

Opdrachtgever:

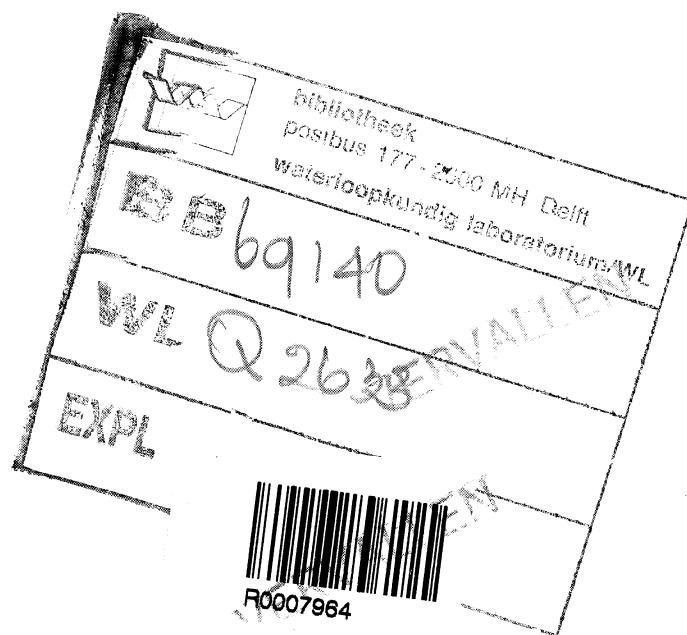
DG Rijkswaterstaat RIZA

HBV-Maas

Uitbreiding voorspellingstijd Borgharen

rapport

september 2000



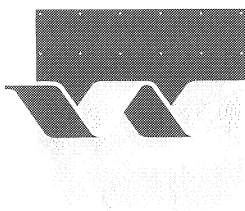
HBV-Maas

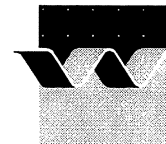
Uitbreiding voorspellingstijd Borgharen

Karin de Bruijn

rapport

september 2000





OPDRACHTGEVER: DG Rijkswaterstaat, RIZA Arnhem

TITEL: Hydrologische Modellerings van de Maas met het HBV model

SAMENVATTING:

De stroomgebieden van de Vesdre, Lesse, Ambleve en de Maas bovenstrooms van Chooz zijn gemodelleerd met het HBV-model. Dit rapport beschrijft de aanpak van de schematisaties, calibraties en validaties van de verschillende stroomgebieden. De resultaten van de modelcalibraties en validaties zijn goed: de hoogte en de timing van de pieken worden goed gesimuleerd. Alle modellen zijn dan ook geschikt om op basis van de beschikbare gegevens de afvoeren op dagbasis te voorspellen.

REFERENTIES: ZWS 0701/00

VER.	AUTEUR	DATUM	OPMERK.	REVIEW	GOEDKEURING
1	Karin de Bruijn <i>KB</i>	13 september 2000		Jaap Kwadijk <i>JK</i>	Eelco van Beek <i>EB</i>

PROJECTNUMMER: Q2633

TREFWOORDEN: Modelleren, HBV, Maas

INHOUD:

TEKST	TABELLEN	FIGUREN	APPENDICES
-------	----------	---------	------------

STATUS: VOORLOPIG CONCEPT DEFINITIEF

Samenvatting

Een van de doelstellingen van het Maasactieplan van 1998 is het verlengen van de zichttijd van de hoogwatervoorspelling voor Borgharen van 12 naar 18 uur. Naar aanleiding hiervan heeft RIZA WL | Delft Hydraulics opdracht gegeven de stroomgebieden van de Vesdre, Lesse en de Amblève te modelleren met het HBV-Model.

Het HBV-model is een conceptueel hydrologisch model voor continue berekening van de afvoer uit een stroomgebied. Het model is opgebouwd uit drie routines (sneeuwroutine, bodemroutine en responsroutine) die samen de processen neerslag, verdamping, infiltratie in de bodem, percolatie naar het grondwater, drainage naar het oppervlakte water en stroming door de waterlopen naar het uitstroompunt van het stroomgebied simuleren.

Voor het ontwikkelen van de modellen van de verschillende stroomgebieden zijn de gebieden geschematiseerd op een eenvoudige wijze. Hierbij zijn binnen de stroomgebieden geen deelstroomgebieden onderscheiden. Wel zijn de gebieden in hoogteklasses ingedeeld en is er onderscheid gemaakt tussen bossen en andere gebieden. Voor de modelinvoer is gebruik gemaakt van de door RIZA aangeleverde meteorologische gegevens. De modellen zijn gecalibreerd op dagbasis voor de periode 1993-1995 en gevalideerd voor de periode 1979-1986.

De resultaten van de modelcalibraties en validaties zijn goed: de hoogte en de timing van de pieken worden goed gesimuleerd. Alle modellen zijn dan ook geschikt om op basis van de beschikbare gegevens de afvoeren op dagbasis te voorspellen. In Tabel 1 is te zien dat de verklaarbare variantie R^2 , een maat voor de kwaliteit van het gecalibreerde model, voor alle gebieden hoger is dan 0.8 wat betekend dat de kwaliteit van de afvoersimulatie goed is.

Tabel 1 Verklaarbare varianties van de gecalibreerde modellen

Gebied	R^2
Lesse	0.89
Amblève	0.91
Vesdre	0.87

Indien men de berekeningen met tijdstappen kleiner dan een dag zou willen maken, is het aan te bevelen om een nadere analyse uit te voeren van de variatie van de neerslag binnen de stroomgebieden. De invloed van de stuwmeren in de Vesdre op de afvoer zal voor deze berekeningen ook beter onderzocht moeten worden.

I Inleiding

In het kader van het Maasactieplan van 1998 is een aantal doelstellingen geformuleerd. Eén van de doelstellingen is het verlengen van de zichttijd van de hoogwatervoorspelling. Voor Borgharen betekent dit een verlenging van 12 naar 18 uur. Naar aanleiding van deze doelstelling worden in dit project enkele kleine stroomgebieden van de Maas gemodelleerd, zodat de bijdrage uit deze stroomgebieden beter voorspeld kan gaan worden.

Voor het modelleren van de stroomgebieden is het HBV-model gebruikt dat is ontwikkeld door het Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Doel van dit project is te verkennen wat de mogelijkheden en resultaten zijn van het modelleren van deze stroomgebieden met het HBV model. Uiteindelijk zou dan het gehele Waalse en Franse deel van het Maasstroomgebied gemodelleerd moeten worden met HBV-modellen. Dit project vormt hiervoor de eerste stap. Het project is uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA Arnhem door WL | Delft Hydraulics. Marc van Dijk is projectleider van het project en de uitvoering is gedaan door Karin de Bruijn.

De doelstelling van het project is:

Het ontwikkelen van HBV-Modellen op dagbasis van de stroomgebieden van de Vesdre, Lesse en de Amblève.

Het project is opgebouwd uit de volgende activiteiten:

1. Het ontwikkelen van een macro waarmee data uit Access 7.0- rechtstreeks kan worden geïmporteerd in het HBV-model.
2. Het ontwikkelen van werkende HBV-modellen van de stroomgebieden van de Vesdre, Lesse en de Amblève
3. Rapportage.

In de volgende hoofdstukken wordt een beschrijving gegeven van het ontwikkelen en de resultaten van de modellen. In hoofdstuk 2 worden de verschillende stroomgebieden kort beschreven. In hoofdstuk 3 wordt het HBV-model toegelicht. Vervolgens wordt in hoofdstuk 4 de schematisatie en calibratie van de modellen beschreven. Hoofdstuk 5 geeft een discussie van de modelresultaten en in hoofdstuk 6 en 7 worden respectievelijk de conclusies en aanbevelingen genoemd.

