbeek blijkt over de onderzochte periode van 1951 tot 1999 sterk te variëren. De maximale berekende afvoer bedraagt $1.018 \text{ m}^3/\text{s}$ en de minimale afvoer bedraagt $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$. Afvoeren hoger dan $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ komen alleen in de winter periode voor (lage verdamping, hoge grondwaterstanden). De gemiddelde afvoer over de onderzochte periode bedraagt $0.046 \text{ m}^3/\text{s}$. Hoge afvoeren zoals de maximale afvoer van $1.018 \text{ m}^3/\text{s}$ wijken dus sterk af van het gemiddelde. De sterke variatie in afvoeren wordt veroorzaakt door de snelle reactie van het hydrologische systeem op neerslag.

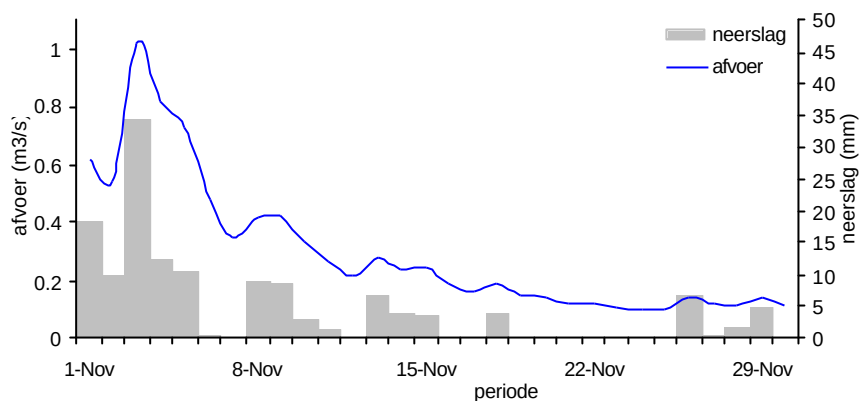


Figuur 7.14 Verloop van afvoer (m^3/s) en neerslag (mm) over de maand juni 1998

In de figuren 7.14 en 7.15 zijn twee afvoerreeksen weergegeven. Het gaat hier om een tweetal maanden uit het zeer natte jaar 1998. In figuur 7.14 is de afvoerreeks voor de maand juni weergegeven en in figuur 7.15 de afvoerreeks voor de maand november. In beide perioden zijn grote hoeveelheden neerslag gevallen: in juni 181 mm en in november 140 mm.

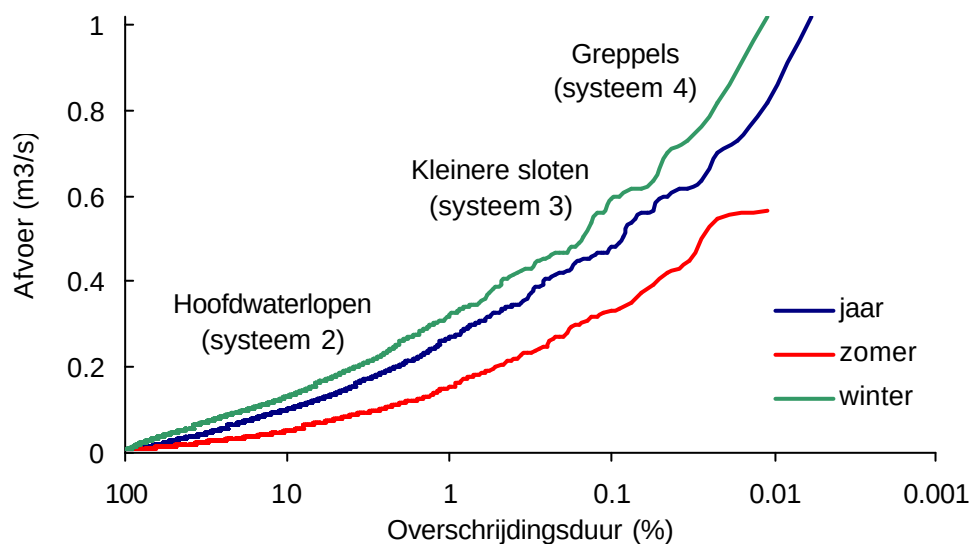
Opvallend verschil tussen beide figuren is de reactie van de afvoer op een neerslagpiek. De piekneerslag van 6 juni (48.3 mm) heeft een afvoerpiek tot gevolg van slechts $0.215 \text{ m}^3/\text{s}$ (3.47 mm/d), maar de neerslagpiek van 3 november (34.5 mm) heeft een afvoerpiek van $1.018 \text{ m}^3/\text{s}$ (16.43 mm/d) tot gevolg. Voor de verschillen in reactie zijn meerdere oorzaken aan te wijzen. Allereerst is de verdamping in de maand juni veel hoger dan in de maand november, 3.23 mm op 6 juni tegen 0.15 mm op 3 november. Belangrijker is echter de voorgeschiedenis. De mate waarin een afvoerpiek optreedt, is sterk afhankelijk van de hoeveelheid berging in het systeem. De figuren 7.14 en 7.15 illustreren dit. Voorafgaand aan de hoge neerslag op 6 juni ging een vrij droge maand mei met een neerslag van 45 mm/maand (normaal 61 mm). Door de voorafgaande droge periode kon een groot deel van de neerslag in de bodem en ondergrond worden geborgen, met als gevolg een relatief lage piekafvoer. Voorafgaand aan de piekneerslag op 3 november ging echter de zeer natte maand oktober met een neerslag van 179 mm/maand (normaal 72 mm). Berging was dus vrijwel niet mogelijk, met als gevolg een forse afvoerpiek. De verschillen in voorgeschiedenis zijn goed te zien in de grondwaterstandverlopen in subparagraaf 7.2.2 en aanhangsel 7. In elk van de figuren is te zien dat de

grondwaterstand voor 6 juni 1998 vrij laag was en voor 3 november de grondwaterstand vrijwel aan maaiveld stond.



Figuur 7.15 Verloop van afvoer (m^3/s) en neerslag (mm) over de maand november 1998

In figuur 7.16 zijn de berekende dagafvoeren voor de periode 1951-1999 uitgezet tegen de overschrijdingsduur in procenten. In de figuur zijn drie duurlijnen weergegeven, één voor de zomerperiode, één voor de winterperiode en één voor het gehele jaar. Hoge afvoeren komen slechts zelden voor. Uit de duurlijn voor het gehele jaar blijkt dat een afvoer van $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ slechts door 1% van de tijd wordt overschreden. Voor de zomerperiode ligt deze waarde lager (ongeveer 0.25%) en voor de winterperiode hoger (ongeveer 2.2%).



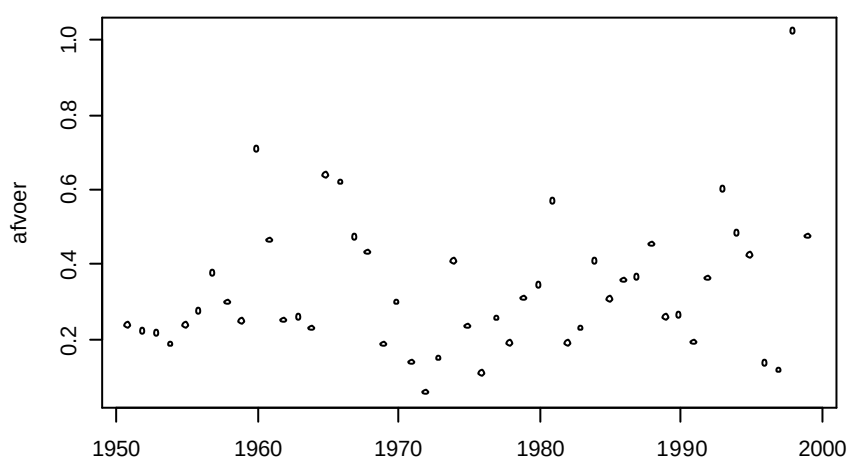
Figuur 7.16 Overschrijdingduurlijnen van de dagafvoeren van de Stortelersbeek voor de periode 1951-1999

In de overschrijdingsduurlijnen zijn een aantal knikken te ontdekken. Het voorkomen van knikken in de overschrijdingsduurlijn van de afvoer is al eerder beschreven door Querner [2003]. De plaats van de knikken is afhankelijk van de drainagekarakteristiek (de diepte van de waterlopen). Doordat er bovenstrooms van

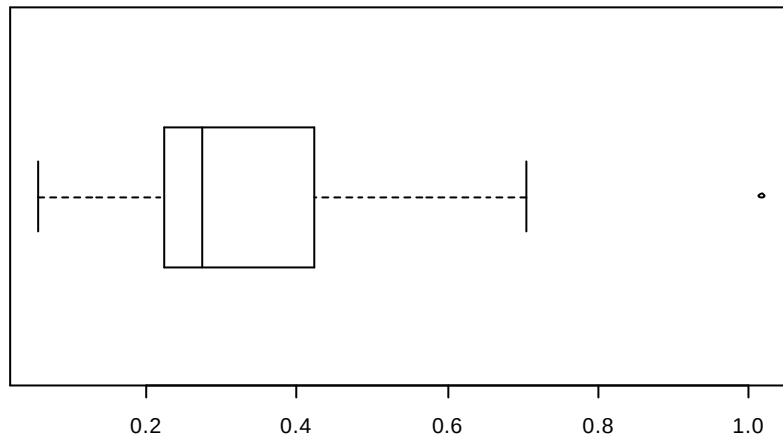
het meetpunt verscheidene deelstroomgebieden samenkomen, dempen de knikken wat uit en zijn de precieze plaatsen van de knikken wat minder duidelijk dan door Querner beschreven. Globaal zijn er drie systemen te ontdekken: de vrijwel altijd watervoerende hoofdwaterlopen, de periodiek droogvallende kleinere sloten en de greppels. Een extreme piekafvoer treedt op als alle drie de systemen bijdragen aan de afvoer. De greppels (systeem 4) blijken in de zomer vrijwel nooit watervoerend zijn (duurlijn van de zomer gaat horizontaal lopen).

7.3.3 Analyse extreme afvoeren met de tijdreeksmethode

Zoals in paragraaf 4.2 is besproken, is een belangrijke vraag binnen de hydrologie hoe vaak een bepaalde extreme afvoer voorkomt. In deze subparagraaf wordt met behulp van een GEV (Generalised Extreme Value) verdeling een inschatting gemaakt van de herhalings tijden van extreem hoge afvoeren van de Stortelersbeek. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van het statistische programma R met evd package. Het gebruikte script is in aanhangsel 8 opgenomen. Als basis zijn de berekende dagafvoeren over de periode 1951-1999 gebruikt. Uit deze reeks zijn vervolgens de jaarmaxima geselecteerd. In figuur 7.17 zijn deze jaarmaxima in een scatterplot weergegeven.



Figuur 7.17 Scatterplot jaarmaxima afvoer van de Stortelersbeek over de periode 1951-1999

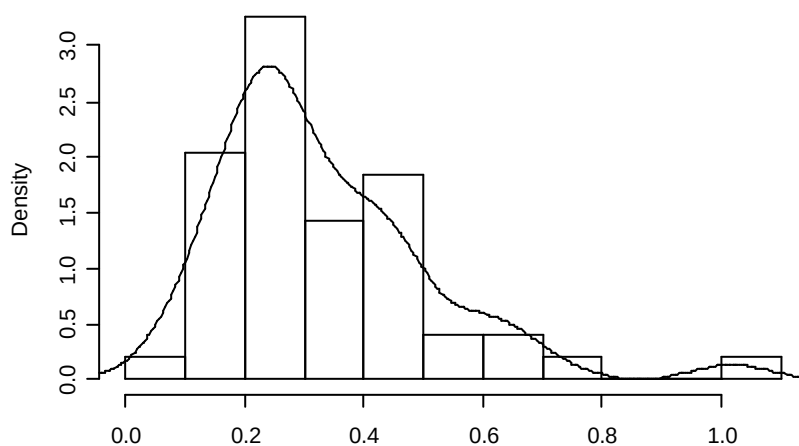


Figuur 7.18 Box-plot jaarmaxima afvoeren van de Stortelersbeek over de periode 1951-1999. Langs de horizontale as staan de jaarmaxima van de afvoer in m^3/s weergegeven.

De aanname van stationariteit en onderlinge onafhankelijkheid van de data [Stephenson, 2003] lijken gezien de plot in figuur 7.17 houdbaar. Het is dus toegestaan om een GEV model te gebruiken. Alvorens verder te gaan met het analyseren van de jaarmaxima is het goed om de verdeling van de jaarmaxima te bepalen. Met behulp van een box-plot zijn in één oogopslag enkele karakteristieken van de verdeling duidelijk. In figuur 7.18 is een box-plot weergegeven van de jaarlijkse maximale afvoeren. In de box-plot zijn de ligging van de middelste 50% van de waarnemingen, de mediaan (verticale lijn in de box), de verdeling van de overige maxima en de uitbijters opgenomen [Buijs, 1997]. Uit de box-plot blijkt dat de verdeling van de maxima scheef is naar rechts (rechter gestippelde lijn is langer dan linker gestippelde lijn en mediaan ligt links van het midden van de box). Verder is te zien dat de afvoer van 3 november 1998 ($1.018 \text{ m}^3/\text{s}$) is aan te merken als een uitbijter

Een andere manier om de verdeling van de jaarmaxima uit te beelden is met behulp van een histogram. In figuur 7.19 is deze weergegeven met een klassebreedte van

Histogram of stohb



Figuur 7.19 Histogram en kansdichtheidsfunctie (kernel density) van jaarmaxima afvoeren van de Stortelersbeek over periode 1951-1999. Op de horizontale as staan de jaarmaxima van de afvoer in m^3/s weergegeven.

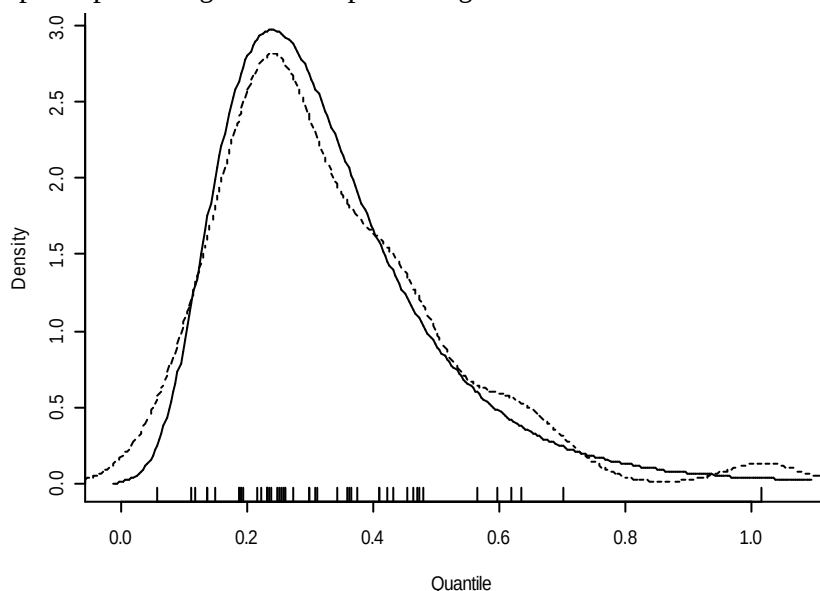
$0.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Te zien is dat het grootste deel van de jaarmaxima ligt tussen 0.1 en 0.5 m^3/s . Net als uit de box-plot blijkt ook uit het histogram dat de verdeling scheef is

naar rechts. Naast het histogram is in de figuur tevens de kansdichtheidsfunctie (kernel density) weergegeven. Met behulp van de maximum likelihood methode is een GEV verdelingsfunctie op de gegevensreeks gefit (zie paragraaf 4.2). In tabel 7.6 staan de gefitte parameters van de GEV verdelingsfunctie weergegeven. Gezien het feit dat de vorm parameter groter is dan 0, is de gefitte verdeling een Fréchet verdeling.

Tabel 7.6 Gefitte parameters GEV verdelingsfunctie en bijbehorende standaard errors

Parameter	Gefitte waarde	Standard errors
Locatie	0.24873	0.01993
Schaal	0.12389	0.01490
Vorm	0.08186	0.10765

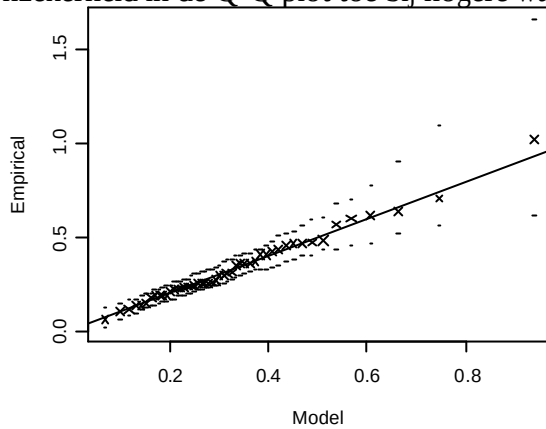
Op het oog heeft het GEV model een goede fit, de gefitte kansdichtheidsfunctie ligt dicht bij de kernel kansdichtheidsfunctie (zie figuur 7.20). Om beter te kunnen bepalen of de fit voldoende is wordt gebruik gemaakt van Q-Q (Quantile) en P-P (probability) plots. In een Q-Q-plot worden de kwantielen van de dataset met gesimuleerde maximale jaarafvoeren tegen de kwantielen van een bekende verdeling (hier de gefitte GEV verdeling) uitgezet. Een kwantiel is de waarde waaronder een bepaald percentage van data punten ligt.



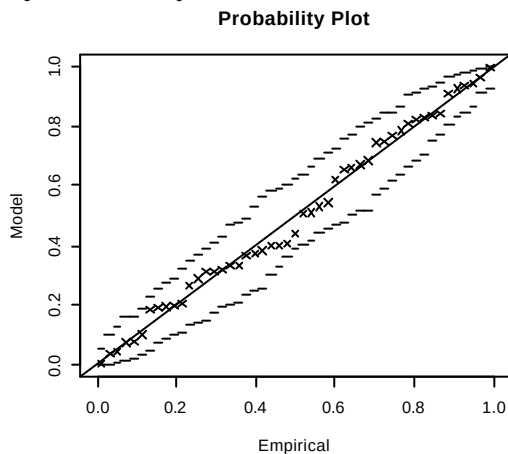
Figuur 7.20 Gefitte GEV kansdichtheidsfunctie (doorgetrokken lijn) in combinatie met de kernel kansdichtheidsfunctie (gestippelde lijn). Langs de x-as staan de jaarmaxima geplot

De fit van de GEV verdeling is goed als de punten in de Q-Q plot op een rechte lijn liggen en niet ver afwijken van de diagonaal. In de P-P plot worden de waarden van de empirisch bepaalde verdelingsfunctie uitgezet tegen de waarden van de gefitte GEV verdelingsfunctie. Voor de P-P plot geldt eveneens dat de punten vrijwel op een rechte lijn moeten liggen. Als zowel de Q-Q plot als de P-P plot voldoen aan de voorwaarden zijn de gekozen verdelingsfunctie en de gefitte parameters correct [Reiss & Thomas, 1997]. In figuur 7.21 en 7.22 staan respectievelijk de Q-Q en P-P plot weergegeven. In de figuren staan tevens de 95% betrouwbaarheidsintervallen (per punt) weergegeven in de vorm van horizontale streepjes.

Zowel de punten op de Q-Q plot als die van de P-P plot wijken weinig af van de diagonale, rechte lijn en vallen binnen de betrouwbaarheidsintervallen. Gezien het feit dat er maar weinig waarnemingen zijn van zeer hoge afvoeren, neemt de onzekerheid in de Q-Q plot toe bij hogere waarden voor de maximale jaarafvoeren.

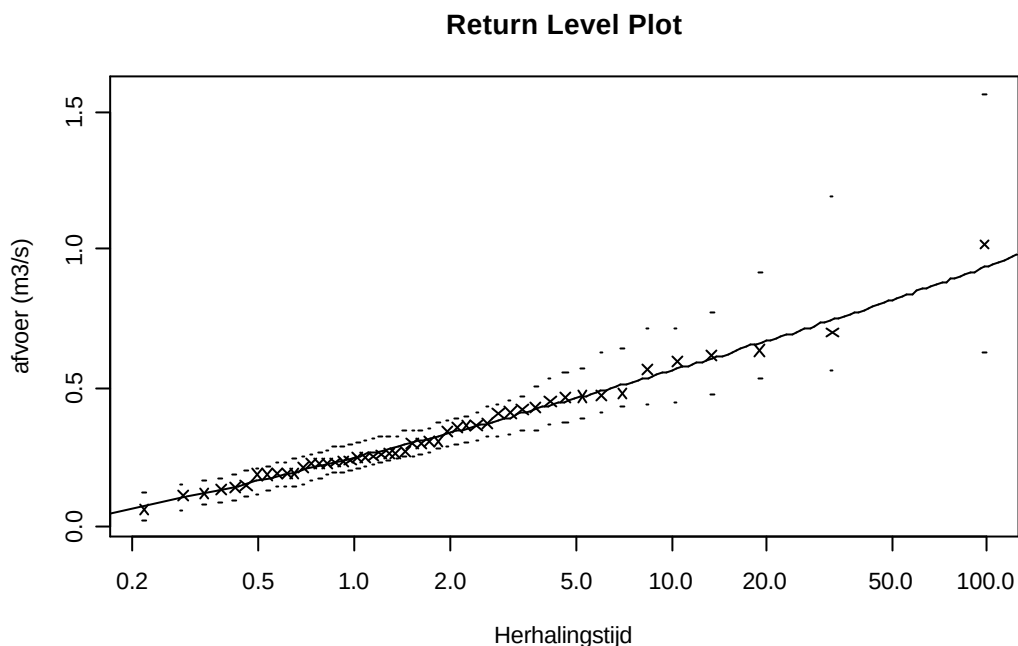


Figuur 7.21 Q-Q plot



Figuur 7.22 P-P plot

Met behulp van de gefitte GEV verdelingsfunctie kan een plot met afvoeren en bijbehorende herhalingstijden gemaakt worden. In figuur 7.23 is deze plot weergegeven. De doorgetrokken lijn geeft de waarden van de gefitte GEV verdelingsfunctie weer. De kruisjes in de plot zijn de waarden van de dataset (met maximale jaarafvoeren) gebruikt om de GEV verdelingsfunctie op te fitten. De herhalingstijden behorende bij de kruisjes zijn bepaald aan de hand van de kernel kansdichtheidsverdeling. Dat het laatste kruisje een herhalingstijd van 100 jaar (in plaats van 50 jaar) heeft gekregen wordt veroorzaakt door de gebruikelijke techniek van plotting position. Hiermee wordt voor het laatste kruisje de bandbreedte van de herhalingstijd voor dit laatste kruisje weergegeven.



