

NATUURVORMING EN DE GEVOLGEN VOOR DE NEERSLAG-AFVOER-RELATIE

**ANALYSE VAN DE GEVOLGEN VAN HET PROJECT “HERSTEL BEEKDALSYSTEEM
HALKENBROEK/HOLMERS” (PEILGEBIED 1510) OP DE NEERSLAG-AFVOER-RELATIE**



Harm Gerrit Nomden

Eindverslag Bachelor Eindopdracht
Studie Civiele Techniek (& Management)
Universiteit Twente

NATUURVORMING EN DE GEVOLGEN VOOR DE NEERSLAG-AFVOER-RELATIE

**ANALYSE VAN DE GEVOLGEN VAN HET PROJECT “HERSTEL BEEKDALSYSTEEM
HALKENBROEK/HOLMERS” OP DE NEERSLAG-AFVOER-RELATIE VOOR HET STROOMGEBIED**

Eindverslag Bachelor Eindopdracht

Harm Gerrit Nomden

Februari 2009, Enschede/Groningen

Student Bachelor Civiele Techniek (& Management)
Universiteit Twente, Enschede

Onderzoek uitgevoerd bij:
Royal Haskoning, Adviesgroep Water & Ecologie, te Groningen.

Begeleiders:
Dr. Ir. Martijn Booij (Universiteit Twente)
Ir. André Niemeijer (Royal Haskoning)

SAMENVATTING

In 1999 heeft het waterschap Hunze en Aa's samen met Dienst Landelijk Gebied (DLG), Staatsbosbeheer en Provincie Drenthe het project "herstel beekdalsysteem Halkenbroek/Holmers" opgestart. In de twee beekdalen Halkenbroek en Holmers bevonden zich voornamelijk landbouwgebieden. Door middel van verschillende ingrepen zijn de beekdalen tot een nat heidegebied omgevormd dat de twee naastgelegen boswachterijen met elkaar verbindt, zodat ze een link gaan vormen binnen de Ecologische Hoofdstructuur. Daarnaast is het gebied zo ingericht dat het als retentiebekken kan dienen om de afvoer (tijdelijk) te bergen. De verschillende ingrepen in de beekdalen waren:

- Het waterpeil in de waterlopen is verhoogd (een automatisch verstelbare stuw voor ingrijpen in natte periodes wordt geïnstalleerd).
- Waterlopen in Holmers zijn gedempt.
- De beweiding op de gebieden is stopgezet en de onnatuurlijk voedselrijke toplaag in Holmers is afgegraven, zodat de oorspronkelijke natuurlijke begroeiing langzaam kan ontstaan.

In de twee boswachterijen werd voornamelijk naaldbos geplant en gekapt voor productiehout. Ook deze gebieden worden weer in de oorspronkelijke staat terug gebracht, door het productiebos te vervangen door een meer natuurlijker bos/natuurgebied, dat gelijkmatig aansluit op de beekdalen Halkenbroek en Holmers. Dit wordt verwezenlijkt door het veelvuldig kappen van de naaldbomen en het verhogen van het (grond)waterpeil in de boswachterijen, waardoor de naaldbomen verdrinken/afsterven.

Het doel van dit onderzoek is om de effecten van de genomen ingrepen op de hydrologie binnen het gebied te analyseren en specifiek de gevolgen voor de afvoer te kwantificeren. Hierbij wordt gekeken naar het stroomgebied van stuwnummer 1510, waarbinnen de beekdalen en grote delen van de twee boswachterijen vallen.

Om een beeld te krijgen van de waterhuishouding en om de gevolgen van de toegepaste ingrepen in beeld te brengen is een neerslag-afvoer-model ontwikkeld. Aan de hand van de verschillende theorieën en modellen over/voor het bepalen van de verdamping, ontwatering, afwatering, kwel en oppervlakkige afvoer is een semi-distributed, deterministisch, conceptueel en niet-stationaire neerslag-afvoer-model ontwikkeld.

Het model gaat uit van het opdelen van het onderzoeksgebied en het in elk deelgebied berekenen van de verschillende onderdelen van het neerslag-afvoerproces. Het gebied is opgedeeld in 4 deelgebieden op basis van landgebruik, waterlopensysteem, bodemsoort en hoogteligging: Halkenbroek, Holmers en de twee boswachterijen. Het model is gecalibreerd en gevalideerd voor zowel de oude situatie (calibratiejaar 2001 en validatiejaar 2002) en voor de nieuwe situatie (calibratiejaar 2006 en validatiejaar 2007). Het model functioneert redelijk, al zitten er enige onzekerheden in bepaalde modelonderdelen.

In de oude situatie hadden de beekdalen al te maken met natte bodems, wat hierbij ook leidde tot oppervlakkige afvoer en veel snelle afvoerpieken in de winter. De ingrepen die plaatsvonden in de beekdalen leidden voornamelijk tot een hogere drainageweerstand (door dempen waterlopen) en een nog verdere beperking van de mogelijke berging (afgraven toplaag en verhoogd peilbeheer). Hierdoor raakt de bodem eerder verzadigd en treedt eerder en meer oppervlakkige afvoer op. De ingrepen leiden echter alleen tot een verschil in berging en afvoer gedurende de tijd, maar niet tot een nieuwe verdeling tussen de uitgaande stromingen van het peilgebied: de totale hoeveelheid afvoer, kwel en verdamping veranderen nauwelijks door deze ingrepen. In de praktijk komt het er op neer dat er een verschuiving plaats vindt van het langzame afvoertraject (ontwatering) naar het snelle afvoertraject (oppervlakkige afvoer), waardoor er meer piekafvoeren optreden en de baseflow dus lager komt te liggen.

Echter hebben de ingrepen in de boswachterijen wel invloed op de verdeling tussen de uitgaande stromingen. Door het verdrinken van de naaldbomen, sterven deze af, waardoor de verdamping erg afneemt. In totaal is de verdamping in 2006 (2 á 3 jaar na de ingrepen) ongeveer 40% afgenomen ten

opzichte van de situatie voor de ingrepen. De al verhoogde grondwaterstand komt hierdoor nog hoger te liggen om het extra neerslagoverschot via wegzijging en afvoer kwijt te raken. Resultaat is dat de wegzijging en de afvoer sterk toenemen.

In de oude situatie verlaat de gevallen neerslag het gebied via verdamping, wegzijging en afvoer volgens een bepaalde verdeling: respectievelijk 50%, 28% en 19% van de totale neerslag. Na de ingrepen is deze verdeling veranderd naar respectievelijk 33%, 35% en 26% van de totale neerslag.

Wanneer echter de jaren 2006 en 2007 met elkaar vergeleken worden, blijkt de verdamping enigszins toe te nemen. Gezien deze verschillen kan geconcludeerd worden, dat het bos zich aan het herstellen is en de dode of gekapte naaldbomen langzaam plaats maken voor nieuwe begroeiing. Wanneer uitgegaan wordt van een herstel van de verdamping, dan zal de afvoer ook weer afnemen. Verwacht kan echter worden dat de verdamping niet het oude niveau zal halen doordat het verwijderende naaldbos een erg hoge verdamping heeft.

Het is van belang om in te zien dat de gevolgen op de afvoer en de rest van de waterhuishouding voornamelijk bepaald worden door de specifieke karakteristieken van het gebied en de schaal waarop de ingrepen die worden uitgevoerd.

VOORWOORD

Voor u ligt het resultaat van enkele maanden onderzoek in het kader van de Bachelor Eindopdracht Civiele Techniek. Deze opdracht heb ik uitgevoerd bij Ingenieursbureau Royal Haskoning adviesgroep Water en Ecologie in Groningen.

De volgende personen wil ik graag bedanken voor hun bijdrage aan dit onderzoek. Ten eerste de persoon die de stageplek bij Adviesgroep Water en Ecologie in Groningen voor mij heeft geregeld, Han Grobbe van Royal Haskoning. Vervolgens mijn directe begeleider op kantoor, André Niemeijer, die mij introduceerde in de wondere wereld van de hydrologie en aan wie ik al mijn vragen kwijt kon en mijn begeleider vanuit de Universiteit Twente, Martijn Booij, bedanken voor zijn commentaar op mijn stukken. Verder wil ik ook alle andere personen van de Adviesgroep Water en Ecologie in Groningen bedanken voor de leuke maanden die ik daar op kantoor met hun heb doorgebracht en waardoor ik een goede en positieve indruk heb gekregen van het werken bij een adviesbureau.

Voor het onderzoek was nogal wat informatie nodig en hiervoor wil ik de volgende mensen bedanken. Met Harry Jager, Paul Hendriks en Anton Bartelds, hydrologen bij het waterschap Hunze en Aa's, heb ik een interessant gesprek gehad over de lopende en al afgeronde (natuurontwikkelings)projecten binnen het werkgebied van het waterschap en uiteindelijk kreeg ik via het waterschap ook de informatie en gegevens over het onderzoeksgebied. Als laatste wil ik nog Roel Velner, ook werkzaam als hydroloog bij Royal Haskoning bedanken voor de vele ontvangen informatie over verschillende neerslag-afvoer-modellen en verschillende interessante artikelen.

Uiteindelijk geeft dit rapport een redelijk duidelijk beeld van de waterhuishouding in het beekdalsysteem Halkenbroek/Holmers en hoe dit veranderd is na de ingrepen die uitgevoerd zijn om van dit landbouwgebied weer een uniek en mooi natuurlandschap te maken. Ik hoop dat dit rapport niet alleen verslag doet van mijn werkzaamheden, maar misschien ook nog van waarde is voor Royal Haskoning of voor het Waterschap Hunze en Aa's.

INHOUDSOPGAVE

1	OPDRACHTOMSCHRIJVING EN ONDERZOEKSVOORSTEL	1
1.1	INLEIDING	1
1.2	KADER VAN HET ONDERZOEK	2
1.3	DOELSTELLING	2
1.4	ONDERZOEKSVRAGEN	3
1.5	LEESWIJZER	3
2	PRAKTIJKANALYSE	4
2.1	ANALYSE ONDERZOEKSGBIED	4
2.1.1	ALGEMENE BESCHRIJVING VAN HET GEBIED	4
2.1.2	VERANDERINGEN IN HET GEBIED	6
2.1.3	WATERBALANS VAN HET GEBIED	7
2.2	EERDERE ERVARINGEN MET GEVOLGEN NATUURONTWIKKELING	9
2.2.1	EERDERE (MODEL)STUDIES EN METINGEN	9
2.2.2	PRAKTIJKERVARINGEN WATERSCHAP HUNZE EN AA'S	11
2.3	AANDACHTSPUNTEN VOOR HET VERDERE ONDERZOEK	11
3	HYDROLOGISCH MODEL PEILGEBIED 1510	13
3.1	NEERSLAG-AFVOER-MODELLEN	13
3.2	MODELOPZET EN TOEPASSING OP HET GEBIED	13
3.3	MODELLERING VAN DE (BELANGRIJKE) PROCESSEN	15
3.3.1	MAAIVELDBERGING	16
3.3.2	DE ONVERZADIGDE ZONE (BODEMVOCHT)	17
3.3.3	DE VERZADIGDE ZONE (EERSTE AQUIFER)	19
3.3.4	AFWATERING	22
3.3.5	VERZADIGING VAN DE BODEM	22
3.4	CALIBRATIE EN VALIDATIE	23
3.4.1	INPUT- EN OUTPUT-DATA	24
3.4.2	GEMETEN EN AANGENOMEN PARAMETERS/INPUTGEGEVENS VAN HET MODEL	24
3.4.3	CALIBRATIE EN VALIDATIE OUDE SITUATIE	25
3.4.4	CALIBRATIE EN VALIDATIE NIEUWE SITUATIE	27
4	RESULTATEN SIMULATIES	28
4.1	RESULTATEN CALIBRATIE EN VALIDATIE	28
4.1.2	WATERBALANS OUDE EN NIEUWE SITUATIE	30
4.2	DE GEVOLGEN VAN DE INGEPEN OP DE WATERHUISHOUDING EN DE AFVOER	31
4.2.1	GEVOLGEN VAN DE INGEPEN/VERANDERINGEN IN DE BEEKDALEN	31
4.2.2	GEVOLGEN VAN DE INGEPEN IN DE BOSWACHTERIJEN	33
5	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	35
5.1	CONCLUSIES	35
5.2	AANBEVELINGEN	36
BIJLAGE A.	INPUT VOOR HET GEBOUWDE MODEL	1
BIJLAGE B.	RESULTATEN CALIBRATIE EN VALIDATIE	6
BIJLAGE C.	RESULTATEN GEVOLGEN INGEPEN	16

FIGUREN

FIGUUR 2-1 HET BEEKSTELSEL VAN DE DRENTSE AA MET DE LOCATIE VAN HET STUDIEGEBIED (ROELSMAN ET AL, 2006)	4
FIGUUR 2-2 HOOGTEKAART (METERS BOVEN NAP) VAN HET PEILGEBIED 1510 (WATERSCHAP HUNZE EN AA'S, 2008)	5
FIGUUR 2-3 BODEMKAART VAN HET PEILGEBIED 1510 (WATERSCHAP HUNZE EN AA'S, 2008)	5
FIGUUR 2-4 VROEGERE LANDGEBRUIK IN HET PEILGEBIED 1510 (WATERSCHAP HUNZE EN AA'S, 2008)	6
FIGUUR 2-5 DE NIEUWE STUW	6
FIGUUR 2-6 IN HALKENBROEK IS AL LAGE BEGROEIING ONTSTAAN	7
FIGUUR 2-7 AFVOERMETINGEN OVER STUW 1510 (DE AANGEGEVEN JAREN LOPEN VAN APRIL TOT MAART)	8
FIGUUR 3-1 OPZET VAN HET MODEL MET DE HYDROLOGISCHE PROCESSEN	14
FIGUUR 3-2 DEELGEBIEDEN VAN PEILGEBIED 1510 MET DE HOOFDWATERGANGEN	15
FIGUUR 3-3 SCHEMATISATIE VAN DE AFWATERING VAN DE DEELGEBIEDEN VIA DE HOOFDWATERGANGEN RICHTING DE STUW	15
FIGUUR 3-4 VERSIMPELING VAN HET WATERLOPENSISTEEM IN EEN STROOMGEBIED VOOR DE ONTWATERING	20
FIGUUR 3-5 SCHEMATISATIE VAN DE GEMODELLEERDE KWEL IN DE VERSCHILLENDE DEELGEBIEDEN	21
FIGUUR 3-6 BEPALING VAN OPWELLING VAN WATER DOOR VERZADIGING VAN BODEM (HET GRIJZE DEEL WORDT VERPLAATSD NAAR DE MAAIVELDBERGING)	23
FIGUUR 3-7 DE COMPLEXITEIT VAN DE AFVOER RICHTING DE WATERLOPEN	26
FIGUUR 4-1 BEREKENDE AFVOER TEN OPZICHTE VAN DE GEMETEN AFVOER (+ BUIEN) VOOR HET HYDROLOGISCH JAAR 2001	28
FIGUUR 4-2 BEREKENDE AFVOER TEN OPZICHTE VAN DE GEMETEN AFVOER (+ BUIEN) VAN HET HYDROLOGISCH JAAR 2002	29
FIGUUR 4-3 BEREKENDE AFVOER TEN OPZICHTE VAN DE GEMETEN AFVOER (+ BUIEN) VOOR HET HYDROLOGISCH JAAR 2006	30
FIGUUR 4-4 BEREKENDE AFVOER TEN OPZICHTE VAN DE GEMETEN AFVOER (+ BUIEN) VAN HET HYDROLOGISCH JAAR 2007	30
FIGUUR 4-5 AFVOER OVER STUW 1510 IN DE OUDE SITUATIE (ZWART) VERGELEKEN MET DE AFVOER NA ALLE INGEPEN IN DE BEEKDALEN (GROEN) OP BASIS VAN DE NEERSLAGGEGEVENS VAN 2001	33
FIGUUR 4-6 AFVOER OVER STUW 1510 IN DE OUDE SITUATIE VERGELEKEN MET DE AFVOER NA DE INGEPEN IN DE BOSWACHTERIJEN (VERHOGEN PEIL EN REDUCTIE GEWASFACTOR MET 65% ZOALS IN 2006) OP BASIS VAN DE NEERSLAGGEGEVENS VAN 2001.	34

TABELLEN

TABEL 2-1 TERMEN VAN DE WATERBALANS VAN EEN STROOMGEBIED	8
TABEL 4-1 WAARDES VAN DE GECALIBREERDE PARAMETERS VOOR DE NIEUWE SITUATIE.	28
TABEL 4-2 WATERBALANS VOOR DE GECALIBREERDE EN GEVALIDEERDE JAREN (OPGESTELD VOOR IEDER HALF JAAR)	31

1 OPDRACHTOMSCHRIJVING EN ONDERZOEKSVOORSTEL

1.1 INLEIDING

Veel van de Drentse gebieden zijn vanaf het eind van de 19^{de} eeuw ontgonnen voor landbouw (voor akkerbouw en veeteelt). Bomen en laaggroei verwijderd en door het aanleggen van sloten en watergangen, werd er voor gezorgd dat het water eenvoudig en snel kon worden afgevoerd. De laatste decennia zijn er echter in heel Nederland steeds meer problemen ontstaan op het gebied van water. Zo hebben benedenstrooms gelegen gebieden steeds meer last gekregen van een teveel aan water, maar ook watertekorten in de steeds drogere zomers veroorzaken problemen.

Dit heeft geleid tot de Nota Waterbeleid 21^e eeuw (WB21), waarin de doelen op het gebied van waterkwantiteit voor 2015 zijn gesteld (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000). Voor WB21 betekent dit het op orde brengen van het watersysteem. In WB21 wordt aangedrongen om anders om te gaan met water en ruimte. Deze nota is uitgekomen naar aanleiding van de wateroverlast van 1993, 1995 en 1998. Onderdeel van het nieuwe beleid is de drietraps-strategie 'vasthouden-bergen-afvoeren'.

De vasthouden-bergen-afvoeren strategie wordt in de Drentsche Aa op enkele plaatsen toegepast om de boezem te ontlasten. In 1998 is al in het Regionaal Bestuursakkoord Water afgesproken dat ieder stroomgebied de toekomstige toename van de neerslag (door klimaatverandering) zelf moet kunnen opvangen en niet direct naar de boezem mag afvoeren. Daarom dient in ieder stroomgebied 10% extra neerslag vastgehouden te worden (verwachte gemiddelde toename neerslag voor 2050). In de Drentsche Aa zal veel van deze extra neerslag in de bodem infiltreren en niet meteen tot afvoer komen. Men gaat er van uit dat in 2050 er 1,9 miljoen m³ water extra vastgehouden moet kunnen worden. De lopende (of net afgeronde) projecten in het stroomgebied blijken volgens modelberekeningen deze hoeveelheid extra te kunnen vasthouden (Waterschap Hunze en Aa's, 2008). Voorbeelden van projecten die hierbij spelen in het gebied zijn het inrichten bergingspolders, retentiebekkens, hermeandering en natuurontwikkeling.

Daarnaast is het Drentsche Aa gebied aangewezen als Natura 2000 gebied. Samen met de Kader Richtlijn Water (KRW) ziet dit beleid er op toe dat de biodiversiteit in Nederland in stand wordt gehouden. Het aaneensluiten van de verschillende losse natuurgebieden is een belangrijk onderdeel hierin.

Eén van de projecten is het herstel van het beekdalsysteem Holmers en Halkenbroek. In 1999 is voor dit beekdal een plan opgesteld dat twee doelen had. Het eerste doel was het terug laten keren van zeldzame planten, die slechts gedijen in natuurlijk mineraalrijke kwelwater. Daarnaast kan het gebied als retentiebekken fungeren om wateroverlast stroomafwaarts te voorkomen. De inrichting van het brongebied is gericht op schoon en kwalitatief goed water voor de Drentsche Aa.

Het nieuwe natuurgebied (Holmers en Halkenbroek) ter grootte van 200 hectare is hierbij ook onderdeel geworden van de ecologische hoofdstructuur (EHS), bedoeld om planten en dieren in ons land een zoveel mogelijk aaneengesloten gebied te geven om zich te kunnen verspreiden over heel Nederland. De twee gebieden scheiden samen de twee naastgelegen boswachterijen, die ook grotendeels afwateren op dit gebied. Ook in deze boswachterijen is ingegrepen om de naaldbossen te verdrinken, zodat deze plaats kunnen maken voor een meer natuurlijker bos.

Het omvormen van landbouwgebied naar natuur heeft effect op de omgeving. Door de ontwikkeling van natuur en de ingrepen die in dit gebied genomen om natuurontwikkeling te bevorderen, verandert de hydrologie binnen het gebied. De neerslag-afvoer-relatie verandert, aangezien het proces van opvangen, vasthouden en de verschillende wijzes van afvoeren van de gevallen neerslag enigszins zal wijzigen. Op enigszins vergelijkbare wijze worden binnen het stroomgebied van de Drenthse Aa meerdere landbouwgebieden omgevormd. Wanneer de omvorming van deze gebieden to een verandering in het afvoerproces leidt, zou dit het beleid op het gebied van berging en waterbeheer enigszins kunnen beïnvloeden. De gevolgen van de ingrepen in het gebied voor de neerslag-afvoer-relatie van dit gebied zijn daardoor interessant voor verder onderzoek. In dit onderzoek is geprobeerd de effecten van verschillende ingrepen op de afvoer te kwantificeren.

1.2 KADER VAN HET ONDERZOEK

Dit onderzoek zal zich richten op de veranderingen die hebben plaatsgevonden in de waterhuishouding van het gebied van Holmers/Halkenbroek. Hierbij is het doel om te kijken naar de afvoer over de stuw naar benedenstrooms gebied (Amerdiep), maar hiervoor dient natuurlijk naar de totale waterhuishouding gekeken te worden. Holmers en Halkenbroek behoren tot het gebied dat afwatert naar stuw 1510. Het stroomgebied bestaat uit de twee beekdalen Halkenbroek (noord) en Holmers (zuid) en ten oosten en ten westen van deze twee gebieden zijn twee grote boswachterijen te vinden. Deze boswachterijen wateren grotendeels ook af richting de eerder genoemde beekdalen. Er hebben enkele verschillende ingrepen plaatsgevonden in het studiegebied. Deze veranderingen zijn duidelijk op te splitsen in twee groepen, namelijk de veranderingen in de twee beekdalgebieden Holmers en Halkenbroek en de veranderingen in de boswachterijen:

Ingrepen in de gebieden Halkenbroek en Holmers:

- Veranderen wateropensysteem: dempen greppels/sloten (voornamelijk in het gebied Holmers) en het ondieper maken en verbreden van de hoofdwatgang die door het beekdal stroomt (zowel Halkenbroek als Holmers).
- Verwijderen van de voedselrijke toplaag in het deelgebied Holmers (30 cm afgegraven). Dit is gedaan om de groei van onnatuurlijke planten in het gebied tegen te gaan.
- Verhoogd peilbeheer beekdal: Er is een nieuwe stuw geplaatst bij het gebied, die op afstand bedienbaar is en er is een hoger openwaterpeil aangehouden (waterpeil is met gemiddeld 40 centimeter verhoogd).
- Natuurvorming beekdal: door het stoppen van onderhoud, beperkte beweiding en het verhogen van de waterstand in het gebied zijn weidegebieden veranderd in natte natuurgebieden waar momenteel laaggroei te vinden is.

Ingrepen in de boswachterijen:

- Verhoogd peilbeheer in de boswachterijen: Via kleine vaste stuwtjes is het waterpeil in de boswachterijen verhoogd. Hierdoor zou het bestaande bos deels verdrinken. Samen met de kap van een deel van de naaldbomen zal er dan ruimte ontstaan voor nieuwe natuur.

Er zal uitsluitend gekeken worden naar de kwantiteit van het water in het gebied en hoe deze hoeveelheden zich verplaatsen door het gebied (zie de hydrologische kringloop). In dit onderzoek zal geprobeerd worden de gevolgen van de genomen ingrepen in kaart te brengen. Hierbij zijn vooral de gevolgen voor waterafvoer van belang.

Ook al gaan waterkwantiteit en –kwaliteit vaak samen, in dit onderzoek zal de waterkwaliteit niet aan bod komen. Hierbij moet echter vermeld worden dat dit wel van belang kan zijn, wanneer er veranderingen plaats vinden met waterstanden en landgebruik. Landbouwgebied kunnen nogal veel fosfaten en nitraten bevatten en die kunnen door bijvoorbeeld een hogere grondwaterstand eenvoudig in het oppervlaktewater terecht komen. Om dit te voorkomen en om een natuurlijke begroeiing te laten ontstaan is dus de toplaag verwijderd.

1.3 DOELSTELLING

De doelstelling van dit onderzoek kan als volgt gedefinieerd worden:

- Analyseren van de effecten van ingrepen in een bovenstrooms gebied ten behoeve van natuurontwikkeling en bovenstroomse berging op de hydrologie binnen het gebied, toegepast op het al uitgevoerde project “herstel beekdalsysteem Halkenbroek/Holmers”.

Met de effecten op de hydrologie worden in het algemeen de veranderingen in de waterhuishouding bedoeld, maar hierbij wordt voornamelijk gekeken naar de gevolgen voor de neerslag-afvoer-relatie en de verdeling tussen de verschillende manieren waarop de neerslag het gebied zal verlaten (afvoer, kwel/wegzijging, verdamping).

Om de waterhuishouding en daarbij de verschillende afvoertrajecten van het gebied te simuleren wordt gebruik gemaakt van een neerslag-afvoer-model dat een stroomgebied of een deel van een stroomgebied en alle hydrologische processen daarin in één conceptueel model beschrijft. Aan de hand van verschillende bestaande neerslag-afvoer-modellen wordt geprobeerd een goed

neerslagafvoermodel te ontwikkelen. Door het model zelf te ontwikkelen wordt ook een goed inzicht verkregen in de hydrologische processen en hoe deze elkaar beïnvloeden.

1.4 ONDERZOEKSVRAGEN

De onderzoeksvragen zijn op te delen in 3 onderdelen, namelijk een gedeelte literatuuronderzoek en de globale verkenning van het onderzoeksgebied, het maken van een model voor het simuleren van de afvoer uit het gebied en het analyseren van de effecten van de ingrepen om vervolgens tot een algemene conclusie en een visie op het beekdalsysteem Halkenbroek / Holmers te komen.

Achtergrondstudie:

- Wat voor invloed hebben de genomen ingrepen volgens eerder onderzoek op de waterhuishouding en specifiek de afvoer binnen een stroomgebied en hoe?

Modellering afvoer

- Wat zijn de belangrijke onderdelen in het neerslag-afvoer-proces en tot welke criteria leidt dit voor het te ontwikkelen neerslag-afvoer-model?
- Welke theoriën liggen aan de grondslag van het model en welke aannames en onzekerheden zitten er aan het model vast?

Analyse gevolgen

- Hoe reageert de waterhuishouding van het gebied op de individuele ingrepen en wat zijn de effecten op de afvoer?

1.5 LEESWIJZER

De opbouw van dit onderzoeksrapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt het onderzoeksgebied beschreven met de verschillende ingrepen die uitgevoerd zijn. Daarnaast wordt in de literatuur nagegaan wat voor effecten te verwachten zijn bij de verschillende ingrepen en welke aspecten binnen het hydrologisch systeem van belang zijn. In hoofdstuk 3 komt het ontwikkelde neerslag-afvoer-model aan bod waarbij ingegaan wordt op de modellering van de verschillende hydrologische processen en de calibratie en validatie van de toepassing van het model op het onderzoeksgebied. Vervolgens worden in hoofdstuk 4 de verschillende ingrepen toegepast op het model, zodat er gekeken wordt wat de effecten van iedere individuele ingreep op de waterhuishouding in het gebied en dus ook de afvoer. Uiteindelijk zullen in hoofdstuk 5 de conclusies aan bod komen en enkele aanbevelingen voor het onderzoeksgebied en extra onderzoek.

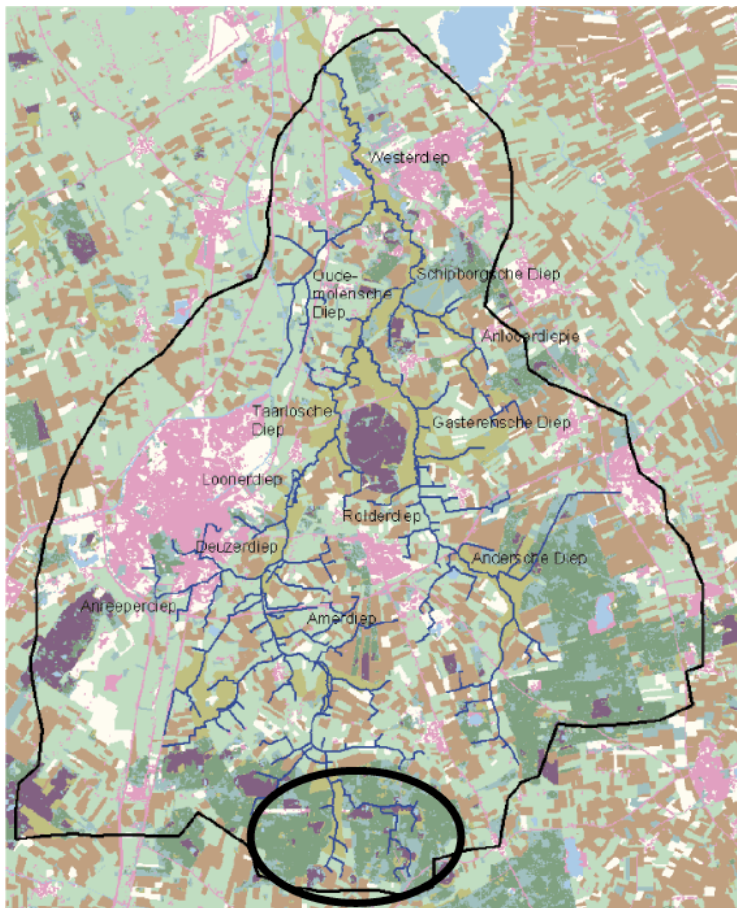
2 PRAKTIJKANALYSE

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de praktijk en de gevolgen die al eerder zijn waargenomen in eerdere studies. In de eerste paragraaf wordt het onderzoeksgebied beschreven, waarin zowel de vroegere situatie, als de huidige (nieuwe) situatie aan bod komt. In de tweede paragraaf wordt ingegaan op eerdere onderzoeken naar de effecten van ingrepen in het landelijk gebied met betrekking tot de neerslagafvoer in het gebied. In deze paragraaf komen ook de ervaringen van het Waterschap Hunze en Aa's aan bod, die zij hebben opgedaan bij dit soort projecten. Uiteindelijk zal dit leiden tot een aantal aandachtspunten voor het te ontwikkelen neerslag-afvoer-model.

2.1 ANALYSE ONDERZOEKSGBIED

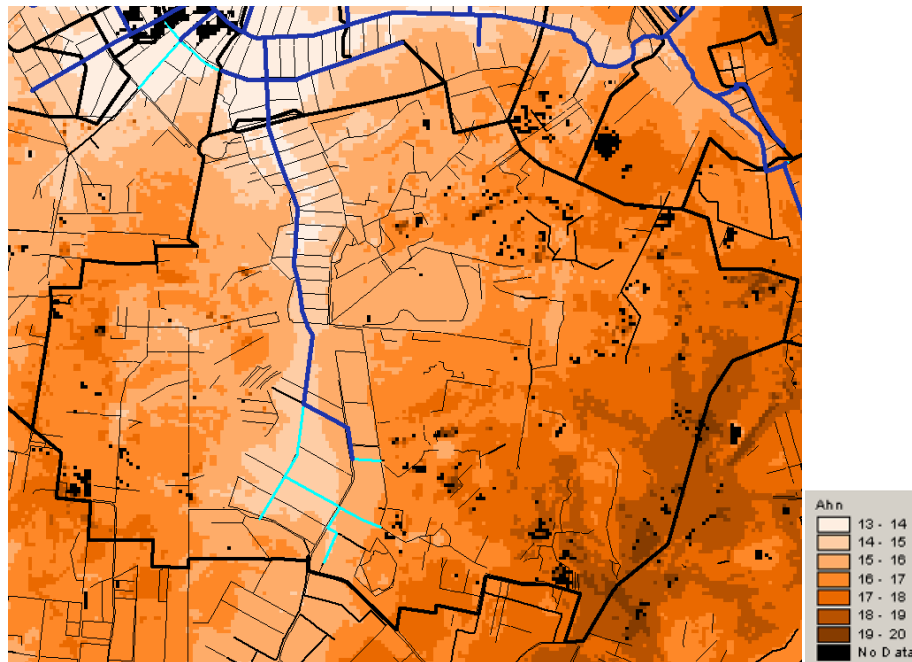
2.1.1 Algemene beschrijving van het gebied

Het project heeft betrekking op het beekdal Holmers en Halkenbroek en delen van de aangrenzende boswachterijen Hooghalen en Grolloo. Het beekdal ligt in het midden van de Provincie Drenthe, tussen de plaatsen Hooghalen en Grolloo. In dit beekdal begin de beekloop Amerdiep, die samen met vele andere beeklopen het bekenstelsel Drentse Aa vormt (zie Figuur 2-1). Het studiegebied (peilgebied nr 1510) heeft een oppervlakte van 1380 hectare.