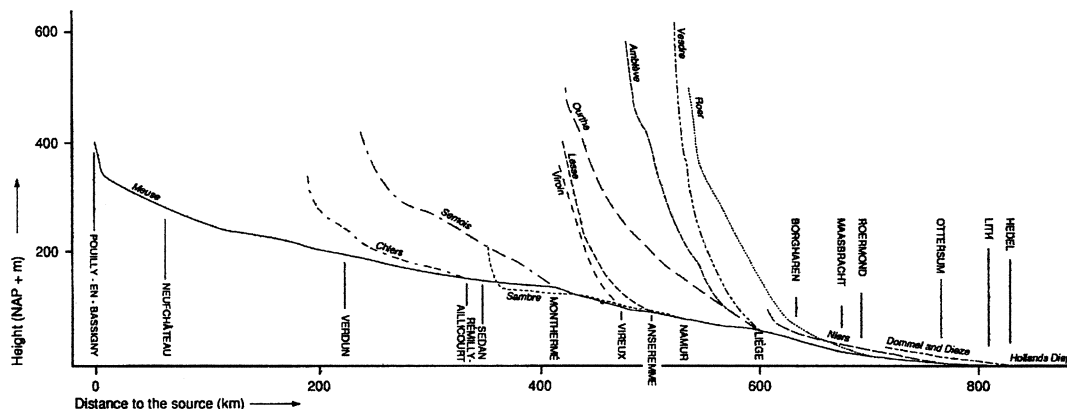
2 Gebiedsbeschrijving

2.1 Het hoogwater regime van de Maas

In het algemeen treden extreme hoogwaters in de Maas te Borgharen bijna uitsluitend op in de winter. Zo'n hoogwater in Nederland kan alleen ontstaan door een combinatie van hoge afvoeren op de Franse Maas en de Waalse zijrivieren en zijn daarom veelal het gevolg van uitgebreide neerslag in een heel groot deel van het stroomgebied. (Min. V&W, 1994). De tijd tussen het moment dat de neerslag valt in het stroomgebied van de Ourthe, Vesdre en Amblève en het moment dat het effect op de afvoer bij Borgharen zichtbaar wordt is zeer kort. Om die reden is het belangrijk om de afvoer uit de kleine zijrivieren van de Maas te voorspellen.

Verder onderzoek naar looptijden en ontstaan van hoogwaters op de Maas is beschreven in Onderzoek Watersnood Maas en valt buiten het kader van dit project.

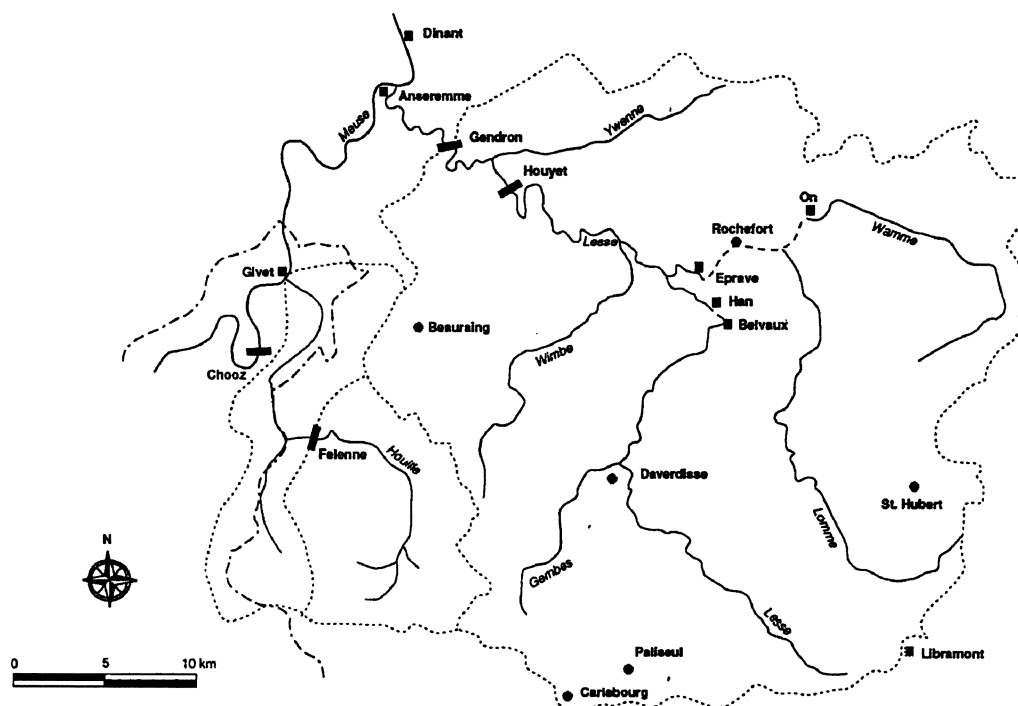
In Figuur 2.1 is de ligging van de stroomgebieden in het stroomgebied van de Maas gegeven en Figuur 2.2 geeft een indruk van de helling van de stroomgebieden.



Figuur 2.2 Weergave van de helling van de verschillende stroomgebieden en de Maas (bron: Min. V&W.,1994)

2.2 De Lesse

Het stroomgebied van de Lesse ligt in de Belgische Ardennen (zie Figuur 2.1.). Het heeft een oppervlakte van ruim 1300 km². Het hoogste punt van het stroomgebied ligt in het oosten op ongeveer 585 m. De Lesse heeft zijn oorsprong op 403 m nabij Libramont en stroomt bij Anseremme (3 km ten zuiden van Dinant) op een hoogte van 89 m uit in de Maas (zie Figuur 2.3). De Lesse heeft een aantal belangrijke zijriviertjes waaronder de Gemme, de Lomme, de Wimbe en de Ywenne. De lengte van de rivier is ongeveer 83 km. De rivier heeft een groot verhang (zie Figuur 2.2), wat een snelle reactie op de neerslag veroorzaakt. In een deel van het stroomgebied is in het Devoon en Carboon kalk afgezet, waarin nu karst is te vinden (Berger, 1992). De Wamme, de Lesse zelf en kleinere zijbeken lopen zelfs voor een deel ondergronds (in Figuur 2.3 zijn deze delen als gestreepte lijnen aangegeven). In het stroomgebied liggen geen reservoirs of meren.

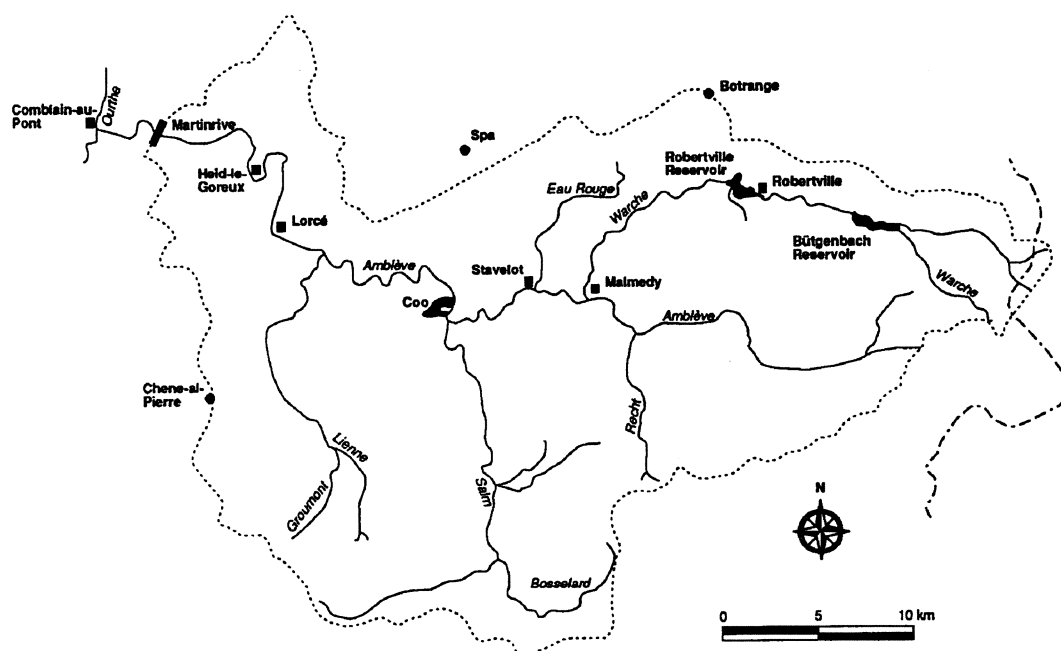


Figuur 2.3 Het stroomgebied van de Lesse (bron: Berger, 1992)

De neerslag in het stroomgebied is niet homogeen verdeeld. In het zuiden valt gemiddeld de meeste neerslag (1250 mm), in het westen de minste (800 mm). Bij St-Hubert valt ook meer neerslag dan gemiddeld (ongeveer 1120 mm) doordat dit gebied relatief hoog ligt.