Figuur 7.23 Afvoeren Stortelersbeek met bijbehorende herhalingstijden in jaren. De waarden op de x-as zijn geplot op een logaritmische schaal

Hoe dichter de doorgetrokken lijn bij de punten ligt hoe beter de fit van de verdelingsfunctie [Stephenson, 2003]. Het blijkt dat de fit vrij goed is. Ook hier is weer te zien dat de onzekerheid groter wordt bij hogere afvoeren. Dit wordt veroorzaakt doordat er voor de hogere en dus zeldzamere afvoeren weinig waarden beschikbaar zijn. Dit probleem kan eventueel verholpen worden door een langere periode met het model door te rekenen.

In figuur 7.22 zijn de waarden voor de afvoeren tot en met een *gemiddelde* herhalingstijd van 100 jaar weergegeven. Een *gemiddelde* herhalingstijd van bijvoorbeeld 100 jaar betekent dat er tussen twee opeenvolgende afvoeren met een zelfde waarde, gemiddeld 100 jaar ligt. Het kan echter best voorkomen dat de tijd tussen deze gebeurtenissen langer, of juist korter is. Over een lange periode beschouwd zal het gemiddelde 100 jaar zijn. In tabel 7.7 zijn voor verschillende herhalingstijden de bijbehorende afvoeren van de Stortelersbeek weergegeven.

Tabel 7.7 Herhalingstijden (jaar) van afvoeren (m^3/s) van de Stortelersbeek voor de referentie situatie, berekend met de tijdreeksmethode

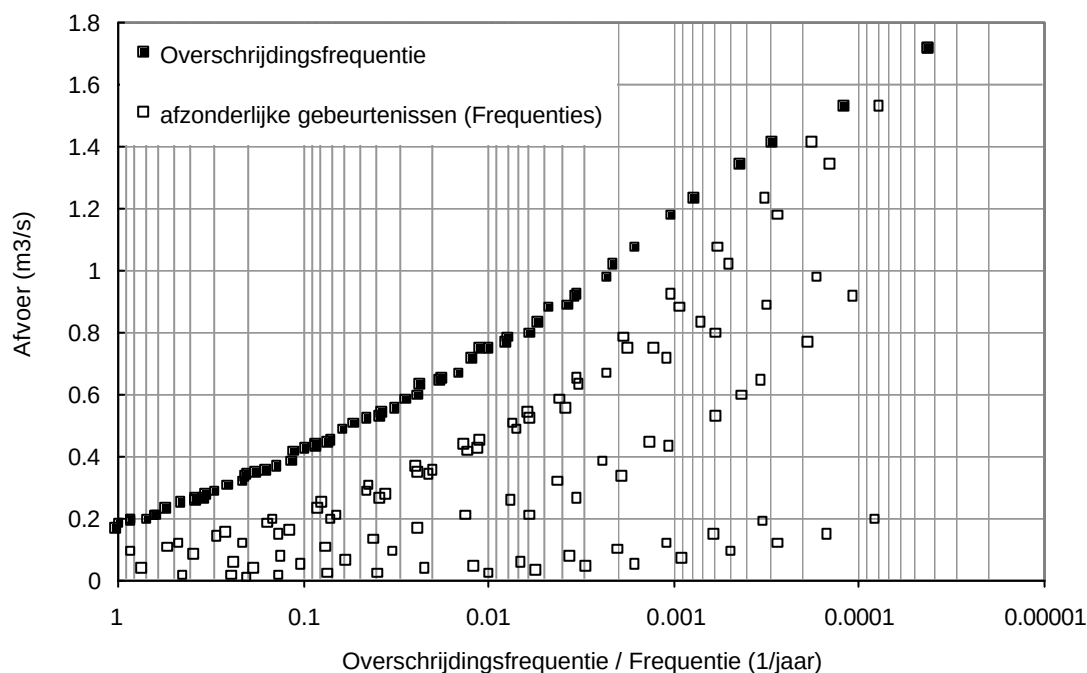
Herhalingstijd (jaar)	Afvoer (m^3/s)
10	0.555
20	0.665
50	0.818
100	0.941
150	1.016
200	1.070
250	1.113

In de puntenreeks in figuur 7.23 zijn veranderingen in het systeemgedrag te ontdekken in de vorm van een verspringing van de afvoer naar een hoger niveau. Dit is te zien bij een herhalingstijd van ongeveer 8 jaar en treedt hoogst waarschijnlijk ook op tussen een herhalingstijd van 50 en 100 jaar. De veranderingen worden veroorzaakt door veranderingen in de drainagekarakteristiek (zie subparagraaf 7.3.2,

figuur 7.16). Als op een gegeven moment naast de hoofdwaterlopen ook de kleinere sloten en daarna ook de greppels water gaan afvoeren wordt water sneller uit het systeem afgevoerd. Hierdoor neemt de kans op hoge afvoeren toe en de herhalingsstijd van een bepaalde hoge afvoer af, wat de verspringing in de reeks kruisjes tot gevolg heeft.

7.3.4 Analyse extreme afvoeren met de Stochastenmethode

Een nadeel van het gebruiken van de tijdreeksmethode voor het bepalen van de herhalingsstijden van extreme gebeurtenissen is dat de methode geen rekening houdt met veranderingen in het systeemgedrag onder extreme situaties. Deze veranderingen zijn, zoals te zien is in figuur 7.23 (beperkt) aanwezig. De stochastenmethode houdt wel rekening met het systeemgedrag onder extreme situaties. De extrapolatie wordt uitgevoerd op de invoer (onder andere neerslag) van het SIMGRO model. De resulterende extreme gebeurtenissen worden in het model doorgerekend [De Graaf & Versteeg, 2000]. In deze subparagraaf worden de resultaten gegeven van berekeningen met de stochastenmethode. Voor een uitgebreide beschrijving van de stochastenmethode wordt verwezen naar paragraaf 4.4.

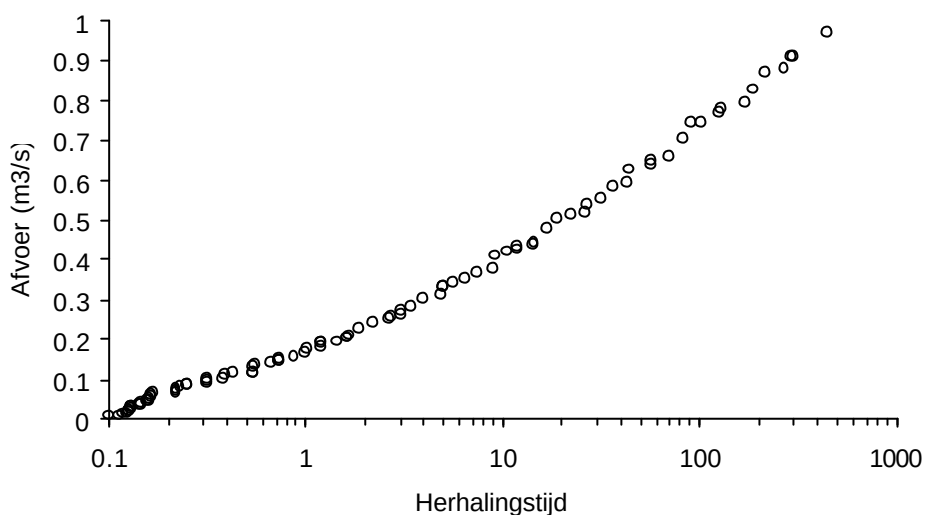


Figuur 7.24 Overschrijdingsfrequenties afvoeren van de Stortelersbeek

De gebruikte reeks met 9-daagse neerslaggebeurtenissen is gebaseerd op data van meteorostation De Bilt (periode 1951-2000) en al eerder gebruikt door HKV en Alterra voor het normeren van watersystemen in de provincie Brabant [Kolen *et al*, 2001]. De neerslaggebeurtenissen en bijbehorende frequenties zijn in aanhangsel 9 opgenomen. Voor de initiële condities van de bodem is de methode gebruikt zoals beschreven in paragraaf 4.4. Vervolgens zijn de gebeurtenissen met behulp van het

SIMGRO-model afzonderlijk doorgerekend en zijn per gebeurtenis de maximale afvoeren ter plaatse van de meetstuw in de Stortelersbeek bepaald. De afvoeren behorende bij de afzonderlijke gebeurtenissen zijn vervolgens uitgezet tegen de bijbehorende frequenties. De overschrijdingsfrequenties zijn vervolgens verkregen door de frequenties van gebeurtenissen die liggen boven een bepaalde waarde bij elkaar op te tellen. In figuur 7.24 zijn de overschrijdingsfrequenties van de afvoeren op de Stortelersbeek ter plaatse van de meetstuw weergegeven. De opbouw van figuur 7.24 is in paragraaf 4.4 al toegelicht.

In figuur 7.25 zijn de afvoeren uitgezet tegen de herhalingstijd (jaar) van de betreffende gebeurtenissen. Uit de figuur komt meteen een groot voordeel van de stochastenmethode naar voren. Tot grote herhalingstijden zijn berekende afvoeren beschikbaar, extrapolatie van de uitkomsten is hierdoor niet nodig. Eventueel veranderend systeemgedrag voor zover verdisconteerd in het simulatiemodel is hiermee meegenomen in de analyse. In tabel 7.8 zijn voor verschillende herhalingstijden de bijbehorende afvoeren van de Stortelersbeek weergegeven. De berekende herhalingstijden zijn gebaseerd op een reeks met frequenties per gebeurtenis en niet op een functie. Hierdoor is het nodig om te interpoleren tussen de punten om bijvoorbeeld de waarde van de afvoer behorende bij een bepaalde herhalingstijd (bijvoorbeeld 10 jaar) te bepalen.



Figuur 7.25 Herhalingstijden van afvoeren van de Stortelersbeek berekend met de stochastenmethode

Tabel 7.8 Herhalingstijden (jaar) van afvoeren (m³/s) van de Stortelersbeek voor de referentie situatie, berekend met de stochastenmethode

Herhalingstijd (jaar)	Afvoer (m³/s)
10	0.419
20	0.508
50	0.636
100	0.744
150	0.787
200	0.848
250	0.878

7.3.5 Vergelijking resultaten van beide methoden

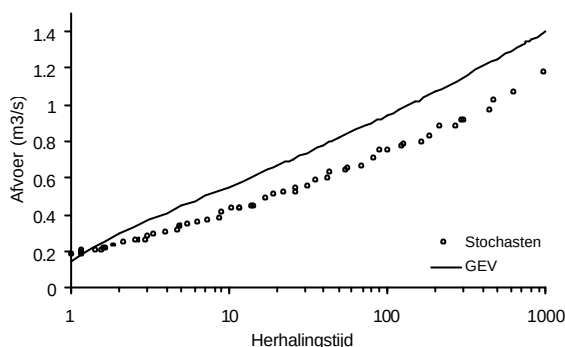
Als de herhalingstijden berekend met de beide methoden worden vergeleken, blijken deze duidelijk van elkaar te verschillen. Voor een bepaalde afvoer geeft de tijdreeksmethode een lagere herhalingstijd dan de stochastenmethode. De afvoer met een herhalingstijd van bijvoorbeeld 100 jaar, bedraagt volgens de tijdreeksmethode $0.941 \text{ m}^3/\text{s}$ en volgens de stochastenmethode $0.744 \text{ m}^3/\text{s}$. Volgens de tijdreeksmethode komen extreem hoge afvoeren dus vaker voor dan volgens de stochastenmethode. Voor de verschillen zijn een tweetal oorzaken aan te wijzen. Allereerst is verandering van systeemgedrag onder zeer extreme situaties in de tijdreeksmethode niet meegenomen. Tot een herhalingstijd van 50 jaar zijn er echter punten beschikbaar en wijkt de gefitte lijn weinig af (figuur 7.23). Veranderend systeemgedrag (bijvoorbeeld de veranderingen in de drainagekarakteristiek) geeft tot deze herhalingstijd dus geen grote afwijkingen.

Een andere mogelijke oorzaak voor de verschillen kan de beginconditie van de door te rekenen gebeurtenissen binnen de stochastenmethode zijn. Als beginconditie zijn initiële grondwaterstanden gebaseerd op waarden uit tabel 4.4 in paragraaf 4.4 gebruikt. Het gaat hier om waarden voor GHG, GLG, GVG en GG gebaseerd op de originele tabel met gemiddelde GHG en GLG per grondwatertrap van Van der Sluijs [1982]. De waarden zijn echter gecorrigeerd omdat er sinds de jaren 70 en 80 verdroging is opgetreden [Kolen et al, 2001]. Zoals al in paragraaf 2.5 is beschreven is de bodemkaart van het oostelijke deel van het onderzoeksgebied gebaseerd op een kartering 1:10.000 uit 1998 [Kleijer & Ten Cate, 1998]. Ook de grondwatertrappen in het oostelijke deel zijn gebaseerd op deze kartering en niet op de kartering 1:50.000 uit de jaren zeventig [Harbers & Rosing, 1983]. Toepassen van een correctiefactor is in dit deel van het onderzoeksgebied dus niet correct. Het oppervlak bovenstrooms van de meetstuw in de Stortelersbeek valt binnen de kartering 1:10.000, voor de initiële grondwaterstanden binnen de stochastenmethode moet dus de originele tabel [Van der Sluijs, 1982] worden gebruikt. Tevens geeft het doorrekenen van de stochasten met andere initiële grondwaterstanden een beeld van de gevoeligheid van de methode voor het veranderen van de begincondities. De waarden van de originele tabel staan in tabel 7.9 weergegeven.

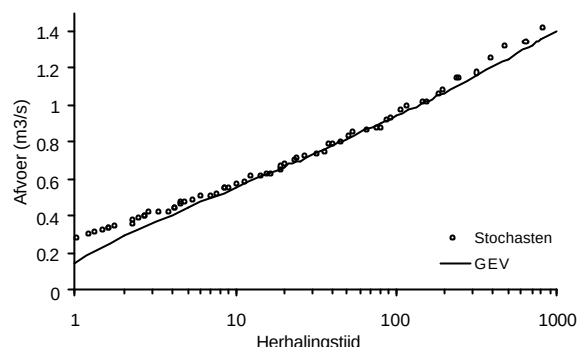
Tabel 7.9 Gemiddelde GHG, GVG, GG en GLG naar Van der Sluijs [1982] voor de Gt's van de oude bodemkaart. Aan de hand van de GHG en GLG is er een inschatting gemaakt van de GVG en GG.

Gt	I	II	II*	III	III*	IV	V	V*	VI	VII	VII*
GHG	-5	7	32	17	32	56	17	32	61	101	185
GVG	8	24	45	39	51	72	45	59	85	126	213
GG	17	37	50	60	67	80	76	87	108	146	233
GLG	38	66	67	103	102	104	135	142	155	190	281

In figuur 7.26 zijn de herhalingstijden van afvoeren berekend met de stochastenmethode en met de tijdreeksmethode weergegeven. Voor de berekeningen met de stochastenmethode is de gecorrigeerde tabel voor de gemiddelde GHG, GVG, GLG en GG (tabel 4.4) gebruikt. De verschillen tussen beide methoden zijn aanzienlijk, het lijkt er op dat de herhalingstijden van extreme afvoeren berekend met de stochastenmethode te hoog zijn in vergelijking met de met de



Figuur 7.26 Herhalingstijden stochastenmethode (met voor de initiële grondwaterstanden de gecorrigeerde tabel 4.4) en tijdreeksmethode (GEV).



Figuur 7.27 Herhalingstijden stochastenmethode (met voor de initiële grondwaterstanden de originele tabel 7.9) en tijdreeksmethode (GEV).

tijdreeksmethode bepaalde waarden. Als binnen de stochastenmethode echter de originele tabel [Van der Sluijs, 1982] wordt gebruikt ontstaat er een totaal ander beeld. De resultaten van de stochastenmethode en die berekend met de tijdreeksmethode komen dan vrijwel overeen. Alleen de waarden met een herhalingstijd kleiner dan 5 jaar en groter dan 400 jaar vertonen significante verschillen.

In tabel 7.10 zijn voor verschillende herhalingstijden de bijbehorende afvoeren van de Stortelersbeek weergegeven. De waarden zijn berekend met de stochastenmethode, met als initiële grondwaterstanden de waarden uit tabel 7.9. Verder is in tabel 7.10 het verschil met de waarden berekend met de tijdreeksmethode weergegeven. De gevonden verschillen in afvoer zijn relatief klein, vrijwel allemaal rond de 10 l/s. De initiële conditie van een gebeurtenis heeft een sterk effect op de uitkomsten van de Stochastenmethode. Gebruik maken van waarden uit tabel 7.9 in plaats van die uit tabel 4.4 geeft een verschil van ongeveer 25% in de uitkomsten

Tabel 7.10 Herhalingstijden (jaar) van afvoeren (m³/s) van de Stortelersbeek voor de referentie situatie, berekend met de Stochastenmethode en de verschillen met de tijdreeksmethode. Als initiële grondwaterstanden zijn de waarden uit de originele tabel van Van der Sluijs [1982] gebruikt. In de laatste kolom staan de verschillen (%) met de waarden berekend met de verkeerde initiële grondwaterstanden weergegeven

Herhalingstijd (jaar)	Afvoer (m³/s)	Verskil met tijdreeksmethode (m³/s)	Verskil met waarden tabel 7.8 (%)
10	0.564	0.009	26
20	0.670	0.005	24
50	0.823	0.005	23
100	0.942	0.001	21
150	1.009	-0.007	22
200	1.080	0.010	21
250	1.145	0.032	23

Uit het voorafgaande blijkt dat het goed kiezen van de initiële condities bij de stochastenmethode erg belangrijk is. Als deze goed gekozen worden blijken de uitkomsten voor het Stortelersbeekgebied goed overeen te komen met de waarden bepaald met de tijdreeksmethode. Voor verdere conclusies en aanbevelingen wordt verwezen naar hoofdstuk 9.

8 Scenario's

8.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is gebleken dat er in het Stortelersbeekgebied een aantal problemen spelen. Het grootste probleem in het gebied is de verdroging. Meer dan de helft van het areaal landbouwgrond binnen het interessegebied heeft een droogteschade groter dan 10%. Ongeveer 75 ha van het interessegebied heeft zelfs een droogteschade groter dan 25%. Ook de natuurfuncties in het interessegebied hebben te leiden onder verdroging. Helaas kon dit in het vorige hoofdstuk, door gebrek aan gedetailleerde informatie over natuurdoeltypen, niet volledig in beeld gebracht worden. Natschade treedt in de referentie situatie vrijwel niet op, slechts op de plateaus zijn een aantal locaties te vinden waar natschade optreedt. De mate waarin schade optreedt, is sterk afhankelijk van de bodem en morfologie. De dekzandruggen met veldpodzol- en enkeerdgronden zijn gevoelig voor verdroging. Ook de veldpodzolgronden en keileemgronden op de plateaus zijn gevoelig voor verdroging, waarbij op de keileemgronden ook nog lokaal natschade optreedt. Het stroomgebied van de Stortelersbeek is een snel reagerend systeem, berging van water in de bodem is vooral op de plateaus slechts zeer beperkt mogelijk. De afvoer van de beek fluctueert hierdoor sterk. Met behulp van de stochastenmethode en de tijdreeksmethode is een inschatting gemaakt van de herhalingstijden van piekafvoeren.

In dit hoofdstuk worden een aantal scenario's besproken. Het eerste scenario (scenario A) omvat het verhogen van de drainagebasis in het interessegebied om de verdroging te bestrijden. Vervolgens wordt met behulp van scenario B onderzocht wat het effect is van klimaatverandering op de grondwaterstanden en beekafvoeren. In scenario C wordt het verhogen van de drainagebasis gecombineerd met klimaatverandering. De resultaten van de scenario's worden vergeleken met de referentie situatie (hoofdstuk 7).

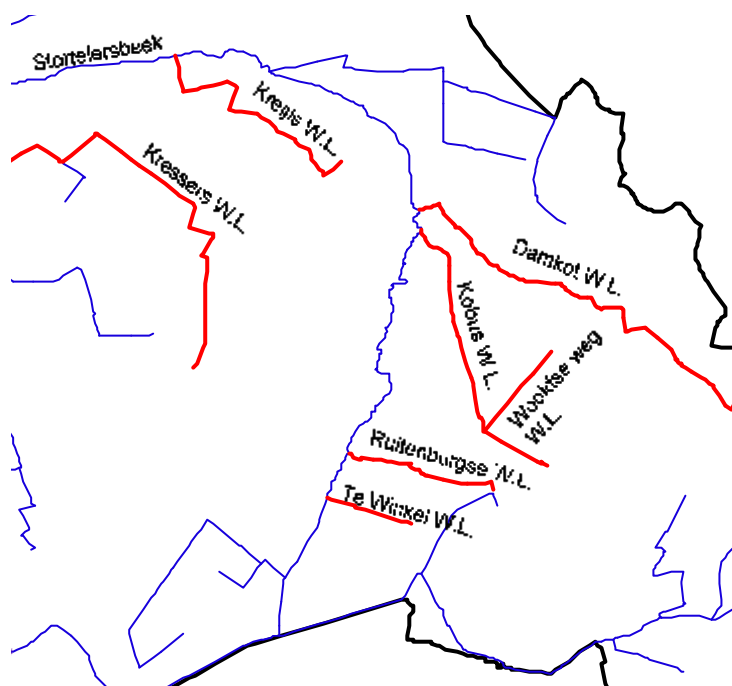
8.2 Beschrijving scenario's

8.2.1 Scenario A Verhogen drainagebasis watergangen

Een groot deel van de watergangen in het interessegebied heeft zich in de laatste decennia diep ingesneden. Dit als gevolg van het door gebrekkig onderhoud verdwijnen van bodemvallen en stuwen. Tevens zijn een aantal watergangen (zoals de Kressers waterleiding en de Kreijls Waterleiding) rechtgetrokken en dieper uitgegraven. Mede als gevolg van de veranderingen aan de watergangen zijn de grondwaterstanden in het gebied gezakt en treedt er verdroging op. Dit probleem speelt vooral in het centrale deel van het interessegebied. In dit scenario wordt om de grondwaterstanden in het centrale deel van het interessegebied te verhogen, de drainagebasis van een aantal watergangen verhoogd. Bij de aanpassingen is gestreefd naar een bodemdiepte van 75 cm-mv. Omdat er lokaal dekzandruggen doorsneden

worden kan de bodemdiepte daar lokaal wat meer zijn dan 75 cm-mv. Van de volgende waterlopen zijn de bodemhoogten aangepast:

- Kressers Waterleiding
- Kreijls Waterleiding
- Damkot Waterleiding
- Kobus Waterleiding
- Wooldse weg Waterleiding
- Ruitenburgse Waterleiding
- Te Winkel Waterleiding



Figuur 8.1 Sloten waarvan de bodemhoogte is aangepast naar ongeveer 75 cm-mv

In figuur 8.1 zijn de locaties van de aangepaste watergangen weergegeven. De Stortelersbeek zelf is niet aangepast omdat deze door aanzanding al vrij ondiep is [Hanhart, 2001]. Tevens is de beek zoals al in paragraaf 2.6 beschreven, door de provincie Gelderland aangemerkt als HEN-water en mogen er geen grote ingrepen aan de loop van de beek plaatsvinden. Het scenario is doorgerekend met meteorologische gegevens van de Bilt over de periode 1951-1999.