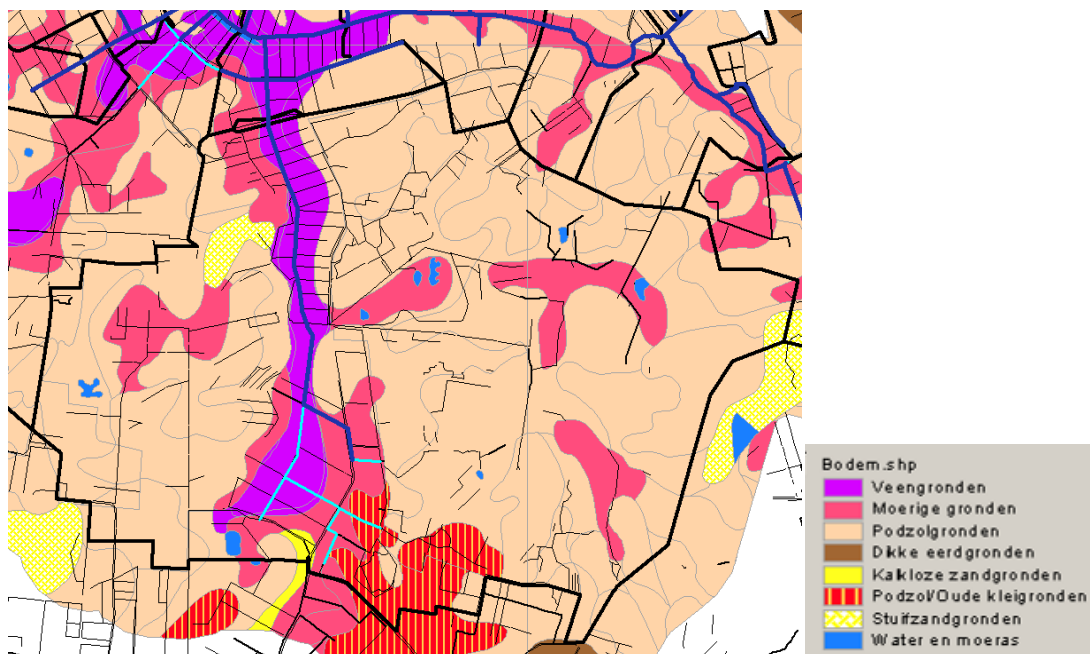
Figuur 2-1 Het beekstelsel van de Drentse Aa met de locatie van het studiegebied (Roelsma et al, 2006)

In Figuur 2-2 is een hoogtekartje van het peilgebied 1510 te zien met de hoofdwatgang die door het gebied loopt. Duidelijk is te zien dat de beek door het laagste deel loopt. De hoogte van het gebied varieert van 13 bij de beek tot 19 meter boven NAP.



Figuur 2-2 Hoogtekaart (meters boven NAP) van het peilgebied 1510 (Waterschap Hunze en Aa's, 2008)

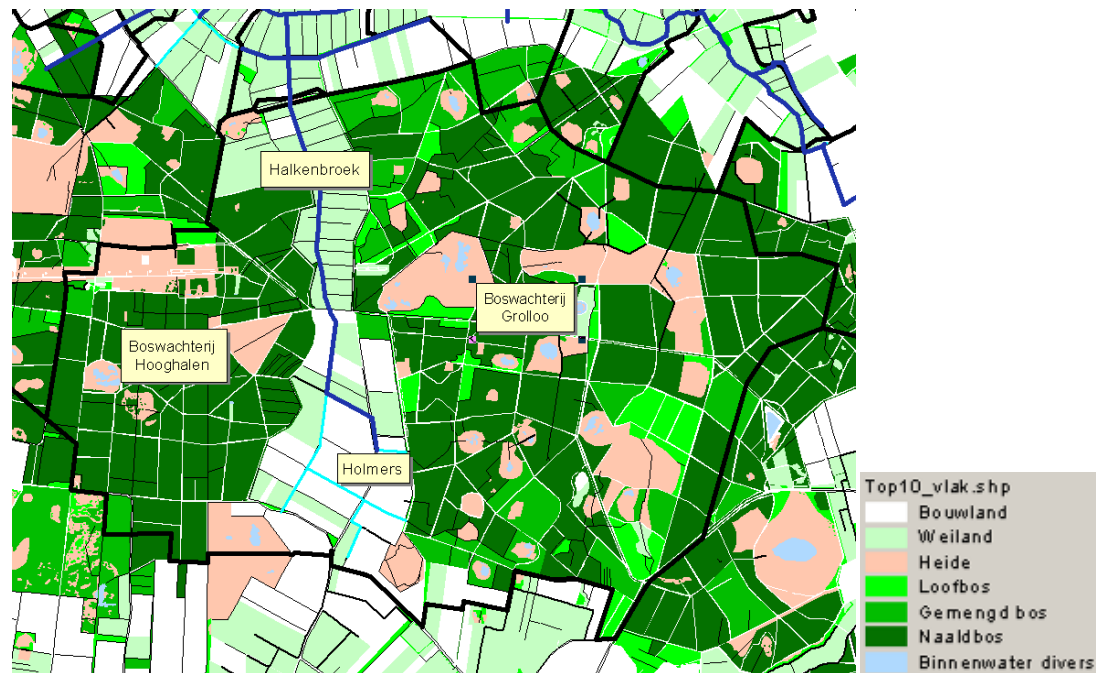
De bodemkaart (Figuur 2-3) geeft duidelijk weer dat rond de beek voornamelijk veen en moerige gronden te vinden zijn. In de rest van het gebied heeft men te maken met podzolgronden en op bepaalde plekken moerige gronden. De bodemsoorten zijn van belang doordat ze de doorlatendheid van de bodem bepalen. Veengronden worden gekarakteriseerd door een groot vochtgehalte, hoge waterstanden en een lage doorlatendheid. De meer zanderige podzolgronden worden echter gekarakteriseerd door een laag vochtgehalte, lage waterstanden en een hoge doorlatendheid.



Figuur 2-3 Bodemkaart van het peilgebied 1510 (Waterschap Hunze en Aa's, 2008)

In Figuur 2-4 is het vroegere landgebruik binnen het peilgebied opgenomen. Halkenbroek (noord) bestond alleen uit weilanden, terwijl in Holmers ook bouwland te vinden is. In het oosten en westen zijn de twee boswachterijen te vinden, waar voornamelijk productiebos (naaldbos) te vinden is met hier en daar natuurlijk ontstane loofbos. Duidelijk is te zien dat op de plekken waar de moerige gronden te vinden zijn (zie Figuur 2-3) heide en moerasgebied is ontstaan. Verder dient vermeldt te worden dat in het westelijk gebied (boswachterij Hooghalen) er ook bebouwing te vinden is. Ook

staan hier een aantal grote radiotelescopen. Het landgebruik beïnvloedt verschillende hydrologische processen in en op de bodem en is daarom van belang.



Figuur 2-4 Vroegere landgebruik in het peilgebied 1510 (Waterschap Hunze en Aa's, 2008)

2.1.2 Veranderingen in het gebied

Het natuurontwikkelingsgebied Holmers-Halkenbroek is in nauwe samenwerking tussen het Staatsbosbeheer, Waterschap Hunze en Aa's, Provincie Drenthe en de Dienst Landelijk Gebied tot stand gekomen. De totale projectkosten bedragen ongeveer € 1,2 miljoen.

2.1.2.1 Ingrepen

De ingrepen in het gebied Holmers zijn in drie fases uitgevoerd tussen begin 2003 en eind 2005. Hierbij ging het iedere fase om ongeveer 30 hectare landbouwgrond waarvan de toplaag werd afgegraven (30 cm) en waarbij de grond werd gebruikt om de aanwezige waterlopen in het gebied (deels) te dempen. De rest van het bodemmateriaal is opgeslagen op een plek in het bos van Hooghalen. Ook is het zuidelijk (bovenstroomse) deel van de hoofdwatgang gedempt. De afwatering van het beekje in de Holmers volgt nu zijn eigen weg. Voor de Halkenbroek geldt dat de hoofdwatgang weer op natuurlijke wijze moest kronkelen. De bestaande stuw in het Amerdiep is vervangen door een nieuwe op afstand bedienbare stuw. Daarnaast is het gebied Halkenbroek geschikt gemaakt voor de opvang van water (retentie). De beek is over de hele lengte ondieper en breder gemaakt en het waterpeil wordt via de nieuwe stuw gemiddeld 40 centimeter hoger gehouden. Zoals eerder aangegeven worden deze retentievoorzieningen aangelegd vanwege meerdere doelen. In het gebied kan hierdoor langer en meer water worden vastgehouden. Dit is goed voor de natuurontwikkeling, maar bovendien kan bij hevige buien, de neerslag uit dit gebied vastgehouden worden, zodat de waterafvoer in het landbouwgebied in de omgeving minder snel overbelast. Ook in de boswachterijen hebben veranderingen plaats gevonden. Het productiebos bestaat voornamelijk uit naaldbomen en deze gaan gekapt worden. Hier is ook het waterpeil verhoogd waardoor



Figuur 2-5 De nieuwe stuw

het overgebleven naaldbos zal verdrinken, waardoor er plaats komen voor een meer natuurlijker bos.

2.1.2.2 Natuurontwikkeling

De ingrepen in de gebieden Holmers en Halkenbroek waren eind 2005 gereed. De landbouwgronden in Holmers en Halkenbroek heeft men verder helemaal met rust gelaten, zodat natuur vanzelf zou ontstaan. In Holmers is de begroeiing van weidegebied en akkerbouw overgegaan in natte natuur (momenteel nog laaggroei). De voedselrijke (fosfaat en nitraatrijke) bovenlaag is verwijderd, waardoor verschraling op treedt en een meer natuurlijke begroeiing ontstaat. Het voedselarme kwelwater dat nu via het Amerdiep afvloeit is van belang voor de terugkeer van planten die alleen groeien in zuiver kwelwater.

In het gebied is langzaam een plas ontstaan en ook meanderen er smalle beekjes met stromend kwelwater door het gebied. Bij het afgraven van de bouwgrond zijn er oude meanders gevonden en deze zijn zoveel mogelijk hersteld. Een deel van de voormalige landbouwsloten in het gebied zijn nog te zien, maar deze zullen in de toekomst langzaam verdwijnen. De lage natte begroeiing in Holmers kan in de toekomst overgaan in een elzenbroekbos.



Figuur 2-6 In Halkenbroek is al lage begroeiing ontstaan

Momenteel kan men al zeggen dat het project leidt tot de gewenste effecten. Het kost natuurlijk nog enige jaren om het gebied volledig te laten ontwikkelen, maar momenteel zijn al veel bijzondere planten- en vogelsoorten ontdekt. Zo zijn van de Rode lijst soorten (planten) de vlottende bies, de kleine en ronde zonnedauw, de bruine snavelbies, de moeraswolfsklauw en de grondster al gesignaleerd in het gebied. Grote getallen aan verschillende vogelsoorten is men in dit gebied ook tegen gekomen en ook een groot scala aan insecten en zoogdieren als dassen zijn gesignaleerd (Waarneming.nl, 2008).

Het was eerst de bedoeling om ook in Halkenbroek de voedselrijke toplaag te verwijderen. Dit is echter niet gebeurd. Men heeft er voor gekozen om dit weidegebied zonder verdere ingrepen aan de natuur over te laten. De verhoogde waterstand en het bijna geheel stopzetten van de begrazing heeft ook al geleid tot lage begroeiing.

In de boswachterijen vinden zoals eerder vermeld ook veranderingen plaats. Ze zijn nog bezig om de naaldbomen deels te kappen en terwijl de rest afsterft, komt er plaats vrij voor nieuwe begroeiing. Uiteindelijk moet dit leiden tot een meer natuurlijk bos, dat voornamelijk uit eiken, berken en beuken bestaat. Dit gaat echter nog vele jaren duren voordat dit een volledig ontwikkeld bos zal zijn.

2.1.3 Waterbalans van het gebied

Om een goed inzicht te krijgen in het watersysteem van het studiegebied is het handig om een waterbalans voor het gebied op te stellen. Een waterbalans van een gebied bestaat uit termen die weergeven hoeveel water het gebied in gaat en termen die aangeven hoeveel water het gebied via verschillende wegen verlaat. In Tabel 2-1 worden de termen weergegeven. Het verschil tussen de

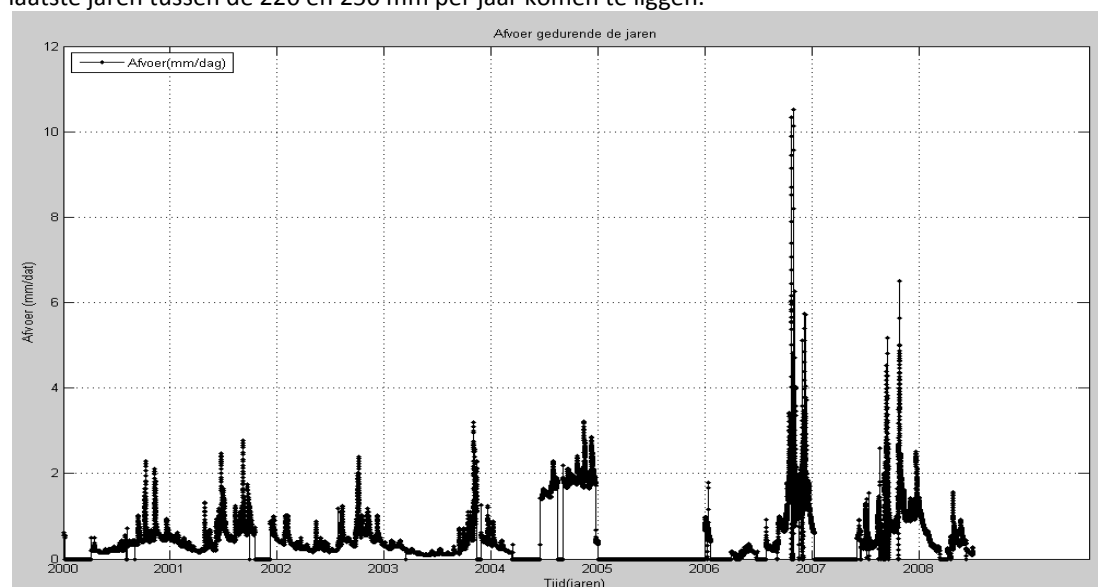
hoeveelheid water die het gebied binnen komt en de hoeveelheid die er uit gaat is de verandering in berging. Verder moet opgemerkt worden dat wegzijging/kwel in de tabel ook negatief kan zijn, waardoor er juist water ondergronds het gebied instroomt.

IN	UIT
Neerslag (mm)	Afvoer over de stuw (mm)
	Verdamping (mm)
	Wegzijging/Kwel (mm)

Tabel 2-1 Termen van de waterbalans van een stroomgebied

Voor dit gebied zijn de gegevens nog niet precies beschikbaar, maar er kan wel een inschatting gemaakt worden. De hoeveelheid neerslag die gevallen is kan via meetstations in de buurt verkregen worden. Daarnaast zijn ook gedurende de jaren de waterstanden bij de stuw en de afvoer over deze stuw gemeten. De resultaten van deze laatste metingen zijn weergegeven in Figuur 2-7 (Waterschap Hunze en Aa's, 2008). Van de oude stuw zijn gegevens beschikbaar van begin 2000 tot eind 2005. De hoogte van de stuw varieert gedurende deze jaren niet. De metingen bij de nieuwe stuw zijn begin 2006 weer hervat.

Uit de figuur blijkt al duidelijk dat de afvoer vanuit het gebied is veranderd. Terwijl de afvoer tot en met de zomer van 2004 nog redelijk gelijk bleef treden vanaf de herfst van 2004 grote veranderingen op. De hoge afvoer de winter van 2004/2005 wordt waarschijnlijk direct veroorzaakt door de ingrepen die dan uitgevoerd worden. Echter is de afvoer in de jaren daarna ook hoger dan voor de ingrepen. Terwijl de afvoer voor de ingrepen nog ongeveer 160 mm per jaar was, is de afvoer in de laatste jaren tussen de 220 en 250 mm per jaar komen te liggen.



Figuur 2-7 Afvoermetingen over stuw 1510 (de aangegeven jaren lopen van april tot maart)

Helaas is het niet duidelijk wat de andere twee termen van de waterbalans zijn. Er zijn wel gemiddelde verdampingsgegevens beschikbaar, maar de verdamping kan per gebied erg veel verschillen (onder andere afhankelijk van de soort begroeiing en de watervoorziening). De gemiddelde verdamping gedurende het jaar is 470 mm in Nederland. Echter hebben wij hier te maken met een gebied dat voor een groot deel bestaat uit naaldbos. Van naaldbos is bekend dat er veel verdamping optreedt, mits de watervoorziening goed is. Ook de hoeveelheid kwel/wegzijging is onduidelijk. Om toch een schatting te maken zal uitgegaan worden van de situaties voor de ingrepen.

In de oude situatie (jaren 2000 – 2003) is de hoeveelheid neerslag in deze jaren gemiddeld 890 mm per jaar, terwijl de afvoer 160 mm per jaar bedraagt. De verdamping zal ongeveer rond de 520 mm per jaar komen te liggen (470 mm maal de gemiddelde gewasfactor voor het gebied van 1.1). Hierdoor blijft er uiteindelijk een restterm over van ongeveer 210 mm per jaar, dat door middel van

wegzijing moet worden afgevoerd. Deze getallen zijn nog maar schattingen, waarbij uitgegaan wordt dat de berging aan het eind van de periode gelijk is aan de berging in het begin. Een waterbalans is een goede manier om voor een bepaalde periode een duidelijk beeld te krijgen van de relatie tussen neerslag en de verschillende afvoertrajecten. Aan het eind van dit onderzoek zal daarom ook een wat preciesere waterbalans op te stellen om inzicht te krijgen in de input en output van het onderzoeksgebied. De net berekende waardes zijn van belang om al snel enig inzicht te verkrijgen.

2.2 EERDERE ERVARINGEN MET GEVOLGEN NATUURONTWIKKELING

Er is veel onderzoek uitgevoerd naar de ontwatering en afwatering van landelijke gebieden. Zeker op landbouwkundig gebied heeft dit geleid tot normen en richtlijnen om een zo groot mogelijke winst te halen uit de akkerbouw. Deze paragraaf richt zich op de gevolgen voor de waterhuishouding en vooral de afvoer door het omvormen van landbouwgebied naar natuurgebied (of andersom) en veranderingen in de afwatering door peilbeheer en het dempen van sloten. Verder komen ervaringen uit de praktijk vanuit het waterschap Hunze en Aa's aan de orde.

2.2.1 Eerdere (model)studies en metingen

Wanneer gekeken wordt naar de ingrepen natuurontwikkeling, het dempen van sloten en het verhogen van het oppervlaktewaterpeil, kunnen een aantal raakvlakken genoemd worden, waar ook al eerder onderzoek naar is gedaan. Veel case- en modelstudies zijn al uitgevoerd om de effecten van landgebruik op de afvoer in kaart te brengen. Deze onderzoeken onderscheiden zich van elkaar in de onderzochte menselijke ingrepen in het landschap, analyse aan de hand van modelresultaten of metingen voor en na de ingrepen, de schaal/locatie van het onderzoeksgebied en de gebiedseigenschappen (bodemeigenschappen en vegetatie). Verder zijn de onderzoeken vaak gericht op één de extreme situaties (dus of op droge of op natte situaties), waarbij wordt gekeken naar oplossingen om problemen/overlast/schade te voorkomen.

Gemeten effecten van ingrepen in het landschap op de afvoer

Verscheidende onderzoeken worden gedaan op locale schaal naar de relatie tussen neerslag en afvoer en de veranderingen door menselijke ingrepen. Eerst zullen enkele onderzoeken besproken worden die uitgaan van het daadwerkelijk meten van de afvoer voor en na de ingrepen. Daarna zullen enkele onderzoeken beschreven worden, waarin de resultaten uit modellen gehaald worden.

Robinson (1986) deed onderzoek naar de neerslag-afvoer-relatie in een veengebied in het noorden van Engeland ter grootte van 1,5 km². Metingen werden gedaan om te kijken naar de veranderingen in de afvoer door bebossing van een veengebied en het stimuleren van de groei van de bomen door verbetering van de drainage van het gebied. Dit onderzoek volgde op het besluit van de Forestry Commission, wat inhield dat 18.000 km² bos aangeplant zou worden in Groot Brittannië. Door de drainagemaatregelen nam de baseflow en de jaarlijkse afvoer toe, de piekafvoeren kwamen sneller na de regenbui en deze pieken kwamen 20% hoger te liggen dan voor het uitvoeren van de drainagemaatregelen. Echter, 10 jaar na uitvoering werd het effect steeds minder doordat de bomen groter werden en de begroeiing in de greppels toenam. Dit zorgde voor een verhoogde interceptie en evapo-transpiratie door de bomen en een hogere weerstand in de greppels. De ingrepen bleken overigens relatief weinig effecten te hebben op de extreem hoge afvoeren. De frequentie van de piekafvoeren en het debiet bleken in dit soort situaties weinig tot niet te veranderen.

Ledger en Harper (1987) keken naar het aanplanten van naaldbos met de vereiste drainage in een veengebied in Schotland en kwamen tot ongeveer dezelfde conclusies. In het begin zorgden de drainagemaatregelen voor een hoger jaarlijks debiet en een sneller afvoerregime. Echter, na verloop van tijd werden de effecten steeds minder en begon het op de situatie voor de maatregelen te lijken. Zhang et al (2007) trekken conclusies na uitgebreide analyse van afvoergegevens van 250 stroomgebieden (variërend in grootte van 100 ha tot 100.000 km² over de hele wereld). Zo zou bebossing (loofbomen) van een weidegebied waar jaarlijks 800 mm neerslag valt (zoals in Nederland) de afvoer met 150 mm/jaar doen afnemen. Naaldbos in plaats van loofbos resulteert in een extra

afname van de afvoer met 90 mm/jaar. Verder was het groeistadium van de gewassen van groot belang.

Rozemeijer en Van der Velde (2008) keken in het kader van een onderzoek naar grond- en oppervlaktewaterkwaliteit bij de Hupselse beek naar een sloottransect van 45 meter. Hierbij probeerden ze te kwantificeren hoeveel neerslag er via de verschillende afvoertrajecten in het oppervlaktewater terecht komt. Dit gebeurt via afstroming over het oppervlak, een kort traject via het grondwater of een lang traject via het grondwater. In Nederland werd altijd aangenomen dat oppervlakkige afstroming op het vrij vlakke land maar heel klein is. Aan de hand van metingen van de waterkwaliteit (fosfaat, nitraat, sulfaat, enz) kan bepaald worden hoeveel afvoer er via elke route gaat. Het blijkt dat bij een korte hevige bui meer dan 60% via oppervlakkige afstroming het oppervlaktewater bereikt. Begroeiing van het land en het dempen van sloten (hogere weerstand en grotere berging) leidt tot een andere verdeling en zou hierdoor een sterk effect hebben op de verdeling over de tijd.

Modelstudies

Aan de hand van het model SIMFLOW kijkt Querner (2003) naar het tijdelijk bergen van piekafvoeren door middel van het verlagen van het grondwaterpeil. Door het verlagen van het oppervlaktewaterpeil en daarmee het grondwaterpeil is het mogelijk de bergingsruimte in de bodem sterk te vergroten en hierbij kan bij buien een deel van het water opgeslagen worden, waardoor de piekafvoeren afgevlakt worden. Querner heeft gekeken naar zand-, klei- en veenbodems en focust hierbij op berging in zandbodems. Hierbij wordt gebruik gemaakt van denkbeeldige gebieden, waarbij uitgegaan wordt van standaardwaarden om een algemeen beeld te kunnen schetsen. Uit berekeningen wordt geconcludeerd dat bij zandbodems een afname van de piekafvoeren met 10-15% mogelijk is, maar dan moeten droge periodes gebruikt worden om het grondwaterpeil sterk te verlagen en de drainage van het gebied dient beperkt te worden.

Om verdroging in droge periodes tegen te gaan is het in sommige gebieden van belang om de grondwaterstand te verhogen. Er zijn verschillende maatregelen mogelijk, waarbij De Graaff en van den Brink (2007) zich richten op het verhogen van het oppervlaktewaterpeil en op het dempen van sloten. Er is een model gemaakt van hun onderzoeksgebied (8 km² tussen Barneveld en Veenendaal) dat bestaat uit een combinatie van een Simgro-model en een aangepast Sobek-ChannelFlow-model. Het verhogen van het oppervlaktepeil met gemiddeld 30 cm en het dempen van de kleinere watergangen hebben beide tot gevolg dat de GLG in het gebied gemiddeld 5-10 cm stijgt. Een ander gevolg is dat de gemiddelde afvoer daalt (in dit geval met 20-30%), wat voornamelijk komt door de omschakeling van kwel naar wegzijging en een klein beetje door meer verdamping. In tegenstelling tot de gemiddelde afvoer nemen de piekafvoeren juist toe doordat de mogelijke bergingsruimte kleiner is (in dit geval een stijging van 20-30%).

Effecten op grote stroomgebieden

Voor de frequentie en het debiet van extreme piekafvoeren in grote stroomgebieden blijkt het landgebruik en de drainage van minder groot belang te zijn. Uit verschillende modelstudies en analyses van historische reeksen (van Deursen, 2002; Phister et al, 2003; Tu et al, 2004) blijken veranderingen in het landgebruik en het dempen van sloten nauwelijks effect te hebben op de hoge afvoeren. Andere onderzoeken (o.a. Van Winden et al, 2003) zien die bovenstroomse bergingen juist als oplossing voor de hoogwaterproblematiek, doordat ze het water vasthouden.

Het verminderd effect bij hoogwater kan verklaard worden aan de hand van de buikarakteristieken en de staat van de bergingen aan het begin van de bui. De afvoer van korte, hevige buien kan gedeeltelijk geborgen worden door het vergroten van de berging. Deze hevige buien komen echter alleen in kleine gebieden voor, waardoor de problemen alleen lokaal voorkomen. Grotere stroomgebieden hebben vooral problemen als gedurende lange tijd neerslag valt over het hele gebied en hierbij blijkt het om een relatief lage intensiteit te gaan. Door de grote hoeveelheid over lange periode raken de bergingen allemaal wel gevuld, wat als gevolg heeft dat op den duur al de neerslag snel wordt afgevoerd. Door de relatief lage intensiteit ontstaan in dit soort gevallen in kleine (of deel-)stroomgebieden niet heel veel problemen maar benedenstrooms in de grote

stroomgebieden wel. Daarbij komt ook nog dat het landgebruik hierbij over grote gebieden zal moeten veranderen wil het effect enigszins merkbaar zijn.

2.2.2 Praktijkervaringen waterschap Hunze en Aa's

Tijdens een gesprek met drie gebiedshydrologen van het Waterschap Hunze en Aa's kwam duidelijk naar voren dat het waterschap met verschillende natuurontwikkelingsprojecten te maken heeft gehad die er voor zorgden dat de waterhuishouding flink veranderde. In deze paragraaf zullen enkele projecten aan bod komen. Echter zijn er over de projecten lastig duidelijke gegevens te verkrijgen en het analyseren kost te veel tijd om in dit onderzoek op te nemen. De verschillende projecten zijn echter nog wel interessant voor eventueel verder onderzoek.

Naast het herstel van het beekdalsysteem Halkenbroek en Holmers, zijn er binnen het stroomgebied van de Drentsche Aa meer gebieden die aangewezen zijn voor natuurontwikkeling. Naast de al bestaande bos- en natuur-gebieden, heeft men de verschillende beeklopen weer laten meanderen als vanouds en de gebieden direct langs de beeklopen laat men omvormen tot vochtige schraalgraslanden. Ook zijn er andere brongebieden aangewezen zoals Geelbroek, waar net als in Halkenbroek/Holmers, een nieuw natuurgebied zal ontstaan door vernatting.

Twee andere projecten binnen de grenzen van het waterschap zijn het lopende project Blauwe Stad (ten noorden van Winschoten) en de toekomstige Meerstad (ten oosten van de stad Groningen) waarbij voornamelijk wonen in een waterrijke natuurlijke omgeving centraal staat. De waterhuishouding is hier van groot belang aangezien het creëren van grote oppervlaktes met open water, veel invloed heeft op de peilen in de omgeving.

Bij Vlagtwedde is men bezig met het project Inrichting EHS Westerwolde. Dit project speelt zich af rond de Ruiten Aa: een beekloop die haar natuurlijke loop weer terug heeft gekregen en waarbij verschillende deelprojecten betrokken worden om er een lange EHS-structuur van te maken. De deelprojecten bestaan voornamelijk uit metamorfoses van verschillende landbouwgebieden naar natuurgebied, gecombineerd met een cultuurlandschap, waarin vooral diversiteit van belang is. Een voorbeeld is het Elsinghuizerveld waarbij men doormiddel van het afgraven van de bouwvoor (toplaag), dempen van sloten en het herstellen van de pingo (laagte ontstaan in de ijstijd) het gebied haar karakter van 150 jaar geleden terug wil geven. De waterhuishouding in dit gebied is hierdoor ook flink veranderd. Het gebied is heel erg nat (grondwaterstand erg hoog) en er treedt momenteel veel oppervlakkige afvoer op doordat er nog weinig begroeiing is. Hierdoor zijn vanzelf slenken ontstaan die alleen na buien vol staan met water. De begroeiing begint hier langzaam op te komen.

Een van de EHS-structuren loopt van Delfzijl naar het zuidwesten, aan de westkant langs Hoogezand en daarna richting het zuiden. Hier zijn ook verschillende projecten al uitgevoerd of staan nog op de planning. Een project dat nog uitgevoerd gaat worden is het (gedeeltelijk) onder water zetten van verschillende landbouwgebieden tussen het gemaal Woudbloem en het Schildmeer. Hier komt dan het Dannemeer, dat een verbinding vormt tussen de al ontwikkelde EHS-gebieden. Aangezien vroeger dit gebied intensief bemest is, zou de toekomstige afvoer en uitspoeling van dit gebied interessant zijn voor verder onderzoek, waarbij ook gekeken wordt naar de kwaliteit van het water.

Twee naast elkaar gelegen projecten in ditzelfde gebied zijn de Kropswolderbuitenpolder en de Westerbroekstermadepolder (ten westen van Hoogezand). Deze vroegere landbouwgebieden zijn vanaf 2002 gedeeltelijk onder water gezet. Ook staan beide polders met elkaar in verbinding. Uiteindelijk is een natuurgebied ontstaan met natte en droge delen, open waterriet, ruigtes en geulen. Verder wordt het gebied gebruikt als waterbergingsgebied. Hiervoor is gekozen omdat er in de omgeving maar weinig ruimte is om water op te slaan en de kans op wateroverlast groter werd. In oktober 1998 heeft dit er ook toe geleid dat het gebied (ongecontroleerd) onder water liep.

2.3 AANDACHTSPUNTEN VOOR HET VERDERE ONDERZOEK

Er blijkt al veel onderzoek te zijn gedaan naar de gevolgen van veranderingen in landgebruik en andere ingepen in het hydrologisch systeem. Uit de studies blijkt dat op lokale schaal het bebossen van gebieden tot een gemiddeld lagere afvoer leidt (door meer verdamping) en ook piekafvoeren zouden enigszins worden afgevlakt. Hierbij zal het plaatsen van naaldbos tot een grotere hoeveelheid verdamping leiden dan bij loofbos. Voor de verdamping blijkt het groeistadium van de

begroeiing ook van belang te zijn. Duidelijk is dat de verdamping een belangrijk onderdeel is bij het veranderen van het landgebruik.