2.3 De Amblève

De Amblève ligt in de Ardennen niet ver van Luik. Het stroomgebied heeft een oppervlak van ruim 1000 km². De Amblève ontspringt op een hoogte van 584 m bij Rivage en mondt op 108 m uit in de Ourthe, die naar de Maas stroomt. De Hautes Fagne draint deels naar Amblève. De Amblève is ongeveer 88 km lang. Het meetstation ligt 8 km boven de monding bij Martinrive (zie Figuur 2.4). De helling van de rivier is ongeveer 5 m/km; het eerste stuk van de bovenloop is zelfs nog steiler. Een bijzonder stukje van de Amblève zijn de watervallen van Coo: over 70 m bedraagt het verval van de rivier maar liefst 12 m. De zijrivieren Lienne, Salm, Eau Rouge, Warche en Recht maken deel uit van het stroomgebied van de Amblève. Deze lijken sterk op elkaar, en zijn ongeveer even lang. Het stroomgebied wordt gekenmerkt door een snelle reactie op de neerslag. Er liggen 3 reservoirs en een complex van reservoirs voor elektriciteit opwekking in het stroomgebied. Deze worden ook gebruikt voor piekafvoerreductie (berger, 1992). De reservoirs zijn relatief klein (samen hebben ze een volume van ongeveer $35.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (afgeleid uit Berger, 1992)).



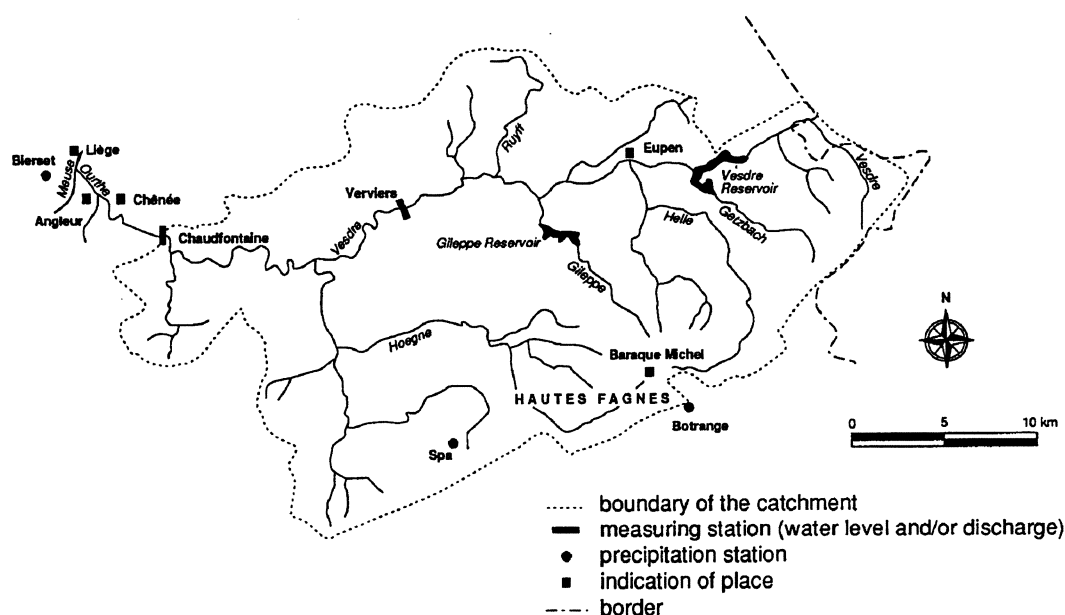
Figuur 2.4 Het stroomgebied van de Amblève (bron: Berger, 1992)

De neerslag in het stroomgebied ligt gemiddeld tussen de 1000 en 1100 mm per jaar, maar kan in het noordoosten wel 1500 mm/jaar bedragen.

2.4 De Vesdre

Ook de Vesdre stroomt uit in de Ourthe. De Vesdre ontspringt heel hoog, op 626 m bij Eupen. In de Vesdre stromen enkele zijrivieren waaronder de Hoegne en Gileppe. De totale rivier is 72 km lang en watert een gebied af van 685 km². Het stroomgebied is niet homogeen. Zo bestaat een deel uit ondoorlatend paleozoïsch gesteente met enkele breuken. Behalve bij die breuken zal er weinig water door kunnen stromen. Ook liggen de Hautes Fagnes in het stroomgebied. Deze venen reageren erg traag op de neerslag. Het stroomgebied wordt in het algemeen gekenmerkt door steile hellingen, waardoor de afvoer snel reageert op de neerslag en in het afvoerloop hoge korte pieken te zien zijn. Heel af en toe overstroomt het benedenstroomse gedeelte van de riviervallei. In het deel boven de 500 m ligt 's winters vaak sneeuw, gemiddeld eens per twee jaar zelfs meer dan 26 cm.

In het stroomgebied liggen ook 2 grote reservoirs (van 25.10⁶ m³ en van 26.10⁶ m³). Een deel van het water uit deze meren wordt gebruikt voor de watervoorziening van Luik (1.74 m³/s) (Berger, 1992). Deze reservoirs hebben als nevensdoel het opvangen van piekafvoeren. De invloed van deze meren op afvoerpieken in het stroomgebied zelf is erg groot (Berger, 1992). Ook de invloed op de pieken in de Maas is aanzienlijk. Na een periode van hoogwater wordt de extra hoeveelheid geborgen water weer uit het reservoir gelaten zodra het peil van de Vesdre gezakt is. Als het peil van de Maas dan hoog is, wordt de piek in de Maasafvoer nog extra verhoogd door de afvoer uit de Vesdre.



Figuur 2.5 Het stroomgebied van de Vesdre (bron: Berger, 1992)

3 Modelbeschrijving

3.1 Inleiding

Het HBV model is een conceptueel hydrologisch model voor continue berekening van de afvoer uit een stroomgebied. Het is ontwikkeld door het Swedish Meteorological and Hydrological Institute in Norrköping, in Zweden (Bergström, 1976).

Het betreft een (nagenoeg) lumped model, wat betekent dat er geen rekening gehouden wordt met ruimtelijke spreiding van variabelen binnen het stroomgebied. Wel kunnen binnen het stroomgebied de deelprocessen neerslag, sneeuwaccumulatie en sneeuwmelt gedistribueerd berekend worden. Hiervoor wordt het stroomgebied ingedeeld in hoogtezones en vegetatiezones (bos/geen bos). De neerslag infiltreert in de bodem, waaruit deze weer kan verdampen of naar het grondwater percoleren. Door middel van lineaire reservoirs met wordt deze laatste stroom vervolgens geconverteerd naar een afvoer.

Als invoer vraagt het model gemeten neerslag, temperatuur en schattingen van de potentiële verdamping. De tijdstap waarmee het model rekent is meestal 1 dag. Voor deze studie is de versie 4.4 van juli 1997 gebruikt.

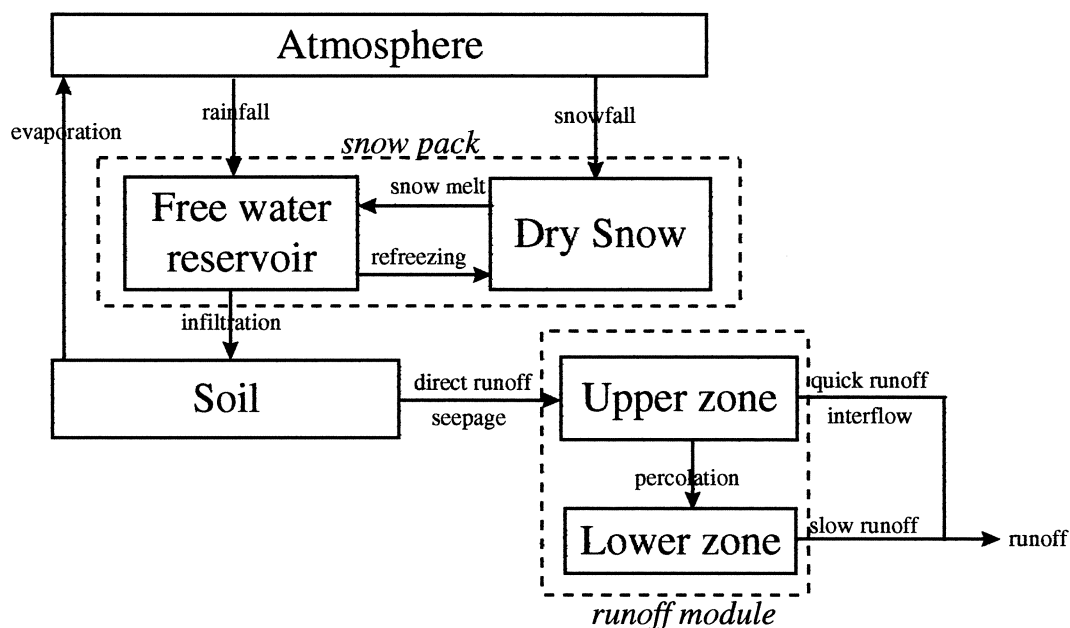
3.2 Componenten van het HBV-model

Het model is opgebouwd uit de volgende routines:

1. *sneeuwroutine* (gedistribueerde routine waarbij het gebied is ingedeeld in hoogtezones)
2. *bodemroutine* (gedistribueerde routine waarbij is ingedeeld in hoogte- en vegetatiezones)
3. *runoff- en transformatieroutine* (de lumped response functie)

Deze routines worden achtereenvolgens besproken in de volgende subparagrafen. Een schematische weergave van het model is afgebeeld in Figuur 3.1.