8.2.2 Scenario B Klimaatsverandering

Dit scenario omvat het doorrekenen van het model met meteorologische data voor de periode 1951-1999, waarbij de oorspronkelijke data is aangepast aan het klimaatscenario uit de WB 21 studie met een verwachte temperatuurstijging van 2° Celsius tot het jaar 2100 (klimaatscenario midden) [Stumpe, J., Tielrooij, F., 2000].

Bij een temperatuurstijging van 2° Celsius neemt de jaarneerslag met 6% toe. Met in de zomer een toename van de neerslag met 2% en in de winter een toename met 12%. De neerslagsom over 10 dagen in een natte periode in de winter neemt toe met 20%. Ook de neerslagintensiteit in buien neemt toe met 20%. De potentiële verdamping is met 8 % verhoogd [Können, 2001].

8.2.3 Scenario C Verhogen drainagebasis in combinatie met klimaatsverandering

In scenario C worden de twee voorafgaande scenario's gecombineerd. Hierdoor kunnen de effecten van het verhogen van de drainagebasis met in combinatie met klimaatverandering worden bepaald. Ook hier wordt gerekend met de aan klimaatverandering aangepaste meteorologische reeks, zoals gebruikt voor het vorige scenario. De effecten van de scenario's worden in de volgende paragraaf besproken.

8.3 Resultaten

8.3.1 Verandering grondwaterstanden

In deze subparagraaf worden de effecten van de verschillende scenario's op de grondwaterstanden beschreven. Allereerst wordt gekeken naar gebiedsdekkende waarden, vervolgens ook naar de grondwaterstanden in de vier onderzoekspunten zoals besproken in paragraaf 7.2. In tabel 8.1 en 8.2 zijn de veranderingen van respectievelijk de GHG en GLG ten opzichte van de referentie situatie weergegeven voor de drie scenario's. Bijbehorende kaartjes staan in Aanhangsel 10 weergegeven.

Het verhogen van de drainagebasis van de zijsloten van de Stortelersbeek (scenario A) heeft een vrij lokaal effect op de grondwaterstanden. De grondwaterstanden stijgen in het gebied rond de sloten met gemiddeld 5 cm, oplopend tot 30 à 40 cm direct langs de sloten. Het gebied waar veranderingen optreden is beperkt tot ongeveer 26% van de oppervlakte van het interessegebied. In het grootste gedeelte van het interessegebied is geen verandering waarneembaar. Het verhogen van de drainagebasis heeft op de GHG en GLG een vergelijkbaar effect.

Bij het scenario klimaatverandering stijgt de GHG over een groot deel van het interessegebied (68%) tot 5 cm. In 16% van het gebied stijgt de GHG zelfs tussen de 5 en 10 cm. De GLG echter zakt over een groot gedeelte van het gebied (78%) tot 10 cm, over 20% van het gebied zelfs met meer dan 10 cm. Als gevolg van het klimaatscenario wordt het verloop van de grondwaterstand dus dynamischer met meer kans op zowel zeer droge als zeer natte omstandigheden. Als het verhogen van de drainagebasis gecombineerd wordt met het klimaatscenario blijkt dat de GLG in een wat kleiner deel van het gebied daalt. De GHG echter stijgt in een groter deel van het gebied. Het verhogen van de drainagebasis zal bij het optreden van klimaatverandering, enerzijds de daling van de GLG beperken maar anderzijds de stijging van de GHG versterken.

Tabel 8.1 Percentage van het gebied met een verandering van de GHG ten opzichte van de referentie situatie

Omschrijving	Verandering GHG (cm)						
	<-10 cm	-10-0 cm	0 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Verhogen drainagebasis	0	2	74	17	4	2	1
Klimaatscenario +2°C	1	8	6	68	16	1	0
Verhogen drainagebasis en klimaatscenario +2° C	1	8	5	60	18	6	1

Tabel 8.2 Percentage van het gebied met een verandering van de GLG ten opzichte van de referentie situatie

Omschrijving	Verandering GLG (cm)						
	<-10 cm	-10-0 cm	0 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Verhogen drainagebasis	1	2	71	19	4	2	1
Klimaatscenario +2° C	20	78	1	1	0	0	0
Verhogen drainagebasis en klimaatscenario +2° C	19	72	2	5	1	1	0

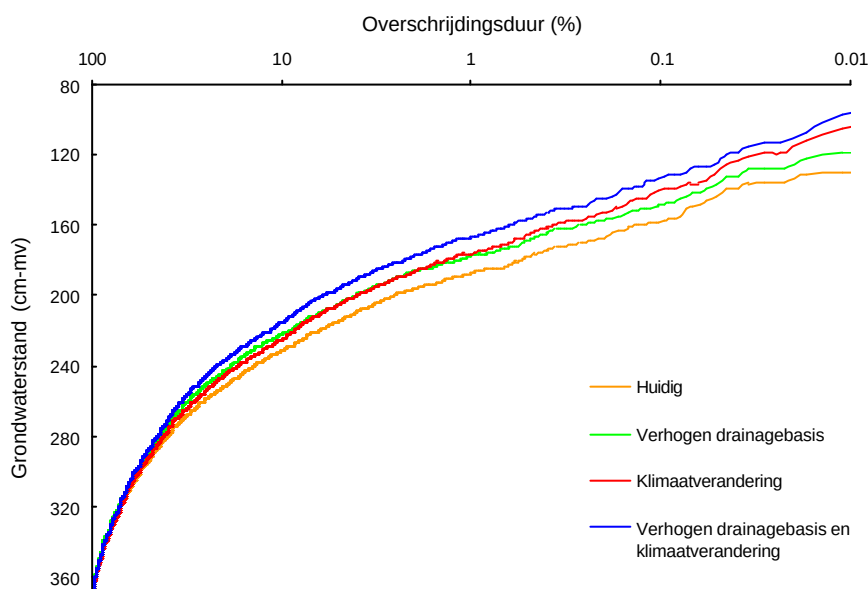
In subparagraaf 7.2.2 zijn een viertal onderzoekspunten vastgesteld voor het analyseren van de grondwaterstandverlopen (zie figuur 7.6). Voor deze punten zijn ook voor de scenario's de grondwaterstandverlopen geanalyseerd. Uit de analyse blijkt dat het verhogen van de drainagebasis (Scenario A) alleen een significant effect heeft op het grondwaterstandverloop van onderzoekspunt D (hoge zwarte enkeerdgrond). Dat het verhogen van de drainagebasis bij de drie overige onderzoekspunten geen effect heeft komt door het lokale karakter van de maatregel. Klimaatverandering heeft op vrijwel alle onderzoekspunten een vergelijkbaar effect; met diepere grondwaterstanden in droge perioden en het vaker voorkomen van ondiepe grondwaterstanden.

Voor de vier onderzoekspunten zijn duurlijnen opgesteld. Uit de duurlijnen blijkt dat voor de onderzoekspunten A, B en C het effect van de verhoging van de drainagebasis nihil is. In onderzoekspunt D is wel duidelijk effect te zien. In figuur 8.2 is de duurlijn voor onderzoekspunt D (hoge zwarte enkeerdgrond) per scenario weergegeven. In de figuur is te zien dat door het verhogen van de drainagebasis ondiepe grondwaterstanden vaker voorkomen. Klimaatverandering heeft een nog sterker effect op de grondwaterstand. De grondwaterstand die in 1% van de tijd (rekenperiode van 50 jaar) wordt overschreden, is door klimaatverandering gestegen met 12 cm. Een combinatie van beide scenario's heeft als gevolg dat de grondwaterstand die in 1% van de tijd wordt overschreden stijgt met 21 cm.

Het effect van klimaatverandering is op de overige onderzoekspunten minder groot. De waarde van de grondwaterstand, die 1% van de tijd wordt overschreden stijgt, als gevolg van klimaatverandering in punt A (Veldpodzolgrond) met 2 cm, punt B (Keileem) met 1.5 cm en punt C (Beekeerdgrond) met 1 cm.

8.3.2 Doelrealisatie landbouw

Om de verandering van de doelrealisatie voor landbouw te bepalen zijn eerst de nat- en droogteschade per scenario uitgerekend. In aanhangsel 11 zijn voor elk scenario de gemiddelde verandering per deelstroomgebied van de droogte- en natschade weergegeven. De veranderingen van de gemiddelde nat- en droogteschade (zoals weergegeven op de figuren in aanhangsel 11) variëren tussen 3% afname en 3% toename. In tabel 8.3 en 8.4 zijn voor het gehele interessegebied per scenario de oppervlaktes (in % van het interessegebied) per schadeklasse weergegeven. Rond de watergangen, waarvan de drainagebasis is aangepast, is de droogteschade met 2 tot 3% afgenomen (zie figuur A11.1). De natschade neemt door het verhogen van de drainagebasis echter wel met enkele procenten toe. Rond de Kreijls waterleiding neemt de natschade zelfs toe met gemiddeld 3% (zie figuur A11.2). Over het gehele interessegebied neemt het percentage van de oppervlakte vallend binnen klasse 0-10% schade toe van 46% naar 49%. De oppervlaktes per natschade klasse veranderen niet.



Figuur 8.2 Overschrijdingsduurlijnen van de grondwaterstand voor onderzoekspunt D (Hoge zwarte enkelegrond)

Als gevolg van klimaatverandering neemt de droogteschade in vrijwel het gehele interessegebied toe (zie figuur A11.3). Alleen op enkele laaggelegen delen van het gebied neemt de droogteschade af met gemiddeld 1%. De natschade (figuur A11.4) neemt lokaal toe met 1 tot 2%. Op de plateaus waar de droogteschade is toegenomen neemt de natschade af met ongeveer 1%. De oppervlakte van het gebied binnen droogteschade klasse 0-10% neemt af van 46% naar 44%. De oppervlaktes vallend binnen droogteschade klasse's 10-25% en >25% nemen beide toe met 1%. Uit tabel 8.4 volgt dat 1% van de oppervlakte van het interessegebied binnen natschade klasse >25% is komen te liggen. Als het verhogen van de drainagebasis wordt gecombineerd met klimaatverandering (scenario C) neemt de droogteschade direct

langs de waterlopen af met enkele procenten, de natschade neemt daar echter sterk toe.

Tabel 8.3 Oppervlaktes in % van het interessegebied per droogteschade klasse

Droogte schade (%)	Oppervlakte (% van interessegebied) per scenario			
	huidig	Verhogen drainagebasis	klimaat	Verhogen drainagebasis + klimaat
0 - 10	46	49	44	45
10 - 25	48	45	49	49
>25	6	6	7	6

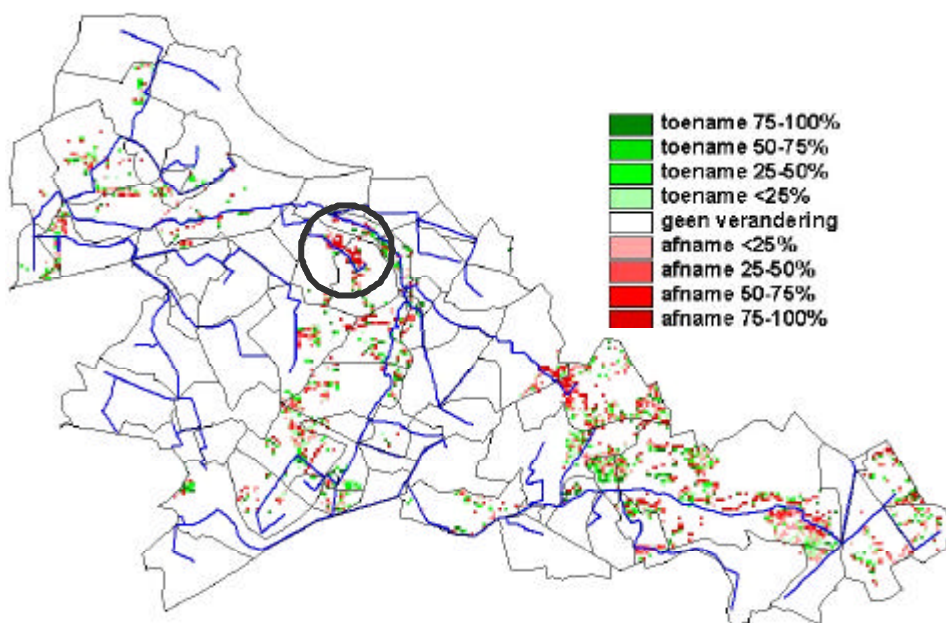
Tabel 8.4 Oppervlaktes in % van het interessegebied per natschade klasse

Nat schade (%)	Oppervlakte (% van interessegebied) per scenario			
	huidig	Verhogen drainagebasis	klimaat	Verhogen drainagebasis + klimaat
0 - 10	91	91	91	91
10 - 25	9	9	8	9
>25	0	0	1	0

In aanhangsel 12 zijn de doelrealisaties (100% -(droogteschade + natschade)) per scenario weergegeven. Voor scenario A (verhoging drainagebasis) blijkt de doelrealisatie vrijwel overal toe te nemen met 1 tot 2%. De doelrealisatie neemt bij klimaatverandering in vrijwel alle deelstroomgebieden af, hetzij door toename van de droogteschade hetzij door toename van de natschade. Bij een combinatie van verhoging van de drainagebasis en klimaatverandering blijft de vermindering van de doelrealisatie als gevolg van droogteschade rond de aangepaste waterlopen beperkt. De vermindering van de doelrealisatie als gevolg van natschade wordt echter op een aantal plaatsen versterkt.

8.3.3 Doelrealisatie natuur

Per scenario is ook de doelrealisatie voor terrestrische natuur berekend. Vervolgens is de verandering ten opzichte van de referentie situatie bepaald. In figuur 8.3 is de verandering van de doelrealisatie natuur als gevolg van het verhogen van de drainagebasis weergegeven. Als de uitkomsten nader bekeken worden blijkt dat op veel plaatsen waar het natter wordt de doelrealisatie afneemt. Een voorbeeld hiervan is het bosje rond de Kreijls waterleiding (in figuur 8.3 aangegeven met een zwarte cirkel).



Figuur 8.3 Verandering doelrealisatie natuur als gevolg van het verhogen van de drainagebasis

Door het verhogen van de drainagebasis stijgen zowel de GHG als de GLG met ongeveer 20 cm. De doelrealisatie natuur neemt hierdoor af met ongeveer 50%. Het lijkt hierdoor of de maatregel (verhogen drainagebasis) een negatief effect heeft op de terrestische natuur rond de Kreijls waterleiding. Wat in werkelijkheid zichtbaar wordt, is de onnauwkeurigheid van de gebruikte natuurdoeltypen kaart. Zoals al in subparagraaf 7.2.4 is beschreven bestond de oorspronkelijke kaart met natuurdoeltypen uit vlakken meerdere natuurdoeltypen. Er is gekozen voor het meest voorkomend natuurdoeltype per vlak. Het vlak rond de Kreijls waterleiding bestaat uit overwegend het natuurdoeltype Eiken- en beukenbos van lemige zandgronden, maar met een klein gedeelte Bos van bron en beek en andere natuurdoeltypen. Als natuurdoeltype is, omdat de Waternoodmethode één natuurdoeltype per vlak vraagt, gekozen voor het natuurdoeltype Eiken- en beukenbos van lemige zandgronden.

Wat in figuur 8.3 zichtbaar wordt, is dat langs de Kreijls waterleiding het te nat wordt voor het eiken en beukenbos. Dit komt overeen met de natuurlijke situatie waarin dit type daar helemaal niet voorkomt. Het gebiedje langs de Kreijls waterleiding heeft in werkelijkheid een ander (meer passend bij natte omstandigheden) natuurdoeltype, door de grove schematisatie is dit echter weggevalen. Het vernatten heeft dus in werkelijkheid een positief effect op de vegetatie. Uit het voorafgaande blijkt dat als er verantwoorde uitspraken moeten worden gedaan over de verandering van de doelrealisatie natuur, een zeer gedetailleerde natuurdoeltypenkaart nodig is. De in dit onderzoek beschikbare gegevens maken het onmogelijk om uitspraken te doen over een positief dan wel negatief effect van het verhogen van de drainagebasis en klimaatverandering op de doelrealisatie van terrestische natuur in het interessegebied.

8.3.4 Afvoer van de Stortelersbeek

In deze subparagraaf worden de effecten van de scenario's op de afvoeren van de Stortelersbeek bepaald. De resultaten worden vergeleken met de in paragraaf 7.3 besproken waarden voor de referentie situatie. In tabel 8.5 staan de gemiddelde, maximale en minimale afvoer over de periode 1951-1999 weergegeven. Als gevolg van het verhogen van de drainagebasis (scenario A) verandert de gemiddelde en minimale afvoer niet, de maximale afvoer neemt echter toe met 14 l/s (2% toename). Als gevolg van klimaatverandering (scenario B) neemt de gemiddelde afvoer toe met 2 l/s (4% toename). De maximale afvoer neemt echter sterk toe met 289 l/s (22% toename), de minimale afvoer blijft gelijk. Als klimaatverandering en het verhogen van de drainagebasis worden gecombineerd, blijkt de maximale afvoer te stijgen naar 1.322 m³/s, dit komt overeen met een toename van 23% ten opzichte van de referentie situatie.

Tabel 8.5 Effecten van scenario's op gemiddelde, maximale en minimale afvoer (m³/s) van de Stortelersbeek gebaseerd op een rekenperiode van 50 jaar

	Huidig	Verhogen drainagebasis	Klimaatverandering	Verhogen drainagebasis en klimaatverandering
Gemiddelde afvoer	0.046	0.046	0.048	0.048
Maximale afvoer	1.018	1.032	1.307	1.322
Minimale afvoer	0.003	0.003	0.003	0.003

Het bovenstaande suggereert dat de lage afvoeren niet beïnvloed worden door de verschillende scenario's. Het blijkt echter dat zowel door het verhogen van de drainagebasis als door klimaatverandering, lage afvoeren vaker voorkomen. In tabel 8.6 is het percentage van de rekenperiode waarin de afvoer kleiner is dan 0.01 m³/s weergegeven. Het blijkt dat het percentage van de tijd waarin lage afvoeren optreden met 2.3% toeneemt bij het verhogen van de drainagebasis en met 4.2% toeneemt bij klimaatverandering.

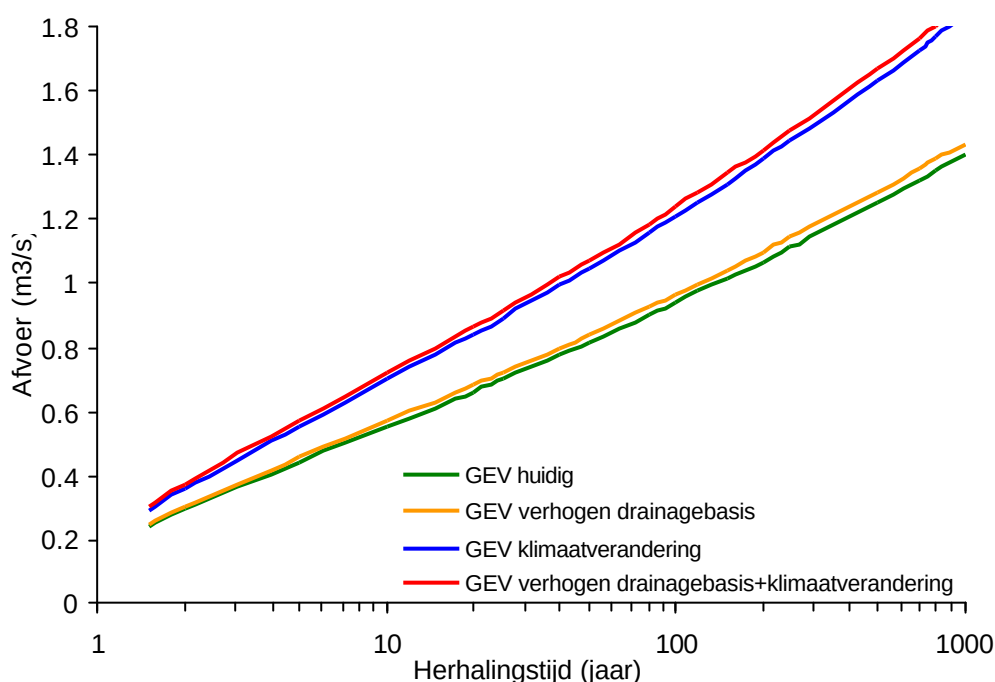
Op de kans van voorkomen van lage afvoeren wordt in dit onderzoek, zoals al eerder aangegeven, niet verder ingegaan. In hoeverre de kans op piekafvoeren veranderd als gevolg van klimaatverandering en het verhogen van de drainagebasis is wel nader onderzocht.