Het dempen van sloten heeft tot effect dat de grondwaterstand zal stijgen om de lagere ontwatering te compenseren. De gevolgen hiervan zijn nogal afhankelijk van de gebiedskarakteristieken en de mate van ingrijpen. De langere afstand tot aan het afwateringssysteem zorgt in eerste instantie voor een vertraging van de afvoer en een grotere spreiding over de tijd. Echter kan door het dempen van sloten de afvoer ook omslaan naar de veel snellere afvoercomponent over het maaiveld, waardoor piekafvoeren juist gaan toenemen.

Door het veranderen van de begroeiing en dus het landgebruik veranderen ook de mogelijke berging op het maaiveld en de wrijving bij oppervlakkige afvoer, waardoor afstroming via het maaiveld ook tegen gegaan wordt.

Ook het verhoogd peilbeheer in het hele gebied en het verwijderen van de toplaag in het deelgebied Holmers zorgen er voor dat de bodem sneller verzadigd raakt. Door het verhoogd peilbeheer zal ook het grondwaterpeil stijgen, waardoor de mogelijke berging kleiner wordt. Dit is ook het geval bij het afgraven van de toplaag. Het verhogen van het peil in de boswachterijen en het verdrinken van het bos kan gevolgen hebben op de verdamping.

Samenvattend is het duidelijk dat de ingrepen direct hebben effect op bepaalde processen, maar indirect worden hierdoor de andere processen binnen het systeem beïnvloed. Daarnaast zijn de gebiedskarakteristieken van belang voor het bepalen van de verschillende processen. Verschillen binnen het onderzoeksgebied zouden er toe moeten leiden dat het gebied opgedeeld dient te worden. Duidelijk is wel dat de volgende processen van belang zijn om inzicht te krijgen in de afvoer van de het gebied:

- De verdamping (afhankelijk van vochtvoorziening en gewas en het eventueel afsterven van de bomen)
- De ontwatering naar het oppervlaktewater (afstand tussen de verschillende waterlopen)
- Oppervlakkige afvoer (invloed van begroeiing en de afstand tussen de waterlopen)
- De afvoer over de stuw
- De gevolgen van verzadiging van de bodem op de afvoer (omschakeling naar oppervlakkige afvoer en verdrinken begroeiing)

3 HYDROLOGISCH MODEL PEILGEBIED 1510

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe het water afgevoerd wordt door het stroomgebied. De verschillende hydrologische processen worden beschreven en hoe deze elkaar beïnvloeden. Daarna komen enkele modellen aan bod die gebruikt worden om de afvoer van een gebied te bepalen. Uiteindelijk leidt dit tot een zelfgemaakt neerslag-afvoer-model voor het peilgebied.

3.1 NEERSLAG-AFVOER-MODELLEN

Om het traject tussen neerslag en afvoer te beschrijven kan gebruik gemaakt worden van neerslag-afvoer-modellen die een stroomgebied of een deel van een stroomgebied en alle hydrologische processen daarin (op een eventueel vereenvoudigde wijze) beschrijven. Deze modellen bestaan vaak uit een vereenvoudiging van een gebied naar verschillende bergingen die naast of boven elkaar liggen. Het gaat hierbij om de maaiveldberging, berging in onverzadigde en verzadigde zone en het oppervlaktewater. De verschillende hydrologische fluxen worden bepaald door de hoeveelheid water in de bergingen en bepaalde weerstandswaarden.

Er zijn verschillende neerslag-afvoer-modellen die gebruikt zouden kunnen worden voor dit onderzoek. Een aantal neerslag-afvoermodellen gaat duidelijk uit van het bergingenprincipe. Op deze manier werken onder andere het HBV-model (Zweeds Meteorologisch en Hydrologisch Instituut), de Regen-Afvoer-Module (Duflow Modelling Studio), het Wageningenmodel (WAGMOD van de Wageningen Universiteit) en het Sacramento-concept. Het voordeel van deze modellen is dat ze eenvoudig in elkaar steken en eenvoudig te kalibreren zijn.

Echter gaan deze modellen bij de stroming in de verzadigde zone vaak uit van een langzame en een snelle component waar tussen het gepercoleerde water verdeeld wordt. Voor een bepaald gebied is het mogelijk om hiermee de afvoer te bepalen: de parameters en de verdeling tussen de verschillende afvoertrajecten kunnen eenvoudig gekalibreerd worden. Deze waarden voor de parameters vertellen echter verder niet veel over de indeling van het gesimuleerde gebied, de indeling van de waterlopen of de bodemkarakteristieken. De parameters bepalen de vertraging in de afvoer van de neerslag, maar alle weerstanden van de verschillende ontwaterings- en afwateringsprocessen worden hierbij samengevoegd, waardoor niet duidelijk is wat de afzonderlijke weerstanden zijn. Bij iedere verandering binnen het systeem dienen de parameters weer opnieuw gekalibreerd te worden, aangezien er geen fysische elementen in het model worden meegenomen buiten de oppervlakte van het gebied. Hierdoor is het onmogelijk om bijvoorbeeld de effecten van het dempen van sloten, het afgraven van een deel van het gebied en het verhoogd peil te bepalen laat staan de effecten van delen van het stroomgebied in beeld te brengen.

Voor dit onderzoek is een niet al te ingewikkeld model gebouwd waarin de verschillende hydrologische processen aan bod zullen komen. Hierbij zal het gaan om een conceptueel model dat voor het onderzoeksgebied de relatie weergeeft tussen neerslag en afvoer gedurende de tijd. Na calibratie zou het model voor ieder neerslagscenario gedurende een bepaalde periode de afvoer voor die periode moeten kunnen simuleren. Om de verandering in landgebruik en de afwatering goed in beeld te brengen zal het gebied enigszins opgedeeld moeten worden. Er is dus sprake van een semi-distributed, deterministisch, conceptueel en niet-stationaire neerslag-afvoer-model. Voor de verschillende onderdelen van het model is gebruik gemaakt van de eerder genoemd modellen en van bestaand onderzoek naar ontwatering en afwatering van een gebied.

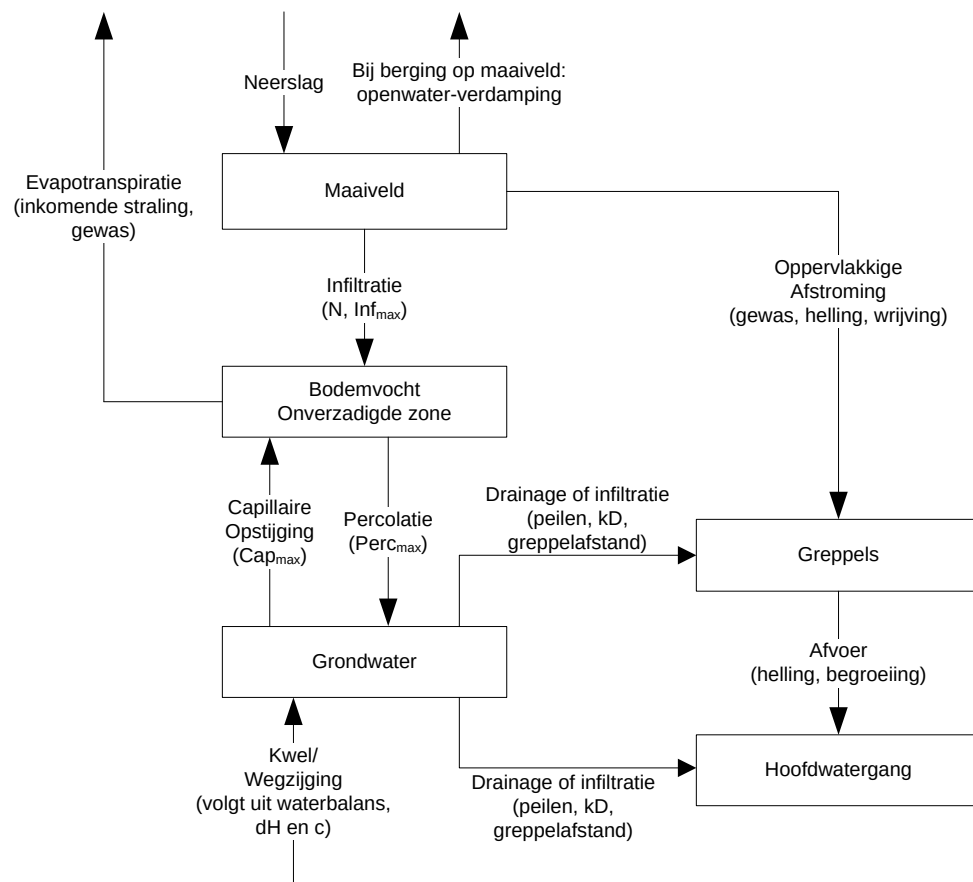
De ontwikkeling van het model is gebaseerd op een aantal criteria:

- Belangrijke processen in beeld brengen
- Toepassen van de genomen ingrepen in het model
- Inzicht verkrijgen in het hydrologisch proces (leerproces)

3.2 MODELOPZET EN TOEPASSING OP HET GEBIED

Het schema in Figuur 3-1 geeft de modelopzet weer met de verschillende “bergingen” en de onderlinge fluxen. Duidelijk is dat er voor gekozen is om de ontwatering van het gebied te laten gebeuren via zowel de greppels als de hoofdwatergang, waarbij weer de onderlinge afstanden

tussen de waterlopen van belang is. In de literatuur komt men vaak tegen dat er gekozen wordt voor 3 verschillende typen (groottes) waterlopen, maar in dit onderzoeksgebied blijkt het onderscheid maken in twee typen genoeg. In de modelopzet zijn de verschillende processen weergegeven met in het kort de variabelen/parameters, die de processen direct beïnvloeden.

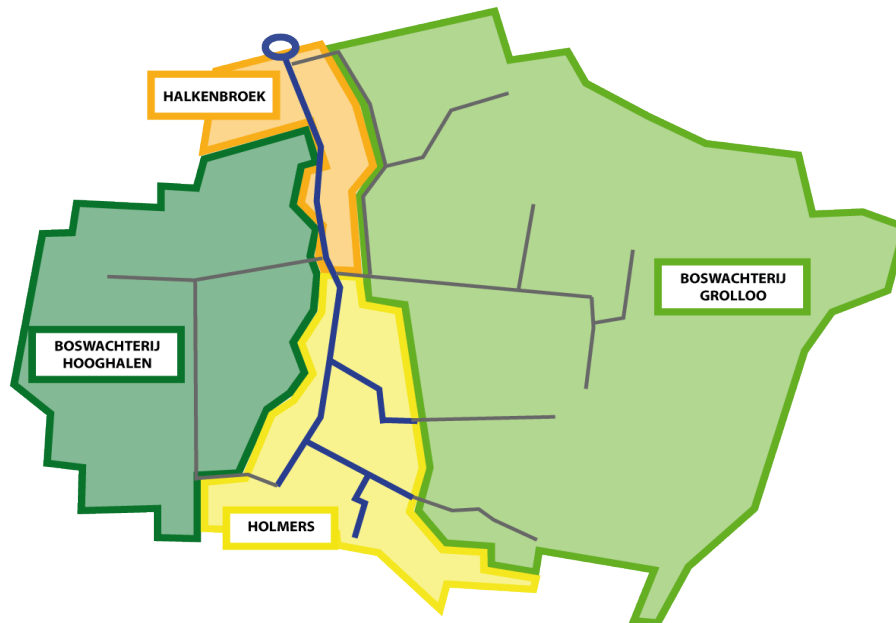


Figuur 3-1 Opzet van het model met de hydrologische processen

De modelopzet kan gebruikt worden door het te modelleren stroomgebied op te delen, waarbij ieder deelgebied zijn specifieke set van parameters en inputgegevens heeft. Dit is ook al in paragraaf 2.1 “Analyse onderzoeksgebied” aan de orde gekomen: niet alleen de bodem verschilt, maar ook de hoogteligging, het landgebruik en de indeling van de waterlopen. Dit betekent dat de modelopzet niet gebruikt kan worden voor het hele peilgebied en dat het nodig is om het onderzoeksgebied op te delen in deelgebieden.

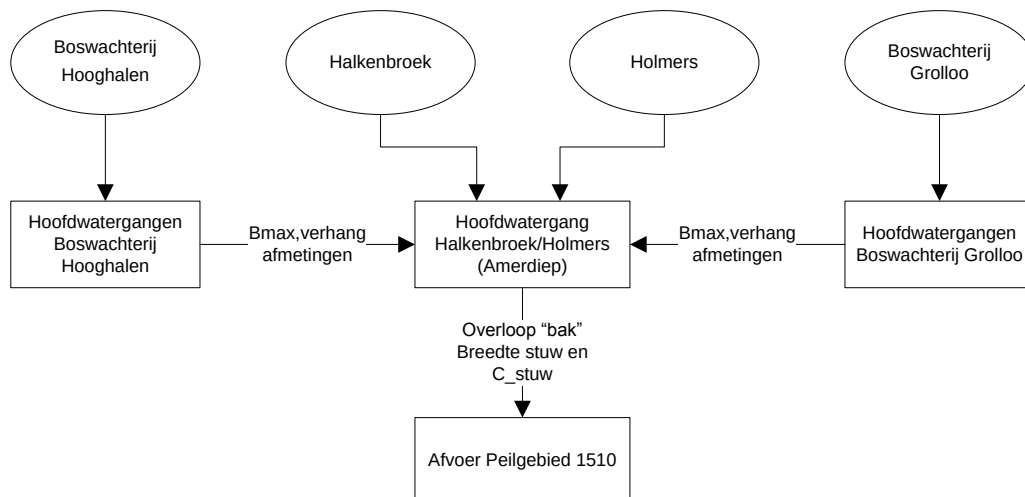
Het voordeel bij het opdelen van het gebied is dat de drie onderdelen (bodem, landgebruik en indeling waterlopen) in verband met elkaar staan. Bepaalde gronden zijn beter geschikt voor bijvoorbeeld landbouw en via waterlopen valt de ontwatering te reguleren. Daarnaast zijn de bodemsoort en de hoogteligging ook weer van invloed op de ontwatering en de kwel.

Rekening houdend met de locaties waar de ingrepen plaatsvinden, kan het gebied simpel worden opgedeeld in 4 gebieden: Halkenbroek, Holmers en de deelgebieden die horen bij de boswachterijen van Hooghalen en Grolloo (zie Figuur 3-2).



Figuur 3-2 Deelgebieden van peilgebied 1510 met de hoofdwatervangsten

De afwatering vanuit de deelgebieden vindt plaats door de hoofdwatervangsten, die gevoed worden vanuit de greppels, vanuit het grondwater of via oppervlakkige afstroming zoals al eerder is weergegeven in de modelopzet. Vanuit de boswachterijen komt het water via de hoofdwatervangsten in het Amerdiep terecht dat weer de hoofdwatervangst van de gebieden Holmers en Halkenbroek is. In Figuur 3-3 is schematisch weergegeven hoe de afwatering plaatsvindt. De hoofdwatervangsten zijn de enige verbinding tussen de verschillende deelgebieden, verder zijn de deelgebieden geheel van elkaar afgesloten. Dit om het afzonderlijk modelleren van de deelgebieden mogelijk te maken. De onderlinge grondwaterstromingen tussen de deelgebieden wordt gecompenseerd met de kwel per deelgebied. Hierdoor zal uit de hoger gelegen boswachterijen meer grondwater wegzijgen naar het tweede watervoerende pakket en Halkenbroek en Holmers krijgen te maken met extra kwel.



Figuur 3-3 Schematisatie van de afwatering van de deelgebieden via de hoofdwatervangsten richting de stuw

3.3 MODELLERING VAN DE (BELANGRIJKE) PROCESSEN

In deze paragraaf wordt het model nader uitgewerkt. De verschillende processen die in het model zijn opgenomen, zijn gebaseerd op verschillende modellen en onderzoeken. Om de effecten van de ingrepen te bepalen is het van belang om in iedere tijdstap de inhoud van de bergingen en de groottes van de onderlinge fluxen te bepalen voor ieder deelgebied. Hierbij moet dus steeds een

samenhang bestaan tussen de peilen in het oppervlaktewater en het grondwater, maar ook met de maaiveldberging en de onverzadigde zone. De gebruikte formules worden in deze paragraaf beschreven en ook wordt duidelijk gemaakt waarom deze zijn gekozen. Uiteindelijk zal nog ingegaan worden op enkele uiterste situaties die ook van belang zijn.

Om het overzicht te houden wordt van boven naar beneden gewerkt in de hydrologische kringloop. Zo komt eerst de maaiveldberging en de processen die hierdoor beïnvloed worden aan bod. Vervolgens wordt ingegaan op de onverzadigde zone en daarna op de verzadigde zone. Uiteindelijk komt de afwatering aan bod.

De processen die spelen in “verticale richting”, zoals infiltratie, percolatie, capillaire opstijging en kwel zijn voornamelijk afgeleid van de Regen-Afvoer-Module (RAM) van Duflow Modelling Studios (STOWA, 2002 en ook beschreven in Velner, 2002) met enkele noodzakelijke aanpassingen. Wanneer er wijzigingen zijn aangebracht wordt dit aangegeven. De “horizontale processen” (de verschillende afvoertrajecten) zijn gebaseerd op verschillende ontwaterings- en afvoertheorien.

In Bijlage A.1 worden alle in het model gebruikte termen weergegeven. De gebiedsgegevens en de parameters dienen bepaald of gecalibreerd te worden voor ieder deelgebied, alle andere termen worden voor iedere tijdstap berekend. Belangrijk is om te vermelden dat bij de fluxen steeds gerekend wordt in m/d, waarbij dus de flux is gedeeld door de oppervlakte van het (deel)gebied. In de onderstaande beschrijving zal bij iedere berging eerst de waterbalans opgesteld worden zodat men een duidelijk beeld overzicht krijgt.

3.3.1 Maaiveldberging

De geborgen hoeveelheid op het maaiveld (B_{mv}) wordt bepaald door de hoeveelheid neerslag (P) die valt, de hoeveelheid die infiltreert (q_{inf}), de verdamping vanuit de depressies ($q_{E,mv}$) en de oppervlakkige afstroming richting de waterlopen ($q_{mv \rightarrow gr}$). In de praktijk het er op neer dat er geborgen wordt op het maaiveld wanneer er neerslag met een hoge intensiteit valt of wanneer de bodem al (bijna) verzadigd is waardoor de infiltratiecapaciteit maar heel klein is. De waterbalans voor de maaiveldberging is als volgt.

$$B_{mv}(t) = B_{mv}(t - \Delta t) + (P(t) - q_{inf}(t) - q_{E,mv}(t) - q_{mv \rightarrow gr}(t)) \cdot \Delta t \quad [m] \quad 3-1$$

Infiltratie

De infiltratiecapaciteit is afhankelijk van de hoeveelheid water in de bodem, de vegetatie en de bodemsoort. Aan het begin van een bui is de infiltratiecapaciteit erg hoog en neemt gedurende de bui af tot een bepaalde waarde. Omdat dit lastig is, wordt uitgegaan van een vast infiltratiemaximum.

$$q_{inf}(t) = P(t) + \frac{B_{mv}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad \text{als } P(t) + \frac{B_{mv}(t - \Delta t)}{\Delta t} \leq q_{inf,max} \quad [m] \quad 3-2$$

$$q_{inf}(t) = q_{inf,max} \quad \text{als } P(t) + \frac{B_{mv}(t - \Delta t)}{\Delta t} \geq q_{inf,max} \quad [m/d] \quad 3-3$$

Bij bijna verzadiging van de bodem dient de infiltratie aangepast te worden. Hier wordt later op ingegaan aangezien de infiltratie dan afhankelijk is van de grondwaterstand en alle andere processen die samen de grondwaterstand bepalen.

Oppervlakkige afstroming

Oppervlakkige afstroming vindt plaats wanneer er teveel berging op het maaiveld plaatsvindt door hoge neerslagintensiteit of bij een verzadigde bodem (dan spreekt men van saturated overland flow). De oppervlakkige afstroming (overland flow) vindt plaats wanneer de depressies in het oppervlak zijn gevuld en er dus meer water op het oppervlak blijft liggen dan er maximaal geborgen kan worden ($B_{mv,max}$). De snelheid waarmee het water afstroomt, is verder afhankelijk van de dikte van de waterlaag (h_{mv}), de helling van het maaiveld (i_{mv}) en de begroeiing (Stolte et al, 2000). Bij de oppervlakkige afvoer zijn zowel de maximale berging als Manning's wrijvingscoëfficiënt n_{mv} afhankelijk van de begroeiing (South Florida Water Management District, 2005).

$$h_{mv}(t) = B_{mv}(t - \Delta t) - B_{mv,max} \quad \text{als } B_{mv}(t - \Delta t) > B_{mv,max} \quad [m] \quad 3-4$$

$$h_{mv}(t) = 0 \quad \text{als } B_{mv}(t - \Delta t) \leq B_{mv, \max} \quad [m] \quad 3-5$$

De oppervlakteafvoer wordt als volgt berekend:

$$q_{mv \rightarrow gr}(t) = \frac{3600 \cdot 24 \cdot h_{mv}(t)^{5/3} \cdot i_{mv \rightarrow gr}^{1/2}}{n_{mv}(t) \cdot L_{gr}} \quad [m/d] \quad 3-6$$

3.3.2 De onverzadigde zone (bodemvocht)

De onverzadigde zone is een niet te onderschatten onderdeel van het hydrologisch systeem binnen een stroomgebied. De onverzadigde zone werkt als een buffer, zeker in droge periodes. Het vochtgehalte in een evenwichtssituatie wordt bepaald aan de hand van de Staringreeks. De Staringreeks is een verzameling waterretentie- en doorlatenheidskarakteristieken aan voornamelijk landbouwbodems. Hierbij wordt de waterretentiekarakteristiek beschreven met de volgende door Van Genuchten opgestelde vergelijking (van den Akker, 2001). Hierbij is het vochtgehalte afhankelijk van de stijghoogte ten opzichte van maaiveld (h_{bv} is uitgedrukt in stijghoogte ten opzichte van maaiveld in cm).

$$\theta_{evenwicht} = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha h_{bv}|^n\right)^{1-1/n}} \quad [-] \quad 3-7$$

Het potentiaal in de onverzadigde zone wordt ook wel uitgedrukt in $pf = \log|h_{bv}|$.

Een evenwichtsprofiel ontstaat wanneer het teveel of het tekort aan vocht is uitgezakt/aangevuld en het bodemvocht dus in evenwicht is. Het vochtgehalte in de evenwichtssituatie wordt ook wel veldcapaciteit genoemd, waarbij de stijghoogte gelijk komt te liggen met het grondwaterpeil. In Nederland liggen de grondwaterstanden gemiddeld tussen de 0,5 en 2 meter beneden maaiveld (afhankelijk van bodemsoort, hoogteligging en beheer). Hierdoor komt de veldcapaciteit normaal gesproken tussen de $pf=1,7$ en $pf=2,3$ te liggen. In het model wordt het vochtgehalte in de evenwichtssituatie bepaald aan de hand van het grondwaterpeil ten opzichte van het maaiveld.

Ook wordt de invloed van hysteresis niet meegenomen. Hier gaat het om de verschillen in bodemkarakteristieken tussen een droge bodem die bevochtigd wordt en een zelfde bodem die juist opdroogt.

De waterbalans voor het bodemvocht is als volgt:

$$B_{bv}(t) = B_{bv}(t - \Delta t) + (q_{inf}(t) - q_{perc}(t) + q_{cap}(t) - q_{E,bv}(t)) \cdot \Delta t - (H_{gw}(t) - H_{gw}(t - \Delta t)) \cdot \theta_{bv}(t - \Delta t) \quad [m] \quad 3-8$$

Aan de ene kant is de verandering in de hoeveelheid bodemvocht afhankelijk van de hoeveelheid vocht dat de onverzadigde zone binnen komt via infiltratie (q_{inf}) en capillaire opstijging (q_{cap}) of verlaat via percolatie (q_{perc}) en verdamping ($q_{E,bv}$). Aan de andere kant speelt de verandering in de grondwaterstand een kleine rol. Bij een daling van de grondwaterstand blijft er namelijk extra vocht achter in de onverzadigde zone. Bij een stijging van de grondwaterstand percoleert juist een extra deel van het bodemvocht.

Percolatie en capillaire opstijging

De pF-curve wordt gebruikt om te bepalen of er percolatie optreedt of juist capillaire opstijging. De grootte van de fluxen wordt bepaald door de huidige vochtgehalte te vergelijken met het vochtgehalte in een evenwichtssituatie. Bij een te hoog vochtgehalte vindt percolatie plaats waarbij de percolatie maximaal is als de bodem verzadigd is (bij $pf=0$).

$$q_{perc}(t) = q_{perc, \max} \quad \text{als } \theta(t - \Delta t) \geq \theta_{pF=0} \quad [m/d] \quad 3-9$$

$$q_{perc}(t) = \frac{(\theta(t - \Delta t) - \theta_{evenwicht}(t - \Delta t))}{(\theta_{pf=0} - \theta_{evenwicht}(t - \Delta t))} \cdot q_{perc, \max} \quad \text{als } \theta_{pF=0} > \theta(t - \Delta t) \geq \theta_{evenwicht}(t - \Delta t) \quad [m/d] \quad 3-10$$

$$q_{perc}(t) = 0 \quad \text{als } \theta(t - \Delta t) < \theta_{evenwicht}(t - \Delta t) \quad [\text{m/d}] \quad 3-11$$

Bij een te laag vochtgehalte (door droogte of snelle daling van de grondwaterstand) vindt er capillaire opstijging plaats. Bij $pf=4.2$ (verwelkingspunt) is de capillaire opstijging maximaal gedefinieerd.

$$q_{cap}(t) = 0 \quad \text{als } \theta(t - \Delta t) \geq \theta_{evenwicht}(t - \Delta t) \quad [\text{m/d}] \quad 3-12$$

$$q_{cap}(t) = \frac{(\theta_{evenwicht}(t - \Delta t) - \theta(t - \Delta t))}{(\theta_{evenwicht}(t - \Delta t) - \theta_{pf=4.2})} \cdot q_{cap,max} \quad \text{als } \theta_{evenwicht,t-1} > \theta_{t-1} \geq \theta_{pf=4.2} \quad [\text{m/d}] \quad 3-13$$

$$q_{cap,t} = q_{cap,max} \quad \text{als } \theta_{t-1} < \theta_{pf=4.2} \quad [\text{m/d}] \quad 3-14$$

De capillaire opstijging en percolatie worden in RAM (STOWA, 2002) bijna net zo gemodelleerd. Hier wordt echter niet uitgegaan van het evenwichtsvochtgehalte dat bij de gemodelleerde grondwaterstand hoort, maar wordt steeds gewerkt naar het vochtgehalte dat hoort bij $pf = 2,0$ (standaard veldcapaciteit). Dit terwijl binnen RAM wel gerekend wordt met de lengte van de onverzadigde zone (dus met grondwaterstand).

Verdamping

De evapotranspiratie bestaat uit evaporatie en transpiratie. Het vochtgehalte in de onverzadigde zone heeft verder veel invloed op de verdamping. Bij een laag vochtgehalte treedt er een merkbare afname op in de hoeveelheid verdamping. De hoeveelheid verdamping wordt bepaald door eerst uit te gaan van de potentiële verdamping. De potentiële verdamping wordt op verschillende manieren berekend door onder andere Makkink en Penman-Monteith (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988). Hierbij wordt door Penman-Monteith naar meer verschillende variabelen gekeken dan door Makkink. Zo worden onder andere de nettostraling (inkomende minus uitgaande kort- en langgolvlige straling), de aerodynamische weerstand en de bodemwarmtestroomdichtheid door Makkink niet apart meegenomen. Makkink gaat uit van een eenvoudige formule die een goede correlatie geeft tussen de verdamping van grasvelden en de globale stralingsstroomdichtheid ($K\downarrow$, inkomende kortgolvlige straling) in combinatie met de temperatuur. Vervolgens is met behulp van gewasfactoren de referentiegewasverdamping te berekenen. Voor het model is gekozen voor de methode van Makkink, omdat deze eenvoudig is en maar enkele inputgegevens nodig heeft, die bovendien ook nog eenvoudig te verkrijgen zijn. Verder geeft de Makkink-methode ongeveer even goede resultaten als de Penman-Monteith methode (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988). De formule van Makkink voor de referentiegewasverdamping is als volgt:

$$q_{E,pot}(t) = f_{Makkink} \cdot q_{E,ref}(t) = f_{Makkink} \cdot 0,65 \cdot \frac{s(t)}{s(t) + \gamma} \cdot K\downarrow(t) \quad [\text{m/d}] \quad 3-15$$

Voor gras is de referentiegewasfactor (f) door het hele jaar 1,0. Voor vele andere gewassen zijn de gewasfactoren voor gedurende het hele jaar opgesteld (de factoren zijn per decade vastgesteld). De gewasfactoren die zijn gebruikt als input en die al algemeen gelden zijn te vinden in Bijlage A.5. De globale stralingsstroomdichtheid $K\downarrow$ is te berekenen met de volgende formule:

$$K\downarrow(t) = K_o\downarrow(t) \left(a + b \cdot \frac{t_{uren_zon}(t)}{t_{max_uren_zon}(t)} \right) \quad [\text{W/m}^2] \quad 3-16$$

De inkomende straling op een horizontaal oppervlak aan de rand van de atmosfeer ($K_o\downarrow$) zijn bekende vaste cijfers die ook afhangen van de tijd van het jaar. Bij het KNMI zijn verder daggegevens op te vragen over het percentage zonneshijn. De constanten zijn bekend voor het binnenland van Nederland ($a = 0,20$ en $b = 0,60$).