Met het model kunnen ook gletsjers en meren in het stroomgebied gesimuleerd worden. De parameters en processen hiervoor worden, zoals in de opdracht afgesproken, niet beschreven.



Figuur 3.1 Schematische weergave van het HBV-model.

3.2.1 De sneeuwroutine

Met de sneeuwroutine worden de processen neerslag, sneeuwaccumulatie en sneeuwmelt gesimuleerd. De belangrijkste parameters uit deze routine zijn beschreven in Tabel 3.1

Tabel 3.1 De belangrijkste parameters uit de sneeuwroutine (SMHI, s.a.)

par.	Omschrijving	Default
pcorr	Correctiefactor van de neerslag	1
pcalt	Correctiefactor van de neerslag voor de hoogte: $P = 1 + h * pcalt$ (h is het verschil in hoogte (in honderden meters) tussen het neerslagstation en de betreffende zone)	0.1
tcalt	Temperatuur factor ($^{\circ}C/100$ m)	0.6
tt	Drempelwaarde temperatuur waar onder neerslag valt als sneeuw ($^{\circ}C$)	0
cfmax	Sneeuwmelt factor ($mm/^{\circ}C$)	3.5
focfmax	Factor waarmee cfmax wordt gecorrigeerd voor bos	0.6
cfr	Bevriezingsfactor voor water in sneeuw	0.05
whc	Watervasthoudend vermogen van de sneeuw	0.1

Als invoer gebruikt deze routine de gemeten neerslag en temperatuur. Afhankelijk van de temperatuur valt de neerslag als sneeuw of als regen. Het sneeuwpak wordt verdeeld in twee delen: een deel met droge sneeuw en een water reservoir. De grootte van dat waterreservoir is afhankelijk van de sneeuwdiepte. Raakt het reservoir vol, dan infiltreert de rest van het water in de bodem. Ligt er geen sneeuw, dan infiltreert het regenwater direct in de bodem. Verder kan de droge sneeuw smelten en het smeltwater bevriezen.

De parameters horende bij deze routine beïnvloeden vooral de voorjaarspieken die ontstaan door sneeuwmelt.

3.2.2 De bodemroutine

De bodemroutine simuleert de processen infiltratie, berging in het bodemvocht, percolatie naar het ondiepe grondwater en verdamping. Invoer voor deze module is de hoeveelheid infiltrerend water uit de sneeuwroutine en de opgegeven potentiële verdamping. De uitvoer bestaat uit percolatie naar het grondwater en verdamping.

De grootte van de percolatie en de verdamping is sterk afhankelijk van de hoeveelheid vocht in de bodem. Onder extreem natte condities, wanneer de bodem de maximale hoeveelheid bodemvocht bevat, zullen de percolatie en evapotranspiratie maximaal zijn. Onder normale condities zullen deze een fractie bedragen van dat maximum. Voor verdamping wordt deze fractie bepaald door een lineaire relatie tussen de hoeveelheid bodemvocht en de maximale hoeveelheid bodemvocht en voor de percolatie is dit een exponentiële relatie. De exponent is de modelparameter β . Deze β bepaalt welk deel van de netto neerslag wordt geborgen in de bodem en welk deel naar het grondwater stroomt (zie vergelijking 3.1). De belangrijkste parameters uit deze routine zijn weergegeven in Tabel 3.2.

De hoeveelheid percolatie van de bodem naar het grondwater wordt dus berekend met de formule:

$$\Delta Q / \Delta P = (SM / FC)^\beta \quad (3.1)$$

Met: ΔQ = Effectieve neerslag (mm/dag) (afvoer naar bovenste grondwaterreservoir)

ΔP = Netto neerslag (mm/dag) (geïnfiltreerde neerslag - verdamping)

SM = Bodemvocht hoeveelheid (mm) (actuele hoeveelheid vocht in de wortelzone)

FC = Veld Capaciteit (mm) ((maximale hoeveelheid vocht die opgeslagen kan worden in de bodem)

β = Coëfficiënt (-)

De verdamping wordt berekend door middel van de vergelijkingen:

$$E_a = \frac{SM}{FC} E_p \quad \text{Als } SM < LP \quad (3.2)$$

$$E_a = E_p \quad \text{Als } SM \geq LP \quad (3.3)$$

Met: E_a = Actuele verdamping (mm)

E_p = Potentiële verdamping (mm)

Verder kan de verdamping gecorrigeerd worden voor bossen en voor de hoogte van de betreffende zone. Ook kunnen de processen capillaire opstijging, interceptie en verdamping van interceptiewater gesimuleerd worden. Voor de vergelijkingen hiervan wordt verwezen naar de handleiding (SMHI, s.a.).

Tabel 3.2 De belangrijkste parameters uit de bodemroutine (SMHI, s.a.)

par.	Omschrijving	Default
FC	Maximale hoeveelheid vocht die opgeslagen kan worden in de bodem	300 mm
LP	Grens voor het optreden van evapotranspiratie	< 1
Beta	Bepaald welk deel van de effectieve neerslag tot afvoer komt	3
cflux	Maximale capillaire opstijging vanuit het ondiepe grondwater naar de bodem	1
cevpfo	Correctie factor voor potentiële evapotranspiratie in bossen	1.15
ecalt	Correctiefactor van verdamping voor de hoogte ($e = 1-h*ecalt$)	0.1
icfo	Interceptie bergingscapaciteit in bosgebieden (mm)	1.5
icfi	Interceptie bergingscapaciteit in niet-bos gebieden (mm)	1

De parameters uit de bodemroutine beïnvloeden vooral de zomer- en herfst pieken. De vorm van de afvoerterlooplijn of hydrograaf wordt niet direct beïnvloed door deze parameters. Door *FC* te vergroten raakt de bodem minder snel vol. De reactie van de afvoer op neerslag na een lange droge periode wordt verkleind door β te vergroten.

3.2.3 De runoff- en transformatieroutine

De runoff- en transformatieroutine converteert de hoeveelheid water die uit de bodemroutine komt naar een afvoer. Deze routine bestaat uit twee componenten: het bovenste reservoir dat de snelle afvoercomponent representeert en het onderste reservoir dat de basis afvoer representeert. Het water dat uit de bodem naar het grondwater percoleert komt eerst terecht in het bovenste reservoir en percoleert voor een deel door naar het onderste reservoir. Het bovenste reservoir heeft een hogere reservoircoëfficiënt dan het onderste. De mate van lineariteit in de respons van de afvoer op het volume water in het bovenste reservoir wordt weergegeven door de factor ALFA. Door deze factor te gebruiken kan een situatie gerepresenteerd worden met een continue toenemende recessiecoëfficiënt. (In oudere versies nam de recessiecoëfficiënt stapsgewijs toe, afhankelijk van een bepaalde drempel volume in het bovenste reservoir).

De totale afvoer wordt vervolgens nog getransformeerd door de transformatiefunctie die bestaat uit een eenvoudige filtertechniek met een driehoekige verdeling van de gewichten. De parameter MAXBAS bepaald in deze transformatiefunctie de grootte van het geheugen van het gebied, het geeft de concentratietijd van het stroomgebied.

De belangrijkste vergelijkingen voor de runoff routine zijn:

$$Q_0 = k \cdot UZ^{(1+ALFA)} \quad (3.4)$$

$$Q_1 = k_4 \cdot LZ \quad (3.5)$$

Met:

Q_0 = Afvoer uit het bovenste reservoir (Upper Zone) (m^3/s),

Q_1 = Afvoer uit het onderste reservoir (Lower Zone) (m^3/s),

ALFA = maat voor de niet-lineariteit van het bovenste reservoir

k = Reservoircoëfficiënt van het bovenste reservoir

k_4 = Reservoircoëfficiënt van het onderste reservoir

UZ = Volume water in het bovenste reservoir (Upper Zone)

LZ = Volume water in het onderste reservoir (Lower Zone)

De belangrijkste parameters uit deze routine zijn samengevat in Tabel 3.3. Deze parameters bepalen de vorm van de hydrograaf en niet direct het volume. KHQ, HQ en ALFA bepalen de uitzakking van de pieken, $k4$ en maxbas de uitzakking van de basisafvoer. Met *perc* wordt de hoogte van de basisafvoer geregeld.