Tabel 8.6 percentage van de tijd waarin de afvoer < 0.01 m³/s

Scenario	%
Huidig	12.2
Verhogen drainagebasis	14.5
Klimaatverandering	16.4
Verhogen drainagebasis en klimaatverandering	18.7

Een van de hoofdvragen in dit onderzoek is hoe de kansen op extreme afvoeren veranderen als gevolg van verdrogingsbestrijdende maatregelen en klimaatverandering. In de onderstaande tekst worden de effecten van de drie scenario's geanalyseerd. Als methode voor de analyse worden in navolging van paragraaf 7.3 de tijdreeksmethode (met een GEV verdeling) en de stochastenmethode gebruikt.

In figuur 8.4 is voor de drie scenario's de herhalingstijd uitgezet tegen de bijbehorende afvoer van de Stortelersbeek. In de figuur zijn tevens ter referentie de herhalingstijden en afvoeren van de referentie situatie weergegeven. De waarden in figuur 8.4 zijn gebaseerd op reeksen van 49 jaar dagafvoer. Met behulp van de GEV verdeling zijn, op dezelfde manier als in subparagraaf 7.3.3, de herhalingstijden bepaald.

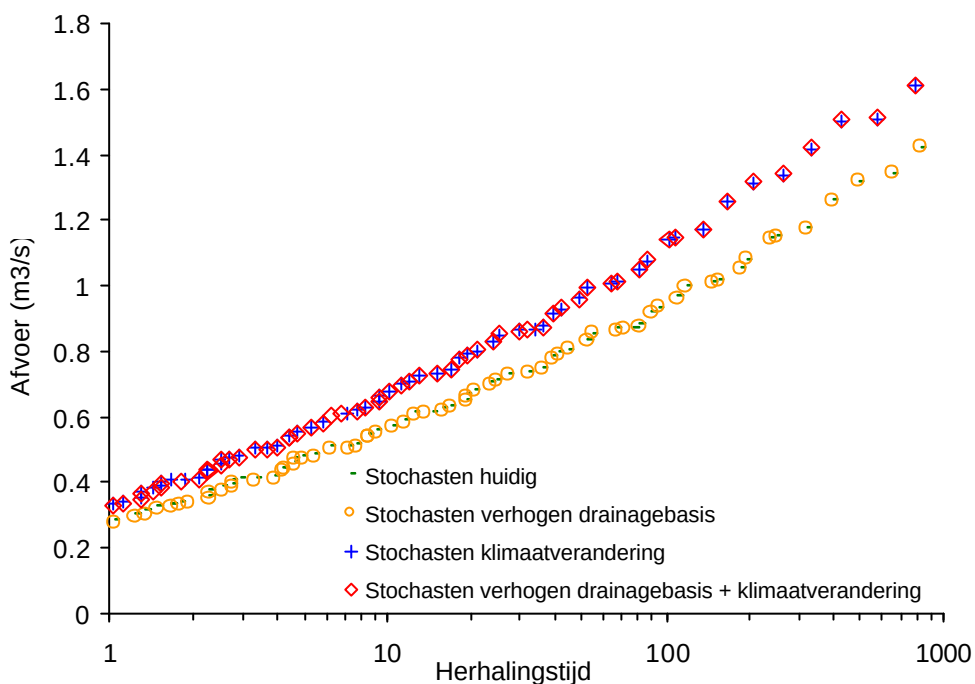


Figuur 8.4 De herhalingstijd bepaald met de tijdreeksmethode (gebruikmakend van de GEV verdeling) uitgezet tegen de bijbehorende afvoer voor de huidige situatie en de drie scenario's

In aanhangsel 13 tabel A13.1 zijn de herhalingstijden en bijbehorende afvoeren van de scenario's opgenomen. In tabel A13.2 in hetzelfde aanhangsel zijn de veranderingen ten opzichte van de referentie situatie weergegeven. Als gevolg van het verhogen van de drainagebasis komen hoge afvoeren frequenter voor. Een afvoer van ongeveer $1 \text{ m}^3/\text{s}$ heeft in de referentie situatie een herhalingstijd van 150 jaar, als gevolg van het verhogen van de drainagebasis neemt de herhalingstijd af naar 120 jaar. Het blijkt dat de verschillen tussen de referentie situatie en de situatie bij verhoging van de drainagebasis toenemen bij een groter wordende herhalingstijd. Het verschil in afvoer bij een herhalingstijd van 10 jaar bedraagt bijvoorbeeld 15 l/s maar neemt toe naar 29 l/s bij een herhalingstijd van 250 jaar. Klimaatverandering (klimaatscenario 2°C) blijkt een sterk effect te hebben op het optreden van piekafvoeren op de Stortelersbeek. Piekafvoeren zullen op de Stortelersbeek met een grotere regelmaat voorkomen. De herhalingstijd behorende bij een afvoer van $1 \text{ m}^3/\text{s}$ neemt bijvoorbeeld af naar 40 jaar. Dit is een afname van de herhalingstijd met 110 jaar ten opzichte van de referentie situatie. Ook voor het scenario klimaatverandering

blijkt dat de verschillen met de referentie situatie toenemen bij een groter wordende herhalingstijd.

Het verhogen van de drainagebasis om de verdroging in het gebied te bestrijden in combinatie met klimaatverandering (klimaatscenario 2°C), heeft als effect een sommatie van de effecten van de twee voorafgaande scenario's. De herhalingstijd behorende bij een afvoer van 1 m³/s neemt verder af naar ongeveer 35 jaar.



Figuur 8.5 De herhalingstijd bepaald met de Stochasten methode uitgezet tegen de bijbehorende afvoer voor de huidige situatie en de drie scenario's

In figuur 8.5 zijn de herhalingstijden en bijbehorende afvoeren bepaald met de stochastenmethode weergegeven. Wat direct opvalt, is dat volgens de berekeningen van de stochastenmethode, het effect van het verhogen van de drainagebasis op de herhalingstijden van piekafvoeren slechts zeer beperkt (of afwezig) is. Dit geldt zowel voor het scenario op zichzelf, als in combinatie met klimaatverandering. In de tabel A13.3 in aanhangsel 13 is dit duidelijk zichtbaar. Het blijkt dat de afvoeren behorende bij de verschillende herhalingstijden slechts 2 à 3 l/s verschillen met de referentie situatie (Volgens de tijdreeksmethode variëren de verschillen van 15 l/s tot 29 l/s). Verder is er in de verschillen geen duidelijke lijn te ontdekken. De oorzaak hiervoor is waarschijnlijk te vinden in de bij de stochastenmethode gebruikte beginconditie. In subparagraaf 7.3.5 is al gebleken dat de beginconditie bepalend is voor de met de stochastenmethode berekende afvoer. De beginconditie (gebaseerd op tabel 7.9) is bij de scenario's niet aangepast. Bij het verhogen van de drainagebasis wordt de grondwaterspiegel in een deel van het gebied ondieper. Voor deze gebieden moeten ook de beginvoorwaarden voor de 9-daagse perioden aangepast worden om een verantwoorde berekening te doen.

Bij het scenario klimaatverandering is wel een duidelijke verandering te ontdekken ten opzichte van de referentie situatie. De herhalingsstijd behorende bij 1 m³/s is afgenomen van ongeveer 120 jaar naar ongeveer 50 jaar. Het effect is duidelijk beperkter dan het effect berekend volgens de tijdreeksmethode (afname 70 jaar berekend met de stochastenmethode tegen 110 jaar berekend met de tijdreeksmethode). Ook hier is weer de beginconditie aan te wijzen als de meest waarschijnlijke veroorzaker van het geringere effect. Ook door klimaatverandering zullen namelijk de grondwaterstanden en daarmee de begincondities veranderen.

In tabel 8.7 is het verschil tussen de afvoeren berekend met de tijdreeksmethode en de stochastenmethode weergegeven. Uit de tabel blijkt dat de waarden berekend voor de referentie situatie (indien de goede begincondities worden gebruikt) weinig verschillen voor beide methoden. Bij het verhogen van de drainagebasis blijken de afvoeren berekend met de stochastenmethode gemiddeld 15 l/s lager dan berekend met de tijdreeksmethode. Bij klimaatverandering komen de afvoeren berekend met de stochastenmethode zelfs al gemiddeld 60 l/s lager uit dan berekend met de tijdreeksmethode. In subparagraaf 8.3.1 is al duidelijk geworden dat klimaatverandering een significant effect heeft op de grondwaterstanden, de GHG wordt hoger terwijl de GLG juist lager wordt. Het is hierdoor noodzakelijk dat de begincondities voor de stochastenmethode ook aangepast dienen te worden aan een bepaald scenario. In de aanbevelingen zal nader uitgewerkt worden hoe de begincondities binnen de stochastenmethode aangepast kunnen worden om betere uitkomsten te verkrijgen.

Tabel 8.7 Verschillen tussen de met de stochastenmethode en de met de tijdreeksmethode berekende afvoeren bij verschillende herhalingsstijden.

Herhalingsstijd (jaar)	Referentie situatie	Verhogen drainagebasis	Klimaatverandering	Verhogen drainagebasis en klimaatverandering
10	0.009	-0.008	-0.020	-0.042
20	0.005	-0.016	-0.047	-0.069
50	0.005	-0.018	-0.076	-0.102
100	0.001	-0.020	-0.080	-0.109
150	-0.007	-0.036	-0.104	-0.133
200	0.010	-0.013	-0.080	-0.107
250	0.032	0.005	-0.113	-0.141

9 Conclusies, aanbevelingen en discussie

9.1 Conclusies

9.1.1 Hoofdconclusies

Uit het onderzoek blijkt dat het Stortelersbeekgebied verdroogt. Met maatregelen (zoals het verhogen van de drainagebasis) is het mogelijk om deze verdroging terug te dringen. Klimaatverandering geeft een sterke verslechtering van de hydrologische situatie (stijging GHG en daling GLG) in het Stortelersbeekgebied. Door het verhogen van de drainagebasis kunnen de effecten slechts beperkt worden gecompenseerd.

De methode Waternood blijkt voor het inschatten van de effecten van maatregelen op natuur problemen te geven als er geen gedetailleerde natuurdoeltypenkaart beschikbaar is. De methode waternood vraagt een kaart met de Natuurdoeltypen 2001. In veel provincies wordt echter met een eigen indeling gewerkt. Vooral de indeling van de provincie Gelderland geeft problemen voor gebruik binnen de methode Waternood. Dit omdat de eenheden samengesteld zijn, waaruit een representatieve eenheid moet worden gekozen.

De twee in dit onderzoek gebruikte methoden voor het bepalen van de kans op extreme afvoeren blijken toepasbaar. Met beide methoden kunnen uitspraken worden gedaan over welke afvoeren zullen optreden met een herhalingsstijd van bijvoorbeeld 100, 150 of 250 jaar. Als voor de Stochastenmethode de initiële bodemvochttoestand goed is gedefinieerd en voor de tijdreeksmethode een voldoende lange reeks wordt gebruikt, blijken de uitkomsten van beide methoden goed overeen te komen.

Een voordeel van de tijdreeksmethode is de relatieve eenvoud. Nadeel is dat er lange reeksen doorgerekend moeten worden (=50 jaar), wat vrij veel rekentijd kost. De stochastenmethode heeft als voordeel dat er uitspraken mogelijk zijn over gebeurtenissen met grote herhalingsstijden. Het correct inschatten van met name de begincondities (bodemvochtvoorraad) is hierbij echter noodzakelijk, maar bijzonder moeilijk.

Door De Graaff en Versteeg [2000] wordt gesteld dat klimaatverandering binnen de stochastenmethode eenvoudig kan worden meegenomen door de kansen op neerslagpatronen aan te passen. De modelsimulaties zouden niet opnieuw gedaan hoeven worden. Bij de bovenstaande redenering wordt voorbijgegaan aan het feit dat ook de begincondities (vochtigheidsgraad/grondwaterstand) van de 9-daagse gebeurtenissen veranderen als gevolg van klimaatverandering. Uit dit onderzoek is gebleken dat de begincondities bepalend zijn voor de resultaten. De simulaties moeten dus wel degelijk opnieuw gedaan worden.

9.1.2 Toelichting op de hoofdconclusies

Algemeen

Het stroomgebied van de Stortelersbeek is een voor Nederlandse begrippen zeer snel reagerend stroomgebied. De snelle reactie van het systeem wordt veroorzaakt door het ondiep voorkomen van Tertiaire klei en keileem. Het gebied heeft te lijden onder verdroging. Op de Stortelersbeek kunnen echter ook extreem hoge afvoeren optreden.

De met het model gesimuleerde grondwaterstanden bleken gevoelig voor de randstijghoogten en de doorlaatfactor van het watervoerende pakket. Calibratie van het model was vrij moeilijk. Oorzaken hiervan zijn: de ongevoeligheid van het model voor de onderzochte parameters, gebrek aan gedetailleerde informatie over bijvoorbeeld de doorlaatfactoren en de complexe aard van het onderzoeksgebied. Gemiddeld over 13 peilbuizen nam door de calibratie de RMSE van de grondwaterstanden af van ongeveer 40 cm naar 30 cm. Het vrij grote verschil tussen de gesimuleerde en gemeten maximale afvoer nam af van 318 l/s naar 225 l/s. Ook voor de validatie periode bleek de overeenkomst tussen gemeten en berekend te verbeteren.

Referentie situatie modelstudie

Uit de referentiesimulatie bleek dat het interessegebied vrij droog is, ongeveer 75% van het gebied heeft een gemiddelde grondwaterstand dieper dan 80 cm-mv. De gemiddeld laagste grondwaterstand is voor bijna 70% van het gebied dieper dan 140 cm-mv. In permanent natte delen van de beekdalen, maar vooral op de plateaus waar ondiep keileem en Tertiaire klei voorkomt, kunnen de grondwaterstanden aan maaiveld komen. De grondwaterstand reageert niet overal in het interessegebied hetzelfde op de neerslag. Het blijkt dat gebieden met veldpodzolgronden en vooral hoge zwarte enkeerdgronden relatief traag reageren op neerslag. De gebieden met keileem of Tertiaire klei in de ondergrond en beekerdgronden reageren juist snel op neerslag.

Om te bepalen hoeveel schade er optreedt aan de landbouw zijn voor de referentie situatie de nat- en droogteschade bepaald. Het blijkt dat de meeste droogteschade (>25%) optreedt op de dekzandruggen aan de randen van de plateaus, globaal ten oosten en westen van de Stortelersbeek. Natschade (10-25% en slechts beperkt >25%) komt voor op plaatsen waar keileem of Tertiaire klei ondiep voorkomt en op lokale laagtes langs de Stortelersbeek.

De doelrealisatie (100%-(droogteschade+natschade)) voor landbouw blijkt voor de referentie situatie voor het grootste deel van het interessegebied te liggen in doelrealisatieklasse 75-90%. Op enkele plaatsen waar veel droogteschade optreedt, komt de doelrealisatie onder de 75%. De doelrealisatie natuur blijkt bij de gebruikte schematisatie van natuurdoeltypen vrijwel overal te voldoen. Dit komt niet overeen met de werkelijkheid. De oorzaak is te vinden in de voor het gebied beschikbare kaart, die per kaartvlak meerdere natuurdoeltypen geeft. De precieze ligging van de

natuurdoeltypen wordt niet weergegeven. Om toch uitspraken te kunnen doen is het meest voorkomende natuurdoeltype per vlak representatief verondersteld. Dit geeft echter een onjuist beeld van de complexere werkelijkheid.

De afvoer van de Stortelersbeek blijkt sterk te variëren. Tijdens de simulatieperiode (1951-1999) is de minimale berekende afvoer $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ en de maximale afvoer $1.018 \text{ m}^3/\text{s}$. De gemiddelde afvoer bedraagt $0.046 \text{ m}^3/\text{s}$, afvoerpieken zoals de maximale afvoer van $1.018 \text{ m}^3/\text{s}$ wijken sterk af van het gemiddelde. Afvoeren hoger dan $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ komen vrijwel alleen in het winterhalfjaar voor. De periode voorafgaand aan een extreme bui blijkt in hoge mate bepalend voor de hoogte van een piekafvoer.

Het blijkt dat de herhalingstijden berekend met de Stochastenmethode en met de tijdreeksmethode voor de referentiesituatie vergelijkbare uitkomsten geven. Dit gaat echter alleen op als de initiële condities voor de Stochasten correct zijn. De uitkomsten van de Stochastenmethode blijken erg gevoelig voor de initiële grondwaterstanden en daarmee voor de initiële vochttoestand van de bodem. Zeker voor snel reagerende systemen als de Stortelersbeek moet dus veel zorg worden besteed aan het bepalen van correcte initiële condities voor de Stochasten.

Bij goed gebruik, blijkt het met beide methoden mogelijk om uitspraken te doen over piekafvoeren met een herhalingstijd van bijvoorbeeld 100, 150 of 250 jaar. In tabel 9.1 staan voor een drietal herhalingstijden de bijbehorende piekafvoeren weergegeven. Bij herhalingstijden groter dan 250 jaar blijken beide methoden substantieel van elkaar af te wijken. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door de beperkte dataset (reeks van 49 jaarextremen) die de tijdreeksmethode heeft om de GEV verdelingsfunctie te fitten.

Tabel 9.1 Herhalingstijden (jaar) van afvoeren (m^3/s) van de Stortelersbeek voor de referentie situatie, berekend met de tijdreeksmethode en de Stochastenmethode

Herhalingstijd (jaar)	Tijdreeksmethode (m^3/s)	Stochastenmethode (m^3/s)
100	0.941	0.942
150	1.016	1.009
250	1.113	1.145

Scenario's modelstudie

Het verhogen van de drainagebasis blijkt een geschikt middel om lokaal verdroging te bestrijden. Het effect is echter beperkt tot het invloedsgebied van de waterlopen. In 17% van de oppervlakte van het interessegebied stijgt de GHG tot 5 cm, voor enkele delen langs de aangepaste waterlopen kan de stijging oplopen tot ongeveer 30 cm. De GLG stijgt tot 5 cm in 19% van de oppervlakte van het interessegebied. In een zeer klein deel van het gebied (op enkele plaatsen waar de watergangen eerst ondieper waren) zakt de grondwaterstand als gevolg van de maatregel.

Het scenario klimaatverandering heeft een sterke stijging van de GHG tot gevolg, in 68% van de oppervlakte van het interessegebied stijgt de GHG tot 5 cm. In 16% van het interessegebied stijgt de GHG met 5-10 cm. De GLG echter daalt in 75% van de oppervlakte van het gebied tot 10 cm en in 20% van de oppervlakte zelfs met meer

dan 10 cm. Klimaatverandering heeft dus voor het Stortelersbeekgebied een vergroting van de dynamiek van het grondwatersysteem tot gevolg. Klimaatverandering en het verhogen van de drainagebasis heeft ten opzichte van het scenario klimaatverandering een versterkend effect op de stijging van de GHG. De GLG zakt door het verhogen van drainagebasis bij klimaatverandering minder ver uit.

Het verhogen van de drainagebasis leidt tot een afname van de droogteschade met 1-3% direct rond de aangepaste watergangen. De natschade neemt in deze gebieden echter toe. Het scenario klimaatverandering leidt in vrijwel het gehele gebied tot een toename van de droogteschade en plaatselijk tevens tot een toename van de natschade. Uit het scenario verhoging drainagebasis en klimaatverandering blijkt dat door het verhogen van de drainagebasis de droogteschade lokaal enigszins beperkt kan worden. De natschade neemt door de combinatie echter extra toe. Als gevolg van het verhogen van de drainagebasis neemt de doelrealisatie landbouw rond de aangepaste sloten toe met gemiddeld 1 tot 3%. Bij klimaatverandering neemt vrijwel overal de doelrealisatie af met gemiddeld 1%. Door beide scenario's te combineren blijft de daling van de doelrealisatie rond de aangepaste sloten beperkt en neemt lokaal zelfs toe. Het bleek dat de gevolgen van de scenario's op de doelrealisatie natuur met de gebruikte methode niet goed bepaald konden worden. Zoals al bij de referentiesituatie aangegeven wordt dit veroorzaakt door de ruimtelijke schematisatie van de natuurdoeltypen.

Op basis van gesimuleerde reeksen over de periode 1951-1999 zijn de gemiddelde en de minimale en maximale afvoeren van de Stortelersbeek bepaald. De gemiddelde afvoer van de Stortelersbeek blijkt door klimaatverandering iets te stijgen. De minimale afvoer van $0.003 \text{ m}^3/\text{s}$ verandert niet door de scenario's. Het aantal dagen dat deze lage afvoer voorkomt, neemt wel voor elk scenario toe met 2-4%. De maximale afvoer neemt door het verhogen van de drainagebasis ten opzichte van de referentie situatie met $0.014 \text{ m}^3/\text{s}$ toe naar $1.032 \text{ m}^3/\text{s}$. Als gevolg van klimaatverandering neemt de maximale afvoer toe naar $1.307 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij een combinatie van klimaatverandering en het verhogen van de drainagebasis neemt de afvoer toe naar $1.322 \text{ m}^3/\text{s}$.

Door het verhogen van de drainagebasis neemt de kans op piekafvoeren op de Stortelersbeek toe. Een afvoer van $1 \text{ m}^3/\text{s}$ heeft in de referentie situatie een herhalingstijd van ongeveer 150 jaar. Bij het verhogen van de drainagebasis neemt de herhalingstijd af naar ongeveer 120 jaar. Bij klimaatverandering neemt de herhalingstijd behorende bij een afvoer van $1 \text{ m}^3/\text{s}$ zelfs af naar 40 jaar. Klimaatverandering in combinatie met het verhogen van de drainagebasis leidt tot een herhalingstijd van 35 jaar voor een afvoer van $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

9.2 Discussie en aanbevelingen

Ook na de calibratie zijn er nog duidelijke verschillen tussen gemeten en berekende afvoer, in mindere mate is dit ook voor de grondwaterstanden het geval. Om een betere weergave van de werkelijkheid te verkrijgen is het aan te bevelen om meer inzicht te krijgen in de variatie van de doorlaatfactor van het watervoerende pakket. Ook is het aan te bevelen om in een vervolgstudie te bepalen in hoeverre de positie van de modelrand van invloed is op de uitkomsten in het interessegebied.