Met de psychrometerconstante γ ($= 2,45 \times 10^6 \text{ J/kg}$) en de helling (s) van de verzadigingsdampdrukcurve kan de potentiële verdamping berekend worden. Voor de helling van de

verzadigingsdampdrukcurve wordt gebruik gemaakt van de gemiddelde temperatuur en de volgende formule.

$$s(t) = 0,0623 \cdot 6,3858 \cdot e^{0,0623T_{\text{gemiddeld}}(t)} \quad 3-17$$

De actuele verdamping hangt daarna af van het bodemvocht. Er wordt vanuit gegaan dat men van een goede vochtvoorziening spreekt wanneer het vochtgehalte hoger is dan bij de evenwichtssituatie bij $pf = 2,0$. In die situaties is de verdamping dus gelijk aan de potentiële verdamping. Bij het verwelkingspunt ($pf=4,2$) en lager treedt er geen verdamping meer op.

$$\begin{aligned}
 q_{E,act}(t) &= f_{Makkin}(t) \cdot q_{E,pot}(t) & \text{als } \theta_{bv}(t - \Delta t) > \theta_{pF=2} & \quad [m/d] & \begin{matrix} 3-1 \\ 8 \end{matrix} \\
 q_{E,act}(t) &= \left(\frac{\theta_{bv}(t - \Delta t) - \theta_{bv,pF=4,2}}{\theta_{bv,pF=2} - \theta_{bv,pF=4,2}} \right) \cdot f_{Makkin}(t) \cdot q_{E,pot}(t) & \text{als } \theta_{pF=2} \geq \theta_{bv}(t - \Delta t) & & \begin{matrix} 3-1 \\ 9 \end{matrix} \\
 & & & > \theta_{pF=4,2} & \\
 q_{E,act}(t) &= 0 & \text{als } \theta_{bv}(t - \Delta t) < \theta_{pF=4,2} & \quad [m/d] & \begin{matrix} 3-2 \\ 0 \end{matrix}
 \end{aligned}$$

3.3.3 De verzadigde zone (eerste aquifer)

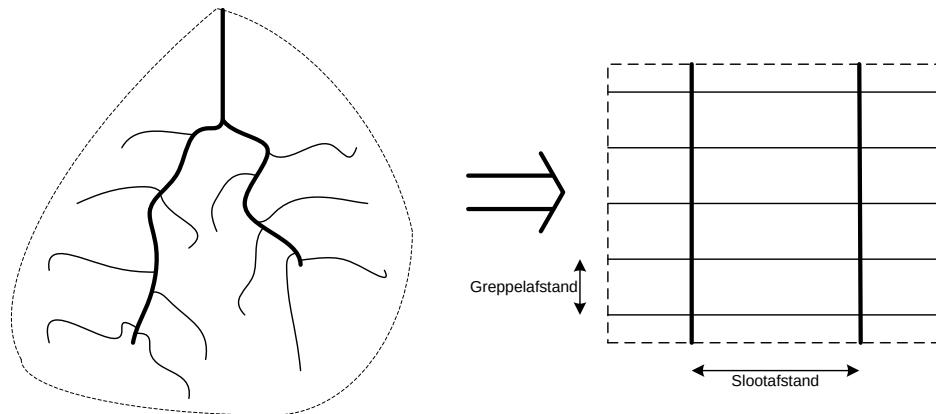
De verzadigde zone in de eerste aquifer heeft met enkele processen temaken. Percolatie en capillaire opstijging zorgen voor de interactie met de onverzadigde zone zoals in de vorige paragraaf is uitgelegd. Daarnaast spelen ontwatering (zijwaartse stroming vanuit/naar waterlopen) en kwel (verticale stroming vanuit naar de onderliggende watervoerende laag) een rol in de verzadigde zone. Formule 3-21 laat zien dat percolatie vanuit het bodemvocht en kwel (q_{kwel}) voor een stijging van de grondwaterstand zorgen en dat capillaire opstijging, ontwatering richting de greppels ($q_{gw \rightarrow gr}$) en de ontwatering richting de sloten/hoofdwatervgangen ($q_{gw \rightarrow sl}$) voor een daling zorgen. Bij de verandering van de berging in het grondwater en de daaruit volgende grondwaterstand verandering wordt rekening gehouden met de porositeit van de bodem (N) en het vochtgehalte in de onverzadigde zone.

$$H_{gw}(t) = H_{gw}(t - \Delta t) + \frac{[q_{perc}(t) - q_{cap}(t) - q_{gw \rightarrow gr}(t) - q_{gw \rightarrow sl}(t) + q_{kwel}(t)] \cdot \Delta t}{N - \theta_{bv}(t - \Delta t)} \quad [m+NAP] \quad 3-21$$

Bij het bepalen van de fluxen wordt er van uitgegaan dat de stijghoogte in de eerste aquifer gelijk is aan de grondwaterstand. Daarnaast wordt vaak uitgegaan van een parabolisch verloop van het freatisch vlak tussen de waterlopen, echter wordt steeds gerekend met de gemiddelde grondwaterstand (gemiddelde stijghoogte).

Ontwatering naar de waterlopen

De verzadigde zone in het model is geschematiseerd als één watervoerende laag, met een dikte die afhankelijk is van de hoogteligging van het deelgebied (de scheidende laag zit overal op hetzelfde niveau). Deze aanname is direct gemaakt, om het model enigszins eenvoudiger te maken. Deze laag heeft een bepaalde doorlatendheid k_{sat} , waarbij er vanuit gegaan is dat er geen sprake is van anisotropie (verschil tussen de verticale en horizontale doorlatendheid). De doorlatendheid bepaalt in grote mate de ontwatering van de gebieden, waarbij een hoge doorlatendheid staat voor een hoge ontwatering en dus een lage grondwaterstand.



Figuur 3-4 Versimpeling van het wateropensysteem in een stroomgebied voor de ontwatering

Verder is voor de ontwatering de afstand tussen de waterlopen van belang. Omdat het systeem van waterlopen van een stroomgebied vaak een vreemde structuur heeft, is er voor gekozen om uit te gaan van een eenvoudige indeling van waterlopen voor ieder deelgebied waarbij men te maken heeft met een gemiddelde slootafstand ($L_{sl} = A_{\text{gebied}} / \text{totale lengte sloten}$) en een gemiddelde greppelafstand ($L_{gr} = A_{\text{gebied}} / \text{totale lengte greppels}$). Met de sloten worden in dit gebied de hoofdwatgangen bedoeld.

De afvoer richting de waterlopen kan benaderd worden met verschillende formules. Voor de niet-stationaire modelleren kan gebruik gemaakt worden van de formules van Ernst, Kraijenhof van de Leur en van De Zeeuw – Hellinga. De laatste twee gaan uit van een exponentiële functie die de afname van de afvoer gedurende de tijd weergeeft afhankelijk van de hoeveelheid neerslag die in het grondwater terecht komt. De formule van Ernst daarentegen, gaat vrij simpel uit van het peilverschil tussen de gemiddelde grondwaterstand en het oppervlaktewater en de drainageweerstand. De formule van Ernst voor evenwijdige waterlopen ziet er als volgt uit:

$$q_{gw \rightarrow \text{waterloop}}(t) = \frac{H_{gw}(t - \Delta t) - H_{\text{waterloop}}(t - \Delta t)}{c_d(t - \Delta t)} \quad [\text{m/d}] \quad 3-22$$

De drainageweerstand c_d wordt verschillend beschreven, maar uit wordt gegaan van de formulering van Maas (2008).

$$c_d = \frac{D^*}{k} + \frac{L_{\text{waterloop}}^2}{12 \cdot k \cdot D} + L_{\text{waterloop}} \cdot w_r \quad [\text{d}] \quad 3-23$$

$$\text{met } w_r = \frac{1}{\pi k} \cdot \ln \frac{4D}{\pi B} \quad [\text{d/m}] \quad 3-24$$

In de formule voor de drainageweerstand c_d geeft de eerste term de weerstand weer van de verticale stroming over D^* (gemiddelde hoogte van het freatisch vlak boven het slootpeil). De tweede term staat voor de weerstand van de stroming in de horizontale richting. De derde term staat voor de intreeweerstand van de waterloop.

De formule voor de drainageweerstand gaat uit van het gemiddelde freatisch peil in de bovenste aquifer. De factor 2/3 wordt hier gebruikt omdat uit wordt gegaan van een parabolische opbolling van het grondwaterpeil tussen de waterlopen (gemiddelde peil ligt hierdoor op 2/3 van de maximale opbolling boven het peil in de waterlopen. Wanneer het grondwaterpeil lager ligt dan het peil in de waterlopen, treedt er infiltratie op vanuit de waterlopen. Hiervoor wordt dezelfde formule gebruikt. In het ontwikkelde model wordt steeds gerekend met de gemiddelde grondwaterstand. Nadeel bij vooral verzadiging van de bodem is, dat er midden tussen de waterlopen de opbolling veel hoger kan liggen dan het gemiddelde grondwaterpeil. In paragraaf 3.3.5 wordt speciaal ingegaan op de verzadiging van de bodem.

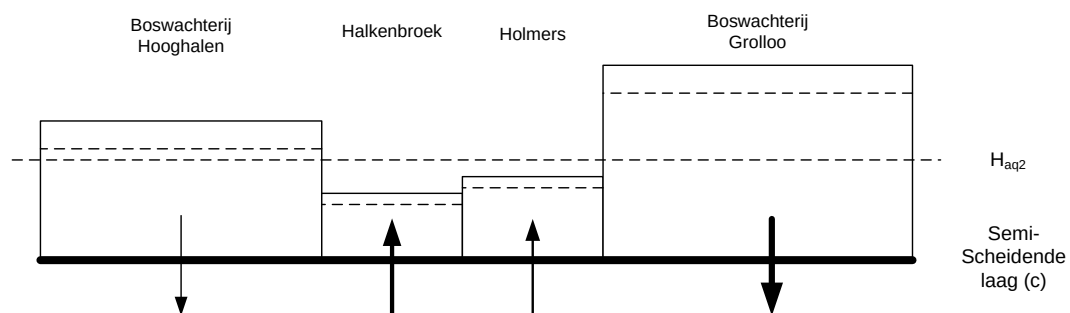
De ontwatering vindt plaats naar zowel de greppels als de sloten. De greppels liggen hierbij minder diep dan de sloten, waardoor bij een lage grondwaterstand de ontwatering alleen richting de sloten gaat.

Kwel

Eerder is er al de conclusie getrokken dat er ook water uit het gebied moet wegzijgen om de waterbalans sluitend te moeten krijgen en verder is bekend dat er kwelwater omhoog komt in de laaggelegen gebieden Holmers en Halkenbroek (er komen ook planten voor die alleen te vinden zijn op plekken waar het mineraalrijke kwelwater omhoog komt). Om de kwel in het model mee te nemen, wordt zoals eerder aangegeven uitgegaan van een semi-scheidende laag onder het hele peilgebied op een vast niveau met overal een gelijke weerstand (c_{aquitard}). Verder heerst in de tweede watervoerende laag overal dezelfde druk (zelfde stijghoogte).

Bij de kwel/wegzijging die gemodelleerd wordt, dient een aantekening gemaakt te worden. Een deel van de kwel kan namelijk gezien worden als grondwaterstroming van het ene gebied naar het andere. Zoals eerder gezegd worden de deelgebieden los van elkaar gemodelleerd, terwijl er ook uitwisseling plaatsvindt tussen de eerste aquifers van de verschillende deelgebieden. Door calibratie van de kwel wordt deze uitwisseling tussen de gebieden meegenomen. Bij het modelleren van de kwel wordt hierdoor uitgegaan van de volgende aspecten:

- Kwel/wegzijging is afhankelijk van de grondwaterstand: hogere wegzijging / minder kwel in de winter door hogere grondwaterstanden.
- De stroming van de eerste aquifers van de boswachterijen naar de eerste aquifers van de lager gelegen Holmers en Halkenbroek neemt ook toe in de winter door een groter verschil in grondwaterpeil (en dus groter verschil in stijghoogte). In de winter dient de “stijghoogte” van aquifer 2 dus hoger te zijn dan in de zomer.
- De stijghoogte in het tweede watervoerende pakket zal eventueel ook stijgen als gevolg van de wegzijging.



Figuur 3-5 Schematisatie van de gemodelleerde kwel in de verschillende deelgebieden

Uit het eerste punt kan geconcludeerd worden dat de stijghoogte in de tweede aquifer lager zal moeten zijn dan de gemiddelde stijghoogte van de eerste aquifers van de verschillende deelgebieden samen. Echter moet het verschil in stijghoogte (wat leidt tot wegzijging) in de zomer kleiner moet zijn dan in de winter. Een gelijke stijghoogte in de tweede aquifer gedurende de tijd is niet mogelijk, aangezien dan niet voldaan wordt aan de tweede eis (zou leiden tot een constante hoeveelheid kwel in Halkenbroek en Holmers gedurende het jaar).

Uiteindelijk blijkt het nodig om te kiezen voor een stijghoogte tussen een standaard laag referentieniveau en de schommelende gemiddelde grondwaterstand (gemiddelde van het referentieniveau en de gemiddelde grondwaterstand van het heel gebied). De bepaling van dit referentieniveau en de weerstand in de scheidende laag kan bepaald worden aan de hand van de gemiddelde grondwaterstand gedurende het jaar en de eerder al bepaalde hoeveelheid wegzijging uit het gebied gedurende het jaar. Aangezien de twee parameters (het referentieniveau en de weerstand van de scheidende laag) direct van elkaar af te leiden zijn, blijft er maar 1 waarde over om te kalibreren.

3.3.4 Afwatering

Via ontwatering of oppervlakkige afvoer komt het water (eventueel via de greppels) in de sloten/hoofdwatgangen terecht. De afvoer via het openwater gaat in tegenstelling tot de ontwatering veel sneller. De formule voor de afvoer in de waterlopen is als volgt:

$$Q_{waterloopafv}(t) = 3600 \cdot 24 \cdot k_M \cdot A_{waterloop}(t) \cdot R_{waterloop}(t)^{2/3} \cdot i_{waterloop}^{1/2} \quad [\text{m}^3/\text{d}] \quad 3-25$$

Hierbij staat $A_{waterloop}$ voor het natte doorstroomoppervlak en $R_{waterloop}$ voor de hydraulische straal (= natte oppervlak / natte omtrek). Bij het doorstroomoppervlak moet vermeld worden dat het hierbij gaat om het oppervlak waarover over de hele lengte stroming plaats vindt. Om het peil in de boswachterijen bijvoorbeeld te verhogen zijn er verschillende obstakels geplaatst (stuwtjes en dergelijk) waardoor de afvoer pas plaats vindt boven een bepaald peil. Voor elke tijdstap kan zo het debiet vanuit de greppels naar de sloten/hoofdwatgangen worden bepaald. Dezelfde formule wordt ook gebruikt voor de afvoer vanuit de hoofdwatgangen van de boswachterijen naar de hoofdwatgang van Holmers/Halkenbroek. Deze hoofdwatgang (Amerdiep) wordt geschematiseerd als een "bak" die vol loopt door aanvoer vanuit de verschillende gebieden en wanneer het peil hoger komt te liggen dan de stuwhoogte er een afvoer over de stuw plaatsvindt. De afvoer over de stuw volgt uit de volgende formule: (WL Delft Hydraulic, 2004).

$$Q_{stuw,afv}(t) = 3600 \cdot 24 \cdot C_{stuw} \cdot b^{2/3} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 9.81 \cdot (H_{Amerdiep}(t) - H_{stuw}(t)) \quad [\text{m}^3/\text{d}] \quad 3-26$$

Bij het berekenen van de debieten moet er rekening mee worden gehouden dat de tijdstap te groot kan zijn. Door een te grote tijdstap kan het peil te ver zakken in vergelijking met de andere waterlopen, waardoor geen evenwicht wordt ingesteld, maar er veel schommelingen plaatsvinden. In deze gevallen worden de debieten bijgesteld zodat de peilen op de juiste hoogte blijven.

3.3.5 Verzadiging van de bodem

Een probleem dat ontstaat bij verzadiging van de bodem is het bepalen van de infiltratie en de percolatie. De doorlatendheid van de onverzadigde zone neemt toe wanneer de bodem bijna verzadigd raakt (gaat richting $q_{perc,max}$), maar modelmatig is het een stuk lastiger. In RAM (DMS) wordt bij verzadiging van de bodem de infiltratie gelijk gesteld aan de maximale percolatie. Echter blijken er modelmatig twee problemen te ontstaan:

- Het grondwaterpeil komt hoger te liggen dan het maaiveld: Bij een bepaalde grenswaarde voor de grondwaterstand moet de percolatie bijgesteld worden om te voorkomen dat de grondwaterstand te hoog wordt (boven maaiveld). In het geval van lage ontwatering en hoge kwel moet er zelfs sprake zijn van opwelling.
- Het vochtgehalte in de onverzadigde zone wordt te hoog: De infiltratie wordt in het model tot nu toe alleen begrensd door een vast maximum. Dit betekent dat er water blijft infiltreren en het bodemvocht blijft toenemen, terwijl dit bij verzadiging bijgesteld dient te worden.

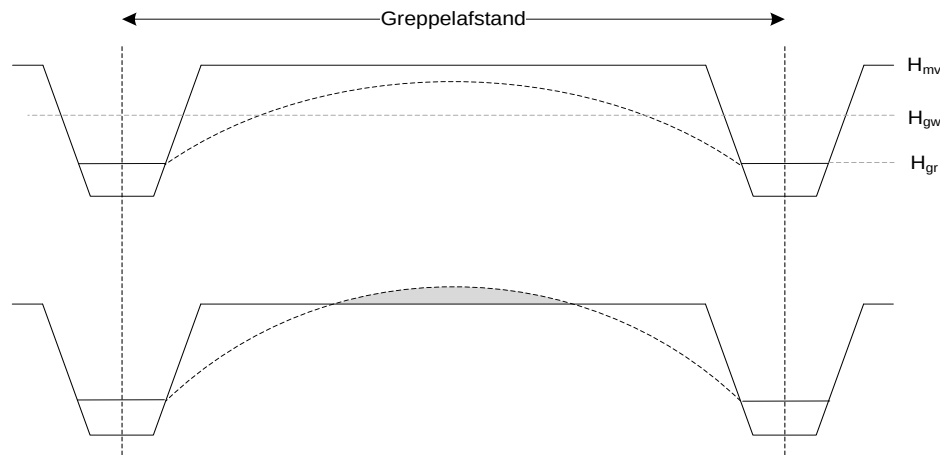
In plaats van dat er water infiltreert en percoleert dient het water geborgen te worden op maaiveld. Om te bepalen of dit gebeurt (dus als het grondwaterpeil het maaiveld nadert), worden eerst alle fluxen, de nieuwe peilen en de hoeveelheden in de bergingen berekend, zoals hierboven beschreven is.

Wanneer het grondwaterpeil te hoog komt te liggen of wanneer het vochtgehalte in de onverzadigde zone te hoog komt te liggen, wordt er ingegrepen door twee extra fluxen te berekenen die het teveel aan water in het bodemvocht en het grondwater naar de berging op het maaiveld loodsen (respectievelijk $q_{bv \rightarrow mv}$ en $q_{gw \rightarrow mv}$). Voor het maximale vochtgehalte wordt uitgegaan van het vochtgehalte bij $pf=0$.

$$q_{bv \rightarrow mv}^*(t) = \frac{(\theta_{bv}(t) - \theta_{bv,pF=0}) \cdot (H_{mv} - H_{gw}(t))}{\Delta t} \quad \text{als } \theta_{bv}(t) > \theta_{bv,pF=0} \quad [\text{m/d}] \quad 3-27$$

De grondwaterstand ligt iets lastiger. In het model wordt uitgegaan van de gemiddelde grondwaterstand, echter is de maximale opbolling hierbij van belang, aangezien deze veel eerder het maaiveld bereikt. De grondwaterspiegel heeft een parabolische vorm tussen de waterlopen. Figuur

3-6 laat zien welk deel van het grondwater naar de maaiveldbergings gaat bij een te hoge grondwaterstand.



Figuur 3-6 Bepaling van opwelling van water door verzadiging van bodem (het grijze deel wordt verplaatst naar de maaiveldbergings)

Het grijze gebied in Figuur 3-6 wordt berekend aan de hand van de volgende formule voor de lokale grondwaterstand tussen de waterlopen (x is de afstand vanaf het midden):

$$f_{gw,x}(t) = -\frac{1}{2} \cdot H_{gr}(t) + \frac{3}{2} \cdot H_{gw}(t) - \frac{6 \cdot (H_{gw}(t) - H_{gr}(t))}{L_{gr}^2} \cdot x^2 \quad [\text{m+NAP}] \quad 3-28$$

Om het grijze gebied te berekenen moet bepaald worden waar de grondwaterspiegel het maaiveld "snijdt". Dit kan eenvoudig met behulp van matlab berekend worden en in het model geïmplementeerd worden ($f_{gw,t,x}$ gelijk stellen aan de hoogte van het maaiveld). De oppervlakte kan bepaald worden door de integraal te nemen van de functie hierboven (minus de maaiveldhoogte).

$$A_{f,grijs}(t) = \left[\left(-\frac{1}{2} \cdot H_{gr}(t) + \frac{3}{2} \cdot H_{gw}(t) - H_{mv} \right) x - \frac{2 \cdot (H_{gw}(t) - H_{gr}(t))}{L_{gr}^2} \cdot x^3 \right]_{x_2}^{x_1} \quad [\text{m}^2] \quad 3-29$$

Om de flux te berekenen tussen het grondwater en de maaiveldbergings wordt het berekende oppervlak vermenigvuldigd met de porositeit:

$$q_{gw \rightarrow mv}^*(t) = \frac{A_{f,grijs}(t) \cdot N}{L_{gr}} \quad \text{als } A_{f,grijs}(t) > 0 \quad [\text{m/d}] \quad 3-30$$

De infiltratie en de percolatie kunnen hierna opnieuw bepaald worden.

$$q_{inf}(t) = q_{inf}(t) - q_{gw \rightarrow mv}^*(t) - q_{bv \rightarrow mv,t}^*(t) \quad [\text{m/d}] \quad 3-31$$

$$q_{perc}(t) = q_{perc}(t) - q_{gw \rightarrow mv}^*(t) \quad [\text{m/d}] \quad 3-32$$

Aan de hand van de nieuwe fluxen kunnen de waterbalansen opnieuw opgesteld worden en de nieuwe peilen en bergingshoeveelheden berekend worden.

3.4 CALIBRATIE EN VALIDATIE

Om het model te gebruiken dient het gebouwde model eerste gekalibreerd en gevalideerd te worden. Het voordeel voor dit onderzoek is dat er ook afvoergegevens zijn van het peilgebied nadat de ingrepen zijn uitgevoerd. Dit betekent dat ook de veranderingen in de waterhuishouding door de ingrepen gecalibreerd kunnen worden. Als input voor het model zijn er ten eerste veel gebiedsgegevens nodig, daarna zijn er enkele parameters die gekalibreerd dienen te worden, die hier ook behandeld zullen worden. Uiteindelijk zal nog kort ingegaan worden op de calibratie van de verschillende parameters. De uiteindelijk resultaten van de simulaties worden behandeld in het volgende hoofdstuk.

3.4.1 Input- en Output-data

Voor het model is allereerst gekeken naar de input en output van het gebied. De inputgegevens bestaan uit metingen van het neerslagstation in Rolde (8 km van het onderzoeksgebied) en van metingen van het KNMI-station in Eelde. De inputgegevens zijn:

- De temperatuur, zonuren en inkomende straling worden gebruikt voor de verdamping en dit blijkt tot waarden te leiden die overeenkomen met de eerder geschatte waarden (515 mm/jaar, zie 2.1.3).
- Er wordt aangenomen dat de uurlijkse neerslagmetingen van het neerslagstation in Rolde ook representatief zijn als input. Door lokale verschillen bij buien kan het zijn dat deze enigszins verschillen van de werkelijke neerslag in het gebied. Normaal dienen neerslaggegevens van meerdere stations gemiddeld te worden om lokale pieken weg te middelen. Vanwege tijdsdruk is er uiteindelijk voor gekozen om alleen van deze waarden uit te gaan. Bij de beoordeling van de output van het model zal hier dan rekening mee gehouden worden.

De output gegevens van een simulatie die gebruikt zijn voor de calibratie van het model zijn:

- De afvoer over de stuw: Aan de hand van de Nash-Suthcliffe coëfficiënt (vergelijking 3-33) wordt bepaald hoe efficiënt het model is wat betreft de gesimuleerde afvoerwaarden ten opzichte van de gemeten afvoerwaarden gedurende de meetperiode. De waarde voor R^2 dient zo hoog mogelijk te zijn en eigenlijk hoger dan 0.75, echter dient vermeld te worden dat bij kleine verschillen in afvoer gedurende de tijd de afvoer absoluut gezien beter gesimuleerd dient te worden om tot dezelfde waarde voor de Nash-Suthcliffe coëfficiënt te komen.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (q_{\text{gemeten}}(t) - q_{\text{berekend}}(t))^2}{\sum_{t=1}^n (q_{\text{gemeten}}(t) - q_{\text{gemeten_gemiddeld}})^2} \quad [-] \quad 3-33$$

Naast de vergelijking van de gemeten en gesimuleerde waarden voor de afvoer aan de hand van de Nash-Suthcliffe coëfficiënt, wordt ook de totale afvoer vergeleken.

- De kwel/wegzijging: Eerder is al geschat dat de hoeveelheid kwel ongeveer rond de 210 mm per jaar moet komen te liggen in de oude situatie. Hierbij wordt het langjarig gemiddelde eventueel aangepast aan de omstandigheden (hogere wegzijging in extreem nat jaar). De totale wegzijging gedurende de simulatie dient hiermee ongeveer overeen te komen.
- De ontwatering en dus ook de afwatering uit het gebied is afhankelijk van het grondwaterpeil in het gebied (en natuurlijk andersom). Dit grondwaterpeil varieert gedurende het jaar en de schommeling verschilt per locatie. Uit kaarten (De Vries & Brouwer, 2006) blijkt dat er sprake is van de verschillende grondwatertrappen in het onderzoeksgebied. Zo blijken Halkenbroek en Holmers te maken te hebben met grondwatertrap IIb (GHG 25-40 cm-mv en GLG 80-120 cm-mv) en de boswachterijen Hooghalen en Grolloo met grondwatertrap VI (GHG 40-80 cm-mv en GLG >120 cm-mv) en V (GHG 0-40 cm-mv en GLG >120 cm-mv). Bij het kalibreren van het model geven deze waarden voor GHG en GLG (Gemiddelde Hoogste en Laagste Grondwaterstand) aan binnen welk bereik de grondwaterpeilen gedurende de jaren vallen. Vanzelfsprekend gaat het hierbij om de oude situatie.

3.4.2 Gemeten en aangenomen parameters/inputgegevens van het model

Bepaalde parameters voor het model worden van te voren bepaald of gemeten terwijl andere parameters juist gekalibreerd worden. Gegevens als oppervlakte, hoogteligging, indeling en de afmetingen van de waterlopen en het landgebruik zijn verkregen via kaarten (Waterschap Hunze en Aa's, 2008) en via eigen metingen in het onderzoeksgebied (voornamelijk afmetingen en hoogteligging tov maaiveld van de waterlopen). In Bijlage 0 (Oppervlaktes en landgebruik) en A.3 (Waterlopen) zijn de gebiedsgegevens te vinden.

Verder spelen de bodemkarakteristieken een rol in het model. De gegevens over porositeit en de bodemkarakteristieken voor een gemiddelde veen- en podzolbodem zijn gehaald uit de literatuur (Werkgroep herziening cultuurtechnisch vademecum, 1992 en te vinden in Bijlage A.4). Hierbij is aangenomen dat deze gegevens representatief zijn voor het modelleren van de processen rond de onverzadigde zones. Voor het model wordt uitgegaan van de ondergronden O1 (voor de podzolgronden in de boswachterijen) en O16 (voor de veengronden in Holmers en Halkenbroek).

Enkele andere parameters worden ook geschat aan de hand van de literatuur, zoals de gewasfactoren van Makkink (WL Delft Hydraulic, 2004), waar al veel onderzoek naar is gedaan (de gewasfactoren en welke van toepassing zijn voor de verschillende gebieden zijn te vinden in Bijlage A.5). Belangrijke aanname hier is dus dat in de oude situatie, de gewasfactoren van Makkink en de manier van berekenen van de verdamping overeenkomen met de werkelijkheid.

Andere parameters zoals de maximale maaiveldberging, de wrijving bij oppervlakkige afvoer (South Florida Water Management District, 2005) en de wrijving bij de afwatering in de waterlopen (Werkgroep cultuurtechnisch vademecum, 1992) zijn te vinden in respectievelijk Bijlage A.6 en A.7.

3.4.3 Calibratie en validatie oude situatie

De calibratie van de oude situatie vindt plaats via de gegevens van het hydrologisch jaar 2001. De gegevens van het hydrologisch jaar 2002 worden gebruikt voor validatie. De parameters die echt gekalibreerd dienen te worden zijn voornamelijk de weerstandscoefficienten. Daarnaast spelen echter ook de waardes van de bergingen en peilen aan het begin van de simulatieperiode een rol. De calibratie is een iteratief proces waarin de parameters elkaar onderling beïnvloeden.

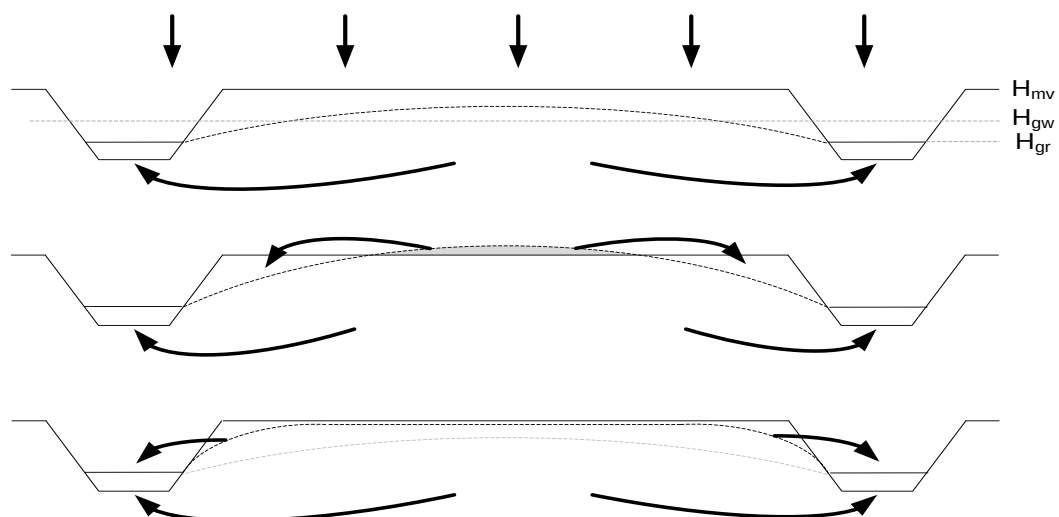
De maximum infiltratie, percolatie en capillaire opstijging zijn geschat door uit te gaan van eventuele buffering en grondwaterstand verandering. Zo worden in de zomer bepaalde buien totaal opgeslagen in de onverzadigde zone (er is geen verandering in de afvoer te zien), wat betekent dat het vochtgehalte voor die bui laag genoeg moet zijn om dit op te vangen. Het moment waarop weer percolatie plaats vindt kan zo redelijk precies bepaald worden. De maximale percolatie is logischerwijs gelijk aan de doorlatendheid van de bodem. De infiltratie is te bepalen door te kijken naar eventuele afvoerpieken in droge periodes (dan treedt oppervlakkige afvoer op omdat de infiltratie lager is dan de hoeveelheid neerslag).

Voor de beginwaardes geldt dat voornamelijk de grondwaterpeilen in de verschillende deelgebieden van belang zijn. Een hoge beginwaterstand zorgt voor een hoge ontwatering en wegzijging in het begin maar doordat deze processen relatief langzaam verloopt, duurt het lang voordat zich een evenwicht heeft ingesteld, zijn beginpeilen gedurende een lange periode bepalend. De eerder besproken grondwatertrappen en de voorgeschiedenis (bijvoorbeeld natte periode voorafgaande aan de simulatieperiode) geven al een aardig beeld van de beginwaterstanden. De afwatering via het openwater verloopt over het algemeen heel snel waardoor die peilen zich heel snel aanpassen aan de waterhuishouding (de beginpeilen hier zijn minder van belang voor de simulatie). De gekalibreerde beginwaardes zijn niet opgenomen in tabelvorm, maar kunnen uit de grafieken in de bijlage (Bijlage B) gehaald worden.

De afvoer uit het gebied bestaat uit een baseflow, die langzaam reageert op neerslagoverschot (een sinus-vormige afvoer gedurende het jaar) en piekafvoeren die uit gaan van een snelle afvoer (net zoals in bijvoorbeeld RAM en het Wageningenmodel). De baseflow blijkt eenvoudig overeen te komen met de ontwatering via de formules van Ernst. Echter levert de snelle afvoer problemen op, zowel met de formule van Ernst als die van Kraijenhof-Van de Leur. Neerslag infiltreert vrij snel, maar de lichte stijging van de grondwaterspiegel leidt niet tot een duidelijke piek in de ontwatering aangezien dit een langzaam proces is. Deze ontwatering wordt dan ook gebruikt om de baseflow te genereren. Om de ontwatering te kalibreren wordt eerst gekeken naar de “gemiddelde” waardes voor de doorlatendheid van veen- en zandbodems (veen: 0.05 m/d en zand 0.5-11 m/d, zie Werkgroep herziening cultuurtechnisch vademecum, 1992), de grondwaterstanden gedurende het jaar ten opzichte van de waterlopen (aan de hand van de grondwatertrappen en gebiedsstudies) en de baseflow gedurende het jaar. Bij een scheidende laag op 6 m+NAP, waarmee de dikte van het watervoerend pakket varieert tussen de 6 en 9 meter, komt men na calibratie op een

doorlatendheid van 0.20 m/d voor de veengebieden (Halkenbroek en Holmers) en 2.4 voor de podzolgronden (de boswachterijen).