Tabel 3.3 De belangrijkste parameters uit de respons routine

par.	Omschrijving	Default
KHQ	De reservoircoëfficiënt bij een afvoer gelijk aan HQ	0.17
HQ	De hoogte van de afvoer waarbij bovenstaande KHQ geldt	3
ALFA	Mate van niet-lineariteit	1
k4	Reservoircoëfficiënt laagste reservoir (diepe grondwater)	0.04
perc	Water dat van bovenste naar onderste reservoir percoleert (mm/dag)	1.2
maxbas	Aantal dagen in de transformatie routine	1

4 Schematisatie en calibratie van de modellen

4.1 Werkwijze bij het ontwikkelen van de modellen

De modellen van de verschillende stroomgebieden zijn allemaal op een vergelijkbare manier ontwikkeld. Bij deze ontwikkeling zijn de volgende stappen doorlopen:

1. Schematisatie
2. Keuze calibratie- en validatieperiode
3. Analyse van de neerslagtijdreeksen van de verschillende meetstations
4. Het bepalen van het totale verschil tussen de berekende en gemeten afvoeren over 3 jaar
5. Calibratie op basis van hydrografen; 'goodness of fit' volgens Nash & Sutcliff (1970)
6. Validatie

Deze stappen worden hieronder kort beschreven.

1. De basisschematisatie van de stroomgebieden is op een zeer eenvoudige wijze aangepakt: Voor de hoogte en vegetatie zijn de door RIZA aangeleverde hoogteklasses en vegetatie-indeling (bos/geen bos) ingevoerd (RIZA, 2000). Meren, reservoirs, watervallen en andere bijzonderheden zijn, zoals in de opdracht afgesproken, niet apart geschematiseerd. Ook is binnen de stroomgebieden geen onderscheid gemaakt tussen deelstroomgebieden.
2. Het uiteindelijke doel van de modellen is in eerste instantie het goed voorspellen van de afvoerpieken, om zo een bijdrage te leveren aan de voorspelling van de hoogwaters bij Borgharen. Echter, om vertrouwen te wekken bij de gebruiker moeten ook de overige lagere afvoeren redelijk goed voorspeld worden. Bij de calibratie en validatie is dus niet specifiek gelet op natte perioden en afvoerpieken. Als calibratieperiode is periode van 1 november 1992 tot en met 31 oktober 1995 gebruikt. Deze periode is gekozen, omdat bekend is dat er in 1993 en 1995 extreem hoge afvoeren op de Maas zijn opgetreden.

De modellen van de verschillende stroomgebieden zijn gevalideerd voor de periode 1-1-1979 tot en met 31-12-1986. Uit de analyse van de gemeten afvoeren van enkele meetstations bleek dat deze periode vrij nat was en dat er enkele hoge piekafvoeren in optraden. Bovendien is er van alle afvoer- en meteorologische meetstations voor de hele periode data beschikbaar .

3. De invoer voor de modellen (neerslag, verdamping en temperatuur) bestaat uit de metingen ter plaatse van één of meer meteorologische meetstations. De keuze van de meetstations is gedaan door RIZA. Voor het stroomgebied van de Amblève is slechts één neerslagstation beschikbaar. In de stroomgebieden van de Lesse en de Vesdre liggen twee meteorologische stations binnen of zeer dichtbij het stroomgebied. Aan deze meteorologische stations moeten in het HBV-model gewichten toegekend worden, zodat de puntwaarnemingen ter plaatse van die meetstations omgezet kunnen worden in

gebiedswaarden. Om dit op een redelijke manier te kunnen doen zijn eerst de neerslaggrafieken (dagneerslag en cumulatieve dagneerslag) bekeken (zie volgende paragraaf) en is globaal de oppervlakte van het deel van het stroomgebied welke het dichtst bij het betreffende station ligt, bepaald (Thiesenpolygonen). Ook is gekeken naar de hoogteverdeling in het stroomgebied en de hoogteligging van de neerslagstations. Op basis hiervan is een inschatting van de gewichten gemaakt. Bij het vergelijken van de gemeten en berekende afvoer over een periode van 3 jaar, zijn de gewichten indien nodig nog iets aangepast. De resultaten van deze analyse worden per stroomgebied besproken in de volgende paragrafen.

4. Vervolgens is een modelrun gedaan om het verschil tussen de totalen van de gemeten en berekende afvoeren over de calibratieperiode te bepalen. Door de gewichten van de neerslagstations iets aan te passen en eventueel een correctie op de neerslag toe te passen of de neerslag-hoogte relatie te wijzigen is dit verschil verkleind tot een verschil kleiner dan 5 %.
5. In eerste instantie zijn voor de modelparameters de defaultwaarden ingevoerd. Daarna is gecalibreerd op basis van de visuele vergelijking tussen gemeten en berekende afvoerverlopen in de tijd en de verklaarbare variantie, R^2 . Deze verklaarbare variantie geeft aan in welke mate het model in staat is om afvoeren te voorspellen op basis van de ingevoerde neerslag, verdamping en temperatuur. Volgens de methode van Nash en Sutcliffe (1970) wordt deze variantie berekend zoals aangegeven in vergelijking 4.1. Wanneer het model de werkelijkheid exact representeert is R^2 gelijk aan 1. Indien de kwaliteit van de gemeten data goed is kan bij een goede calibratie een R^2 gevonden worden die tussen de 0.8 en de 0.95 ligt.

$$R^2 = \frac{\sum (Q_r - Q_{r(mean)})^2 - \sum (Q_c - Q_r)^2}{\sum (Q_r - Q_{r(mean)})^2} \quad (4.1)$$

Met:	R^2	= Verklaarbare variantie (-)
	Q_R	= Gemeten afvoer (m^3/s)
	Q_C	= Berekende afvoer (m^3/s)
	$Q_{R(mean)}$	= De gemiddelde gemeten afvoer over de calibratieperiode (m^3/s)

De calibratie is gedaan op basis van hydrologische inzichten: steeds zijn de gemeten en berekende afvoeren vergeleken en is op basis van de verschillen een bepaalde parameter aangepast. Dit is gedaan tot verdere aanpassingen nauwelijks meer verbeteringen gaven. Bij het calibreren is er op gelet dat de waarden binnen de door SMHI opgegeven ranges vielen (zie Tabel 4.10) en dat de waarden fysisch gezien logisch leken.

6. Voor de validatie is gekeken naar de verschillen in gemeten en berekende afvoeren en is opnieuw de verklaarbare variantie R^2 berekend. Bij de validatie zijn de beginvoorwaarden (initiële condities) niet aangepast, al hoewel begonnen is in een andere maand dan bij de calibratie.

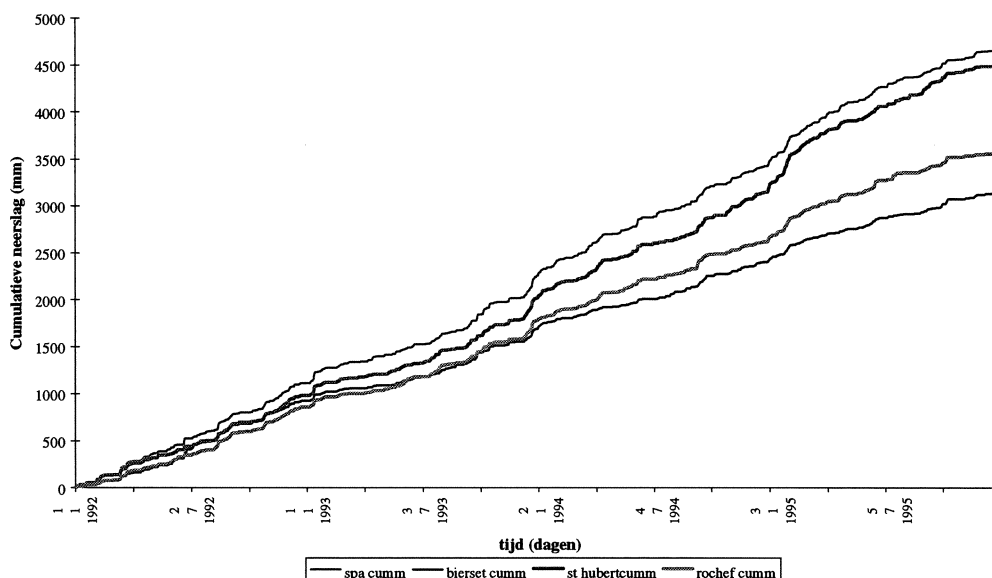
In de volgende paragrafen worden eerst de analyse van de neerslagreeksen beschreven en vervolgens worden per stroomgebied de schematisatie, calibratie en validatie besproken.