Achteraf gezien is het de vraag of de methode Waternood de meest geschikte methode is om de effecten van de scenario's op landbouw en natuur te bepalen. De doelrealisatie natuur kon bijvoorbeeld in deze studie niet goed worden bepaald. De oorzaak hiervan was de gebruikte natuurdoeltypenkaart. Om betere uitspraken te kunnen doen over de effecten van de scenario's op de natuur in het gebied moet er een zeer gedetailleerde natuurdoeltypenkaart gemaakt worden met per vlakje één natuurdoeltype. Een andere en misschien betere mogelijkheid is gebruik maken van het programma Natles [Runhaar *et al*, 2003] in plaats van de methode Waternood. Met Natles is het mogelijk om de kansrijkdom van vegetaties te bepalen. Bijvoorbeeld bepalen of het verhogen van de drainagebasis de kansrijkdom voor een elzenbroekbos langs de beek vergroot of niet.

In het onderzoek zijn de extreem lage afvoeren vrijwel buiten beschouwing gelaten. Toch is bekend dat te lage afvoeren op de Stortelersbeek wel degelijk een probleem vormen voor vooral de beekgebonden flora en fauna. Een vervolgonderzoek waarin ook extreem lage afvoeren worden onderzocht, is hierdoor gewenst.

Bij de berekening van de kansen op extreme afvoeren met de stochastenmethode zijn de initiële waarden voor de grondwaterstanden (en daarmee de initiële vochtconditie van de bodem) bij de scenario's niet aangepast. Dit is uiteraard niet correct, want als gevolg van de scenario's stelt de grondwaterstand zich in op een ander niveau.

De initiële condities zijn in dit onderzoek gedefinieerd aan de hand van waarden voor de GHG, GVG, GG en GLG per gridcel. Voorafgaand aan de berekening van de scenario's met de stochastenmethode kunnen deze worden bepaald met behulp van een modelsimulatie van tenminste 8 jaar. Een nadeel van deze methode is dat het voordeel van de Stochastenmethode ten aanzien van de rekentijd, ten opzichte van het doorrekenen van een lange reeks en toepassing van de tijdreeksmethode, verdwijnt.

Beter nog dan het gebruik van de GHG, GVG, GG en GLG is het gebruiken van de bodemvochtinhoud voorafgaand aan een geselecteerde neerslaggebeurtenis.

Literatuur

- Bakel, P.J.T. van, Bastiaanssen, M.A., Drost, C., Gaast, J. van der, Harmsel, A. ter, Waternood deelrapport 2, Instrumentarium Waternood, Stowa, Utrecht, 2003.
- Bakker, E. Waterwijzer, Ecologische profielen van waternatuur in Gelderland, Deel A: Stromende wateren, Provincie Gelderland, januari 2002.
- Bal, D., Beije, H.M., Fellingier, M., Haveman, R., Opstal, A.J.F.M. van, Zadelhoff, F.J. van, Handboek natuurdoeltypen, Expertisecentrum LNV, Wageningen, 2001.
- Bon, J., Hoge beekafvoeren in de achterhoek, ICW, Wageningen, 1967.
- Bear, J., Verruijt, A., Modelling groundwater flow and pollution, Reidel, Dordrecht, 1987.
- Bruijn, K. de, Hoefsloot, C., De invloed van fysische gebiedskenmerken en menselijke ingrepen op hydrologische droogte, DLO-Staring Centrum, Landbouwniversiteit Wageningen, Wageningen, april 1997.
- Buijs, A., Statistiek om mee te werken, Educatieve Partners Nederland BV, Houten, 1997.
- Cirkel, D.G., Meulepas, R.H.H., Toepassingsmogelijkheden van een flexibeler peilbeheer in het Gelders Rivierengebied, Afstudeerscriptie Hogeschool Larenstein, mei 2001.
- Commissie voor hydrologisch onderzoek TNO, Verklarende hydrologische woordenlijst, TNO, 1986.
- Dijk, J. van, De geologie van de gemeente Winterswijk, R.U. Groningen, Groningen, 1980.
- Feddes, R.A., Crop factors in relation to Makkink reference crop evapotranspiration, Comm. Hydrol. Res. TNO, The Hague, 1987.
- Feddes, R.A., Kowalic, R.J., Zaradny, H., Simulation of field water use and crop yield, Pudoc, Wageningen, 1978.
- Graaff, B. de, Versteeg, R., Wateroverlast, zo goed als zeker, H2O Tijdschrift voor Watervoorziening en Afvalwaterbehandeling nr.21 p28-30, 2000.
- Gumbel, E.J., Statistical Theory of Extreme Values and some Practical Applications, U.S. Department of Commerce, National bureau of standards applied mathematics, february 1954.
- Hanhart, K., Hydrologisch vooronderzoek OBN Landgoed 't Kreijl, Hanhart Consult, Wageningen, april 2001.

Harbers, P., Rosing, H., Bodemkaart van Nederland met toelichting, blad 41 WestAalten, 41 Oost Aalten. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, 1983.

Kleijer, H., Ten Cate, J.A.M., De bodemgesteldheid van het herinrichtingsgebied Winterswijk-Oost; Resultaten van een bodemgeografisch onderzoek, SC-DLO, Wageningen, 1998.

Knol, W.C., Kramer, H., Gijsbertse, H., Historisch Grondgebruik Nederland (HGN) rond 1900; beschrijving van een landsdekkend GIS bestand, Alterra, Wageningen, in prep.

Kok, M., Hoogwaternormering regionale watersystemen, HKV lijn in water, Alterra, juni 2000.

Kolen, B., Kok, M., Bolt, F.J.E. van der., Stochasten voor het thema waterberging van de reconstructie in Brabant, HKV lijn in water, Lelystad, augustus 2001.

Können, G.P., Climate scenario's for impact studies in the Netherlands, KNMI, De Bilt, may 2001.

Koopmans, R.W.R., Vloeistofmechanica en grondwaterstroming, Sectie Waterhuishouding, Universiteit Wageningen, Wageningen, 2000.

Laat, P.J.M. de, Model for unsaturated flow above a shallow water-table, applied to a regional sub-surface flow problem, Pudoc, Wageningen, 1980.

Massop, H.Th.L, Wit, P.A.J.W. de, Hydrologisch onderzoek naar de drainageweerstand van het tertiair ontwateringsstelsel in Oost-Gelderland, DLO-Staring centrum, Wageningen, 1994.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Vierde Nota waterhuishouding, Regeringsbeslissing, Ando bv, Den Haag, december 1998.

Montfort, M.A.J. van, Handleiding kandidaatsvak toegepaste statistiek, Vakgroep Wiskunde Landbouwhogeschool, Wageningen, 1975.

Noordhuis, M., Bakel, P.J.T. van, Holst, A.F. van, Onderzoek naar de verandering van de freatische grondwaterstanden op enkele kaartbladen in de provincie Noord-Brabant als gevolg van veranderingen in de landbouwwaterhuishouding, Staring centrum, Wageningen, 1990.

Peletier, W., Kolstee, H.G., Winterswijk, geologie deel 1, Inleiding tot de geologie van Winterswijk, K.N.N.V. , Hoogwoud, juli 1986.

Projectgroep Waternood, Grondwater als leidraad voor het oppervlaktewater, DLG-publicatie, Utrecht, 1998/2.

Provincie Gelderland, Waterhuishoudingsplan Gelderland voor de jaren 1996–2000, Provinciaal bestuur Gelderland, Arnhem, september 1996.

Querner, E.P., Aquatic weed control within an integrated water management framework, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, 1993.

Querner, E.P., Effecten van klimaatverandering en waterconservering op beekafvoeren en grondwaterstanden geëvalueerd in het Stortelersbeekgebied, Alterra, Wageningen, 2002.

Querner, E.P., Bakel, P.J.T. van, Description of the regional groundwater flow model SIMGRO, Winand Staring centre, Wageningen, 1989.

Reiss, R. D., Thomas, M., Statistical Analysis of Extreme Values, Birkhauser Verlag, Basel Switzerland, 1997.

Runhaar, J., Hennekens, S., 'Hydrologische randvoorwaarden natuur'. Gebruikershandleiding, Alterra, Wageningen, juli 2002.

Runhaar, J., Kuijpers, H., Boogaard, H.L., Schouwenberg, E.P.A.G., Jansen, P.C., Natuurgericht landevaluatiesysteem (Natles) versie 2, Alterra, Wageningen, 2003.

Rijtema, P.E., Een berekeningsmethode voor de benadering van de landbouwschade ten gevolge van grondwateronttrekking, I.C.W, Wageningen, 1971.

Sluijs, P. van der, De grondwatertrap als karakteristiek van het grondwaterstandsverloop, H2O tijdschrift voor watervoorziening en Afvalwaterbehandeling 15:42-46, 1982.

Stephenson, A., A User's Guide to the evd Package, Department of Mathematics and Statistics, Lancaster University, 2003.

Stumpe, J., Tielrooij, F., Waterbeleid voor de 21e eeuw. Geef water de ruimte en de aandacht die het verdient, Commissie Waterbeheer 21e eeuw, Den Haag, 2000.

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Van Overschrijdingskans naar Overstromingskans, achtergrondrapport, Den Haag, juni 2000.

Torfs, P.J.J.F., Eindige elementen in de hydrologie, Sectie Waterhuishouding, Universiteit Wageningen, Wageningen, 2001.

Torfs, P.J.J.F., Stochastische hydrologie, Sectie Waterhuishouding, Universiteit Wageningen, Wageningen, 2001.

Venables, W.D., Smith, D.M., An introduction to R version 1.7.0, R Development Core Team, 2003.

Vereniging voor Landinrichting, Cultuurtechnisch Vademecum, Handboek voor inrichting en beheer van het landelijke gebied, Elsevier bedrijfsinformatie BV, Doetinchem, 2000.

Walsum, P.E.V. van, Veldhuizen, A.A., Waterconservering en multifunctioneel landgebruik ten behoeve van ondiepe waterwinning en natte natuur, Staring Centrum, Wageningen, 1999.

Werkgroep herziening Cultuurtechnisch Vademecum, cultuurtechnisch vademecum, Cultuurtechnische vereniging, Utrecht, 1988.

Werkgroep verdrogingskaart, Verdrogingskaart 2000 van Nederland, landelijke inventarisatie van verdroogde gebieden en projecten verdrogingsbestrijding, RIZA/IPO, Den Haag, 2000.

Werkgroep Water wijzer, Waterwijzer, Ecologische profielen van waternatuur in Gelderland, Deel A: Stromende wateren, Provincie Gelderland, januari 2002.

Wesseling, J.G., CAPSEV : steady state moisture flow theory : program description, user manual, Staring Centre, Wageningen, 1991.

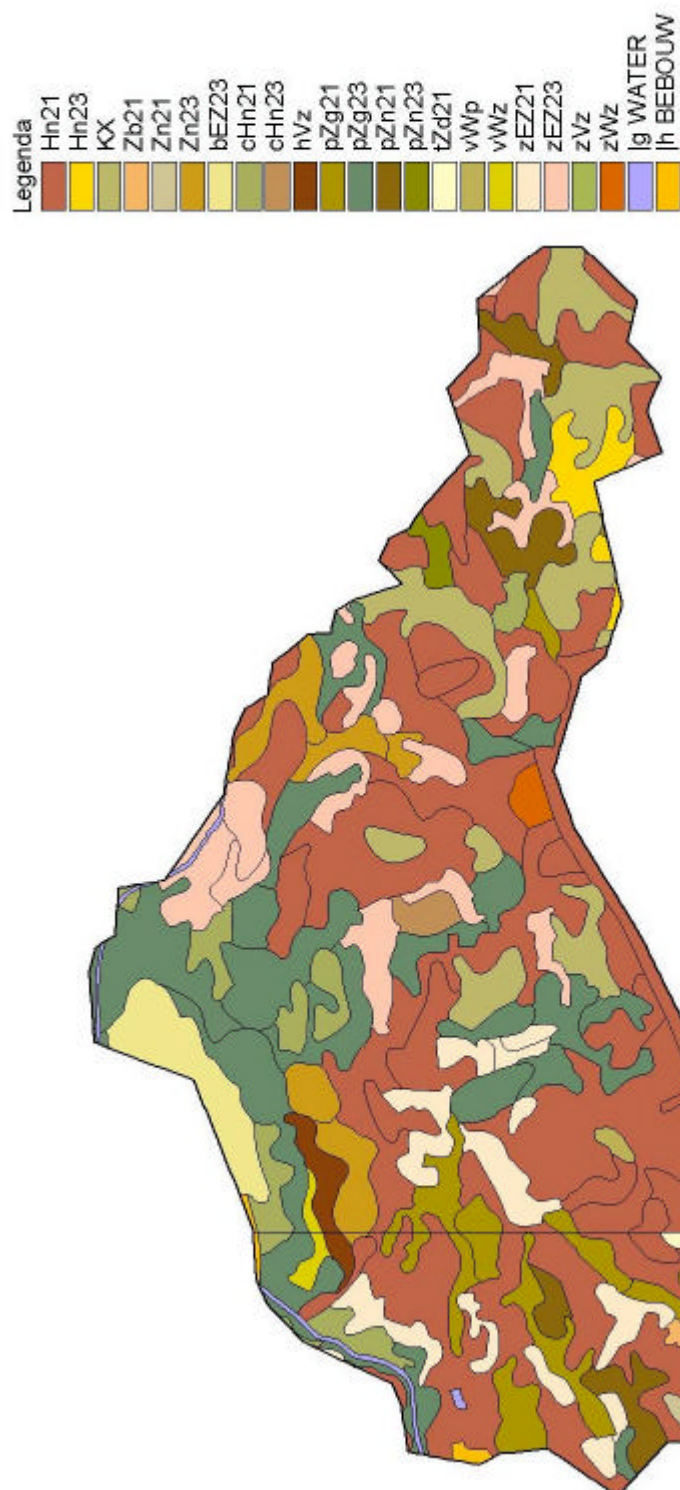
Wit, A.J.W. de, Heijden, Th.G.C. van der, Thunissen, H.A.M., Vervaardiging en nauwkeurigheid van het LGN3-grondgebruiksbestand. Achtergrondinformatie bij het gebruik van het bestand., SC-DLO, Wageningen 1999.

Wösten, J.H.M., Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringsreeks, Alterra, Wageningen, 2001.

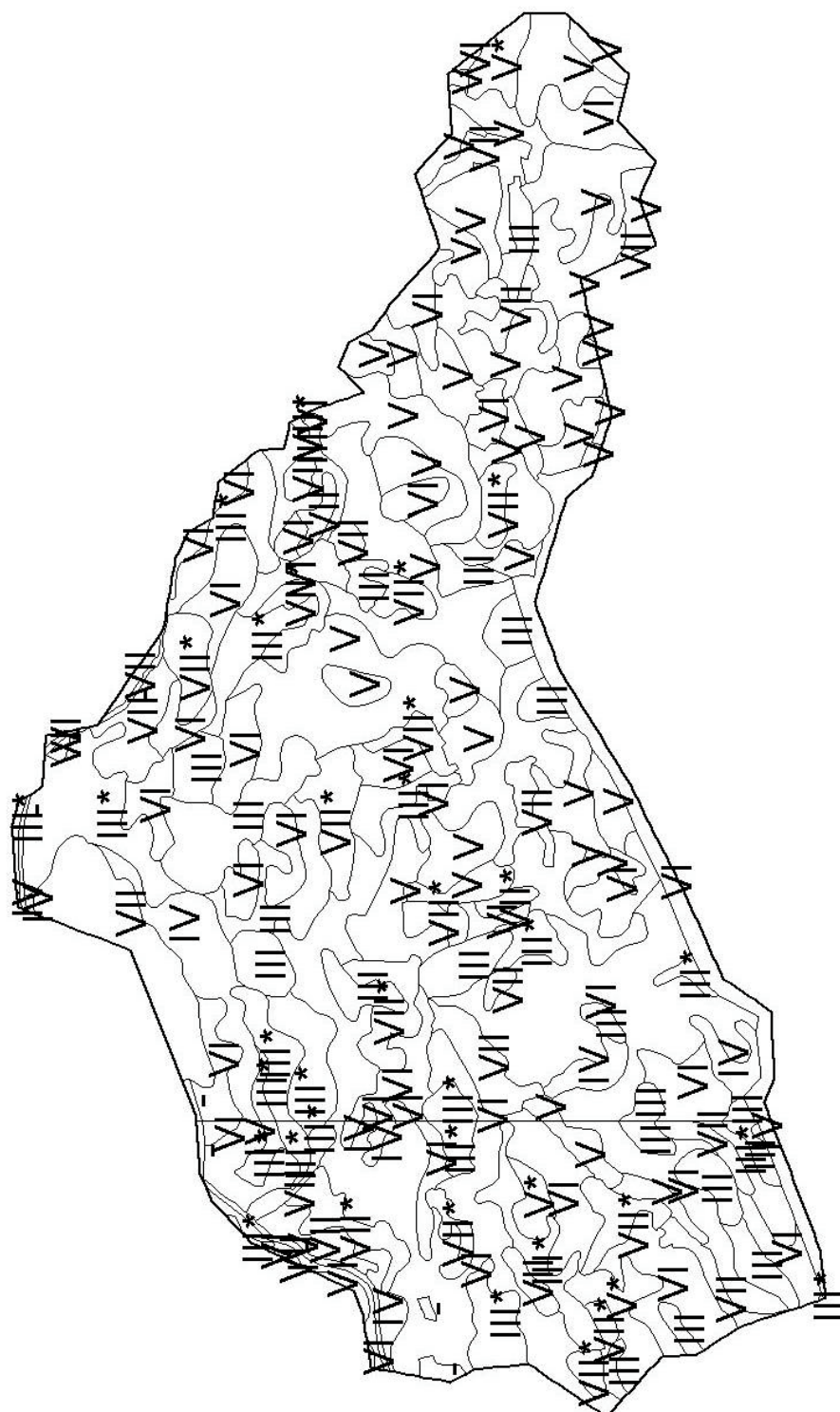
Bijlage 1 Stratigrafische tabel

Periode	Series	Formatie	Afzetting	Laag	Lithologie	Dagzomen
KWARTAIR	Pleistoceen	Twente			dekzand	Dun op plateaus
		Drenthe			Keileem op plateaus Fluvioglaciaal zand in de geulen	
TERTIAIR	Boven Mioceen				Hiaat	
	Midden Mioceen		Eibergen		Zandige klei tot zware klei	Westen
			Aalten	Stemerdink	Zandige klei tot zware klei	Midden
				Miste	Grof zand aan basis, met steeds meer klei naar boven	Midden
	Onder Mioceen				Hiaat	
	Boven Oligoceen				Hiaat	
	Midden Oligoceen		Winterswijk		Zandige klei	Oosten
			Brinkheurne		Zeer vette stugge klei	Oosten
			Ratum		Fijn zand soms kleiig	Uiterste oosten

Bijlage 2 Bodemkaart



Bijlage 3 Grondwatertrappen



Bijlage 4 Gevoeligheidsanalyse

Tabel A4.1 Verandering van de RMSE voor (a) grondwaterstanden en (b) afvoeren ten opzichte van de referentiesimulatie voor de verschillende varianten. Tevens zijn voor de afvoeren van de beek de veranderingen in de maximale en minimale afvoer weergegeven

a) Grondwaterstanden (cm)

Peilbuis nummerr	Referentie simulatie	randpotentiaal		k-waarde keileem		k-waarde watervoerend pakket		drainageweerstand secundair systeem			drainageweerstand tertiair systeem		Laagdikte onder keileem	Onverzadigde bergingscoëfficiënt	Tijdstap grondwater	k-waarde deklaag
		-0.5m	-1.0m	-50%	+50%	-50%	+50%	-50%	+50%	+100%	-50%	+50%	-75%	-25%	+0.5 d	-50%
41BP0093_01	18	0	1	0	0	-3	4	1	-1	-1	0	4	2	1	0	0
41BP0094_02	43	-10	-20	0	0	-3	3	-1	3	5	0	-3	0	0	1	1
41BP0095_01	45	-5	-10	0	0	-2	2	-2	1	4	0	-6	0	0	0	1
41DP0031_01	28	-1	-2	0	0	8	-12	-4	4	7	0	-10	-2	-1	0	0
41DP0031_02	25	-1	-2	0	0	9	-10	-3	4	8	0	-9	-1	-1	1	0
41EL0019_01	33	0	0	1	-1	-2	0	0	0	0	0	0	-2	-1	-1	-1
41EL0021_01 ¹	153	0	0	1	0	-42	33	1	0	-1	-1	4	3	0	0	-2
41EL0028_01	71	-18	-38	0	0	6	0	0	1	2	0	-4	0	1	0	1
41EP0205_01	38	0	0	-2	1	8	-7	0	0	1	-1	0	14	0	0	2
41EP0206_01	26	0	-1	0	0	2	0	-2	4	9	0	-8	0	0	1	0
41EP0261_02	93	-37	-71	0	0	8	-2	0	0	1	0	0	0	0	1	1
41GL0001_01	42	0	1	-5	2	-11	6	1	-2	-3	0	5	4	1	-1	-1
41GL0002_01	32	0	0	-1	0	3	-3	0	0	0	0	-1	4	0	0	1
41GL0004_01	25	0	0	-2	0	9	-6	-1	0	1	-1	-2	19	-1	-1	1

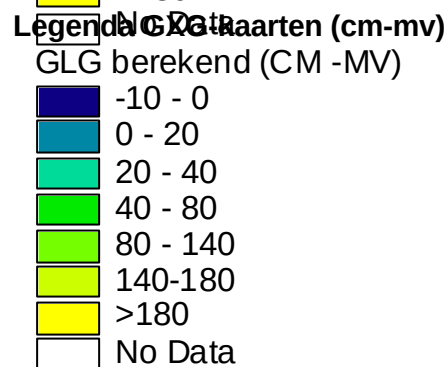
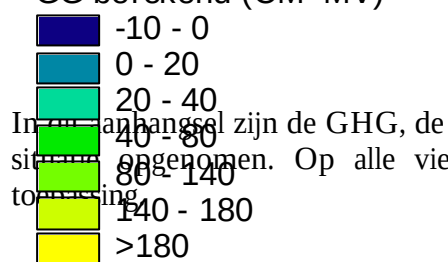
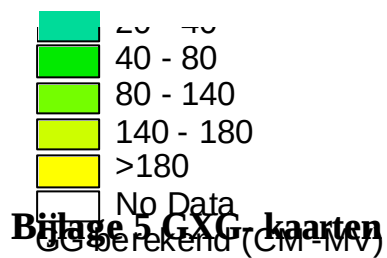
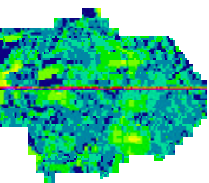
¹ Hoge waarde van de RMSE voor deze peilbuis heeft te maken met verschuiving over een constante hoogte, waarschijnlijk veroorzaakt door de hoogteverdeling in SIMGRO