Voor de snelle afvoerpieken zijn extra aannames nodig. De snelle afvoer is te scheiden in de heel snelle afvoer over het maaiveld en de ondiepe stroming via de (on)verzadigde zone (interflow, is niet gemodelleerd). Neerslag valt gelijkmatig over het hele oppervlak, waardoor dit ook geldt voor de grondwateraanvulling. De gelijkmatige aanvulling zorgt er voor dat de vorm van de grondwaterspiegel niet meer parabolisch is maar meer rechthoekiger. Deze rechthoekige vorm zal snel worden bijgesteld door een versnelde afvoer. Daar komt nog eens bij dat bij verzadiging van de bodem, er voornamelijk midden tussen de waterlopen berging op het maaiveld plaats vindt. Wanneer de grens van maximale berging is bereikt zal er water oppervlakkig afstromen richting de greppels. In het model gaat de oppervlakkige afvoer uit van een gelijke laag over het hele maaiveld. Echter gaat het water via allerlei ondieptes in het maaiveld richting de greppel. En dicht bij de greppel is door de ontwatering de bodem vaak nog niet volledig verzadigd, waardoor hier weer infiltratie optreedt. Dit afvoertraject is ingewikkelder en langer dan waar in eerste instantie van uit wordt gegaan. Figuur 3-7 laat dit duidelijk zien.



Figuur 3-7 De complexiteit van de afvoer richting de waterlopen

Geconcludeerd kan worden dat het proces van verzadiging en oppervlakkige afvoer lastig op deze manier te modelleren is. Een meer gedistribueerd (GIS) model zou deze onderdelen beter kunnen simuleren, doordat het hele gebied opgedeeld wordt in een raster en dan per gridcel de peilen en de stromingen berekend worden. Echter moet hierbij dan wel de resolutie hoog genoeg zijn om de afstand tussen de waterloop op te delen en alle waterlopen dienen goed bepaald te worden.

Om toch met het model aan de slag te kunnen is gekeken of de oppervlakkige afvoer aangepast kan worden zodat het toch de snelle afvoercomponent kan benaderen. Het blijkt dat wanneer de wrijving bij oppervlakkige afvoer 20 keer zo groot wordt (dus de piekafvoeren worden kleiner) en in de winter de gebieden Holmers en Halkenbroek verzadigd zijn, de piekafvoeren die hierdoor ontstaan redelijk overeen komen.

De keuze om uit te gaan van oppervlakkige afvoer komt niet helemaal uit de lucht vallen. Ten eerste zijn er de praktijkervaringen van de landeigenaren die klaagden dat de bodem veel te nat was. Verder blijkt ook uit eerder onderzoek dat er relatief veel oppervlakkige afstroming plaats vindt op deze veenbodems. Volgens Meinardi en Schotten (1999) wordt op veenbodems de helft tot soms wel het hele neerslagoverschot oppervlakkig afgevoerd. Bij de zandbodems wordt het totale neerslagoverschot gebruikt als grondwateraanvulling. Echter vermelden ze ook dat de redenen hiervoor diverser zijn dan eenvoudig verzadiging van de bodem. Zo blijkt de infiltratie in droge veenbodems heel laag te zijn (wat ook leidt tot oppervlakkige afvoer) en wordt deze hoger wanneer de grondwaterstand stijgt.

3.4.4 Calibratie en validatie nieuwe situatie

De nieuwe situatie (na alle ingrepen) wordt gekalibreerd aan de hand van de gegevens van het hydrologisch jaar van 2006 en wordt vervolgens gevalideerd via de gegevens van 2007. Een uitgebreid overzicht met grafieken en waardes is te vinden in Bijlage B (Resultaten calibratie en validatie).

De ingrepen in Holmers en Halkenbroek (dempen waterlopen, afgraven, natuurvorming) zijn vrij eenvoudig te meten en te implementeren. De veranderingen in de boswachterijen blijken van grote invloed. Het grondwaterpeil wordt hier verhoogd door het plaatsen van stuwtjes. Dit wordt in het model geïmplementeerd door de afvoer via de waterlopen pas te laten plaats vinden boven een bepaald peil.

Uit de gemeten afvoer blijkt duidelijk dat de afvoer over de jaren toegenomen is na alle ingrepen. Dit betekent dat dit ten koste gaat van de andere uitgaande stromingen (wegzijging en de verdamping). Voor de kwel wordt uitgegaan van dezelfde waardes voor de parameters als bij de oude situatie. Dit resulteert in een hogere wegzijging vanuit de boswachterijen (de stijging van de waterpeilen is hier hoger dan de stijging van de stijghoogte in het tweede aquifer) en een hogere kwel in de beekdalen. Het is echter wel mogelijk dat de verdamping gedaald is.

Met het verhogen van het grondwaterpeil in de boswachterijen is het de bedoeling om het productiebos (bestaande uit naaldbomen) te “verdrinken”, waarna er langzaam een meer natuurlijker (nat) bos zal ontstaan. Ook is er in de laatste jaren een deel van de naaldbomen gekapt, waarna er langzaam aan nieuwe natuur ontstaat. Door het vernatten van de boswachterijen, het afsterven van het naaldbos en de langzame ontwikkeling van nieuwe natuur, zal de hoeveelheid verdamping veranderen. Naaldbos heeft een erg hoge verdamping (gewasfactor naaldbos = 1.2 gedurende het hele jaar) vergeleken met andere soorten begroeiing en dus kan verwacht worden dat de gewasfactor zal dalen. Na calibratie blijkt voor het jaar 2006 de gemiddelde gewasfactor voor de boswachterijen 65% lager te liggen dan voor de ingrepen.

Voor de simulatie zijn vanzelfsprekend de stuwhoogtes gedurende de tijd meegenomen. Door de wijziging in stuwhoogte wordt de berging vergroot of verkleind. Na verloop van tijd stelt zich weer een evenwicht in, maar het geschreven model stelt dit evenwicht veel sneller in. Dit ligt waarschijnlijk zowel aan de afmetingen van de waterlopen die in het model zijn gebruikt en de gebrekkige modellering van de afwatering. Voornamelijk de afmetingen van de waterlopen lijken van belang: bij schommelingen bij lage peilen, vallen de verschillen mee, maar bij hoge peilen reageert het model te snel op veranderingen in de stuwhoogte. Vooral bij hoge waterpeilen neemt de totale oppervlakte aan openwater flink toe.

4 RESULTATEN SIMULATIES

In dit hoofdstuk komen de resultaten van de simulaties aan bod. Eerst worden de resultaten van de calibratie en validatie behandeld waarna gekeken wordt wat de gevolgen zijn voor de waterbalans van het gebied. Daarna wordt gekeken wat de verschillende ingrepen voor effecten heeft op de waterhuishouding en specifiek de afvoer.

4.1 RESULTATEN CALIBRATIE EN VALIDATIE

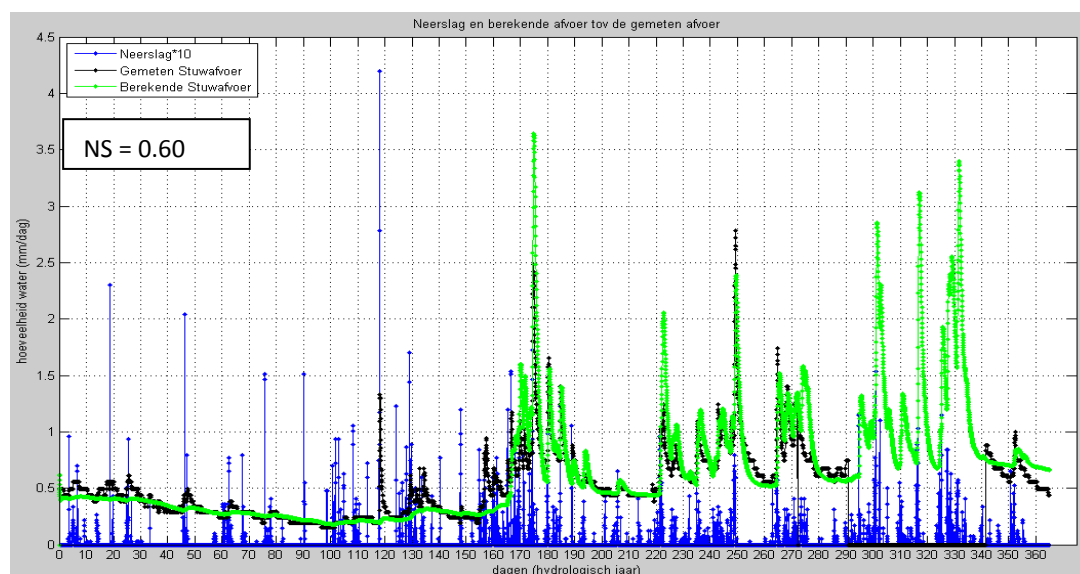
In Tabel 4-1 worden de waarden van de verschillende parameters gepresenteerd. Hierna komen eerst de resultaten van de oude situatie aan bod en daarna de resultaten van de nieuwe situatie.

Parameter	Toegekende waarde	Parameter	Toegekende waarde
$H_{\text{aquitard1}}$ (m+NAP)	6	$\text{factor}_{\text{opp. afv. (-)}}$	20
k_{veen} (m/d)	0.20	$H_{\text{aq2,REF}}$ (m+NAP)	12.50
k_{podzol} (m/d)	2.30	$C_{\text{aquitard1}}$ (d)	2500
$q_{\text{inf,max}}$ (m/d)	k_{bodem}	NS (oude situatie)	0.60(2001) - 0.65(2002)
$q_{\text{perc,max}}$ (m/d)	k_{bodem}	Reductie gewasfactor	0.65(2006) - 0.50(2007)
$q_{\text{cap,max}}$ (m/d)	$k_{\text{bodem}}/20$	NS (nieuwe situatie)	0.69(2006) - 0.75(2007)

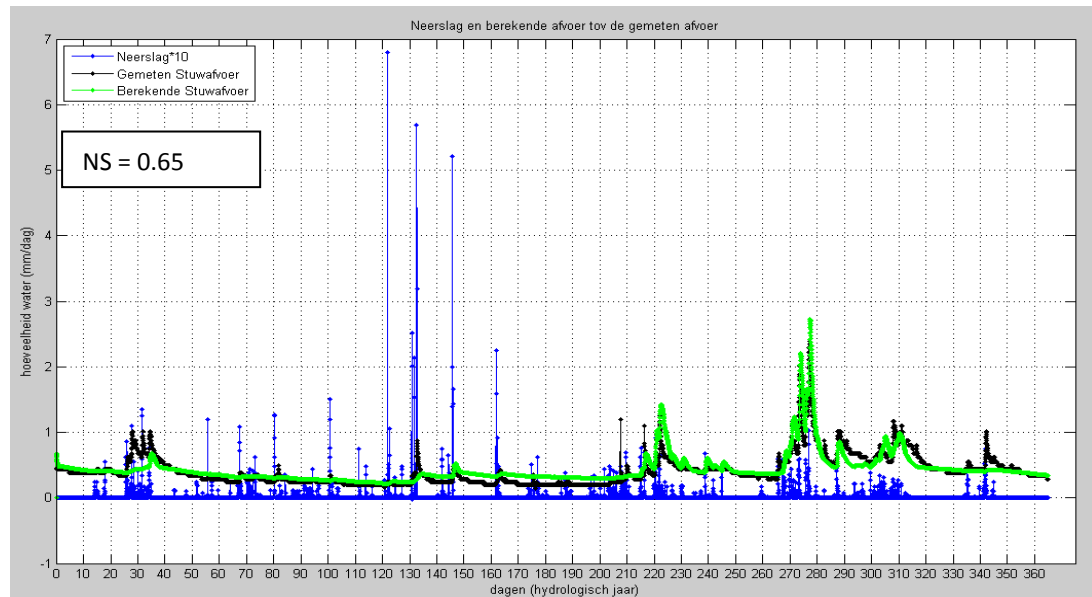
Tabel 4-1 Waarden van de gecalibreerde parameters voor de nieuwe situatie.

4.1.1.1 Resultaten oude situatie

Het model simuleert de oude situatie redelijk tot goed. Figuur 4-1 en Figuur 4-2 laten de berekende afvoeren zien van respectievelijk het hydrologisch jaar 2001 en 2002, die redelijk overeen komen met de gemeten afvoer. Een uitgebreid overzicht met grafieken en waarden is te vinden in Bijlage B (Resultaten calibratie en validatie). De Nash-Suthcliffe coëfficiënt is vrij laag ($NS_{2006} = 0.60$ voor 2006 en $NS_{2007} = 0.65$), maar de simulatie geeft nog wel een goed beeld van de afvoer. Doordat de variatie in afvoer niet heel groot is (verschil tussen zomer en winter) wegen lichte afwijkingen heel zwaar. Wanneer gekeken wordt naar de afvoer vanuit de verschillende deelgebieden (zie Bijlage B.1.1) valt op dat de piekafvoeren uit Holmers en Halkenbroek afkomstig zijn en de boswachterijen juist voor een groot deel van de baseflow zorgen. De totale afvoeren van de simulatie en de metingen komen bijna met elkaar overeen (zie Bijlage B.1.2). De validatie via het simuleren van 2002 levert dezelfde resultaten op.



Figuur 4-1 Berekende afvoer ten opzichte van de gemeten afvoer (+ buien) voor het hydrologisch jaar 2001

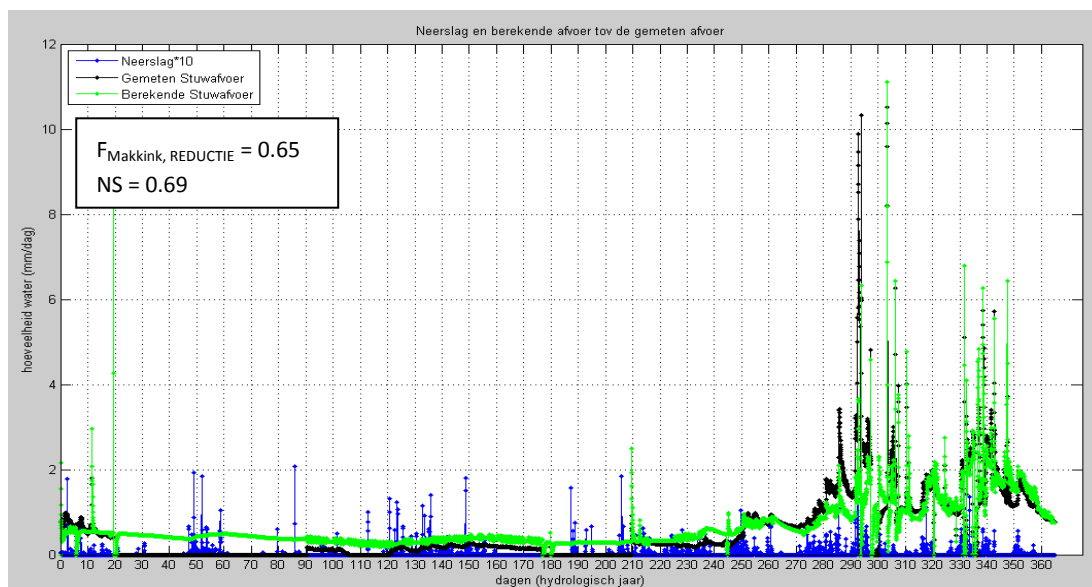


Figuur 4-2 Berekende afvoer ten opzichte van de gemeten afvoer (+ buien) van het hydrologisch jaar 2002

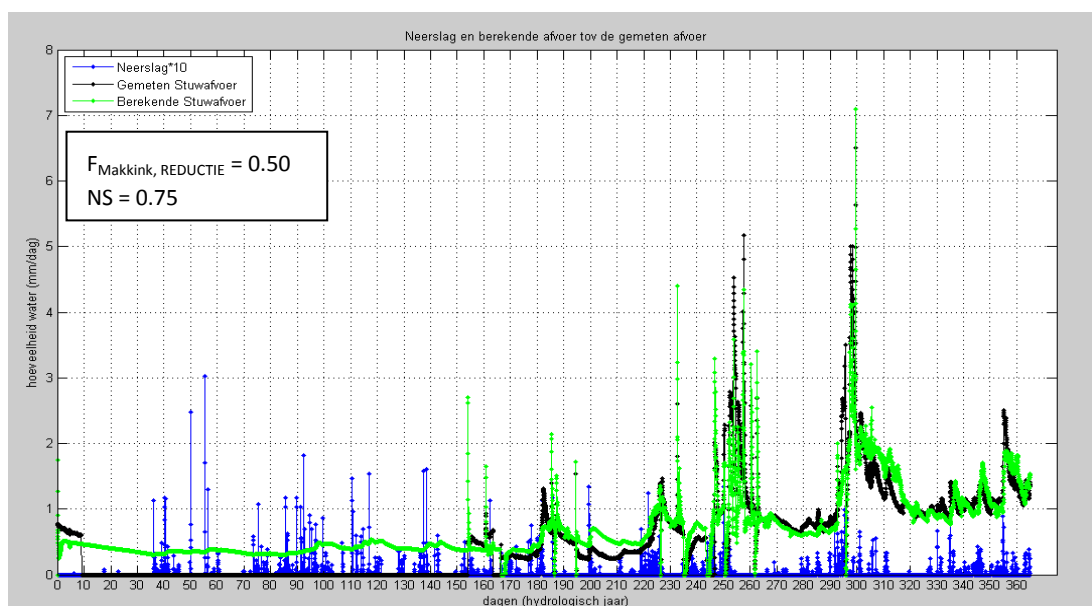
4.1.1.2 Resultaten nieuwe situatie

Figuur 4-3 en Figuur 4-4 laten het resultaat zien van de afvoeren van respectievelijk 2006 en 2007. De Nash-Suthcliffe coëfficiënt is hierbij hoger dan bij de oude situatie ($NS_{2006} = 0.69$). Verder moet er bij vermeld worden dat de vreemde pieken veroorzaakt worden door het flexibel peilbeheer. De hoge pieken zijn bijvoorbeeld het resultaat van het ineens verlagen van de stuwhoogte. De validatie van de nieuwe situatie is gebeurd via het hydrologisch jaar 2007. Echter blijkt hierbij dat de afvoeren te hoog worden. Dit is op zich niet zo heel vreemd, aangezien er een overgang plaats vindt van de ene natuurvorm naar de andere. Het naaldbos is al afgestorven en ook al is het nog niet verdwenen, toch is te verwachten dat dit deels plaats gemaakt heeft voor nieuwe natuur. Blijkbaar begint de natuur zich al te herstellen en neemt de verdamping weer toe. Overigens kan bij de verdamping ook de hoeveelheid neerslag in de zomer van belang zijn. Bij veel neerslag in de zomer, blijven de meren en dergelijke gevuld en treedt er bijvoorbeeld meer verdamping op, dan wanneer er sprake is van een lage hoeveelheid neerslag. Wanneer er opnieuw de gewasfactor gekalibreerd wordt aan de hand van de afvoermetingen van 2007 komt men tot een verlaging van de gewasfactor met 50% ten opzichte van de oude situatie.

Over de invloed van begroeiing kan in ieder geval gesteld worden dat de afvoer waarschijnlijk zal dalen. De dode/verdrongen begroeiing zal plaatsmaken voor nieuwe, al zal de gemiddelde afvoer waarschijnlijk hoger blijven dan in de oude situatie, vanwege het feit dat naaldbos voor erg veel verdamping zorgt.



Figuur 4-3 Berekende afvoer ten opzichte van de gemeten afvoer (+ buien) voor het hydrologisch jaar 2006



Figuur 4-4 Berekende afvoer ten opzichte van de gemeten afvoer (+ buien) van het hydrologisch jaar 2007

4.1.2 Waterbalans oude en nieuwe situatie

Een waterbalans wordt over het algemeen opgesteld voor het hydrologisch jaar (van 1 april tot 31 maart). Omdat de verdeling in de waterbalans in de zomer vaak erg verschilt van de verdeling in de winter, wordt de balans opgemaakt voor de verschillende zomer- en winterhalfjaren (het zomerhalfjaar van 1 april tot en met 30 september en het winterhalfjaar van 1 oktober tot en met 31 maart). Er zijn balansen opgesteld voor de 2 jaren van de oude situatie en de 2 jaren in de nieuwe situatie die ook behandeld zijn bij de calibratie en de validatie.

Periode	Peil Stuw (m+NAP)	Neerslag (mm)	Verdamping (mm)	Afvoer (mm)	Kwel (mm)	Berging (mm)
Oude situatie						
Zomer 2001	13.00	621	-387	-68	-140	26
Winter 2001/2002	13.00	561	-126	-164	-154	117
Zomer 2002	13.00	497	-400	-63	-143	-109
Winter 2002/2003	13.00	365	-109	-96	-144	16
Percentage v neerslag			50%	19%	28%	2%

<i>Nieuwe situatie</i>						
Zomer 2006	13.26	334	-208	-69	-160	-103
Winter 2006/2007	13.37	524	-60	-163	-165	136
Zomer 2007	13.37	478	-280	-70	-160	-32
Winter 2007/2008	13.47	508	-68	-181	-167	92
<i>Percentage v neerslag</i>			33%	26%	35%	5%

Tabel 4-2 Waterbalans voor de gecalibreerde en gevalideerde jaren (opgesteld voor ieder half jaar)

Op te merken valt dat de jaren behoorlijk nat zijn en er valt voornamelijk in 2001, maar ook in 2002 en 2007 veel neerslag in de zomer. Dit is ook te merken aan de berging in het gebied. Gevolg is ook dat de verdamping vrij hoog is in de oude situatie door een goede vochtvoorziening (geen reductie vanwege droogte). Terwijl de totale kwel gedurende de jaren vrijwel gelijk blijft is die na de ingrepen duidelijk toegenomen, wat te verklaren is door de hogere grondwaterstanden in de boswachterijen. De afvoer is na de ingrepen relatief gezien duidelijk toegenomen. De wisselende hoeveelheden neerslag gedurende de jaren en vooral de extreem hoge hoeveelheden in de gemeten jaren voor de ingrepen geven een enigszins vertekend beeld.

De percentages geven aan hoe groot het deel is van de totale gevallen neerslag dat via verdamping, afvoer of kwel het gebied verlaat of dat in het gebied geborgen wordt. Zo is te zien dat na de ingrepen er veel minder verdamping op treedt ten opzichte van voor de ingrepen, de afvoer flink stijgt en ook de hoeveelheid kwel stijgt.

4.2 DE GEVOLGEN VAN DE INGEPEN OP DE WATERHUISHOUDING EN DE AFVOER

Om de verandering van de waterhuishouding in het onderzoeksgebied en de gevolgen voor de afvoer goed in kaart te brengen was het de bedoeling om de effecten van iedere individuele ingreep te onderzoeken. Hierbij lag de focus in het begin op de veranderingen in de gebieden Holmers en Halkenbroek die van landbouwgebied naar natuurgebied omgevormd werden door het stoppen van beweiding, het dempen van sloten en het verhogen van het peilbeheer. Echter blijken de gevolgen van de ingrepen in de boswachterijen tot veel grotere veranderingen te leiden op vooral de afvoer. Hier zijn twee redenen voor te noemen:

- Halkenbroek en Holmers zijn heel klein ten opzichte van de oppervlakte van de boswachterijen, waardoor de effecten op de afvoer ook maar klein zijn.
- De ingrepen in de boswachterijen hebben een heel duidelijk effect gehad op de waterbalans door de verdamping te verkleinen. Het extra overschot aan water moet daarom op een andere manier worden afgevoerd en dit gebeurt via wegzijging of afvoer over de stuw.

In de oude situatie zorgden de boswachterijen voor een groot deel van de baseflow. Doordat de laaggelegen veengebieden (vooral in de winter) bijna verzadigd zijn, vindt hier veel oppervlakkige afvoer plaats en komen de korte, snelle afvoerpieken voornamelijk hier vandaan.

Eerst zal er aan de hand van de theorie en praktijkervaring ingegaan worden op de ingreep, waarna via het model de gevolgen van de ingreep in het onderzoeksgebied gesimuleerd worden.

Om de effecten op de afvoer te vergelijken is geprobeerd steeds met de neerslaggegevens van hetzelfde referentiejaar te rekenen. Hierbij is gekozen voor het referentiejaar 2001. Dit vanwege het feit dat deze het beste gecalibreerd is en blijken de verschillen door de vele grote buien duidelijk zichtbaar te zijn. De invloed van het flexibel peilbeheer wordt apart bekeken door uit te gaan van het referentiejaar 2006.

4.2.1 Gevolgen van de ingrepen/veranderingen in de beekdalen

Er hebben verschillende ingrepen plaatsgevonden in de beekdalen en deze hadden vooral ten doel om het gebied natter te maken om de natuurontwikkeling te stimuleren. De verschillende ingrepen waren: Het dempen van de waterlopen in het gebied, het verwijderen van de toplaag (voornamelijk gericht om de voedselrijke laag te verwijderen) en het verhogen van het peil. Door daarnaast de beweiding te stoppen werd de natuur zijn gang gelaten en ontstond langzaam lage begroeiing (natte heide).

4.2.1.1 Volgens de theorie

Het verwijderen van de toplaag en het verhogen van het oppervlaktewaterpeil zorgen er voor dat er minder bergingsruimte over blijft en dat de bodem eerder verzadigd raakt. Hierdoor zal eerder oppervlakkige afvoer plaatsvinden en worden piekafvoeren dus ook eerder zichtbaar..

Het dempen van waterlopen komt neer op het vergroten van de afstand tussen de waterlopen waar naar toe de ontwatering verloopt. De weerstand zal hierdoor toenemen. Dit is ook terug te vinden in de theorieën over de drainageweerstand. Volgens de formule van Ernst is de drainageweerstand ongeveer evenredig met de afstand tussen de waterlopen in het kwadraat (zie formule 3-23). De ontwatering zal dus erg afnemen, waardoor de grondwaterstand zal stijgen. Gevolg hiervan is dat de kwel afneemt (of wegzijging stijgt) en bij verzadiging van de bodem wordt eerder overgegaan tot oppervlakkige afvoer. Het dempen van de waterlopen heeft ook zijn invloed op de oppervlakkige afvoer. Het water op het maaiveld moet een langere weg afleggen naar de waterlopen, waardoor de helling afneemt (zelfde hoogteverschil over een langere afstand) en de afvoersnelheid lager wordt.

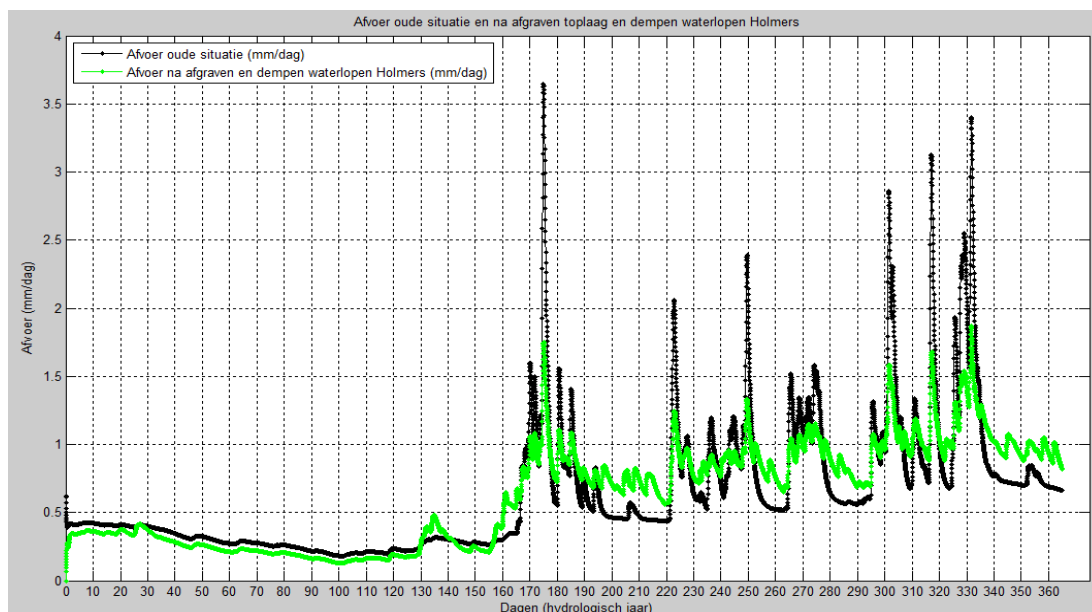
De nieuwe begroeiing die ontstaat, heeft ook invloed op de grondwaterstand en de oppervlakkige afvoer. Natte heide heeft voornamelijk in de zomer een lagere gewasfactor dan grasland en bouwland (zie Bijlage A.5). Hierdoor zal de verdamping dalen (ongeveer 15% daling) en de bodem nog eerder verzadigd raken. Verder zal de heidevorming ook effect hebben op de oppervlakkige afvoer. Aan de ene kant wordt de maximale maaiveld berging vergroot (zie Bijlage A.6), waardoor er meer water op het maaiveld geborgen kan worden, voordat oppervlakkige afvoer plaats vindt. Daarnaast neemt de wrijving erg toe waardoor de afvoersnelheid afneemt. Bij een dunne laag op het land is de wrijving meer dan 10 keer zo hoog, al neemt de wrijving langzaam af bij toenemende dikte van de waterlaag (door de hogere wrijving wordt er meer geborgen en wordt de laag snel dikker, waardoor er alsnog afgevoerd wordt).

4.2.1.2 Gevolgen op de afvoer

Er dient bij deze ingrepen vermeld te worden dat er een hele ontwikkeling heeft plaatsgevonden sinds de ingrepen en ook de komende jaren zal er nog wel het een en ander veranderen. Door het verwijderen van de toplaag is de bodem tijdelijk veel gevoeliger voor erosie geworden (door het verwijderen van de begroeiing in de winter zorgt dit voor snelle oppervlakkige afvoer). De praktijkervaringen in het gebied Holmers en in Elsinghuizerveld (zie 2.2.2) wijzen er op dat er hierdoor vanzelf ondiepe greppels (slenken) ontstaan. Doordat er geen begroeiing is in het begin is de maaiveldberging heel klein, is de infiltratie laag en is de wrijving voor oppervlakkige afvoer heel laag. Dit is ook duidelijk te merken aan de afvoeren in 2004 (zie Figuur 2-7) waarin de gemiddelde afvoer erg hoog komt te liggen. Gedurende deze periode is er nog nauwelijks begroeiing waardoor de neerslag nog heel snel wordt afgevoerd.

De waterlopen in het deelgebied Holmers worden voor een groot deel gedempt. De greppels worden ook enigszins gedempt of minder diep gemaakt. Via kaarten en observaties wordt geschat dat de gemiddelde afstand tussen de hoofdwatgangen (sloten) drie keer zo groot wordt. Daarnaast wordt de helft van de greppels gedempt. Het maaiveldsniveau komt 30 cm lager te liggen.

De gevolgen voor de totale afvoer zijn maar klein, wat te zien is in Bijlage C.1. Echter hebben de ingrepen wel duidelijk invloed op de verdeling over de tijd (zie Figuur 4-5). Zo zijn er eerder in het jaar al snelle piekafvoeren te onderscheiden, wat duidt op een snelle verzadiging van de bodem en het plaats vinden van oppervlakkige afvoer en de snelle piekafvoeren worden enigszins gedempt door de hogere wrijving en de langere af te leggen weg naar de waterlopen. De grotere hoeveelheid water die oppervlakkig wordt geborgen leidt niet echt tot hogere verdamping. De verdamping van openwater is alleen in de zomer hoog, maar juist dan is de berging aan oppervlak vrij laag.



Figuur 4-5 Afvoer over stuw 1510 in de oude situatie (zwart) vergeleken met de afvoer na alle ingrepen in de beekdalen (groen) op basis van de neerslaggegevens van 2001

4.2.2 Gevolgen van de ingrepen in de boswachterijen

Door delen van waterlopen te dempen en stuwtjes aan te leggen is de afvoer vanuit de boswachterijen gestremd. Nu moet het oppervlaktewater in de waterlopen en meertjes boven een bepaald peil liggen, wil er afvoer optreden.