4.2 Analyse van de neerslagtijdreeksen

Om een beter beeld van de ruimtelijke spreiding van de neerslag te krijgen zijn de meetreeksen van de verschillende stations geanalyseerd. In Figuur 4.1 is de grafiek weergegeven met de cumulatieve neerslag over de hele calibratieperiode. Uit deze grafiek is te zien dat de verschillen in de hoeveelheden geaccumuleerde neerslag aanzienlijk zijn. In totaal viel er ter plaatse van de stations Spa en St-Hubert meer neerslag dan bij de andere stations. St-Hubert ligt erg hoog (zie Tabel 4.2), wat de hoge neerslag kan verklaren. Spa ligt echter een stuk lager (279 m). Bierset heeft de laagste neerslag.

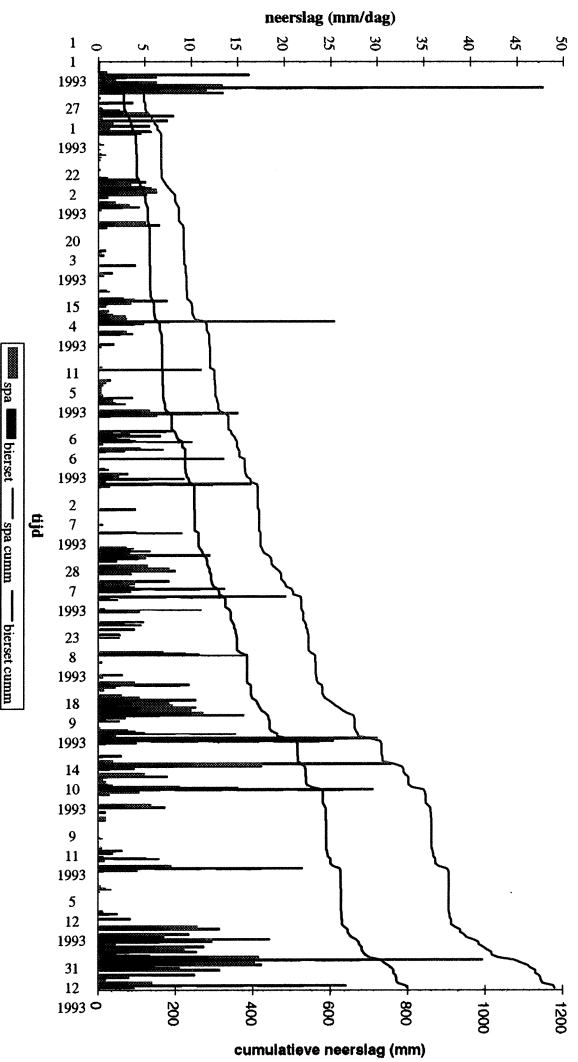
Tabel 4.2. Hoogte neerslagstations

Station	Hoogte (m t.o.v. NAP)
Bierset	191
Rochefort	193
St-Hubert	556
Spa	279



Figuur 4.1 Cumulatieve dagneerslag over de periode 1992-1995 van de verschillende neerslagstations

In de Figuren 4.2 is de dagneerslag van 1993 weergegeven om te laten zien dat de hoogte van de pieken erg kan verschillen. Soms bedragen de verschillen ruim 20 mm. Uit deze grafieken blijkt dat de timing van de neerslag bij de verschillende neerslagstations wel redelijk overeenkomt.



Figuur 4.2 Dagneerslag en cumulatieve neerslag over 1993 bij Bierset en Spa

Ook is de correlatie op dagbasis berekend voor de calibratie- en validatieperiode. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabellen 4.3 en 4.4. Uit deze tabellen blijkt dat de correlatie tussen de verschillende stations vrij goed is (in het algemeen hoger dan 0.7). Dit betekent dat de neerslag op de verschillende meetlocaties ongeveer op dezelfde tijdstippen valt en in vaste verhoudingen. De homogeniteit van de neerslag lijkt dus redelijk te zijn, waardoor de vertaling van punt- naar stroomgebiedsneerslag waarschijnlijk ook redelijk betrouwbaar is. Wel is de correlatie tussen de neerslagstations in de calibratieperiode hoger dan in de validatieperiode. In de periode 1979-1986 viel de regen blijkbaar iets meer gevarieerd. Dit verkleint de betrouwbaarheid van de neerslagstations als representatieve punten voor het gehele stroomgebied. De correlatiewaarden zijn echter ook in de validatieperiode nog hoog.

Tabel 4.3 Correlatiematrix van de verschillende neerslagstations berekend over de calibratieperiode

Naam	Bierset	Rochefort	Spa	St-Hubert
Bierset	1.0000	.81	.91	.84
Rochefort	.81	1.0	.87	.90
Spa	.91	.87	1.0	.89
St-Hubert	.84	.90	.89	1.0

Tabel 4.4 Correlatiematrix van de verschillende neerslagstations berekend over de validatieperiode

Naam	Bierset	Rochefort	Spa	St-Hubert
Bierset	1.0	.75	.81	.72
Rochefort	.75	1.0	.76	.84
Spa	.81	.76	1.0	.79
St-Hubert	.72	.84	.79	1.0

4.3 De Lesse

4.3.1 Schematisatie en meteorologische invoer

Voor het schematiseren van de Lesse is de hoogte- en vegetatieclassificatie van het stroomgebied gebruikt zoals weergegeven in Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Oppervlakte per hoogte- en vegetatieklasse en percentage bos voor de Lesse (RIZA, 2000)

Hoogte	Opp. (km ²)	Opp Bos. (km ²)	% Bos
110-199	152	52.5	34.6
200-299	399	161.4	40.5
300-399	406	240.7	59.3
400-499	288	176.1	61.2
500-560	66	50.1	75.9
total	1311	680.8	51.9

Voor de invoerdata van de Lesse zijn de meteorologische meetwaarden van de stations St-Hubert en Rochefort gebruikt. Zoals in de gebiedsbeschrijving beschreven staat, is de neerslag in het stroomgebied niet homogeen verdeeld. In het zuiden valt meer dan in het westen. Ook bij St-Hubert valt veel neerslag door de hoge ligging. In de Figuren 4.1, 4.2 en staan de cumulatieve en dagneerslag van de beide stations over de gehele calibratieperiode en 1993 gegeven. In deze figuren is te zien dat de verschillen van de pieken groot zijn. Hierdoor zijn de wegingsfactoren erg belangrijk voor de afvoerberekeningen. Een nadere analyse van de neerslagverdeling met meerdere meetstations is daarom aan te bevelen.

Op basis van de oppervlakte van het deel van het stroomgebied dat het dichtst bij Rochefort respectievelijk St-Hubert ligt en de hoogteligging van de stations zijn de volgende gewichten toegekend: St-Hubert, gelegen op 556 m heeft een gewicht gekregen van 0.25 en Rochefort van 0.75.

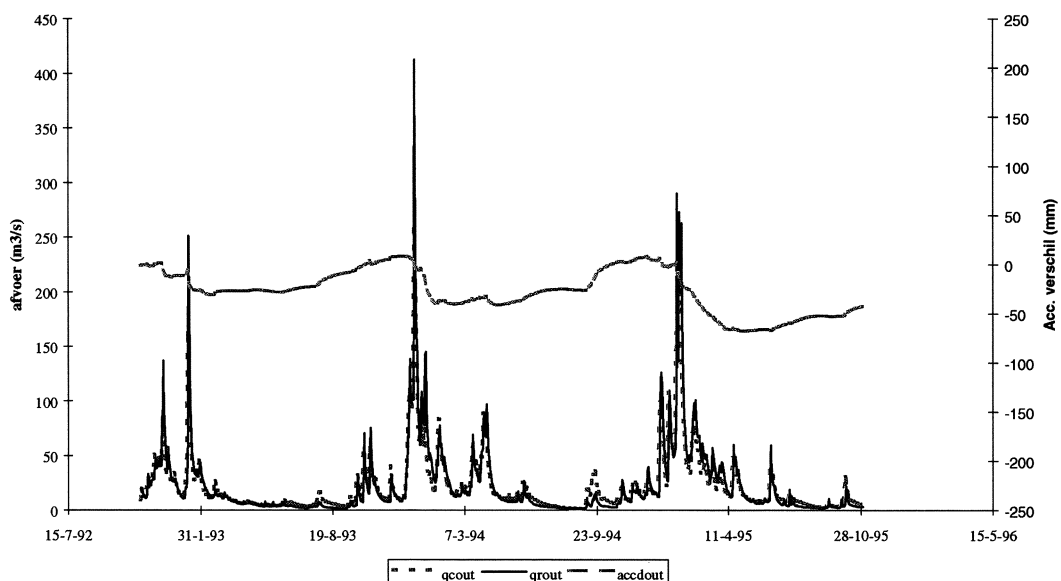
4.3.2 Calibratie resultaten

Bij de calibratie zijn de berekende afvoeren vergeleken met de afvoer gemeten bij Gendron (zie Figuur 2.3). De gecalibreerde waarden van de parameters zijn aangegeven in Tabel 4.6. Ook de beginvoorwaarden: de hoeveelheid water in de bodem en de twee grondwaterreservoirs zijn tijdens de calibratie aangepast. Deze beginvoorwaarden hebben een grote invloed op de afvoeren voor de eerste drie maanden van de rekenperiode.