B) afvoeren (l/s)

Hoeveelheid afvoer	Referentie simulatie	randpotentiaal		k-waarde keileem		k-waarde watervoerend pakket		drainageweerstand secundair systeem			drainageweerstand tertiair systeem		Laagdikte onder keileem	Onverzadigde bergingscoëfficiënt	Tijdstap grondwater	k-waarde deklaag
		-0.5m	-1.0m	-50%	+50%	-50%	+50%	-50%	+50%	+100%	-50%	+50%	-75%	-25%	+0.5 d	-50%
>100 l/s		6.1	12.2	-0.2	0.1	-0.8	1.4	0.1	-0.4	-0.2	-0.3	0.8	-0.6	0.5	-5.3	-1.0
<100 l/s		-3.1	-5.6	-0.1	0.0	-3.3	2.5	0.4	-0.5	-1.2	0.0	-0.5	-0.7	-0.4	-0.3	-0.5
Piek ²	507	-14	-34	1	0	26	-16	-3	4	9	3	-11	2	6	110	5
Basis ³	10	0.0	-0.5	0.0	0.0	-2	2	0.1	0.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	-1.2	0.0	0.0

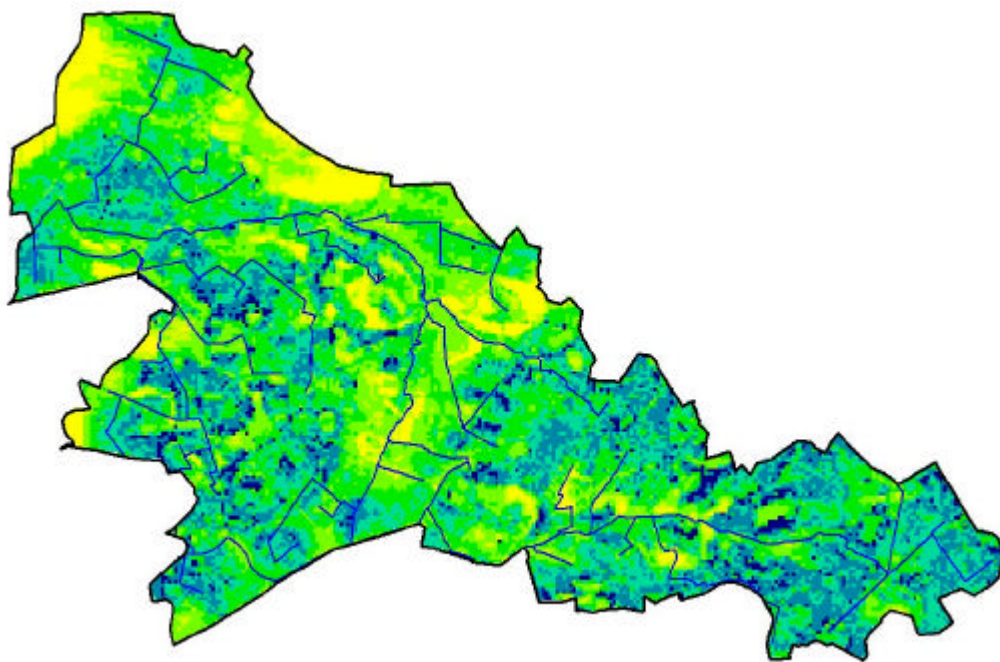
² geobserveerde afvoer op 28-01-1994 is 825 l/s

³ geobserveerde afvoer over 10 dagen in augustus 1994 is 0 l/s

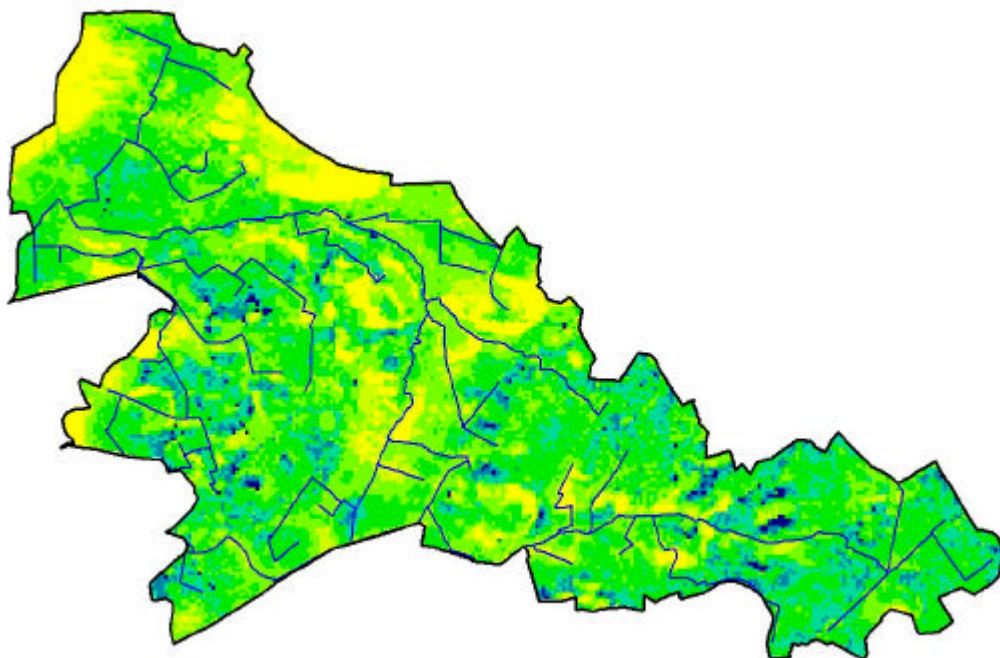


In een aanhangsel zijn de GHG, de GVG, de GG en de GLG kaart van de referentie situatie opgenomen. Op alle vier de kaarten is de onderstaande legenda van toepassing.

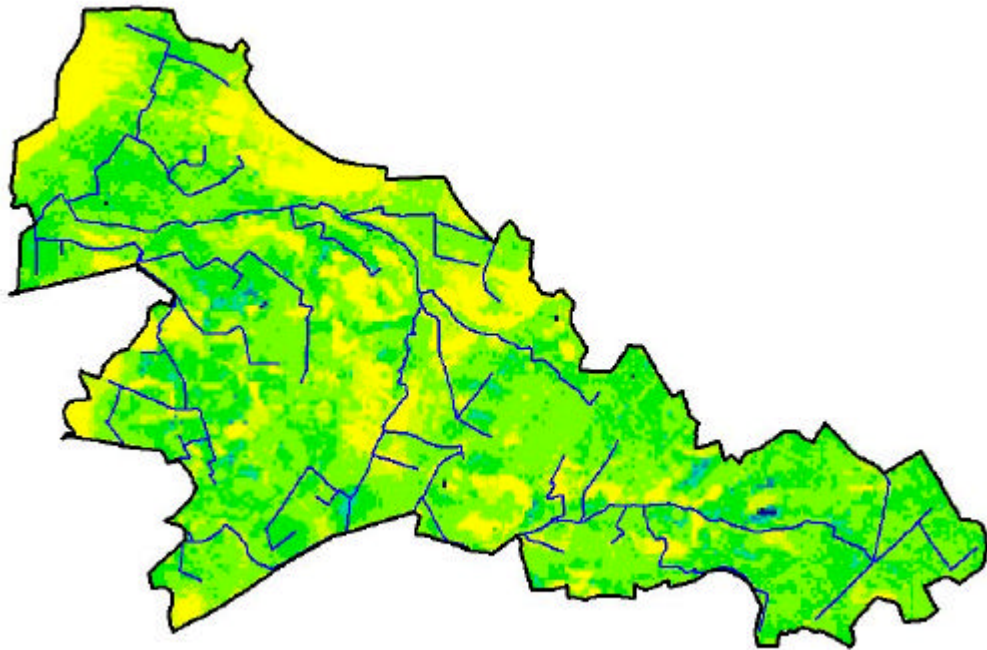
GHG-kaart



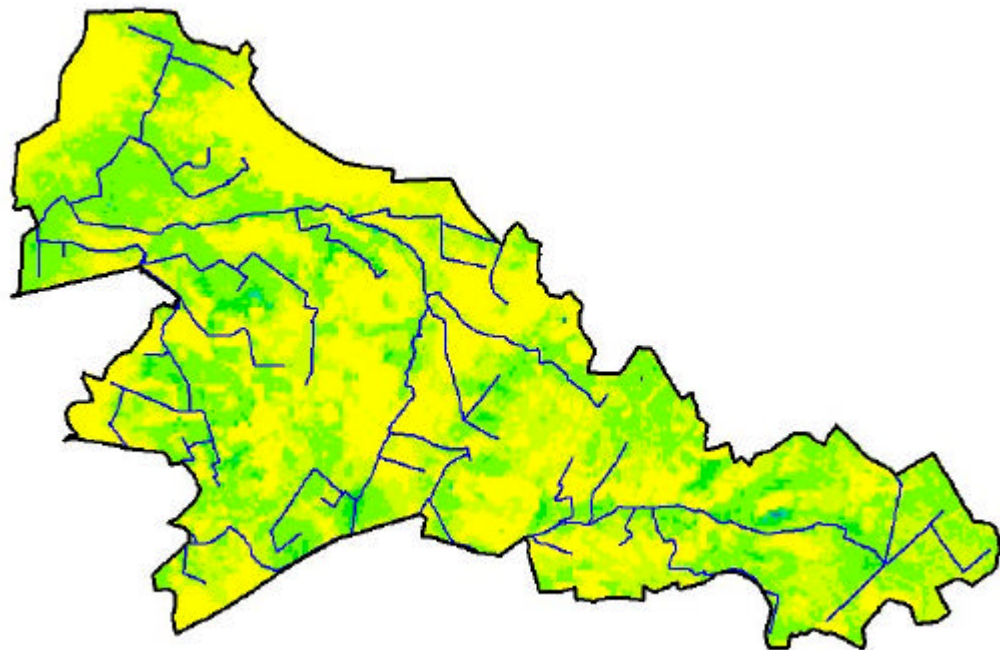
GVG-kaart



GG-kaart



GLG-Kaart



Bijlage 6 HELP-tabel

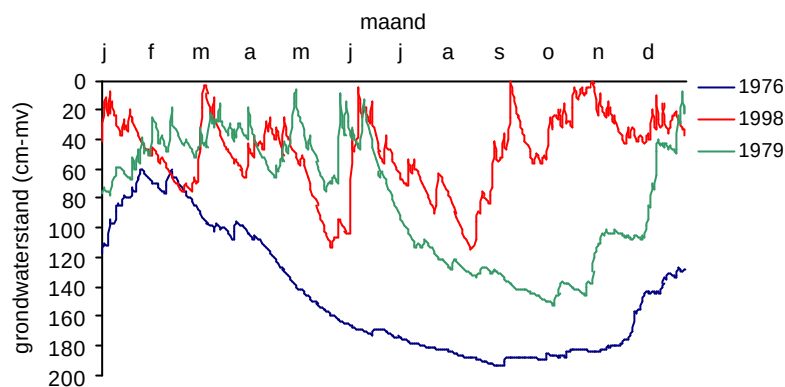
Om inzicht te krijgen in hoeverre de hydrologische situatie voldoet aan de eisen van de landbouw, is er een relatie nodig tussen grondwaterstand en opbrengstdepressies. Voor deze relatie is een methode beschikbaar, de HELP-tabel. In de HELP-tabel zijn opbrengstdepressies in procenten per HELP-bodemprofieltype voor een aantal GHG/GLG combinaties weergegeven.

De wateroverlastdepressies zijn in hoofdzaak gebaseerd op empirische relaties, proefveldervaringen en inzichten en ervaringen van deskundigen in de periode 1975-1985. De droogtedepressies zijn berekend met behulp van meteocijfers van het station De Bilt (periode 1954-1983) en zijn de waarden gemiddeld over 30 jaar.

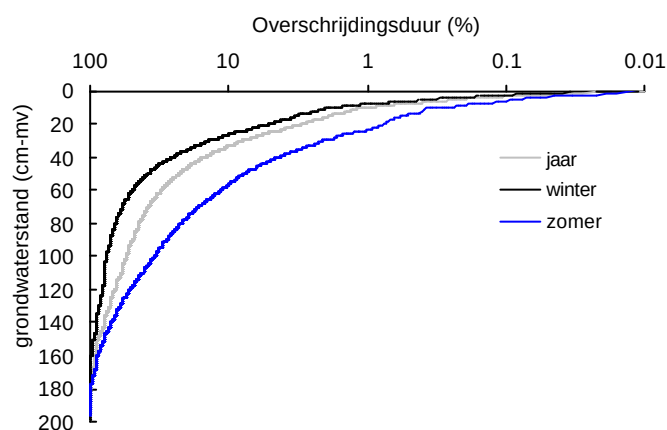
Berekeningen op basis van de HELP-tabel gebeuren in de regel op gebiedsniveau. Daar is de HELP-tabel ook voor bedoeld. Voor berekeningen op perceels- of lokaal niveau is de HELP-tabel minder geschikt omdat de depressiepercentages gelden voor een gemiddeld bodemprofiel van een bepaald bodemtype. Bij de bodemkundige indeling wordt maar beperkt rekening gehouden met de aard en de dikte van de wortelzone en de vochtnaleverende eigenschappen kunnen tot hetzelfde HELP-bodemtype behoren. Men dient zich te realiseren dat er om het gemiddelde depressiepercentage een behoorlijke spreiding zit voor de profielen die afwijken van het gemiddeld profiel [Voet, H.A.L.J., 1998]. Andere nadelen van de HELP-tabel zijn dat alleen veeljarige nat- en droogteschades worden gegeven en dat de gegevens in de tabellen gebaseerd zijn op onderzoek uit de jaren 70 en 80 van de vorige eeuw en niet op meer recent onderzoek. Omdat er echter geen betere gegevens voorhanden zijn wordt de HELP-tabel nog steeds als uitgangspunt gebruikt [Bakel, P.J.T., 2002].

Bijlage 7 Grondwaterstandsverlopen en duurlijnen

Onderzoekspunt A Veldpodzolgrond

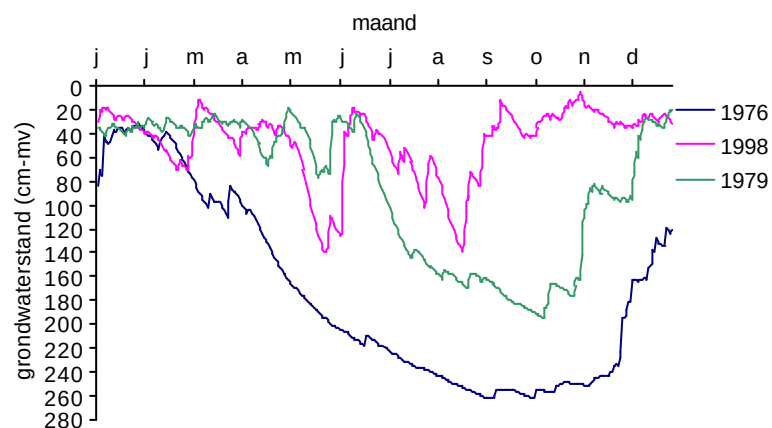


Figuur A7.1 Grondwaterstandsverlopen onderzoekspunt A

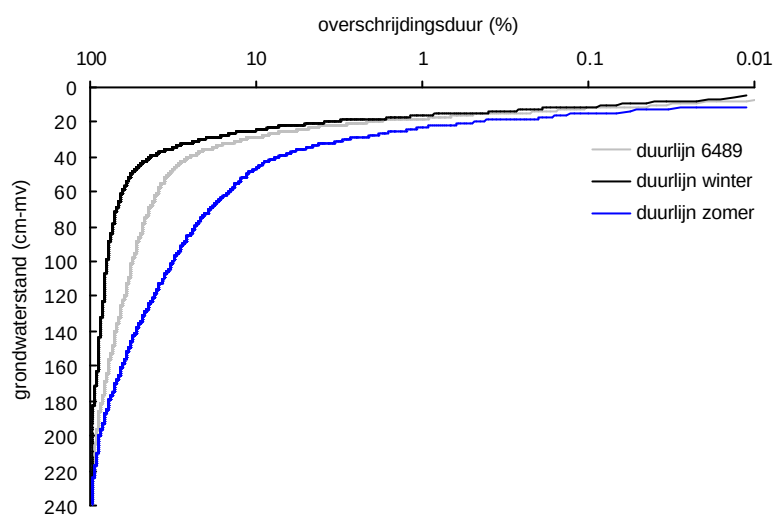


Figuur A7.2 Overschrijdingsduurlijnen onderzoekspunt A voor de periode 1951-1999

Onderzoekspunt B Keileem

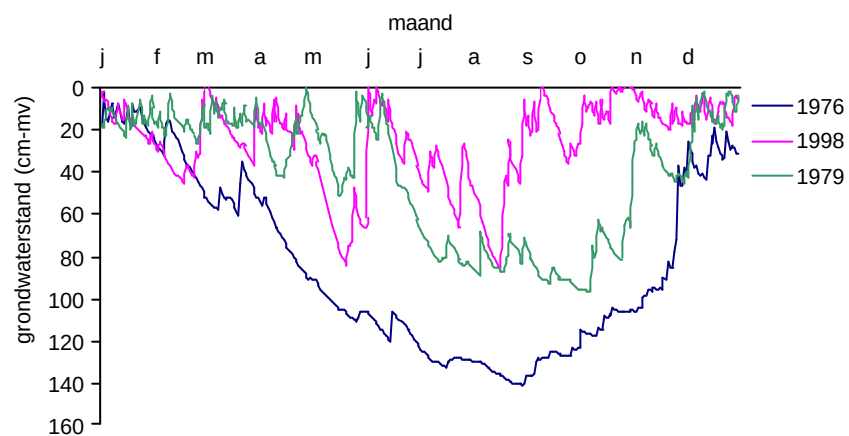


Figuur A7.3 Grondwaterstandsverlopen onderzoekspunt B

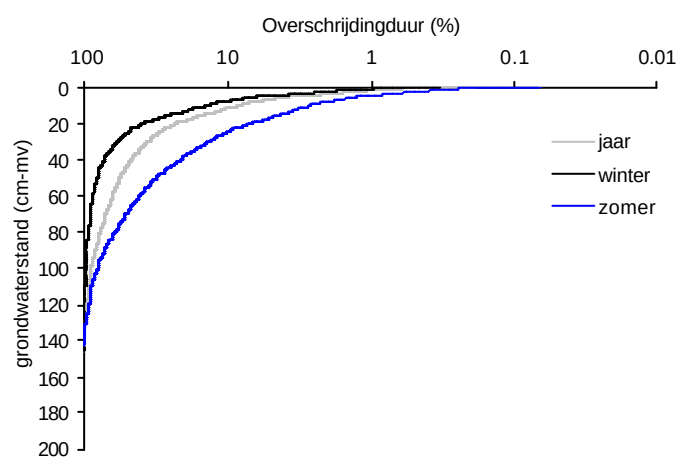


Figuur A7.4 Overschrijdingsduurlijnen onderzoekspunt B voor de periode 1951-1999

Onderzoekspunt C Beekeerdgrond

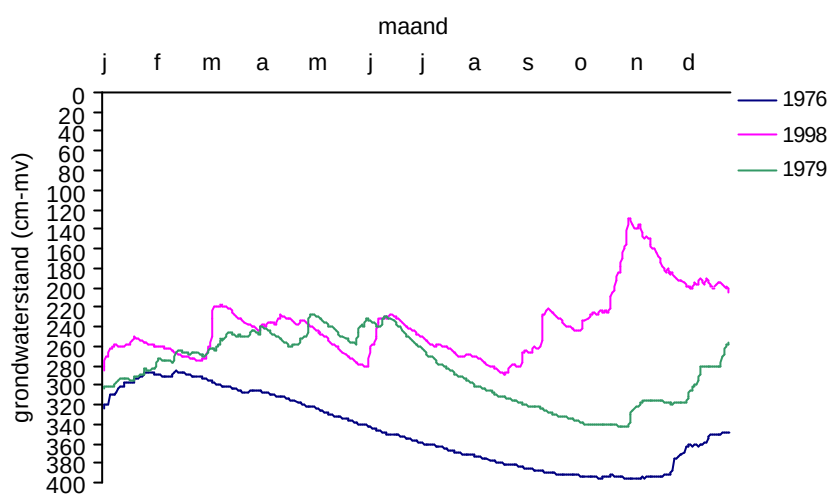


Figuur A7.5 Grondwaterstandsverlopen onderzoekspunt C

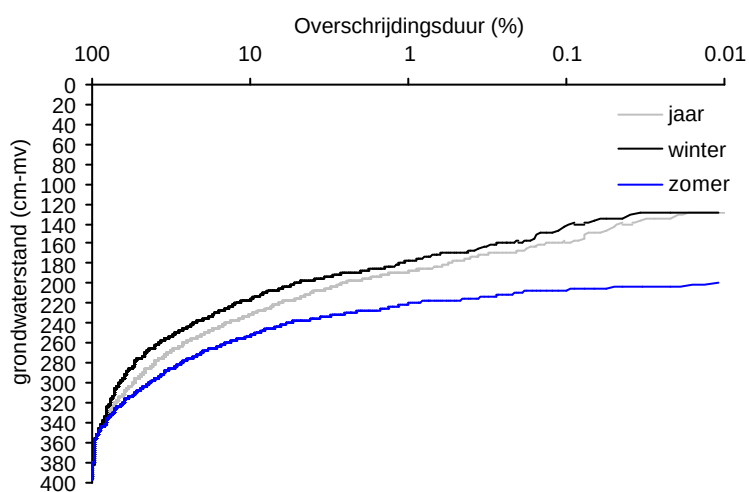


Figuur A7.6 Overschrijdingsduurlijnen onderzoekspunt C voor de periode 1951-1999

Onderzoekspunt D Hoge zwarte enkeerdgrond



Figuur A7.5 Grondwaterstandsverlopen onderzoekspunt D



Figuur A7.6 Overschrijdingsduurlijnen onderzoekspunt D voor de periode 1951-1999

Bijlage 8 R-script voor GEV verdeling

In dit aanhangsel wordt als voorbeeld een R-script voor het gebruik van de GEV verdeling weergegeven. Per stukje code wordt kort uitgelegd waar het commando voor gebruikt wordt. R kan gedownload worden van: <http://www.r-project.org/>.