4.2.2.1 Volgens de theorie

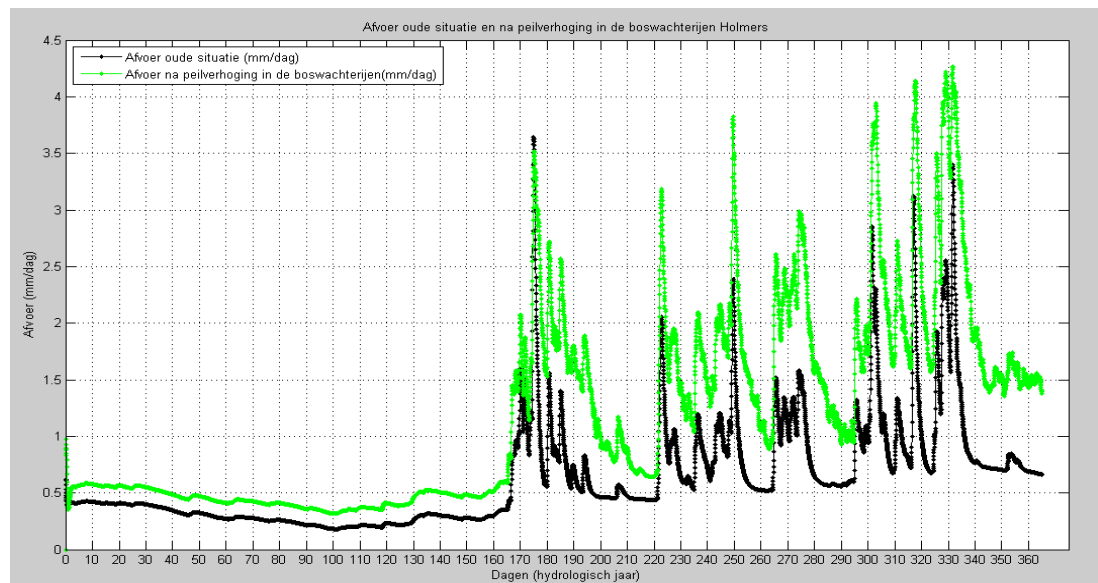
Gevolg van het extreem verhogen van het grondwaterpeil in bosomgevingen is dat de ontwatering lager wordt en dat de grondwaterstand gaat stijgen. Door de al hoge ligging van de boswachterijen zorgt een stijgende grondwaterstand voor extra wegzijging en extra stroming naar de lageregelegen gebieden. Echter worden de echte veranderingen hier veroorzaakt door de afname in verdamping. Door het verdrinken van de naaldbomen, gaan de bomen dood en dus stopt ook de transpiratie. Er is wel onderzoek gedaan naar de grondwaterstand/hoeveelheid bodemvocht en de verdamping en hieruit volgt ook wel dat boven bepaalde grenzen de transpiratie door de begroeiing (in dit geval de naaldbomen) stopgezet wordt. Dit is echter niet in het model meegenomen omdat dit vrij ingewikkeld is en het hierbij om precieze metingen en een heel precies model zou moeten gaan. De rest van de begroeiing, de bodem en de verdamping van opgevangen water op bijvoorbeeld bladeren, zorgt namelijk nog wel voor verdamping (evaporatie). Doordat de staat van de begroeiing en het herstel gedurende de tijd en de gevolgen voor de verdamping niet te meten zijn, is de gewasfactor eigenlijk alleen nog maar te bepalen via calibratie.

Duidelijk is wel dat de verdamping een stuk lager wordt, waardoor er meer water via een andere weg afgevoerd dient te worden. Op den duur zal een nieuw "evenwicht" ingesteld worden, waarbij het overtollige water via wegzijging en/of via het oppervlaktewater wordt afgevoerd.

4.2.2.2 Gevolgen op de afvoer

Bij de calibratie van de situatie na de ingrepen was al gebleken dat voornamelijk de wijzigingen in de boswachterijen van invloed zijn geweest op de afvoer. Door het oppervlaktewaterpeil in de waterlopen te verhogen (het belemmeren van de afvoer via de waterlopen) zijn de grondwaterpeilen ook sterk mee gestegen, waardoor de bomen verdrinken. Het effect van het verhogen van het grondwaterpeil in de boswachterijen zorgt voor een grotere wegzijging uit het gebied en een hogere ondergrondse grondwaterstroming naar de laaggelegen gebieden Holmers en Halkenbroek (uitgaande van de gecalibreerde parameters uit de oude situatie). Echter zijn de gevolgen van het verhogen van het grondwaterpeil op de verdamping veel groter. De afname in verdamping is zo groot dat de grondwaterstand nog meer stijgt en er ook een deel van het water

wordt afgevoerd via het oppervlaktewater en dus via de stuw. Uit de calibraties blijkt dat de afvoer vanuit de erg natte boswachterijen ook deels oppervlakkig plaats vindt (erg hoge pieken kunnen alleen op die wijze verklaard worden). Dat deze extra afvoer veel is blijkt wel uit Figuur 4-6 waar de nieuwe gecalibreerde situatie nog een keer getest wordt met de neerslag van 2001. Hierbij is uitgegaan van de afname in de gewasfactor voor de boswachterijen van 65%, zoals die in 2006 plaats vindt. Het verschil in afvoer ten opzichte van de oude situatie is aanzienlijk groot. Hierbij moet echter wel vermeld worden dat 2001 ook wel een erg nat jaar was en dat bij de beginpeilen in de boswachterijen uit is gegaan van de beginpeilen van 2006 (dit vanwege het feit dat de voorgaande jaren 2000 en 2005 ongeveer dezelfde neerslag hebben en ongeveer dezelfde peilen dan representatief zou zijn). Het mag in ieder geval duidelijk zijn dat de afvoer sterk toegenomen is. De verschillen ten opzichte van de afvoer zonder ingrepen is voor een heel groot deel afhankelijk van de afvoer van de boswachterijen. De extra stroming van water naar de laaggelegen delen (in de vorm van extra kwel) is maar heel klein (leidt niet snel tot extra pieken).



Figuur 4-6 Afvoer over stuw 1510 in de oude situatie vergeleken met de afvoer na de ingrepen in de boswachterijen (verhogen peil en reductie gewasfactor met 65% zoals in 2006) op basis van de neerslaggegevens van 2001.

5 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk wordt antwoord gegeven op de onderzoeksvragen en wordt duidelijk gemaakt of aan de doelstelling van het onderzoek is voldaan. Uit het voorgaande werk worden conclusies getrokken en enkele aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan.

De doelstelling van dit onderzoek is als volgt gedefinieerd:

- Analyseren van de effecten van ingrepen in een bovenstrooms gebied ten behoeve van natuurontwikkeling en bovenstroomse berging op de hydrologie binnen het gebied, toegepast op het al uitgevoerde project “herstel beekdalsysteem Halckenbroek/Holmers”.

5.1 CONCLUSIES

Het ontwikkelde model blijkt de afvoer van het gebied redelijk goed te simuleren. In het model zitten echter wel enkele onzekerheden, voornamelijk in de processen als de ontwatering en de interactie met de oppervlakkige afvoer bij verzadiging. Daarnaast is de afwatering binnen het gebied erg versimpeld, wat op zich ook beter kan worden gedaan. Een ander minder punt aan het model is dat het gecalibreerd is aan de hand van afvoermetingen waar soms nogal grote gaten in zitten.

De verschillende ingrepen in het gebied zijn onderverdeeld in:

- De ingrepen in de beekdalen Holmers en Halckenbroek: bestaande uit het verhogen en het automatisch kunnen variëren van het waterpeil, het dempen van waterlopen, het afgraven van de voedselrijke toplaag en het stoppen van de beweiding om natuurvorming niet meer tegen te gaan.
- De ingrepen in de hogergelegen boswachterijen: het verhogen van de waterstanden om het bestaande naaldbos te verdrinken en plaats te laten maken voor een meer natuurlijker en natter bos.

Deze opdeling heeft voornamelijk te maken met de karakteristieken van deze deelgebieden. De boswachterijen bevinden zich op de hogergelegen zandgronden waar ze te maken hebben met veel wegzijging, hoge doorlatendheid en de begroeiing bestond voornamelijk uit naaldbomen. Halckenbroek en Holmers liggen op de lagere veenbodems, waardoor deze gebieden te maken hebben met kwel, een langzame ontwatering en dus ook hoge grondwaterstanden ten opzichte van maaiveld.

Uit modelberekeningen blijkt dat in de oude situatie een groot deel van de neerslag verdampt, de hoge verdamping wordt voornamelijk veroorzaakt door de grote oppervlakte aan naaldbos. De overige neerslag verlaat het gebied via wegzijging naar onderliggende bodemlagen of watert af via de waterlopen en vervolgens over de stuw. Het blijkt dat de afvoer vanuit de boswachterijen grotendeels voor de baseflow zorgt gedurende het jaar. De veengronden in de beekdalen hebben een lage ontwatering en voegen maar een klein deel toe aan de baseflow. Deze gebieden raken in de winter echter vrij snel verzadigd waardoor er oppervlakkige afvoer optreedt en waardoor de korte hoge afvoerpieken ontstaan die volgen op de verschillende buien.

De ingrepen en veranderingen die hebben plaatsgevonden in het beekdal, zijn vooral gericht op het natter maken van het gebied en dit blijkt ook duidelijk uit de grondwaterstanden en het veel eerder verzadigd raken van de bodem. Zowel het dempen van sloten (lagere ontwatering), het afgraven van de toplaag (eerder verzadigd), het verhogen van het slootpeil (lagere ontwatering), als de vorming van heide (lagere verdamping) zorgen voor een stijging van het grondwaterpeil waardoor het gebied gedurende langere tijd verzadigd is. Daarnaast zorgen de ingrepen er voor dat bij oppervlakkige afvoer de wrijving toeneemt (door begroeiing) en de afstand naar de waterlopen toeneemt (demping waterlopen). Hierdoor verloopt de oppervlakkige afvoer langzamer en wordt er meer geborgen op maaiveld. Al met al zorgt dit voor een veel natter gebied waar de natuur zich goed kan ontwikkelen. Hierbij moet echter wel vermeld worden dat de totale afvoer uit deze gebieden nauwelijks veranderd. De afvoer via het grondwater wordt wel veel kleiner, maar hierdoor treedt oppervlakkige afvoer eerder en vaker op, waardoor de totale afvoer nagenoeg gelijk blijft. De toename van kwel in deze lage gebieden is klein gezien het feit dat het gebied voor de ingrepen ook al veelvuldig

verzadigd was en de waterstand daardoor nauwelijks veranderd is. Ook de verdamping verandert niet veel. De verdamping uit openwater is in de zomer, maar dit wordt gecompenseerd door de lagere verdamping van de ontstane heide. In de winter is het oppervlakte aan openwater hoger, maar de gemiddelde verdamping van openwater is in de winter weer veel lager.

De ingrepen in de boswachterijen zijn van groter invloed op de afvoer. Door het ophogen van het waterpeil in de waterlopen met behulp van stuwtjes ontstaan verschillende meertjes en het gebied wordt veel natter. Een belangrijk gevolg is dat het bos verdrinkt, waardoor de bomen afsterven. Voor de huishouding in het peilgebied heeft dit tot gevolg dat de gewasfactor erg daalt (65%) en dus de verdamping veel lager komt te liggen. De wegzijging neemt licht toe door het hogere grondwaterpeil. Echter is dit niet genoeg om het neerslagoverschot (neerslag minus verdamping) op te vangen en zal het water zijn weg zoeken naar de waterlopen en vervolgens via de stuw het gebied verlaten.

Het verdrinken van het naaldbos zorgt voor de nodige gevolgen voor de afvoer. Hier moet echter bij vermeld worden dat er tussen 2006 en 2007 al een afname van dit effect te merken is. Dit duidt op langzame vervanging van de dode bomen door andere begroeiing. Voor de toekomst zal dit waarschijnlijk betekenen dat de toegenomen afvoer weer zal dalen. Echter zal het oude niveau waarschijnlijk niet behaald worden aangezien de verdamping vanuit naaldbos erg hoog ligt.

Voor zowel het beekdal als ook de boswachterijen kan geconcludeerd worden dat de mogelijke berging in de bodem is afgenomen. Vooral de gedurende nog veel langere periode verzadigde bodem in de beekdalen zorgen er voor dat het water snel wordt afgevoerd via oppervlakkige afvoer. Echter kan er nu wel weer meer water geborgen worden in de ontstane meertjes en via het flexibel peilbeheer is het in theorie mogelijk om bij een bui de piekafvoer (tijdelijk) op te vangen. Of dit in de praktijk ook makkelijk te verwezenlijken is, is lastiger te zeggen. Doordat het model niet heel precies is op het gebied van afmetingen waterlopen en meervorming valt het lastig te zeggen hoeveel water men tijdelijk kan bergen. In ieder geval valt te zeggen dat door de hogere afvoer de mogelijke berging ook mee zou moeten groeien om te voldoen aan de doelstelling om in de toekomst een groot deel van het water te kunnen bergen.

Van belang is om in te zien dat de gevolgen op de afvoer en de rest van de waterhuishouding voornamelijk bepaald worden door de specifieke karakteristieken van dit gebied en de schaal waarop de ingrepen die worden uitgevoerd. Het hangt van het gebied en de ingrepen af of er daadwerkelijk grote veranderingen optreden, of de totale waterbalans van het gebied verandert (andere verdeling tussen de uitgaande termen) en of de neerslag via andere snellere of langzamere trajecten (verzadiging van de bodem) wordt afgevoerd.

5.2 AANBEVELINGEN

De conclusies geven aan dat er nogal wat veranderd is in de waterhuishouding binnen het gebied. Een belangrijk punt is dat door de ingrepen de afvoer van dit gebied (in ieder geval voorlopig) juist is toegenomen, wat een beetje tegen het punt van klimaatbestendig maken van het stroomgebied en het beperken van de wateroverlast, in gaat. Het vernatten van het peilgebied is goed voor de ontwikkeling van een mooi uniek natuurgebied, maar dit zal wel gevolgen met zich meebrengen voor de afvoer van het gebied. De volgende aanbevelingen worden gemaakt.

- De toekomstige ontwikkelingen in het gebied zijn van belang voor de gevolgen op de afvoer. De verdamping vanuit het gebied bepaalt voor een groot deel het overschot aan water en dus ook de afvoer over de stuw naar het Amerdiep. Nagegaan dient te worden wat er voor de huidige naaldbossen in de plaats komt. Het is nog lastig te schatten wat het “meer natuurlijker en nattere bos” dat in de toekomst zal gaan ontstaan, voor effect zal hebben op de verdamping en of dit in de buurt van de verdamping van naaldbos zal komen, zodat de afvoer zich enigszins zal herstellen.
- Wanneer er de afname in verdamping blijvend is het aan te bevelen om te onderzoeken of de retentiefunctie wel voldoende capaciteit heeft. Aan de ene kant geeft het een positieve bijdrage aan de ontwikkeling van natuur, maar aan de andere kant moet de grootte van het retentiegebied nu misschien ook wel aangepast worden. In ieder geval moet dan

rekening gehouden worden met een flinke stijging van de afvoer uit dit gebied, bovenop de al verwachte 10% extra afvoer in 2050.

- Het gebruikte ontwikkelde model bevat nogal wat onzekerheden en modelonderdelen die misschien niet goed onderzocht zijn of niet geheel juist gemodelleerd zijn, ook al levert het model na calibratie best goede resultaten op. Het is aan te raden om ditzelfde onderzoek nog een keer met een GIS-based model te bepalen om te kijken of de resultaten goed aansluiten.
- Bij eventueel verder onderzoek aan de hand van een hydrologisch dient rekening gehouden te worden met enkele aspecten. Zoals bij dit onderzoek naar voren komt heeft het verdrinken van bossen een nogal groot maar tijdelijk effect op de verdamping, waarbij een nieuw evenwicht wordt ingesteld. Een verandering in de verdamping heeft gevolgen voor de andere afvoertrajecten waarmee het water het gebied verlaat. Een verandering in de wegzijging zal weer leiden tot meer/minder kwel op andere plekken en de afvoer uit het gebied kan ook sterk veranderen.

LITERATUUR

- Akker, J.J.H. van den (2001). Een inventarisatie van bodemfysische materiaalmodellen zoals toegepast in het landbouwkundig onderzoek. Rapport Delft Cluster samengesteld door Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen.
- Beden, N. van den, Kuiper, R. (2006). Effecten van bovenstroomse berging in hoogwater in de Maas. Wageningen Universiteit en Researchcentrum.
- Berendrecht, W., P. Vermeulen, G. Hendriksen, J. Snepvangers, A. Veldhuizen, A. Heuven, M. Steenvoorden (2008) Syllabus cursus 'interactief modelleren met het MIPWA modelinstrumentarium'. Deltares: Delft.
- Bergström, S. (1992) The HBV model - its structure and applications; SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping.
- Ernst, L.F. (1978). Drainage of undulating sandy soils with high groundwatertables, Journal of Hydrology, Vol. 39:1-50.
- Werkgroep herziening cultuurtechnisch vademecum (1992), Cultuur Technisch Vademecum (derde druk), Vereniging voor landinrichting, Utrecht.
- Dienst Landelijk Gebied & Unie van waterschappen (1998), Grondwater als leidraad voor het oppervlaktewater, Utrecht.
- Deursen, W. van, H. Middelkoop, J. Kwadijk (2002). Grenzen aan de werking van bovenstroomse berging'. H₂O Tijdschrift voor watervoorziening en waterbeheer, nummer 5, pag 17-20.
- Graaff, B. de, M. van den Brink (2007), Maatregelen om over te piekeren, effecten van vernatten op afvoerloop in beken. Stroming 13 (2007), nr 2.
- Huinink, J.T.M. (1986) Grasland: rond of vlak?; in: De Buffer, jrg. 32, nr 1, pag 1-14.
- KNMI (2008) Daggegevens van het weer in Nederland – Eelde 2000-2008. <http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/download.html> bezocht op 10-10-2008.
- Ledger, D.C. en E. Harper (2000). The hydrology of a drained, afforested peat bog in southern Scotland, 1977-1986. Earth Sciences, 78, 297-303.
- Maas, K. (2008). Drainageweerstand en voedingsweerstand van een freatische aquifer. Stromingen, jrg 14, nr 2.
- Meinardi C.R., en C.G.J. Schotten. (1999) Grondwateraanvulling en oppervlakkige afstroming in Nederland: Deel 3: De afwatering van veengebieden; in: Stromingen, jrg 5, nr 1, pag 5-18.
- Ministerie Verkeer en Waterstaat (2000) Anders omgaan met water, Waterbeleid voor de 21^e eeuw. Den Haag.
- Pfister, L., J. Kwadijk, A. Musy, A. Bronstert en L. Hoffman (2004). Climate change, land use change and runoff prediction in the Rhine-Meuse basins. River research and applications 20, pag 229-241.
- Robinson, M., E.L. Ryder, en R.C. Ward (1985) Influence on streamflow of field drainage in a small agricultural catchment. Agricultural water management, jrg 10, pag 145-158.
- Robinson, M. (1986). Changes in catchment runoff following drainage and afforestation. Journal of Hydrology, 86, pag 71-84.
- Roelsma, J., F.J.E. van der Bolt, T.P. Leenders, L.V. Renaud, (2006). Systeemanalyse voor het stroomgebied van de Drentse Aa Fase 1. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 1271. Reeks Monitoring Stroomgebieden 5-I. 58 blz. 16 fig.; 6 tab.; 2 ref.
- Rozemeijer, J., Y. van der Velde (2008). Oppervlakkige afstroming ook van belang in het vlakke Nederland. H₂O, jrg 41, nr 19/2008.
- Shaw, E.M. (1994), Hydrology in Practice third edition, Londen.
- South Florida Water Management District (2005). South Florida Water Management Model Version 5.5. Paragraaf 2.4 Overland flow.
- Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (2002). RAM Precipitation Runoff Module Reference Manual. Utrecht: STOWA

- Stolte, J., Ritsema, C., Wösten, H. (2000), Oppervlakte-afvoer: een combinatie van helling, bodem, gewas en regen, *Stroming* jrg 6, nr 4, pag 27-36
- STOWA (2002). Reference Manual RAM, Precipitation Runoff Module version 3.5.
- Tu, M., M.J. Hall, P.J.M. de Laat en M.J.M. de Wit (2004). Extreme floods in the Meuse River over the past century: aggravated by land-use changes? *Phys. Chem. Earth*, parts A/B/C 30(4-5), 267-276, 2005a.
- Velner, R. (2002). Neerslag-afvoer modellering van de bemalinggebieden Streukelerzijl en Galgenrak, een studie ten behoeve van de ontwikkeling van een gekoppeld grond- en oppervlaktewatermodel. Wageningen Universiteit: Wageningen
- Vries, F. de, Brouwer, F. (2006). De bodem van Drenthe in beeld, Alterra rapport 1381, Wageningen
- Waarneming.nl (2008). <http://waarneming.nl>. Gebied Holmers, bezocht op 03-10-2008.
- Waterschap Hunze en Aa's (2008). Watersysteemplan Drentsche Aa. Veendam
- Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum (1988). Cultuurtechnisch Vademecum. Cultuurtechnische Vereniging, Utrecht.
- Winden, A. van, W. Overmars en W. Braakhekke (2003). Bergen bij de bron; Natuurlijke waterberging in de middelgebergten in het stroomgebied van Maas en Rijn. Nijmegen: Stroming bv.
- Wösten, J.H.M., G.J. Veerman en J. Stolte (1994). Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: de Staringreeks (vernieuwde uitgave 1994). Technisch Document 18. Staring Centrum, Wageningen
- WL Delft Hydraulic (2004) Reference Manual SOBEK Rainfall-Runoff. Delft.
- Zhang, L., R. Vertessy, G. Walker, M. Gilfedder en P. Hairsine (2007). Afforestation in a catchment context: understanding the impacts on water yield and salinity. Industry report 1/07, eWater CRC, Melbourne Australia.

BIJLAGE A. INPUT VOOR HET GEBOUWDE MODEL

A.1. DE VERSCHILLENDE MODELTERMEN EN PARAMETERS

Soort term	Symbool	Eenheid	Betekenis
Gebiedsgegevens	A	[m ²]	Oppervlakte
	H _{mv}	[m+NAP]	Gemiddelde hoogteligging van maaiveld
	H _{gr,bodem}	[m+NAP]	Gemiddelde bodemhoogte greppel
	H _{sl,bodem}	[m+NAP]	Gemiddelde bodemhoogte sloot
	i _{mv}	[-]	Helling van het maaiveld
	i _{gr}	[-]	Helling van de greppel
	i _{sl}	[-]	Helling van de sloot
	T _{gr}	[-]	Talud van de greppel
	T _{sl}	[-]	Talud van de sloot
	L _{gr}	[m]	Gemiddelde greppelafstand
	L _{sl}	[m]	Gemiddelde slootafstand
Stijghoogtes/Peilen	H _{aq1} = H _{gw}	[m+NAP]	Stijghoogte in de bovenste watervoerende laag (wordt gelijk gesteld aan de grondwaterstand)
	H _{gr}	[m+NAP]	Gemiddeld peil in de greppels
	H _{sl}	[m+NAP]	Gemiddeld peil in de sloten (hoofdwatgang)
	H _{stuw}	[m+NAP]	Hoogte van de stuw
	H _{aq2}	[m+NAP]	Stijghoogte in de tweede watervoerende laag
Bergingen	H _{aquitard1}	[m+NAP]	Peil van de scheidende laag.
	B _{mv}	[m]	Berging in oppervlakkige depressies
	B _{bv}	[m]	Berging in de onverzadigde zone (totaal)
Input	θ _{bv}	[-]	Berging in de onverzadigde zone (vochtgehalte)
	P	[m/d]	Neerslag
	T _{gem}	[°C]	Temperatuur (Celsius)
Fluxen	K↓	[W/m ²]	Globale stralingsstroomdichtheid
	Q _{inf}	[m/d]	Infiltratieflux (van maaiveld naar bodemvocht)
	Q _{perc}	[m/d]	Percolatieflux (van bodemvocht naar grondwater)
	Q _{cap}	[m/d]	Capillaire opstijging (van grondwater naar bodemvocht)
	Q _{kwel}	[m/d]	Kwel vanuit tweede watervoerende laag (omhoog)
	Q _{E,bv}	[m/d]	Evapotranspiratie
	Q _{E,mv}	[m/d]	Openwaterverdamping bij berging op maaiveld
	Q _{mv->gr}	[m/d]	Oppervlakkige afstroming (van mv naar de greppels)
	Q _{gw->gr}	[m/d]	Ontwatering (van grondwater naar greppel)
	Q _{gw->sl}	[m/d]	Ontwatering (van grondwater naar sloot)
	Q _{gr->sl}	[m/d]	Afwatering (van greppel naar sloot)
Modelparameter	Q _{stuwafvoer}	[m/d]	Stuwafvoer
	B _{mv,max}	[m]	Maximale maaiveldberging
	Q _{inf,max}	[m/d]	Infiltratiecapaciteit
	Q _{perc,max}	[m/d]	Percolatiemaximum
	Q _{cap,max}	[m/d]	Maximale capillaire opstijging
	k _{verz}	[m/d]	Doorlatendheid van de verzadigde bodem
	D	[m]	Dikte van de bovenste watervoerende laag
	C _d	[dag]	Drainageweerstand (Ernst)
	N	[-]	Porositeit van de bodem
	C _{stuw}	[-]	Stuwconstante
	C _{aquitard1}	[d]	Weerstand eerste scheidende laag
	H _{aq2,REF}	[m+NAP]	Referentiewaarde voor bepalen stijghoogte in aquifer 2

k_M	$[m^{1/3}/s]$	Wandruwheid waterloop (Manning)
n_{mv}	$[m^3*s]$	Manningcoefficient voor de wrijving over maaiveld
$f_{Makkink}$	$[-]$	Gewasfactor Makkink

A.2. OPPERVLAKTES EN LANDGEBRUIK

Landgebruik	Halkenbroek	Holmers	Boswachterij Hooghalen	Boswachterij Grollloo	Totaal
Naaldbos	0	0	270	490	760
Gemengd bos	0	0	10	120	130
Loofbos	0	0	0	60	60
Heide	0	10	60	140	210
Bouwland	0	100	0	0	100
Grasland	80	40	0	0	120
Totaal	80	150	340	810	1380

De oppervlaktes naar landgebruik per deelgebied in hectares: Oude situatie

Landgebruik	Halkenbroek	Holmers	Boswachterij Hooghalen	Boswachterij Grollloo	Totaal
Naaldbos	0	0	270	490	760
Gemengd bos	0	0	10	120	130
Loofbos	0	0	0	60	60
Heide	40	100	60	140	340
Bouwland	0	30	0	0	30
Grasland	40	20	0	0	60
Totaal	80	150	340	810	1380

De oppervlaktes naar landgebruik per deelgebied in hectares: Nieuwe situatie

A.3. WATERLOPEN

Karakteristiek	Halkenbroek	Holmers	Boswachterij Hooghalen	Boswachterij Grollloo
Gemiddelde hoogteligging (m+NAP)	14.40	14.90	17.00	18.00
Peil greppelbodem (m+NAP)	13.30	13.90	15.75	16.75
Peil slootbodem (m+NAP)	12.00	12.00	15.25	16.25
Totale lengte greppels (m)	9700	13500	10000	8700
Greppelafstand (m)	82	111	340	931
Totale lengte sloten (m)	1450	3500	2300	4500
Slootafstand (m)	552	429	1478	1800
Breedte greppelbodem (m)	0.50	0.50	0.25	0.25
Talud greppel (m/m)	1.00	1.00	1.00	1.00
Breedte slootbodem (m)	2.30	1.30	0.50	0.50
Talud sloot (m/m)	2.00	1.50	1.00	1.00
Verhang van het maaiveld (m/m)	0.0002	0.0002	0.0059	0.0021
Verhang van de greppel (m/m)	0.0007	0.0009	0.0007	0.0006
Verhang van de sloot (m/m)	0.0000	0.0000	0.0037	0.0025

De karakteristieken van de afwateringseenheden: oude situatie

Karakteristiek	Halkenbroek	Holmers	Boswachterij Hooghalen	Boswachterij Grollloo
Gemiddelde hoogteligging (m+NAP)	14.40	14.60	17.00	18.00
Peil greppelbodem (m+NAP)	13.30	13.90	15.75	16.75
Peil slootbodem (m+NAP)	12.00	12.00	15.25	16.25
Totale lengte greppels (m)	9700	6750	10000	8700
Greppelafstand (m)	82	222	340	931
Totale lengte sloten (m)	1450	1200	2300	4500
Slootafstand (m)	552	1250	1478	1800
Breedte greppelbodem (m)	0.50	0.50	0.25	0.25
Talud greppel (m/m)	1.50	1.50	1.00	1.00
Breedte slootbodem (m)	2.30	1.30	0.50	0.50
Talud sloot (m/m)	2.50	1.50	1.50	1.50
Verhang van het maaiveld (m/m)	0.00024	0.00009	0.00588	0.00215
Verhang van de greppel (m/m)	0.00073	0.00032	0.00068	0.00056
Verhang van de sloot (m/m)	0.00000	0.00000	0.00373	0.00276

De karakteristieken van de afwateringseenheden: nieuwe situatie

A.4. BODEMGEGEVENS

$$\theta_{\text{evenwicht}} = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha h_{bv}|^n\right)^{1-1/n}} \quad [-]$$

Bodemgegevens	Halkenbroek	Holmers	Boswachterij Hooghalen	Boswachterij Grollloo
Bodemsoort	Veen (O16)	Veen (O16)	Podzolgrond (O1)	Podzolgrond (O1)
Porositeit [cm ³ /cm ³]	0.9000	0.9000	0.4500	0.4500
θ_r [cm ³ /cm ³]	0.0000	0.0000	0.0100	0.0100
θ_s [cm ³ /cm ³]	0.8900	0.8900	0.3600	0.3600
L [-]	-1.4110	-1.4110	0.0000	0.0000
α [1/cm]	0.0103	0.0103	0.0224	0.0224
n [-]	1.3230	1.3230	2.2860	2.2860

Bodemgegevens en -karakteristieken per deelgebied (Halkenbroek en Holmers gelijk en de boswachterijen ook). Bron: Van den Akker (2002)

A.5. GEWASFACTOREN

$$q_{E,pot}(t) = f_{Makkink} \cdot q_{E,ref}(t) = f_{Makkink} \cdot 0,65 \cdot \frac{s(t)}{s(t) + \gamma} \cdot K \downarrow(t) \quad [\text{m/d}] \quad [\text{m/d}] \quad 5-1$$

Maand	Grasland	Bouwland	Heide	Loofbos	Gemengd bos	Naaldbos	Open water
April	1.00	0.67	0.70	1.05	1.13	1.20	1.30
Mei	1.00	0.72	0.80	1.15	1.18	1.20	1.30
Juni	1.00	1.08	0.85	1.20	1.20	1.20	1.31
Juli	1.00	1.06	0.85	1.25	1.23	1.20	1.27
Augustus	1.00	0.91	0.80	1.10	1.15	1.20	1.19
September	1.00	0.68	0.80	1.05	1.13	1.20	1.17
Oktober	1.00	0.40	0.70	1.00	1.10	1.20	0.90
November	1.00	0.40	0.70	0.95	1.08	1.20	0.70
December	1.00	0.40	0.70	0.90	1.05	1.20	0.50
Januari	1.00	0.40	0.70	0.90	1.05	1.20	0.63
Februari	1.00	0.40	0.70	0.90	1.05	1.20	0.93
Maart	1.00	0.40	0.70	1.00	1.10	1.20	1.27

Gewasfactoren per maand voor de verschillende landgebruiken (WL Delft Hydraulics, 2004)

Maand	Halkenbroek	Holmers	Boswachterij Hooghalen	Boswachterij Grollloo	Totaal
April	1.00	0.76	1.11	1.09	1.05
Mei	1.00	0.80	1.13	1.12	1.08
Juni	1.00	1.04	1.14	1.14	1.12
Juli	1.00	1.03	1.14	1.15	1.12
Augustus	1.00	0.93	1.13	1.12	1.09
September	1.00	0.77	1.13	1.11	1.07
Oktober	1.00	0.58	1.11	1.08	1.03
November	1.00	0.58	1.11	1.08	1.03
December	1.00	0.58	1.11	1.07	1.02
Januari	1.00	0.58	1.11	1.07	1.02
Februari	1.00	0.58	1.11	1.07	1.02
Maart	1.00	0.58	1.11	1.08	1.03

Gemiddelde gewasfactor per maand voor ieder deelgebied: Oude situatie

Maand	Halkenbroek	Holmers	Boswachterij Hooghalen	Boswachterij Grollloo	Totaal
April	0.85	0.73	1.11	1.09	1.04
Mei	0.90	0.81	1.13	1.12	1.08
Juni	0.93	0.92	1.14	1.14	1.10
Juli	0.93	0.91	1.14	1.15	1.11
Augustus	0.90	0.85	1.13	1.12	1.08
September	0.90	0.80	1.13	1.11	1.07
Oktober	0.85	0.68	1.11	1.08	1.03
November	0.85	0.68	1.11	1.08	1.03
December	0.85	0.68	1.11	1.07	1.02
Januari	0.85	0.68	1.11	1.07	1.02
Februari	0.85	0.68	1.11	1.07	1.02
Maart	0.85	0.68	1.11	1.08	1.03