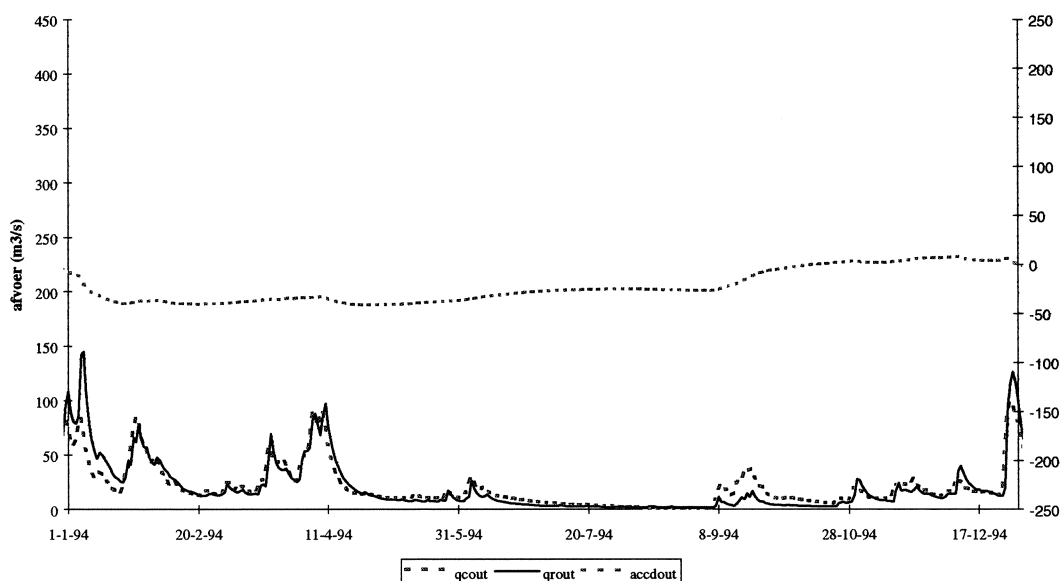
Tabel 4.6 Defaults en nieuwe waarden van de parameters voor de Lesse

Par.	Omschrijving	Def.	Waarde
pccorr	Correctiefactor van de neerslag	1	1
pcalt	Correctiefactor van de neerslag voor de hoogte (per 100m)	0.1	0.1
tcalt	Correctiefactor van de temperatuur voor de hoogte (°C/100m)	0.6	0.6
tt	Temperatuur waaronder neerslag valt als sneeuw (°C)	0	-0.1
cfmax	Sneeuwsmelt factor (mm/°C)	3.5	3.5
focfmax	Factor waarmee cfmax wordt vermenigvuldigd voor bos	0.6	0.6
FC	Maximale hoeveelheid die opgeslagen kan worden in de bodem (mm)	300	210
lp	Grens voor potentiële evapotranspiratie	1	1
Beta	Bepaalt welk deel van de effectieve neerslag tot afvoer komt	3	2.8
KHQ	Reservoircoëfficiënt bij de afvoer HQ	0.17	0.15
HQ	Afvoer waarvoor geldt dat $k = KHQ$	3	3.5
k4	Reservoircoëfficiënt laagste reservoir (diepe grondwater)	0.04	0.05
ALFA	Mate van niet-lineariteit van het bovenste reservoir	1	0.5
perc	water dat van ondiep naar diep grondwater percoleert (mm/dag)	1.2	1
maxbas	Aantal dagen in de transformatie routine	1	2
cflux	Maximale capillaire opstijging vanuit het ondiepe grondwater naar de bodem	1	0.9
cevpfo	Correctiefactor voor potentiële evapotranspiratie in bossen	1.15	1.15
ecalt	Verdamping correctiefactor voor de hoogte : $e = 1-h*ecalt$	0.1	0.1
icfo	Interceptie bergingscapaciteit in bosgebieden (mm)	1.5	1.5
icfi	Interceptie bergingscapaciteit in niet-bos gebieden (mm)	1	1

Tijdens de calibratie zijn met name de FC, alfa, reservoircoëfficiënten aangepast. In Figuur 4.3 is te zien dat het model het verloop van de afvoer goed simuleert. De timing is zeer goed en ook de hoogte van de afvoer pieken wordt redelijk gehaald. De hoogste pieken worden iets onderschat, maar het verschil in volume is zeer klein. De lijn die het cumulatieve verschil tussen de gemeten en berekende afvoeren aangeeft (accdout) loopt iets af, maar het totale verschil bedraagt slechts 42 mm (2.5 %).

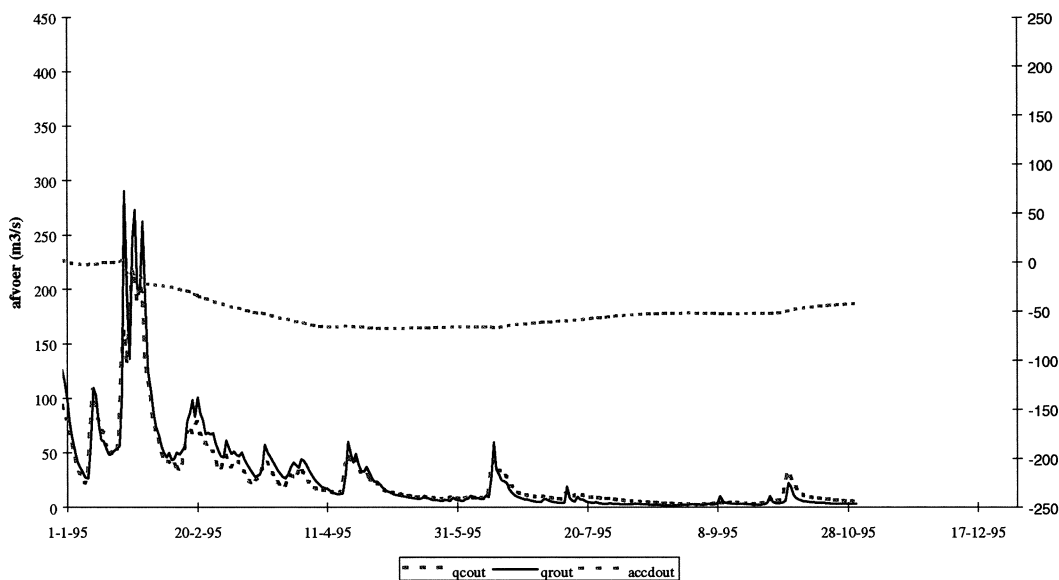


Figuur 4.3 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Lesse over november 1993 t/m oktober 1995



Figuur 4.4 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Lesse over 1994

Ook de resultaten van de jaren 1994 en 1995 lijken erg goed (Figuur 4.4 en Figuur 4.5).