Alvorens te beginnen moet eerst het evd package geïnstalleerd worden en ingeladen via het keuze menu packages. Ook moet de input file (bijvoorbeeld: storthuidig.R) aangemaakt worden met een format als in het volgende voorbeeld:

```
"storthuidig" <- c(0.236, 0.223, 0.215, 0.185, 0.237, 0.273, 0.374, 0.298, 0.248, 0.703,
0.464, 0.251, 0.259, 0.23, 0.636, 0.618, 0.470, 0.432, 0.188, 0.299, 0.137, 0.058, 0.149,
0.410, 0.232, 0.109, 0.254, 0.189, 0.311, 0.344, 0.566, 0.190, 0.230, 0.408, 0.306, 0.358,
0.365, 0.452, 0.260, 0.262, 0.192, 0.362, 0.598, 0.481, 0.422, 0.135, 0.116, 1.018, 0.473)
```

De input file moet geplaatst worden onder de directory:\R\rw1070\library\evd\Data

Inlezen en plotten van het bestand, met stoh als werknaam van het te analyseren bestand:

```
> data(storthuidig) ; stoh <- storthuidig
> plot(1951:1999, stoh, xlab = "jaar", ylab = "afvoer")
```

Een boxplot geeft inzicht in de kenmerken van de dataset:

```
> boxplot(stoh, horizontal=TRUE)
```

Een andere manier om de kenmerken van de verdeling zichtbaar te maken is met een histogram. Hierin kan tevens de (kernel)kansdichtheidsfunctie afgebeeld worden:

```
> hist(stoh, probability=TRUE)
> lines(density(stoh))
```

Met de volgende code kan de GEV verdeling op de data worden gefit:

```
> stoh.fit <- fgev(stoh)
```

De waarden van de gefitte parameters van de GEV verdeling worden als volgt zichtbaar:

```
> fitted(stoh.fit)
      loc      scale      shape
0.31363214 0.16105709 0.09348794
```

Met de volgende code worden de kenmerken van de gefitte parameters bepaald:

```
> makli.fit
```

```
Call: fgev(x = makli)
Deviance: -18.92623
```

```
Estimates
      loc      scale      shape
0.31363 0.16106 0.09349
```

Standard Errors

loc scale shape
0.02576 0.01929 0.10423

Optimization Information

Convergence: successful
Function Evaluations: 26
Gradient Evaluations: 7

Met behulp van de volgende code kunnen de kansdichtheidsfunctie, de Q-Q plot, de P-P plot en de herhalingstijden grafisch worden weergegeven. Door de parameter ci op TRUE te zetten worden in de figuren per punt de 95% betrouwbaarheid intervallen weergegeven voor de Q-Q, P-P en herhalingstijden plot. De parameter jitter is nodig als de data herhaalde waarden heeft:

```
> plot(stoh.fit, which = 1:4, main = c("Probability Plot", "Quantile Plot", "Density Plot", "Return Level plot"), ci = TRUE, jitter=TRUE)
Hit <Return> to see next plot:
Hit <Return> to see next plot:
Hit <Return> to see next plot:
Hit <Return> to see next plot:
```

De afvoeren behorende bij een bepaalde herhalingstijd kunnen vervolgens met de volgende code bepaald worden. In dit voorbeeld zijn de afvoeren voor herhalingstijden van 10, 25, 50, 100 en 250 jaar bepaald:

```
> qgev(1/10, 0.31363214, 0.16105709, 0.09348794, lower = FALSE)
[1] 0.7170153

> qgev(1/25, 0.31363214, 0.16105709, 0.09348794, lower = FALSE)
[1] 0.9140865

> qgev(1/50, 0.31363214, 0.16105709, 0.09348794, lower = FALSE)
[1] 1.071996

> qgev(1/100, 0.31363214, 0.16105709, 0.09348794, lower = FALSE)
[1] 1.239352

> qgev(1/250, 0.31363214, 0.16105709, 0.09348794, lower = FALSE)
[1] 1.477041
```

Bijlage 9 Gebeurtenissen en frequenties

Gebeurtenissen en frequenties neerslagklasse 800-850 mm (De Bilt)

Gebeurtenis	Frequentie	Gebeurtenis	Frequentie
50mmkl2ghg	0.5256676	50mmkl2gg	1.521348133
50mmkl4ghg	0.1314168	50mmkl4gg	0.3803369
60mmkl2ghg	0.2830268	60mmkl2gg	0.839867067
60mmkl4ghg	0.0707568	60mmkl4gg	0.2099672
70mmkl2ghg	0.1523856	70mmkl2gg	0.463894
70mmkl4ghg	0.0380964	70mmkl4gg	0.1159732
80mmkl2ghg	0.0820468	80mmkl2gg	0.256361533
80mmkl4ghg	0.0205116	80mmkl4gg	0.0640904
90mmkl2ghg	0.0441752	90mmkl2gg	0.141745867
90mmkl4ghg	0.0110436	90mmkl4gg	0.0354365
100mmkl2ghg	0.0237844	100mmkl2gg	0.078412933
100mmkl4ghg	0.005946	100mmkl4gg	0.0196028
110mmkl2ghg	0.012806	110mmkl2gg	0.043400267
110mmkl4ghg	0.0032016	110mmkl4gg	0.0108505
120mmkl2ghg	0.0068948	120mmkl2gg	0.024032867
120mmkl4ghg	0.0017238	120mmkl4gg	0.0060082
130mmkl2ghg	0.0037124	130mmkl2gg	0.013315067
130mmkl4ghg	0.0009282	130mmkl4gg	0.0033292
140mmkl2ghg	0.0019988	140mmkl2gg	0.007380467
140mmkl4ghg	0.0004998	140mmkl4gg	0.0018454
150mmkl2ghg	0.001076	150mmkl2gg	0.004092667
150mmkl4ghg	0.0002688	150mmkl4gg	0.0010226
160mmkl2ghg	0.0005796	160mmkl2gg	0.002271
160mmkl4ghg	0.0001446	160mmkl4gg	0.0005672
170mmkl2ghg	0.000312	170mmkl2gg	0.0012608
170mmkl4ghg	0.000078	170mmkl4gg	0.0003155
180mmkl2ghg	0.000168	180mmkl2gg	0.0007004
180mmkl4ghg	0.000042	180mmkl4gg	0.0001748
50mmkl2gvg	0.7991536	50mmkl2glg	0.729296
50mmkl4gvg	0.1997883	50mmkl4glg	0.182324
60mmkl2gvg	0.4371928	60mmkl2glg	0.411109333
60mmkl4gvg	0.1092984	60mmkl4glg	0.1027776
70mmkl2gvg	0.23929	70mmkl2glg	0.231745067
70mmkl4gvg	0.0598224	70mmkl4glg	0.057936
80mmkl2gvg	0.1310354	80mmkl2glg	0.130636267
80mmkl4gvg	0.0327588	80mmkl4glg	0.0326592
90mmkl2gvg	0.0717904	90mmkl2glg	0.073640533
90mmkl4gvg	0.0179475	90mmkl4glg	0.0184104
100mmkl2gvg	0.0393512	100mmkl2glg	0.041511467
100mmkl4gvg	0.0098376	100mmkl4glg	0.0103776
110mmkl2gvg	0.0215812	110mmkl2glg	0.023400533
110mmkl4gvg	0.0053955	110mmkl4glg	0.0058504
120mmkl2gvg	0.0118414	120mmkl2glg	0.013190933
120mmkl4gvg	0.0029604	120mmkl4glg	0.0032976
130mmkl2gvg	0.0065008	130mmkl2glg	0.007435733
130mmkl4gvg	0.0016254	130mmkl4glg	0.0018592
140mmkl2gvg	0.0035706	140mmkl2glg	0.004191467
140mmkl4gvg	0.0008928	140mmkl4glg	0.001048
150mmkl2gvg	0.001962	150mmkl2glg	0.002362667
150mmkl4gvg	0.0004902	150mmkl4glg	0.0005904
160mmkl2gvg	0.001079	160mmkl2glg	0.001331733
160mmkl4gvg	0.0002694	160mmkl4glg	0.0003328
170mmkl2gvg	0.0005936	170mmkl2glg	0.000750933
170mmkl4gvg	0.0001485	170mmkl4glg	0.000188
180mmkl2gvg	0.0003268	180mmkl2glg	0.000423467
180mmkl4gvg	0.0000816	180mmkl4glg	0.0001056

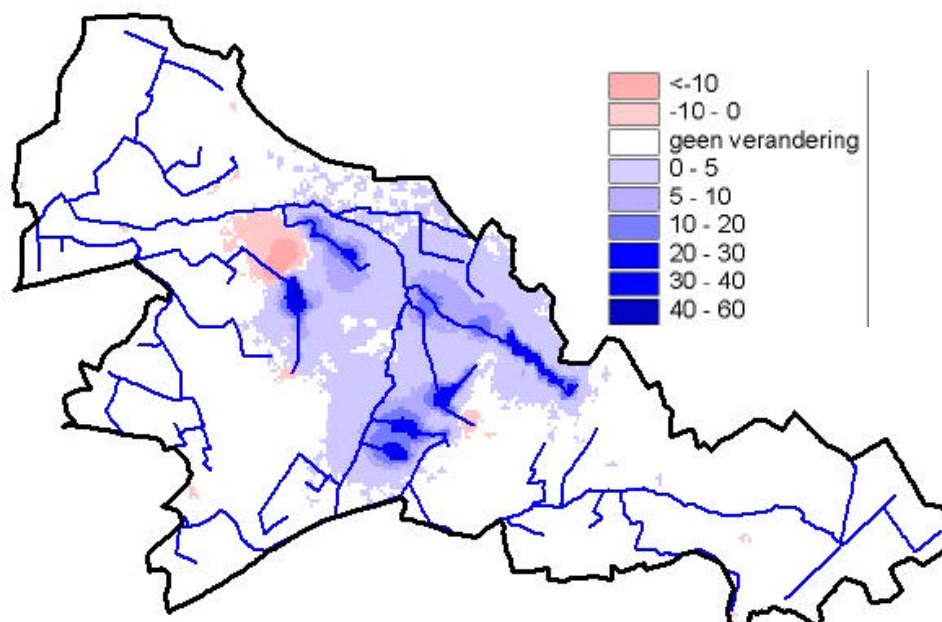
Gebeurtenissen en frequenties neerslagklasse 800-850 mm klimaatverandering

gebeurtenis	frequentie	gebeurtenis	frequentie
50mmkl2ghg	0.682562	50mmkl2gg	1.953234
50mmkl4ghg	0.170641	50mmkl4gg	0.488308
60mmkl2ghg	0.389479	60mmkl2gg	0.6207617
60mmkl4ghg	0.09737	60mmkl4gg	0.285017
70mmkl2ghg	0.222242	70mmkl2gg	0.665726
70mmkl4ghg	0.055561	70mmkl4gg	0.166432
80mmkl2ghg	0.126814	80mmkl2gg	0.388911
80mmkl4ghg	0.031703	80mmkl4gg	0.097228
90mmkl2ghg	0.072362	90mmkl2gg	0.227297
90mmkl4ghg	0.018091	90mmkl4gg	0.056824
100mmkl2ghg	0.04129	100mmkl2gg	0.132899
100mmkl4ghg	0.010322	100mmkl4gg	0.033225
110mmkl2ghg	0.023561	110mmkl2gg	0.077739
110mmkl4ghg	0.00589	110mmkl4gg	0.019435
120mmkl2ghg	0.013444	120mmkl2gg	0.045492
120mmkl4ghg	0.003361	120mmkl4gg	0.011373
130mmkl2ghg	0.007672	130mmkl2gg	0.026633
130mmkl4ghg	0.001918	130mmkl4gg	0.006658
140mmkl2ghg	0.004378	140mmkl2gg	0.015599
140mmkl4ghg	0.001094	140mmkl4gg	0.0039
150mmkl2ghg	0.002498	150mmkl2gg	0.00914
150mmkl4ghg	0.000625	150mmkl4gg	0.002285
160mmkl2ghg	0.001425	160mmkl2gg	0.005357
160mmkl4ghg	0.000356	160mmkl4gg	0.001339
170mmkl2ghg	0.000813	170mmkl2gg	0.003142
170mmkl4ghg	0.000203	170mmkl4gg	0.000785
180mmkl2ghg	0.000464	180mmkl2gg	0.001843
180mmkl4ghg	0.000116	180mmkl4gg	0.00046
50mmkl2gvg	1.030279	50mmkl2glg	0.927246
50mmkl4gvg	0.25757	50mmkl4glg	0.231811
60mmkl2gvg	0.2069208	60mmkl2glg	0.5517877
60mmkl4gvg	0.1491	60mmkl4glg	0.137947
70mmkl2gvg	0.345377	70mmkl2glg	0.328359
70mmkl4gvg	0.086344	70mmkl4glg	0.08209
80mmkl2gvg	0.200089	80mmkl2glg	0.195401
80mmkl4gvg	0.050022	80mmkl4glg	0.04885
90mmkl2gvg	0.115966	90mmkl2glg	0.116279
90mmkl4gvg	0.028992	90mmkl4glg	0.02907
100mmkl2gvg	0.067239	100mmkl2glg	0.069196
100mmkl4gvg	0.01681	100mmkl4glg	0.017299
110mmkl2gvg	0.039002	110mmkl2glg	0.041177
110mmkl4gvg	0.009751	110mmkl4glg	0.010294
120mmkl2gvg	0.022633	120mmkl2glg	0.024504
120mmkl4gvg	0.005658	120mmkl4glg	0.006126
130mmkl2gvg	0.01314	130mmkl2glg	0.014582
130mmkl4gvg	0.003285	130mmkl4glg	0.003646
140mmkl2gvg	0.007632	140mmkl2glg	0.008677
140mmkl4gvg	0.001908	140mmkl4glg	0.00217
150mmkl2gvg	0.004434	150mmkl2glg	0.005164
150mmkl4gvg	0.001109	150mmkl4glg	0.001291
160mmkl2gvg	0.002578	160mmkl2glg	0.003073
160mmkl4gvg	0.000644	160mmkl4glg	0.000768
170mmkl2gvg	0.001499	170mmkl2glg	0.001829
170mmkl4gvg	0.000375	170mmkl4glg	0.000457
180mmkl2gvg	0.000872	180mmkl2glg	0.001088
180mmkl4gvg	0.000218	180mmkl4glg	0.000272

Bijlage 10 Grondwaterstanden scenario's

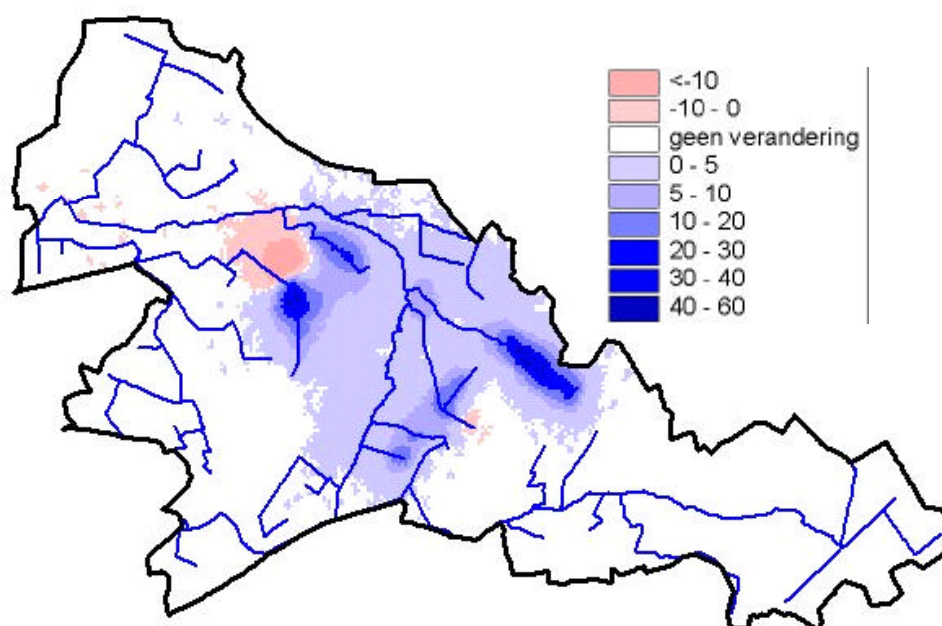
Scenario A Verhogen Drainagebasis watergangen

Verandering GHG:



Figuur A10.1 Verhoging van de GHG (cm) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van het verhogen van de drainagebasis

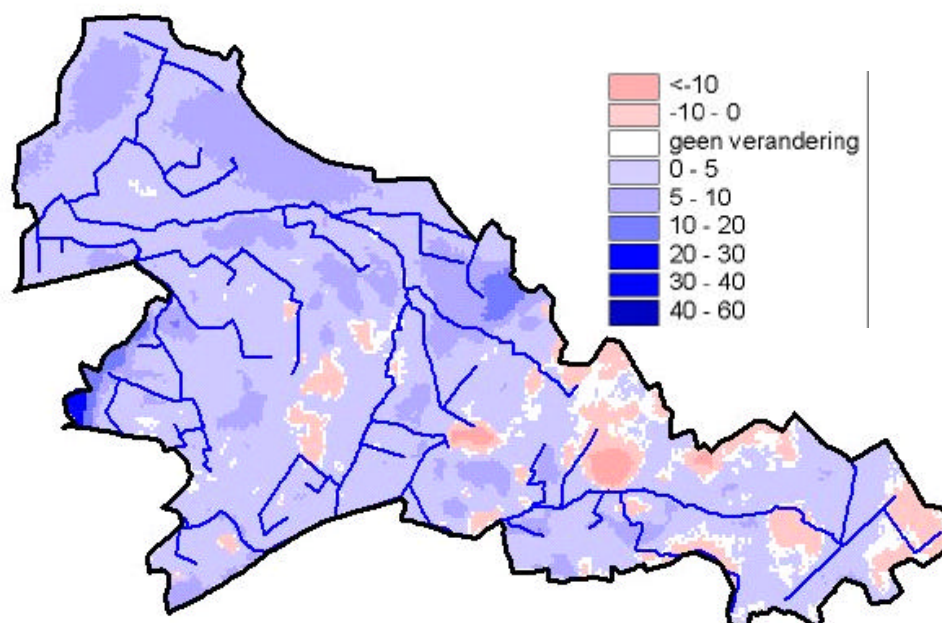
Verandering GLG:



Figuur A10.2 Verhoging van de GLG (cm) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van het verhogen van de drainagebasis

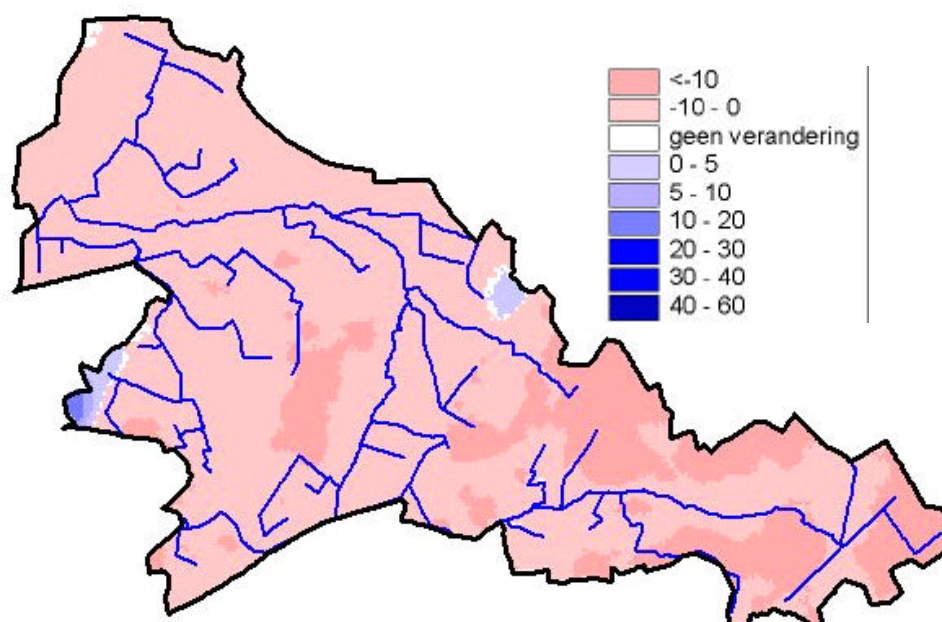
Scenario B Klimaatverandering

Verandering GHG:



Figuur A10.3 Verhoging van de GHG (cm) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van klimaatverandering

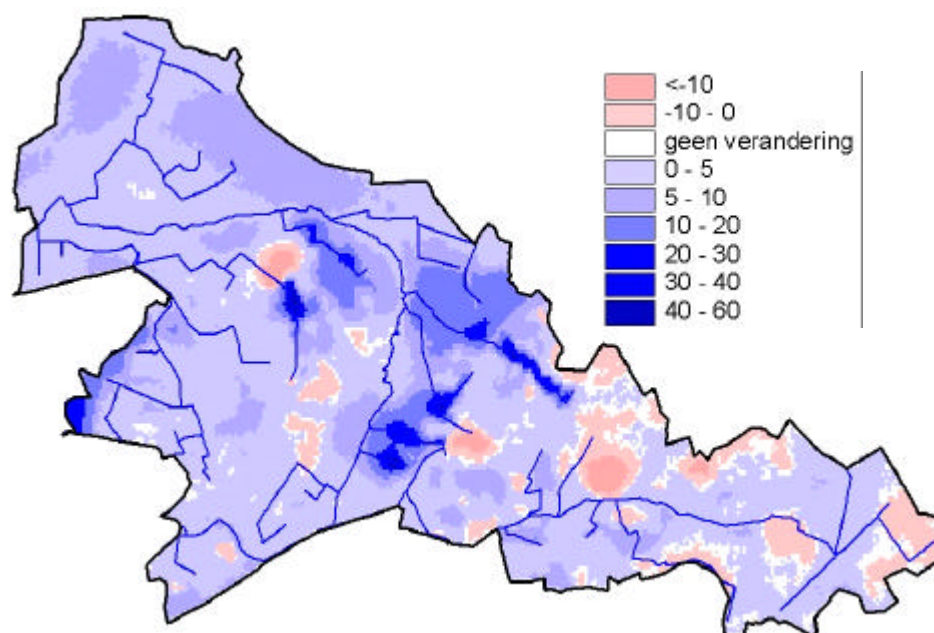
Verandering GLG:



Figuur A10.4 Verhoging van de GLG (cm) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van klimaatverandering

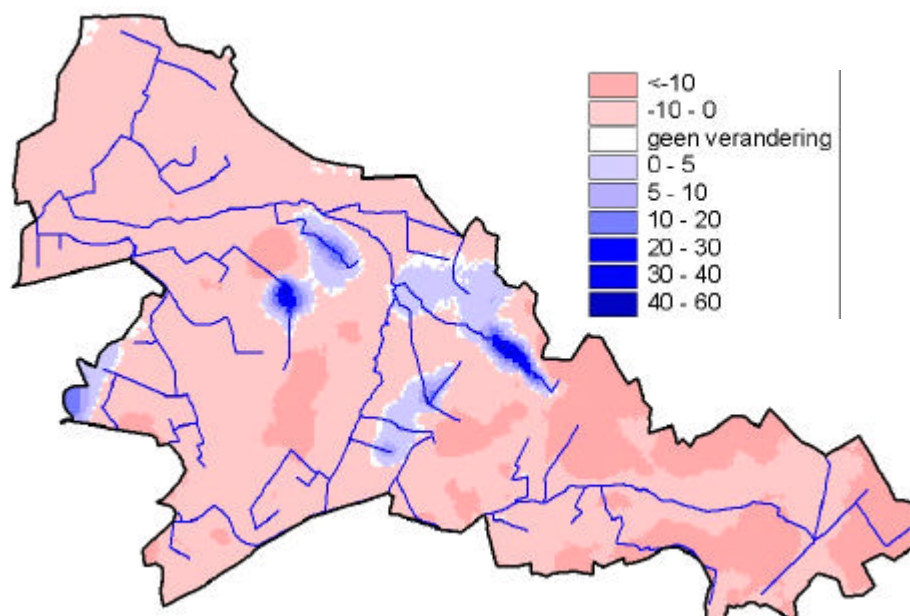
Scenario C Verhogen Drainagebasis watergangen en klimaatverandering

Verandering GHG:



Figuur A10.5 Verhoging van de GHG (cm) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van het verhogen van de drainagebasis en klimaatverandering

Verandering GLG:

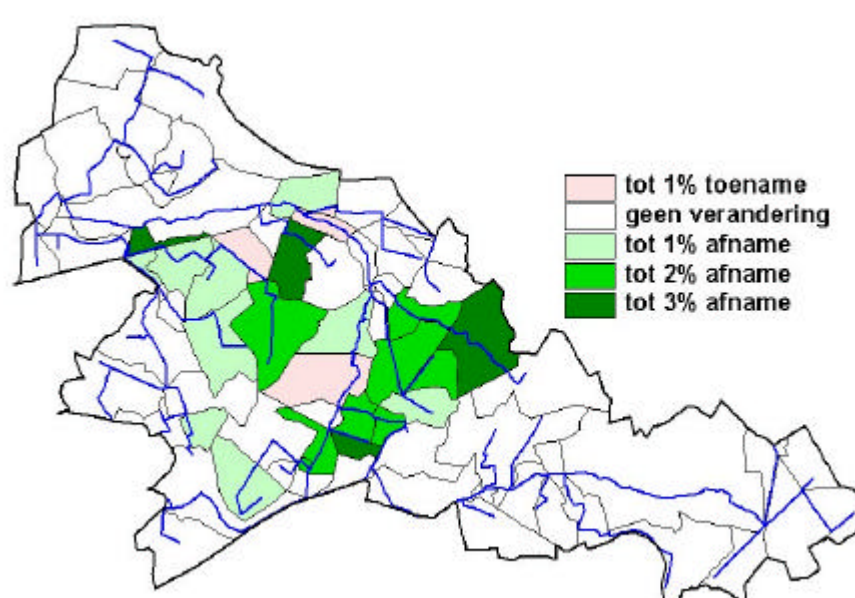


Figuur A10.6 Verhoging van de GLG (cm) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van het verhogen van de drainagebasis en klimaatverandering

Bijlage 11 Nat- en droogteschade scenario's

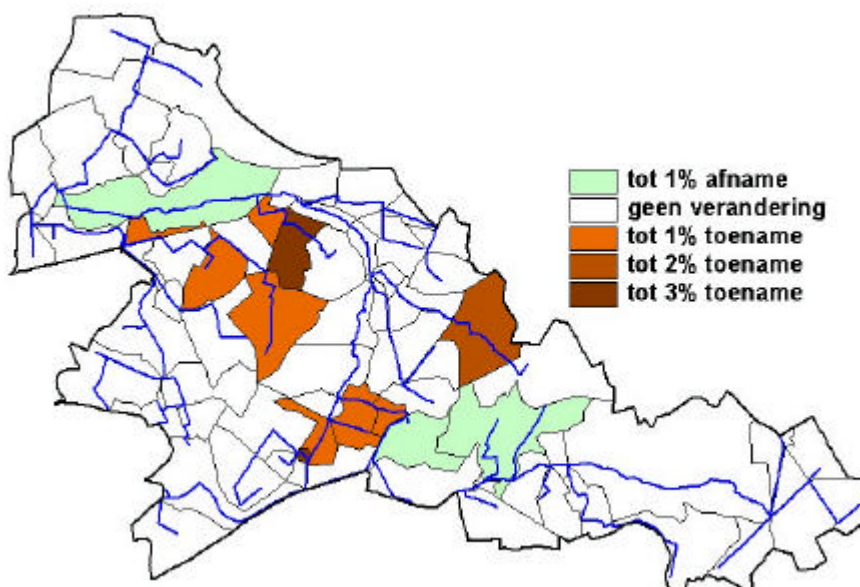
Scenario A Verhoging drainagebasis

Verandering droogteschade:



Figuur A11.1 Verandering van de droogteschade (%) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van het verhogen van de drainagebasis. De schade is weergegeven als gemiddelde per deelstroomgebied.

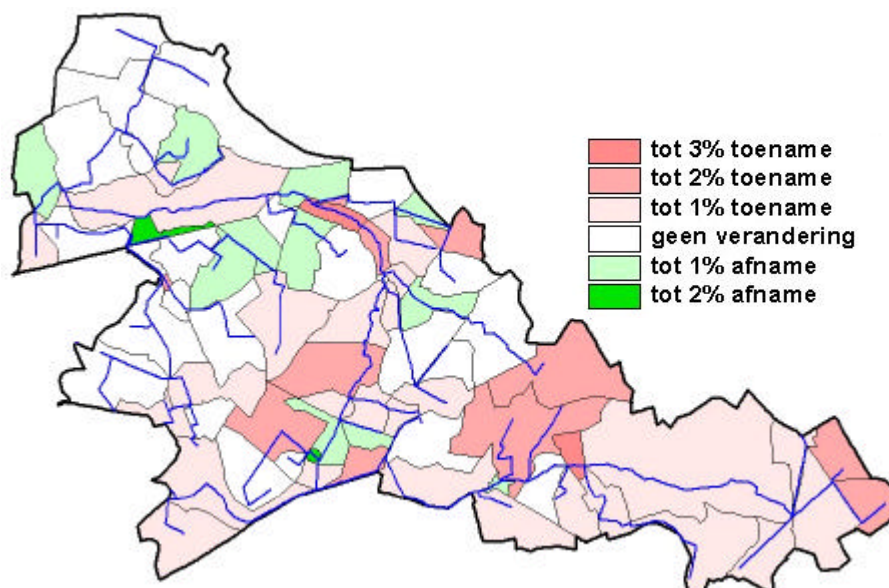
Verandering natschade:



Figuur A11.2 Verandering van de natschade (%) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van het verhogen van de drainagebasis. De schade is weergegeven als gemiddelde per deelstroomgebied.

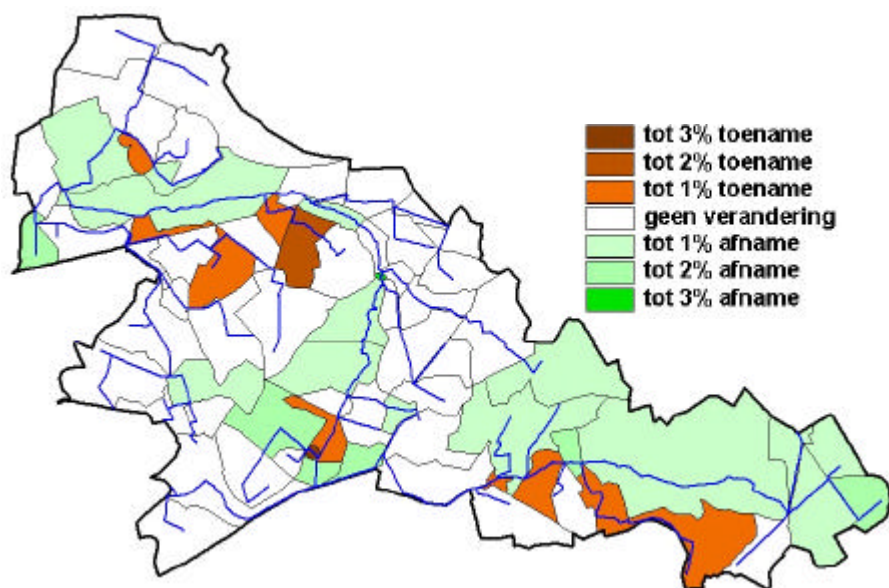
Scenario B Klimaatverandering

Verandering droogteschade:



Figuur A11.3 Verandering van de droogteschade (%) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van klimaatverandering. De schade is weergegeven als gemiddelde per deelstroomgebied.

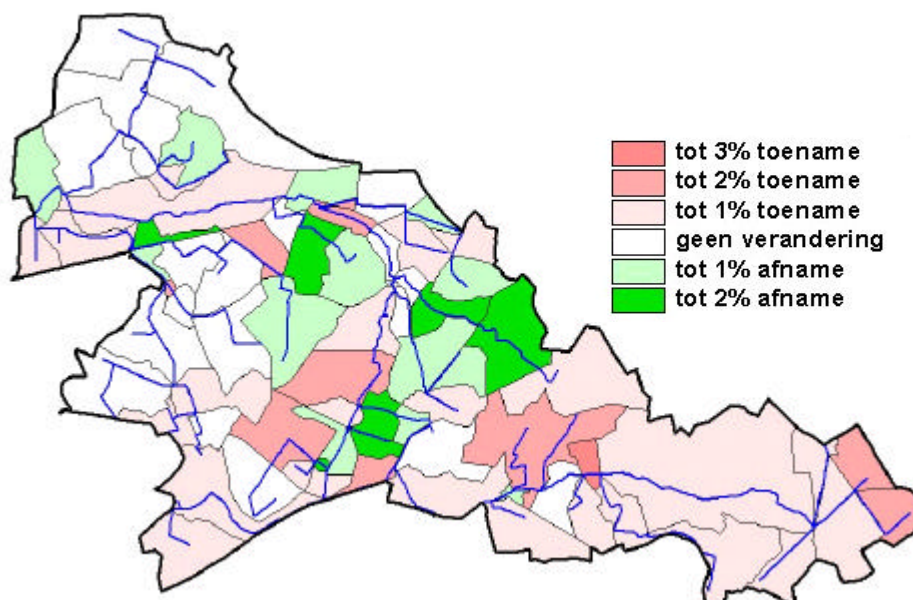
Verandering natschade:



Figuur A11.4 Verandering van de natschade (%) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van klimaatverandering. De schade is weergegeven als gemiddelde per deelstroomgebied.

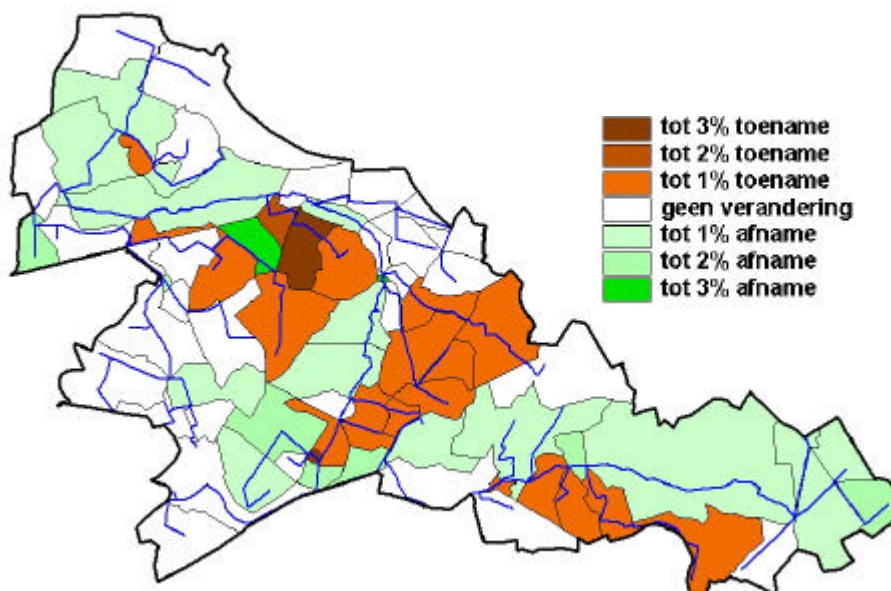
Scenario A Verhoging drainagebasis en klimaatverandering

Verandering droogteschade:



Figuur A11.5 Verandering van de droogteschade (%) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van het verhogen van de drainagebasis en klimaatverandering. De schade is weergegeven als gemiddelde per deelstroomgebied.

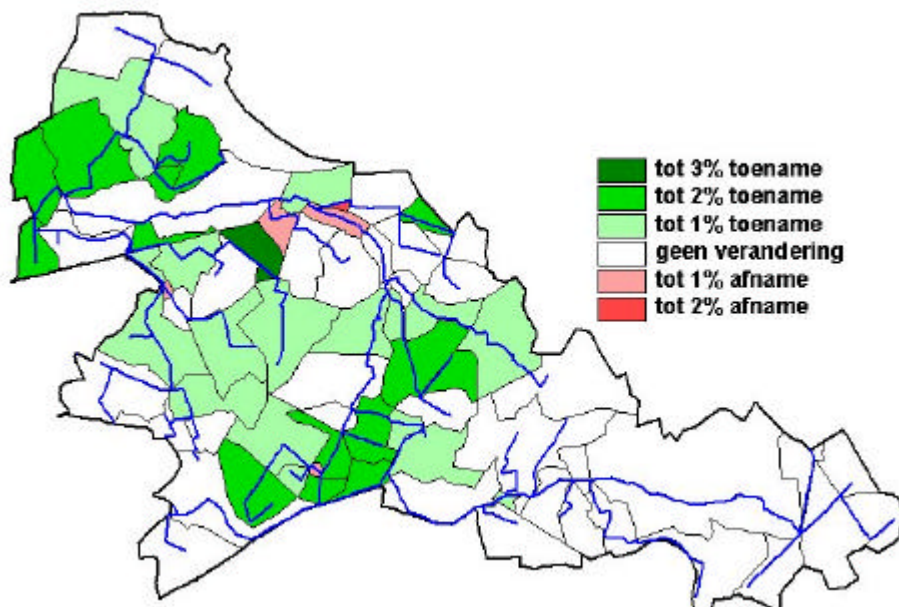
Verandering natschade:



Figuur A11.6 Verandering van de natschade (%) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van het verhogen van de drainagebasis en klimaatverandering. De schade is weergegeven als gemiddelde per deelstroomgebied.

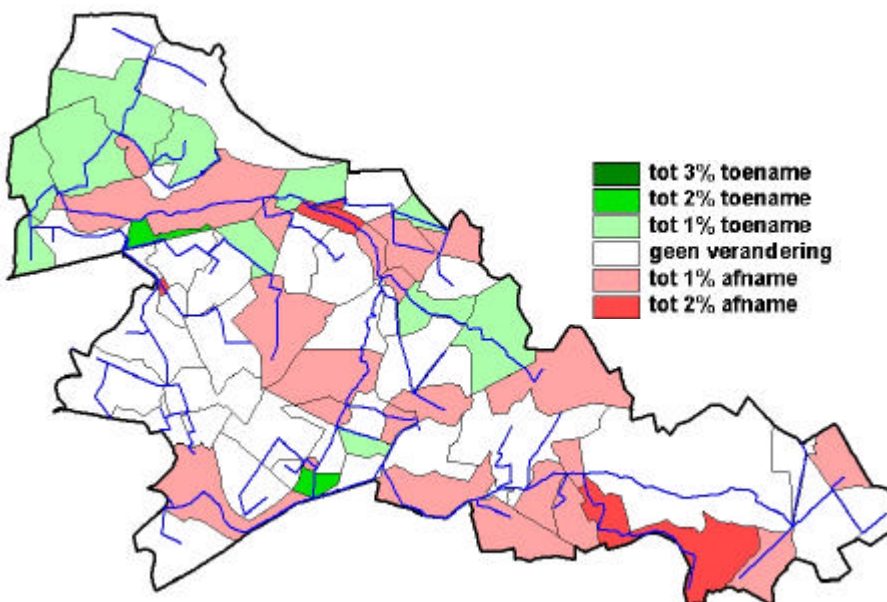
Bijlage 12 Verandering doelrealisatie landbouw

Scenario A Verhoging drainagebasis



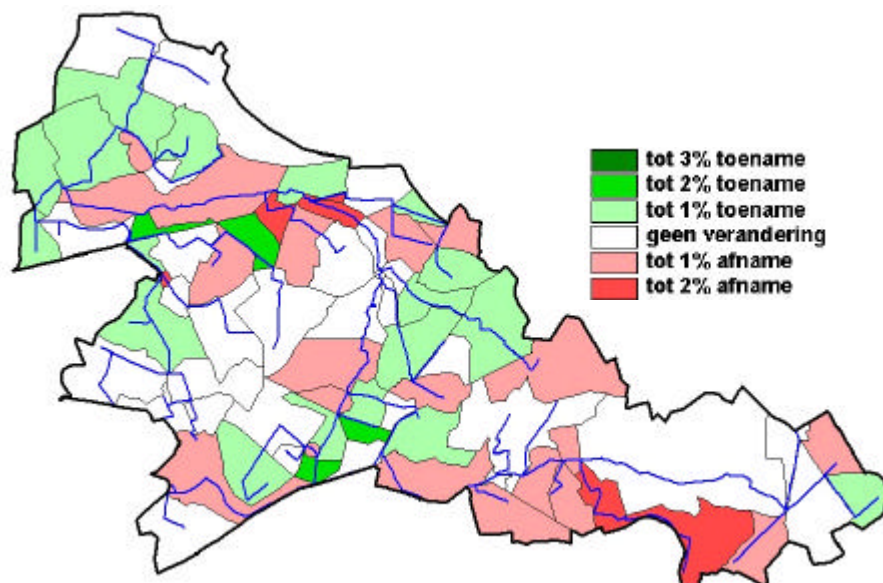
Figuur A12.1 Verandering doelrealisatie landbouw (%) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van het verhogen van de drainagebasis. De doelrealisatie is weergegeven als gemiddelde per deelstroomgebied.

Scenario B Klimaatverandering



Figuur A12.2 Verandering doelrealisatie landbouw (%) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van klimaatverandering. De doelrealisatie is weergegeven als gemiddelde per deelstroomgebied.

Scenario C Verhoging drainagebasis en klimaatverandering



Figuur A12.3 Verandering doelrealisatie landbouw (%) ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van klimaatverandering. De doelrealisatie is weergegeven als gemiddelde per deelstroomgebied.

Bijlage 13 Herhalingstijden en afvoeren

GEV verdeling

Tabel A13.1 GEV

Herhalingstijd (jaar)	Referentie situatie	Verhogen drainagebasis	Klimaatverandering (+2gr)	Verhogen drainagebasis en klimaatverandering
10	0.555	0.570	0.698	0.717
20	0.665	0.683	0.843	0.865
50	0.818	0.840	1.046	1.072
100	0.941	0.965	1.210	1.239
150	1.016	1.042	1.312	1.342
200	1.070	1.097	1.386	1.417
250	1.113	1.142	1.444	1.477

Tabel 13.2 GEV verschil met huidig

Herhalingstijd (jaar)	Referentie situatie	Verhogen drainagebasis	Klimaatverandering (+2gr)	Verhogen drainagebasis en klimaatverandering
10	-	0.015	0.143	0.162
20	-	0.018	0.178	0.200
50	-	0.022	0.228	0.254
100	-	0.024	0.269	0.298
150	-	0.026	0.296	0.326
200	-	0.027	0.316	0.347
250	-	0.029	0.331	0.364

Stochasten methode

Tabel A13.3 Stochasten

Herhalingstijd (jaar)	Referentie situatie	Verhogen drainagebasis	Klimaatverandering (+2gr)	Verhogen drainagebasis en klimaatverandering
10	0.564	0.562	0.678	0.675
20	0.670	0.667	0.796	0.796
50	0.823	0.822	0.970	0.970
100	0.942	0.945	1.130	1.130
150	1.009	1.006	1.208	1.209
200	1.080	1.084	1.306	1.310
250	1.145	1.147	1.331	1.336

Tabel A13.4 Stochasten verschil met huidig

Herhalingstijd (jaar)	Referentie situatie	Verhogen drainagebasis	Klimaatverandering (+2gr)	Verhogen drainagebasis en klimaatverandering
10	-	-0.002	0.114	0.111
20	-	-0.003	0.126	0.126
50	-	-0.001	0.147	0.147
100	-	0.003	0.188	0.188
150	-	-0.003	0.199	0.200
200	-	0.004	0.226	0.230
250	-	0.002	0.186	0.191