Gemiddelde gewasfactor per maand voor ieder deelgebied: Nieuwe situatie

A.6. OPPERVLAKKIGE AFSTROMING

$$\begin{aligned}
 h_{mv,t} &= B_{mv,t-1} + (N_t - q_{inf,t})\Delta t - B_{mv,max} & \text{als} & (P_t - q_{inf,t})\Delta t + B_{mv,t-1} > B_{mv,max} & \text{[m]} \\
 h_{mv,t} &= 0 & \text{als} & (P_t - q_{inf,t})\Delta t + B_{mv,t-1} \leq B_{mv,max} & \text{[m]} \\
 q_{mv \rightarrow gr,t} &= \frac{3600 \cdot 24 \cdot h_{mv,t}^{5/3} \cdot i_{mv \rightarrow gr}^{1/2}}{n_{mv,t} \cdot L_{gr}} & & & \text{[m/d]}
 \end{aligned}$$

Volgens het South Florida Water Management Model (2005) geldt voor n_{mv} de volgende functie:

$$n_{mv,t} = \alpha_{mv} \cdot \left(\frac{h_{mv,t}}{0.304} \right)^{\beta_{mv}}$$

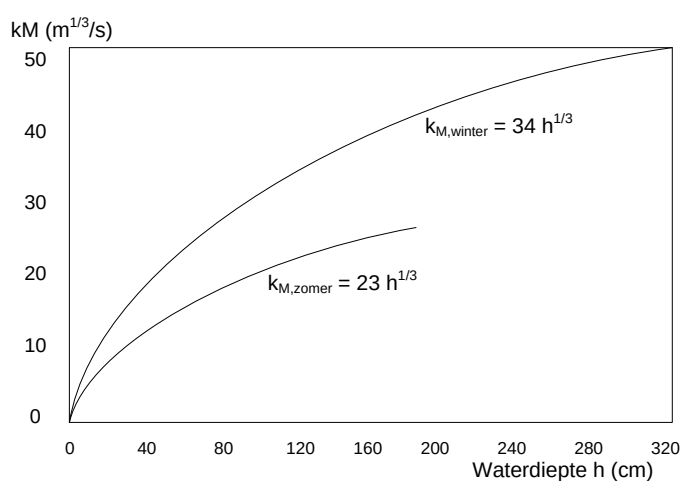
(factor 0.304 is voor het omrekenen van feet naar meters)

Parameter	Grasland	Bouwland	Heide	Loofbos	Gemengd bos	Naaldbos
$B_{mv,max}$ (ft)	0.080	0.080	0.100	0.120	0.120	0.120
$B_{mv,max}$ (m)	0.026	0.026	0.033	0.040	0.040	0.040
α_{mv}	0.080	0.090	0.100	0.100	0.100	0.100
B_{mv}	0.000	0.000	-0.770	-0.770	-0.770	-0.770

Parameters voor de oppervlakkige afstroming ($ft = 0.304\text{ m}$)

A.7. AFWATERING

$$Q_{\text{waterloopafv},t} = 3600 \cdot 24 \cdot k_M \cdot A_{\text{waterloop}} \cdot R_{\text{waterloop}}^{2/3} \cdot i_{\text{waterloop}}^{1/2} \quad [\text{m}^3/\text{d}]$$



Manning's wandruwheid bij normaal onderhoud: vergelijking zomer en winter

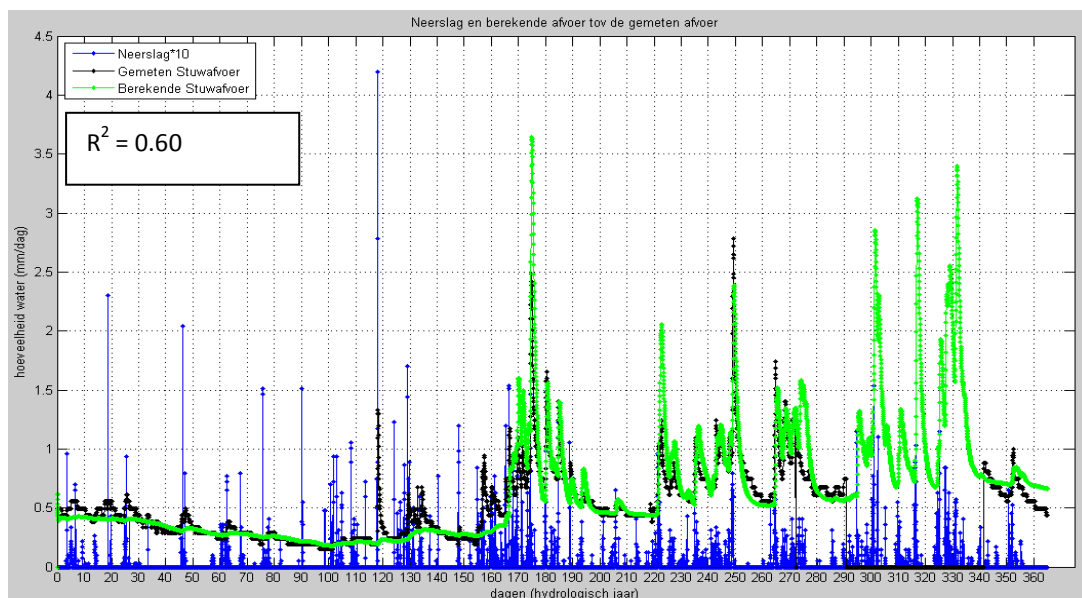
Toestand waterloop	k_M -waarde in $\text{m}^{1/3}/\text{s}$
Zeer schoon	45-30
Schoon	35-20
Licht begroeid	25-15
Matig begroeid	20-10
Vrij sterk begroeid	16-5
Zeer sterk begroeid	<10

Manning's wandruwheid afhankelijk van begroeiingstoestand (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch vademecum, 1992)

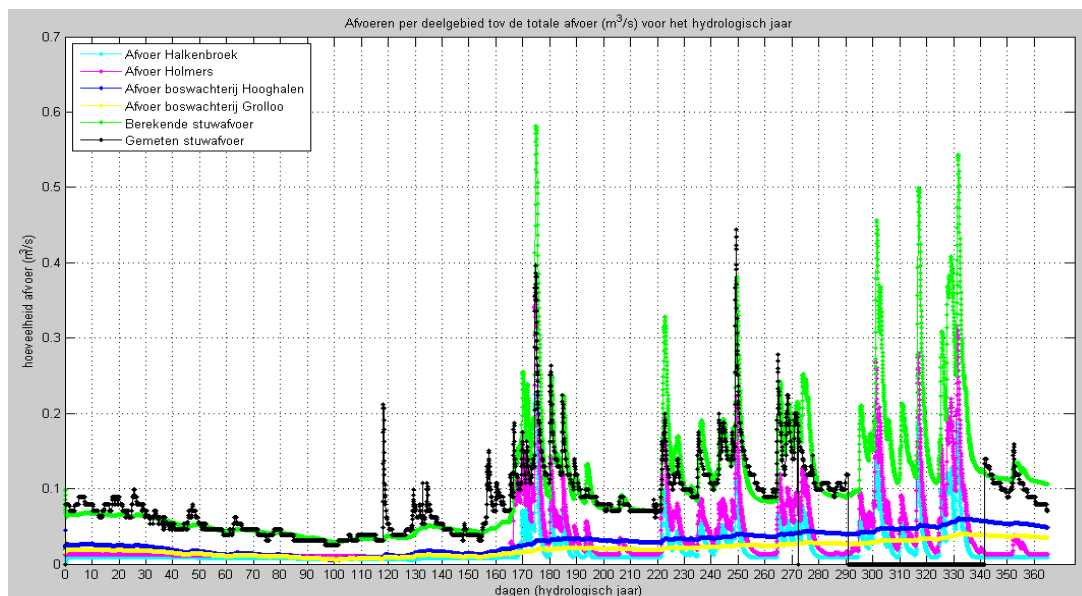
BIJLAGE B. RESULTATEN CALIBRATIE EN VALIDATIE

B.1. CALIBRATIE OUDE SITUATIE ADHV HYDROLOGISCH JAAR 2001

B.1.1. Afvoer

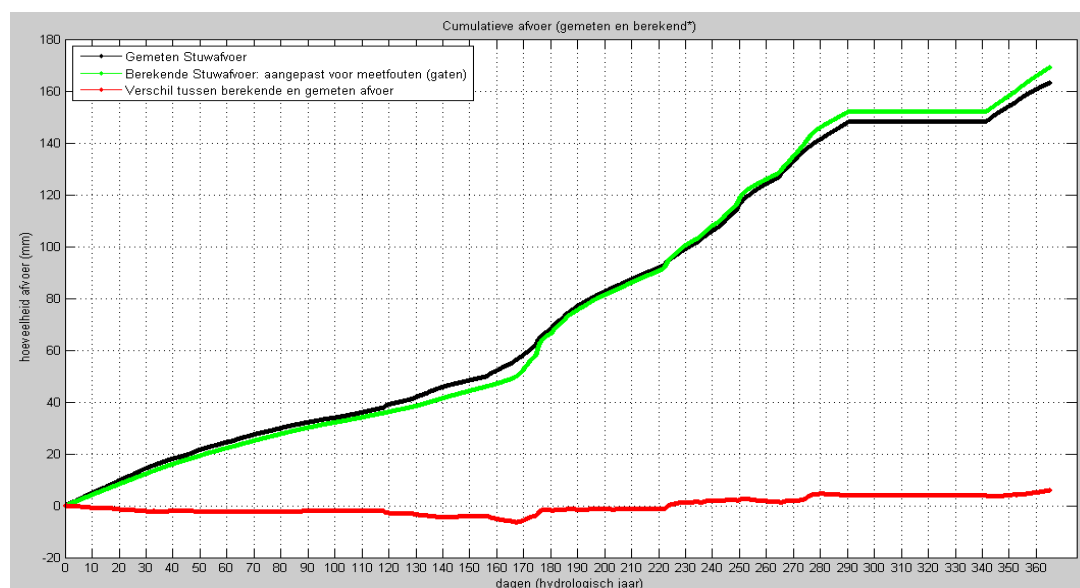


Berekende afvoer ten opzichte van de gemeten afvoer (+ buien) voor het hydrologisch jaar 2001 (mm/dag)

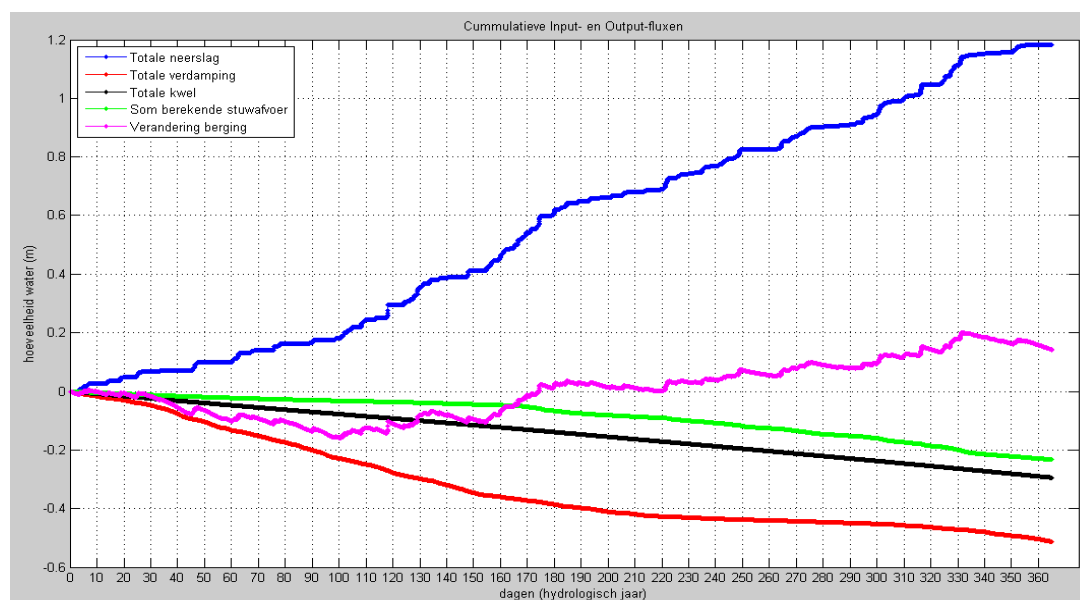


Stuwafvoer met de afvoeren per deelgebied voor het hydrologisch jaar 2001 (m^3/s)

B.1.2. Totalen

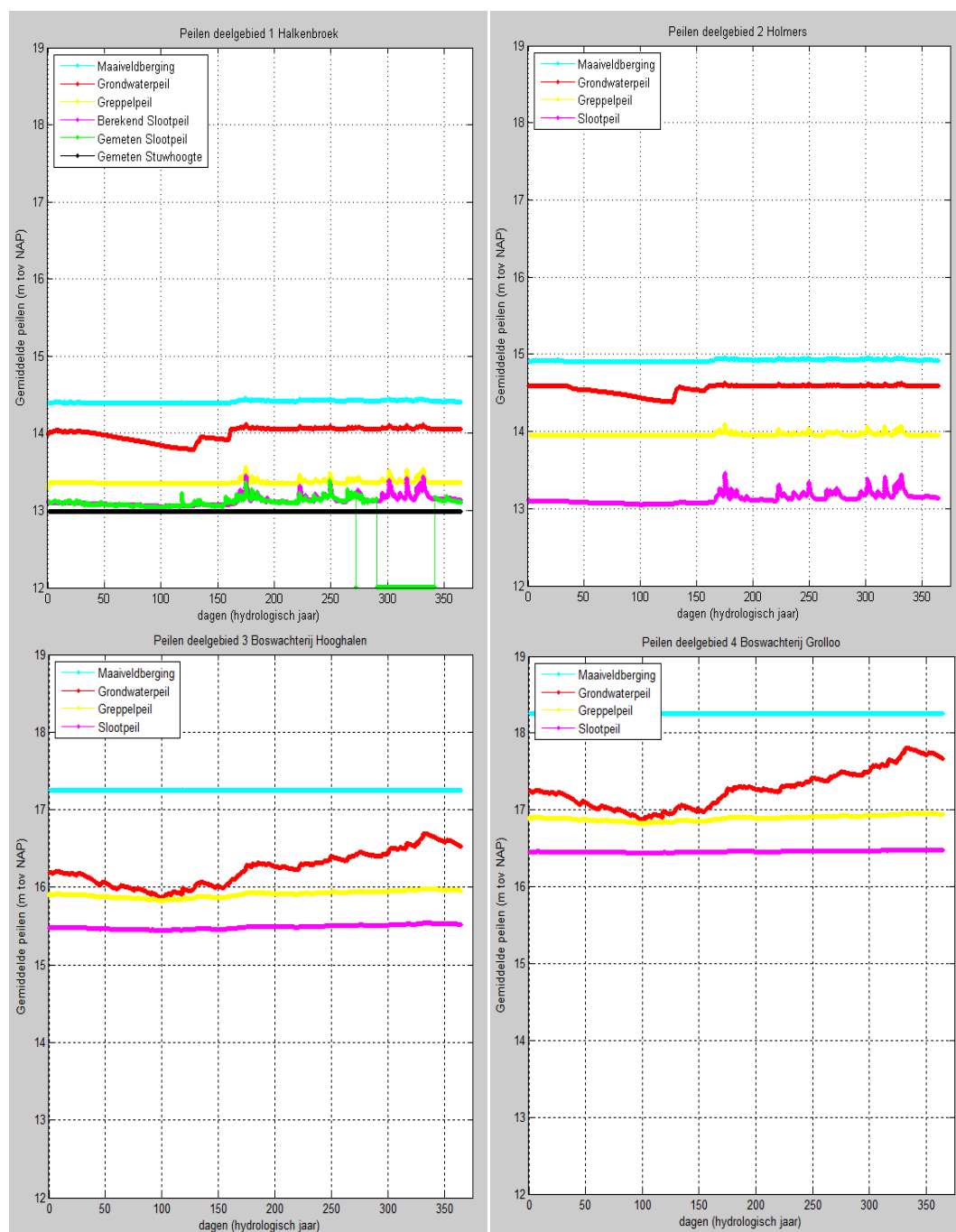


Totale berekende afvoer vergeleken met de totale gemeten afvoer voor het hydrologisch jaar 2001 (m)



Totalen van de verschillende termen (balans = 0) voor het hydrologisch jaar 2001

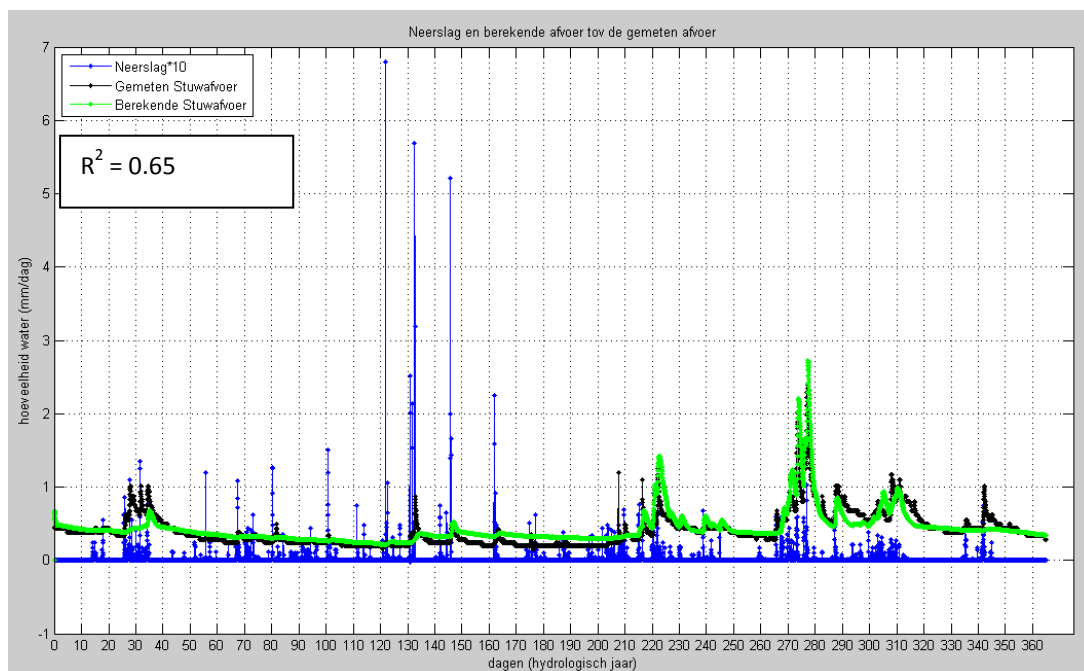
B.1.3. De verschillende deelgebieden



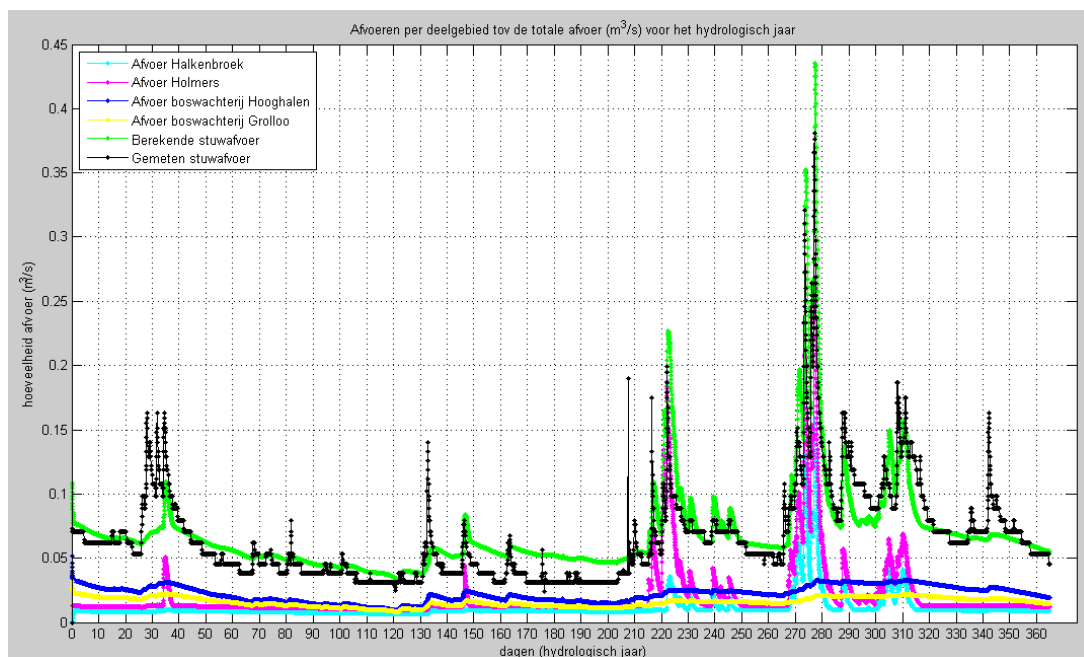
Gemiddelde peilen binnen de verschillende deelgebieden (m tov NAP) voor het hydrologisch jaar 2001 (vlnr/vbnb: Halkenbroek, Holmers, boswachterij Hooghalen en boswachterij Grolloo)

B.2. VALIDATIE OUDE SITUATIE ADHV HYDROLOGISCH JAAR 2002

B.2.1. Afvoer

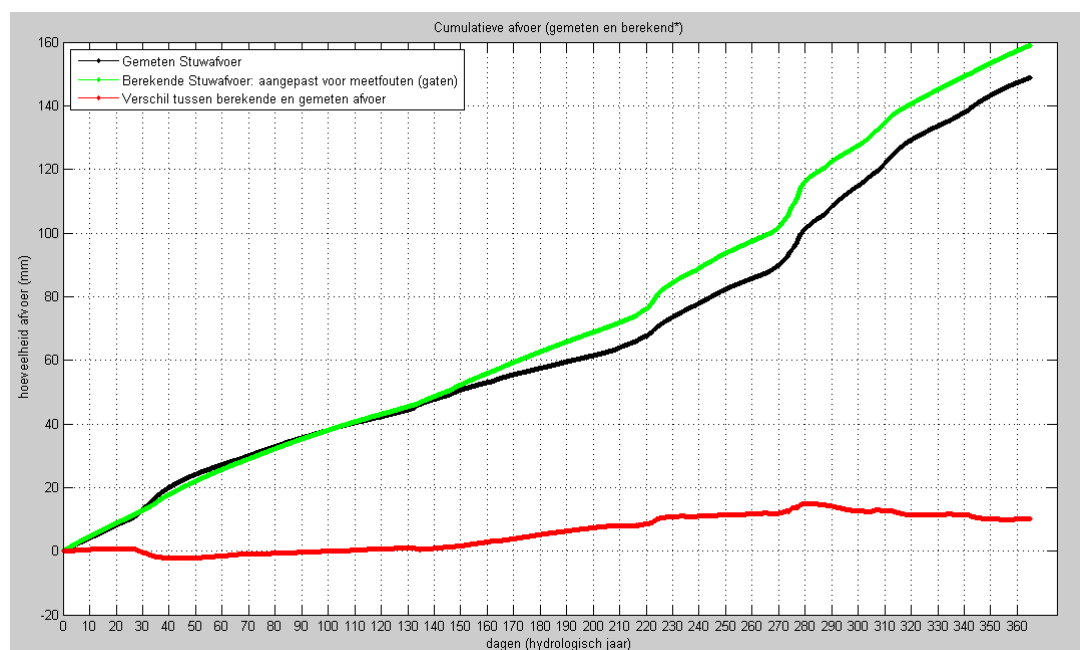


Berekende afvoer ten opzichte van de gemeten afvoer (+ buien) van het hydrologisch jaar 2002 (mm/dag)

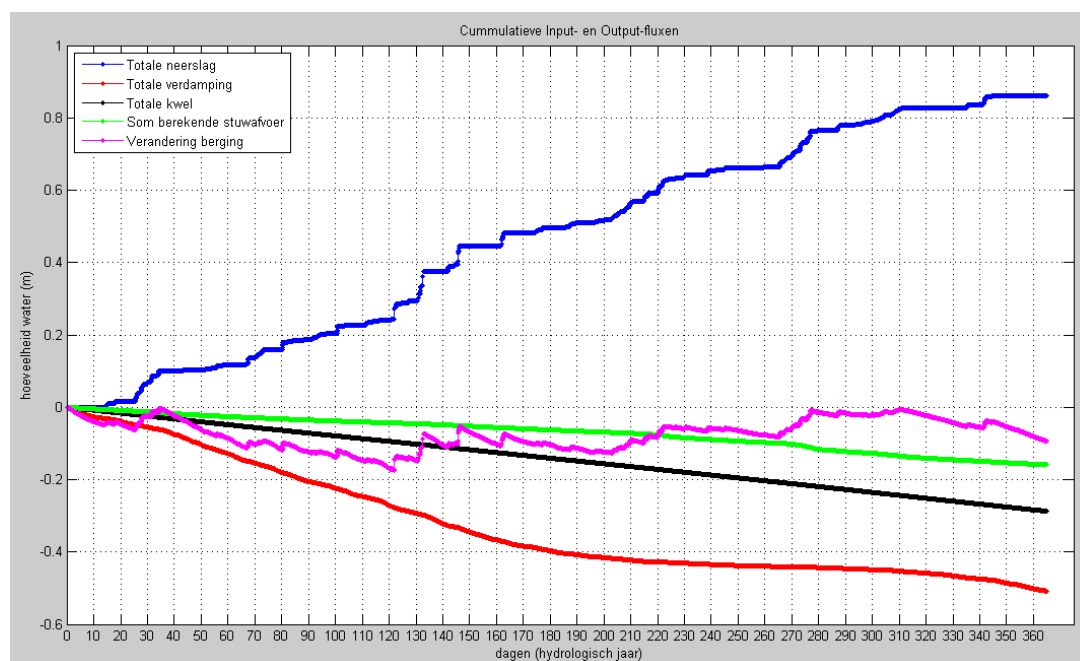


Stuwafvoer met de afvoeren per deelgebied voor het hydrologisch jaar 2002 (m^3/s)

B.2.2. Totalen



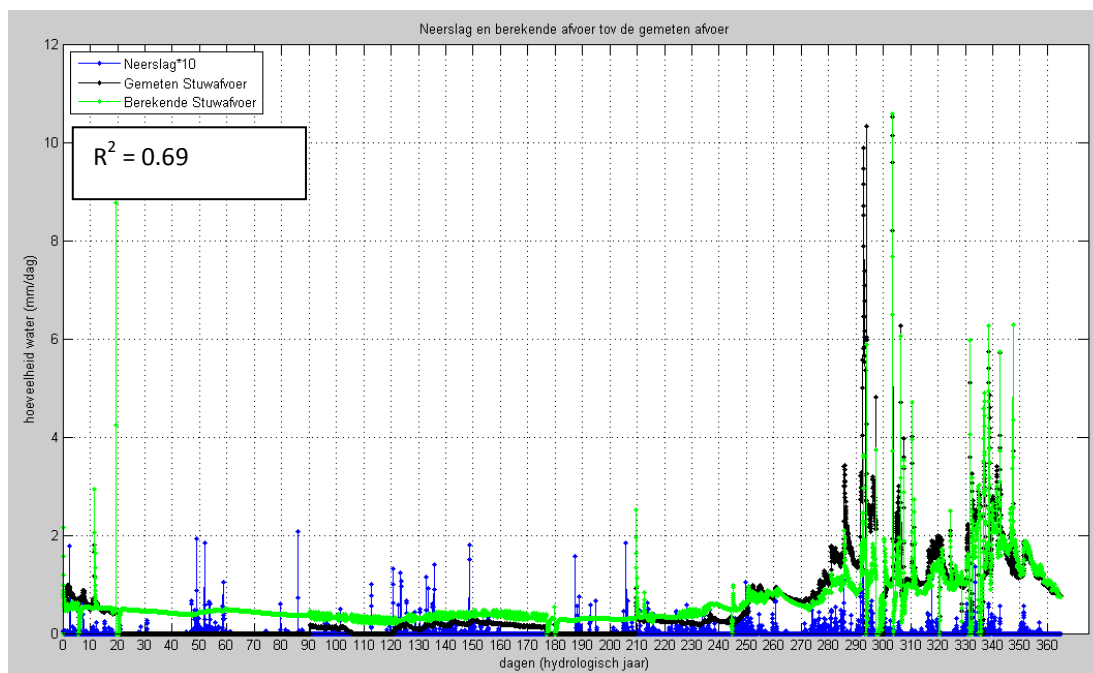
Totalen berekende afvoer vergeleken met de totale gemeten afvoer voor het hydrologisch jaar 2002



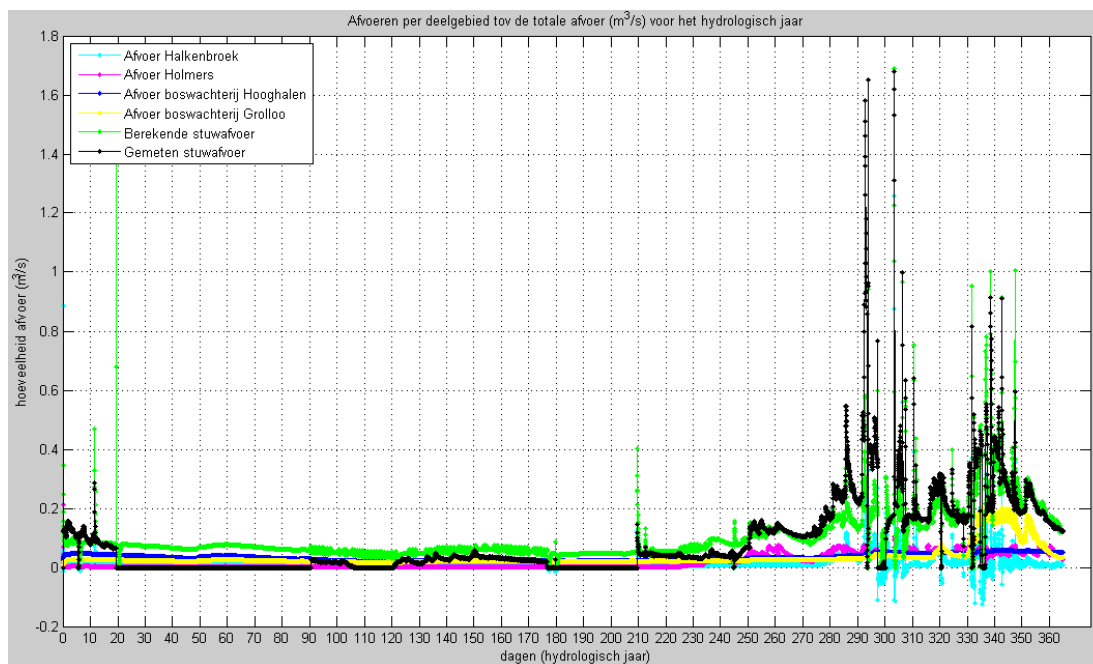
Totalen van de verschillende termen (balans = 0) voor het hydrologisch jaar 2002

B.3. CALIBRATIE NIEUWE SITUATIE ADHV HYDROLOGISCH JAAR 2006

B.3.1. Afvoer

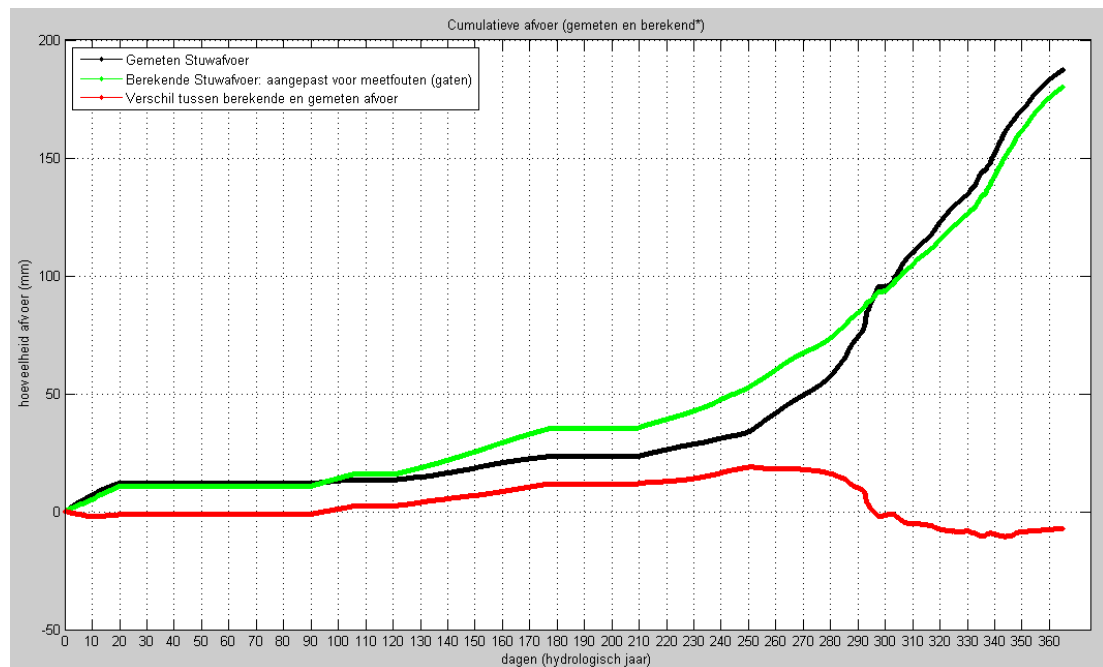


Berekende afvoer ten opzichte van de gemeten afvoer (+ buien) voor het hydrologisch jaar 2006

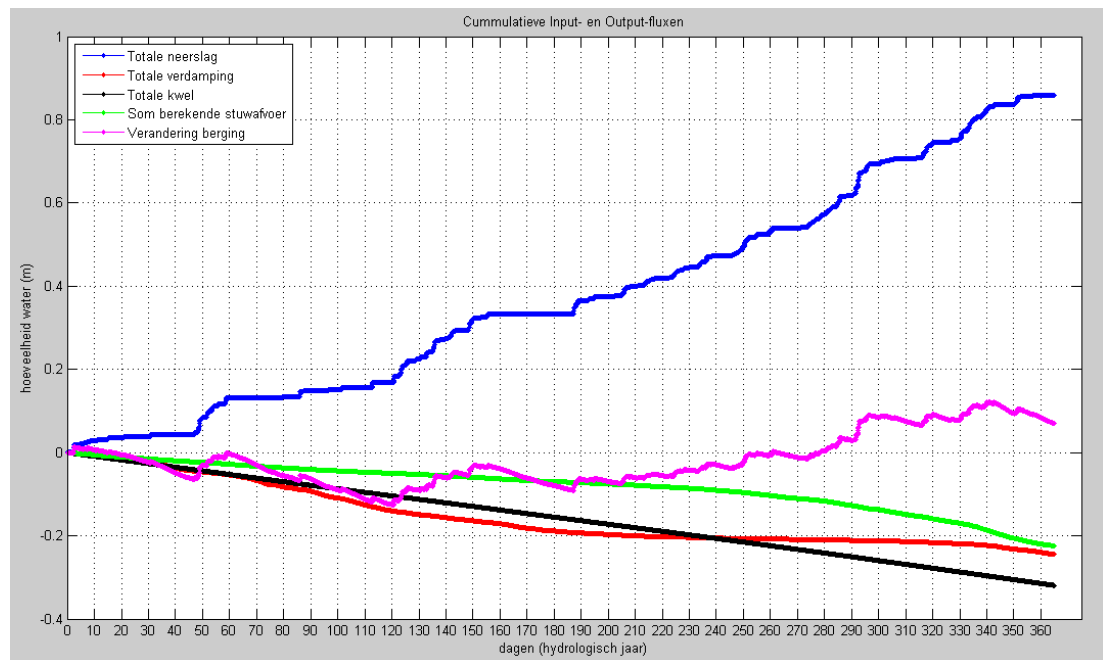


Stuwafvoer met de afvoeren per deelgebied voor het hydrologisch jaar 2006

B.3.2. Totalen

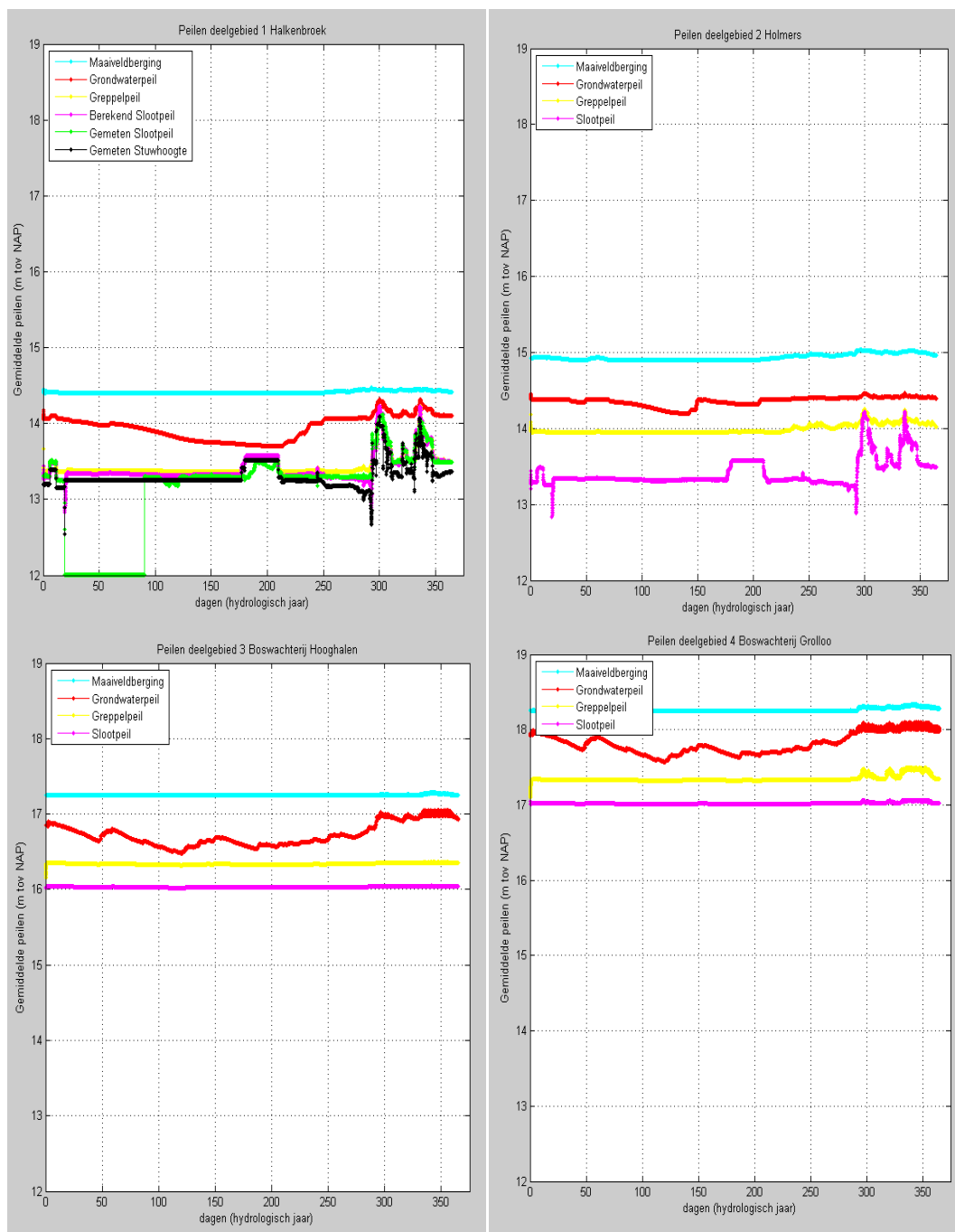


Totale berekende afvoer vergeleken met de totale gemeten afvoer voor het hydrologisch jaar 2006 (de vlakke stukken in de afvoer zijn niet meegeteld wegens meetfouten in de afvoer).



Totalen van de verschillende termen (balans = 0) voor het hydrologisch jaar 2006

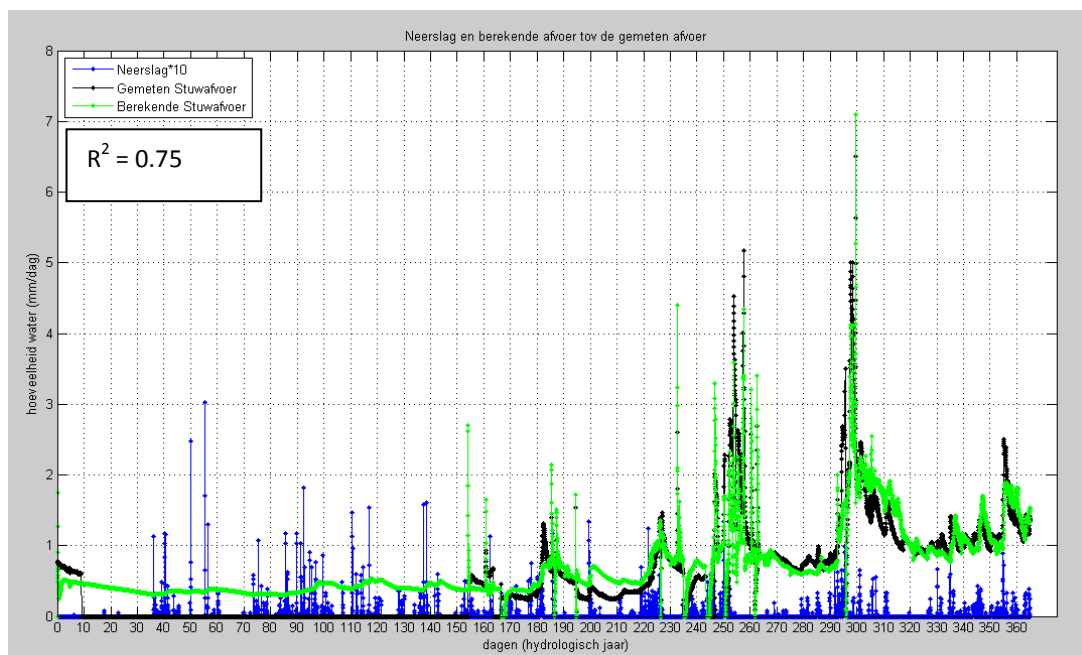
B.3.3. De verschillende deelgebieden



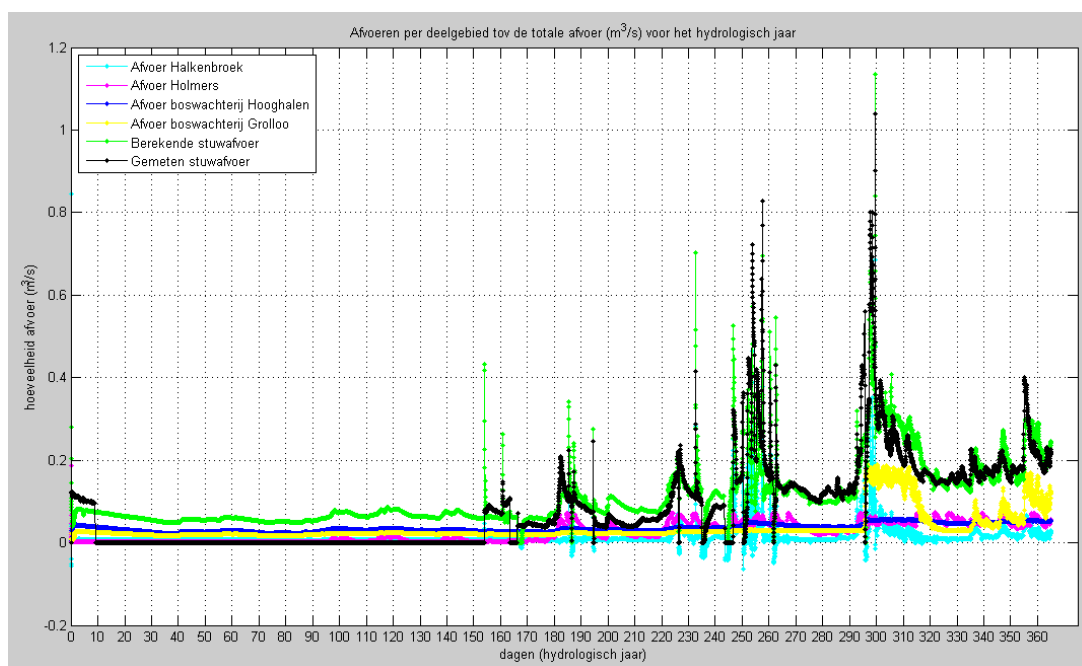
Gemiddelde peilen binnen de verschillende deelgebieden (m tov NAP) voor het hydrologisch jaar 2006

B.4. VALIDATIE NIEUWE SITUATIE ADHV HYDROLOGISCH JAAR 2007

B.4.1. Afvoer

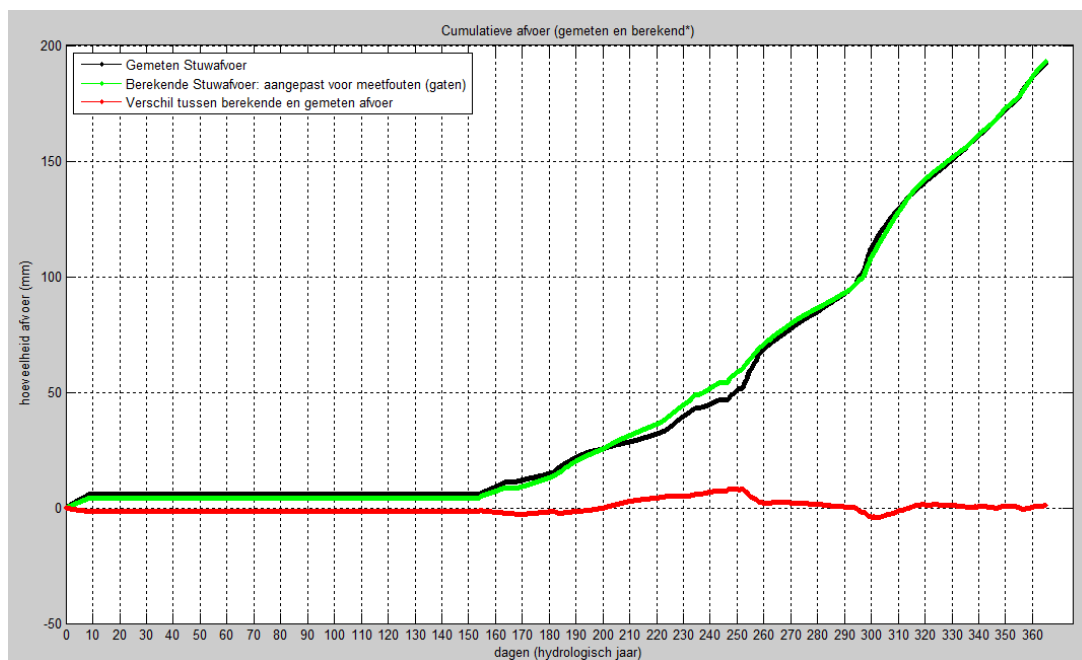


Berekende afvoer ten opzichte van de gemeten afvoer (+ buien) van het hydrologisch jaar 2007 (mm/dag)

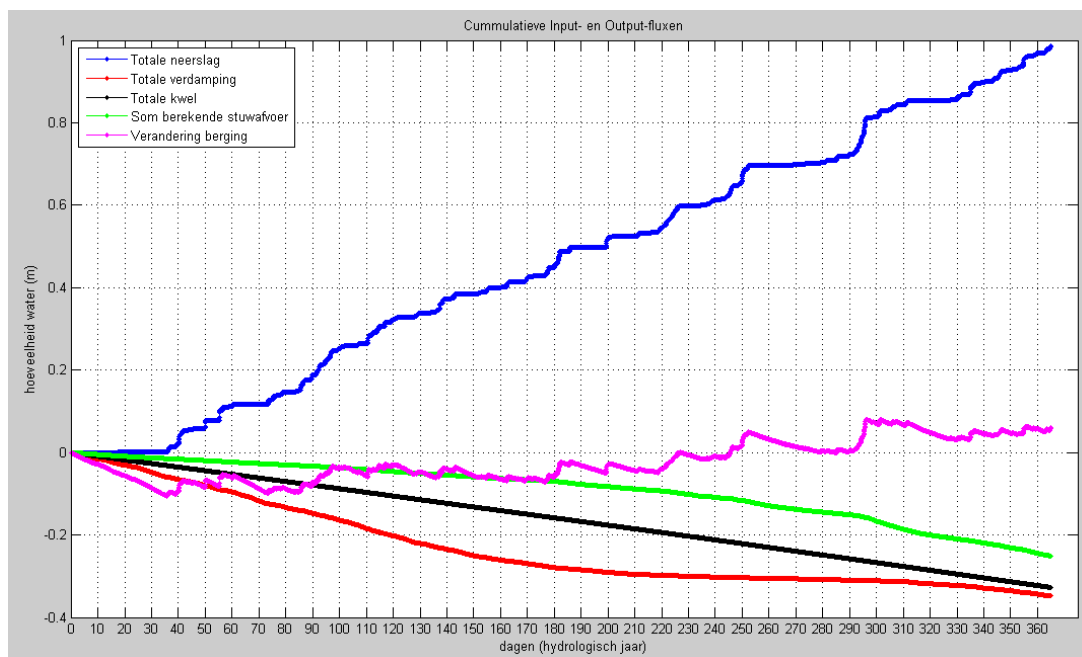


Stuwafvoer met de afvoeren per deelgebied voor het hydrologisch jaar 2007 (m³/s)

B.4.2. Totalen



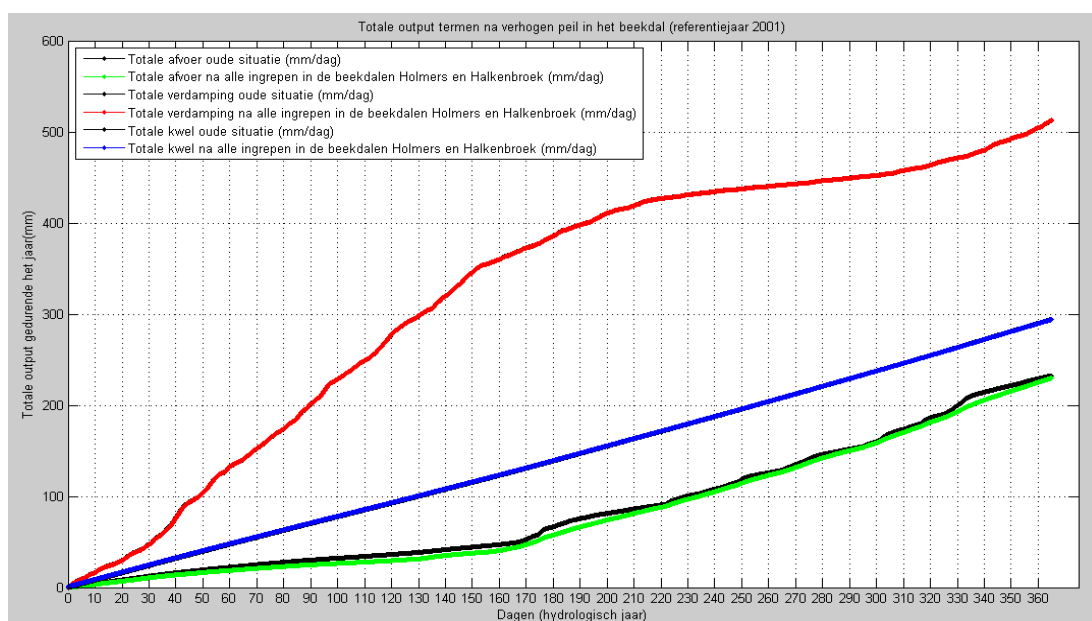
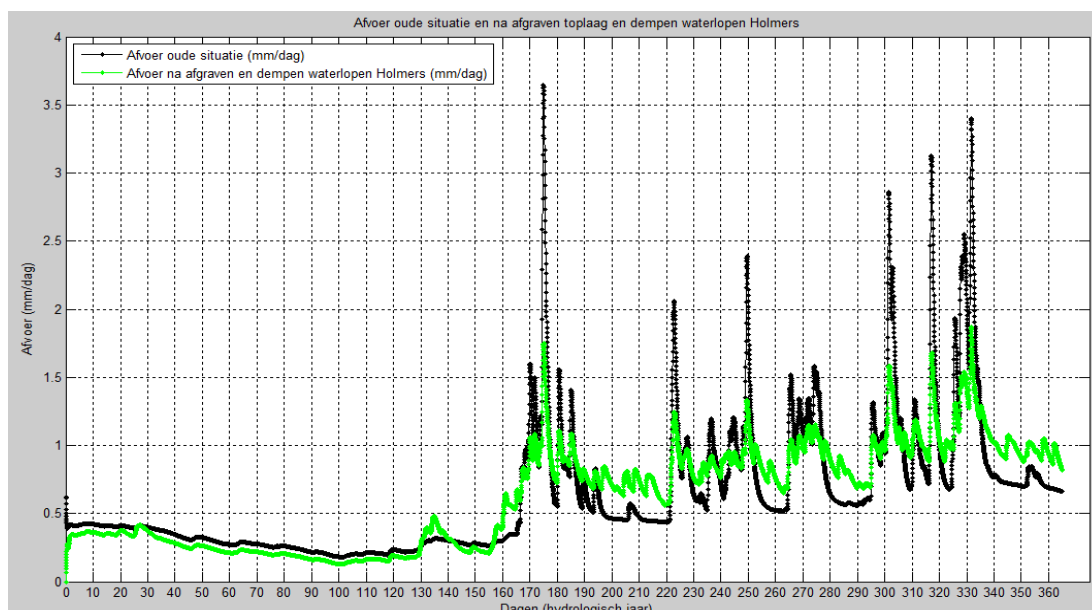
Totale berekende afvoer vergeleken met de totale gemeten afvoer voor het hydrologisch jaar 2007 (waar de grafieken horizontaal lopen zijn de metingen niet goed geregistreerd)



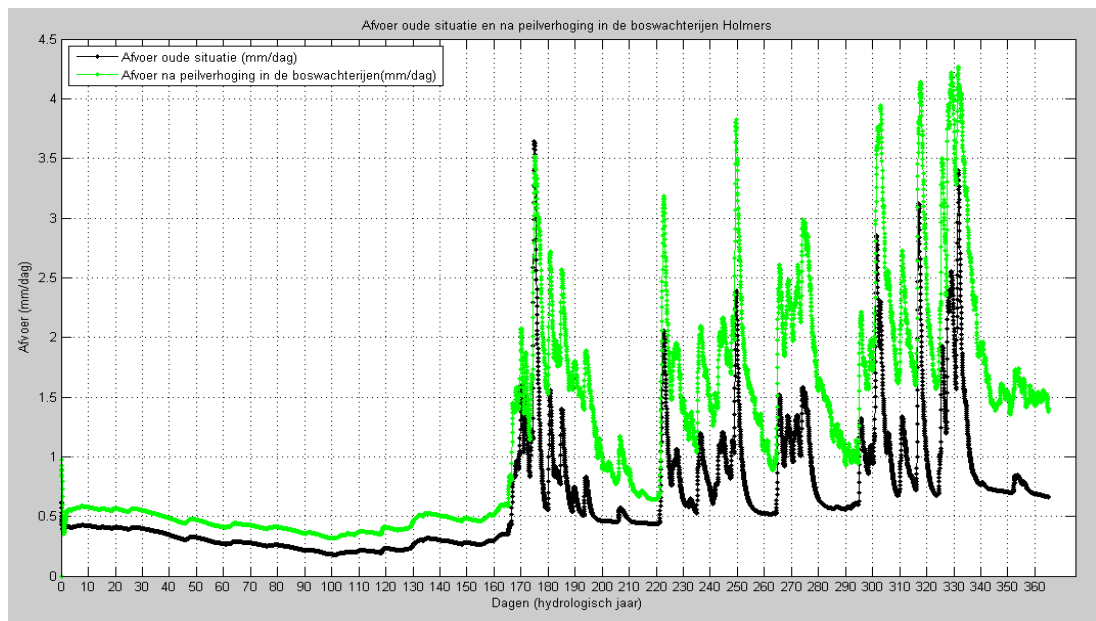
Totalen van de verschillende termen (balans = 0) voor het hydrologisch jaar 2007

BIJLAGE C. RESULTATEN GEVOLGEN INGREPEN

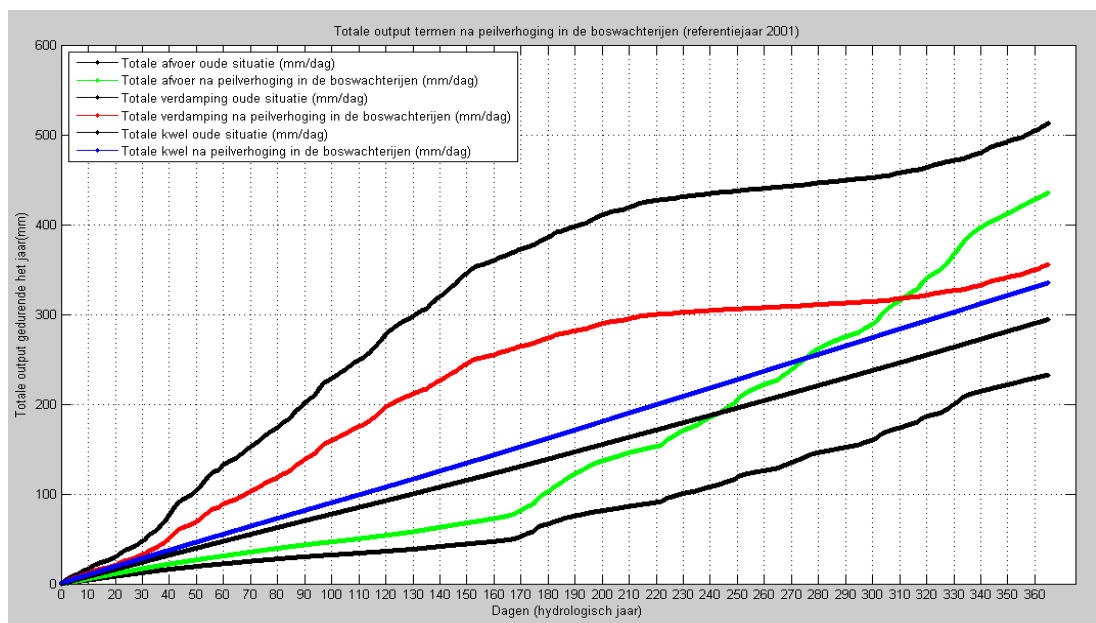
C.1. GEVOLGEN ALLE INGREPEN IN HET BEEKDAL HALKENBROEK/HOLMERS



C.2. GEVOLGEN PEILVERHOOGING IN DE BOSWACHTERIJEN

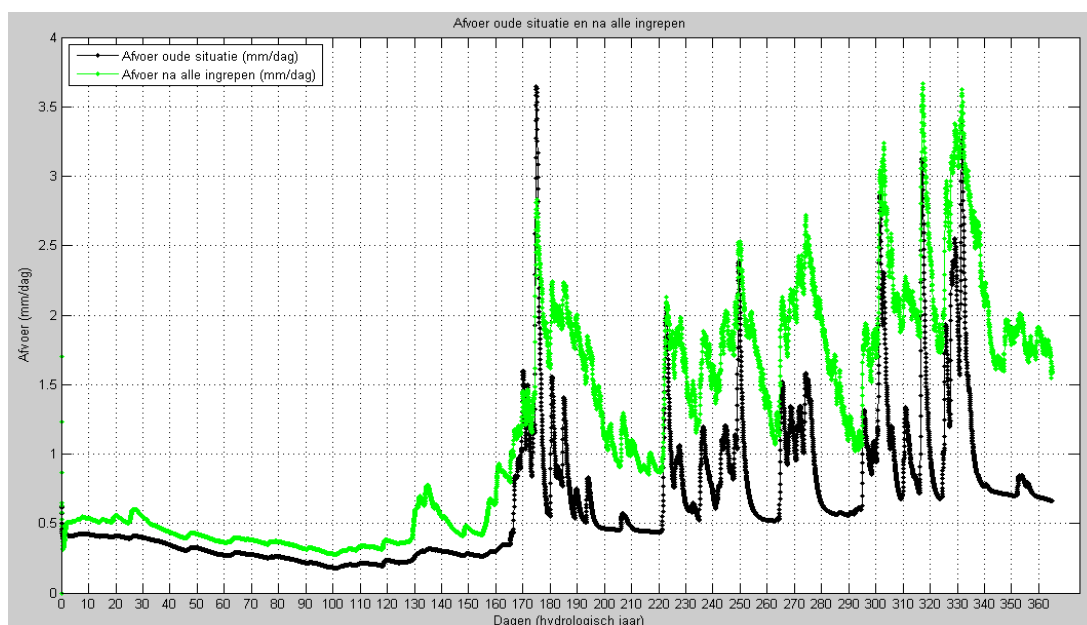


De stuwafvoer in de oude situatie en na de ingrepen in de boswachterijen van Grolloo en Hooghalen (verhogen grondwaterpeil): neerslagdata van hydrologisch jaar 2001

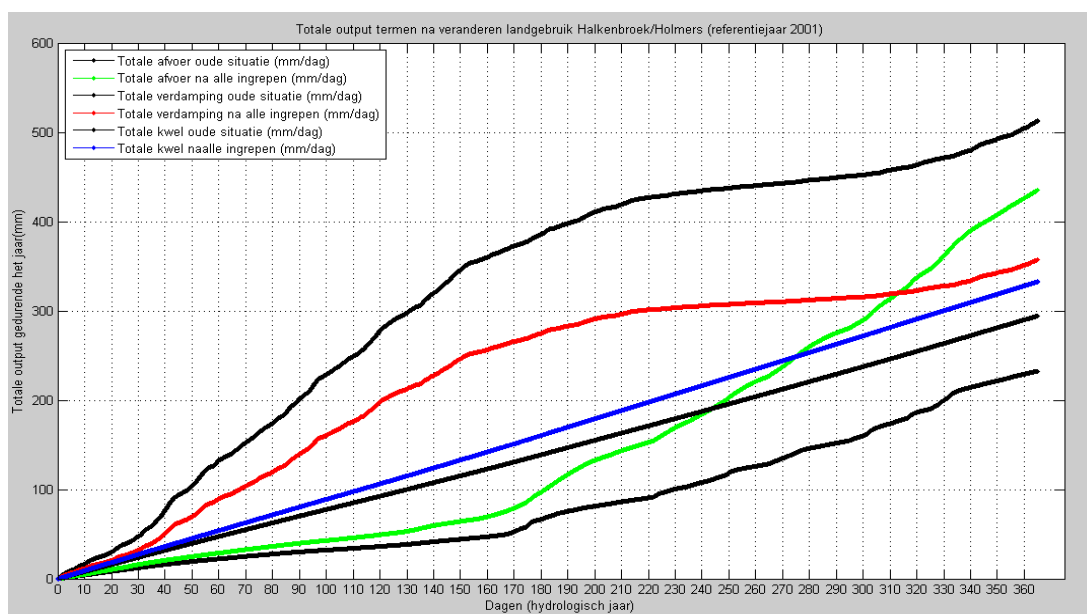


De totale stuwafvoer, verdamping en kwel in de oude situatie en na de ingrepen in de boswachterijen van Grolloo en Hooghalen (verhogen grondwaterpeil): neerslagdata van hydrologisch jaar 2001

C.3. GEVOLGEN VAN ALLE INGREPEN (BEHALVE FLEXIBEL PEILBEHEER) OP DE AFVOER



De stuwafvoer in de oude situatie en na alle toegepaste ingrepen (geen flexibel peil): neerslagdata van hydrologisch jaar 2001



De totale stuwafvoer, verdamping en kwel in de oude situatie en na alle toegepaste ingrepen (geen flexibel peil): neerslagdata van hydrologisch jaar 2001.