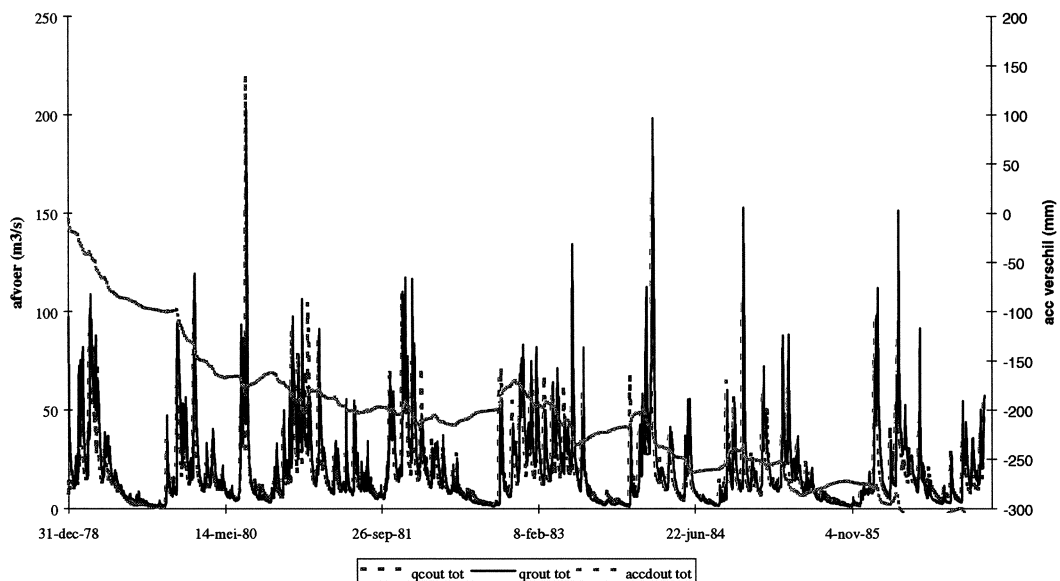
Figuur 4.5 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Lesse over 1995

De berekende verklaarbare variantie R^2 over de hele rekenperiode inclusief de eerste paar maanden kwam uit op 0.89, wat betekend dat de calibratie van het model goed is. De afvoeren van de eerste paar maanden worden erg beïnvloed door begin voorwaarden, die natuurlijk onmogelijk de werkelijke begin situatie goed kunnen weergeven. Indien de R^2 berekend zou zijn zonder deze eerste maanden mee te nemen, zou de R^2 waarschijnlijk nog hoger geworden zijn.

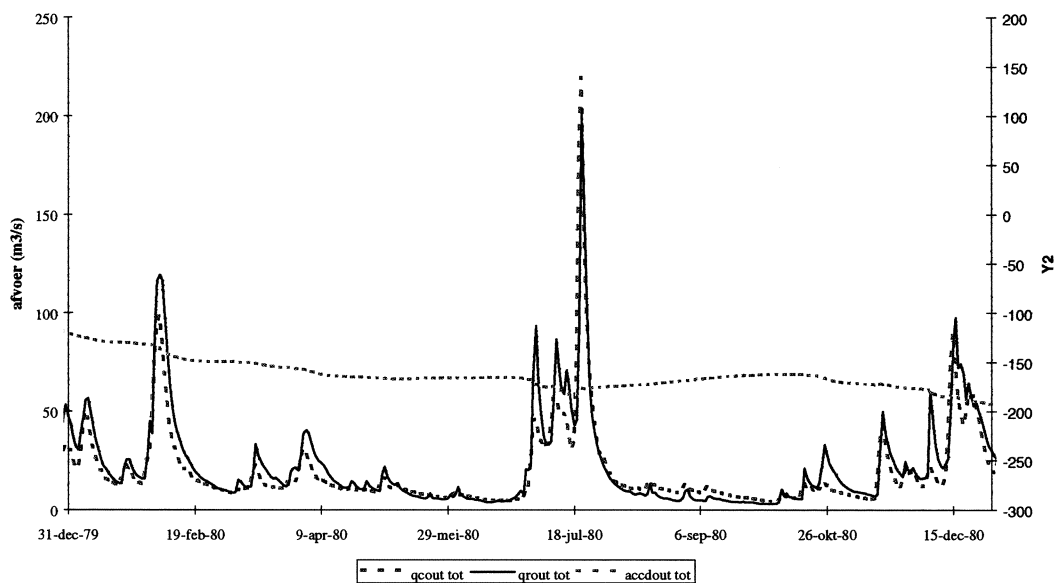
4.3.3 Validatieresultaten

Zoals in de onderstaande grafieken te zien is, zijn de validatieresultaten van de Lesse erg goed. De timing van de pieken en de uitzakking van de pieken is in het algemeen goed en ook de hoogte van de pieken wordt redelijk gesimuleerd. Op enkele momenten wordt de hoogte van de pieken soms iets over- of onderschat maar zeker qua volume afvoer zijn de verschillen minimaal (Figuren 4.6, 4.7 en Figuur 4.8).

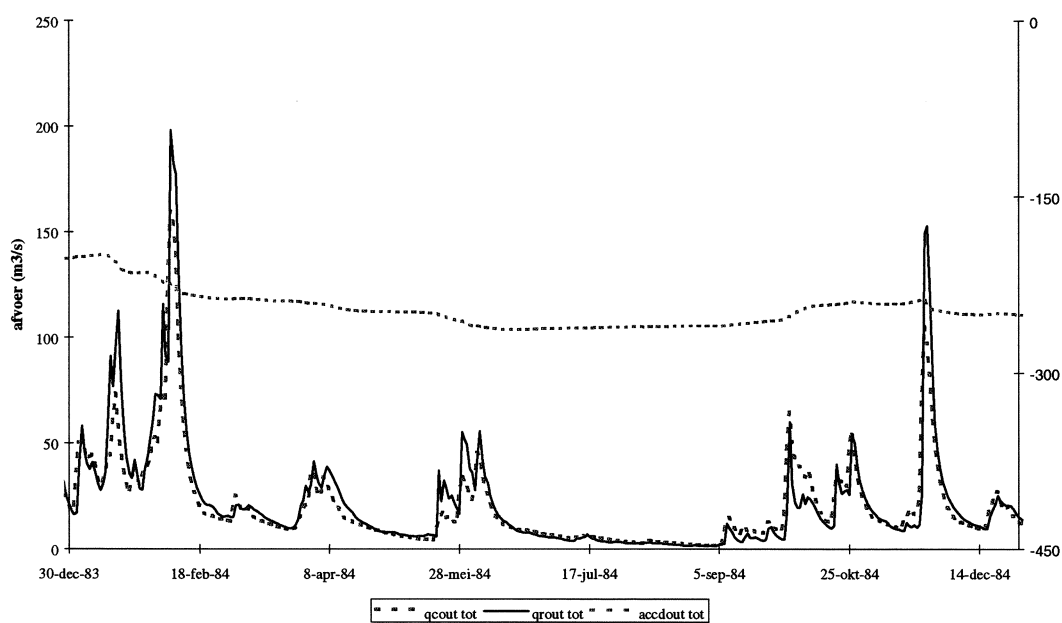
De verklaarbare variantie, R^2 is 0.82, wat goed is, zeker gezien het feit dat deze weer berekend is over de gehele rekenperiode inclusief de slechtere inlooperperiode, waarin een verschil tussen gemeten en berekende waarden ontstaat als gevolg van verkeerde initiële voorwaarden. Het cumulatieve verschil tussen de gemeten en berekende afvoer over de hele periode is 331 mm (8 %).



Figuur 4.6 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerloop in de Lesse over de totale validatie periode



Figuur 4.7 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Lesse over 1980



Figuur 4.8 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Lesse over 1984

4.4 De Amblève

4.4.1 Schematisatie en meteorologische invoer

Voor de schematisatie van de Amblève is de indeling in hoogte en vegetatieklassen gebruikt zoals weergegeven in Tabel 4.7. Zowel de reservoirs in het stroomgebied, als de watervallen van Coö zijn in de schematisatie niet expliciet meegenomen.

Als invoer voor de meteorologische gegevens, zijn alleen de gemeten reeksen bij Spa beschikbaar. Door alleen die reeksen te gebruiken, wordt de neerslagspreiding in het stroomgebied (in het oosten valt meer neerslag) niet meegenomen. Ook is Spa waarschijnlijk voor met name de kortere hevige buien in het stroomgebied geen representatief station, omdat het station buiten het stroomgebied ligt. Bij neerslag op dagbasis zoals in deze studie gebruikt is, zijn de afwijkingen naar verwachting gering.

Tabel 4.7 Oppervlakte per hoogte- en vegetatieklasse en percentage bos voor de Amblève (RIZA, 2000)

Hoogte	Opp. (km ²)	Opp Bos. (km ²)	% Bos
111-199	15	4.8	31.8
200-299	82	32.2	39.2
300-399	175	85.3	48.8
400-499	382	164.9	43.1
500-599	356	158.0	44.4
600-665	43	17.3	40.3
total	1053	462.5	43.9

4.4.2 Calibratie resultaten

Voor de calibratie zijn de afvoeren gemeten bij Martinrievé gebruikt. Bij deze calibratie zijn de parameters gewijzigd tot de waarden in Tabel 4.8.

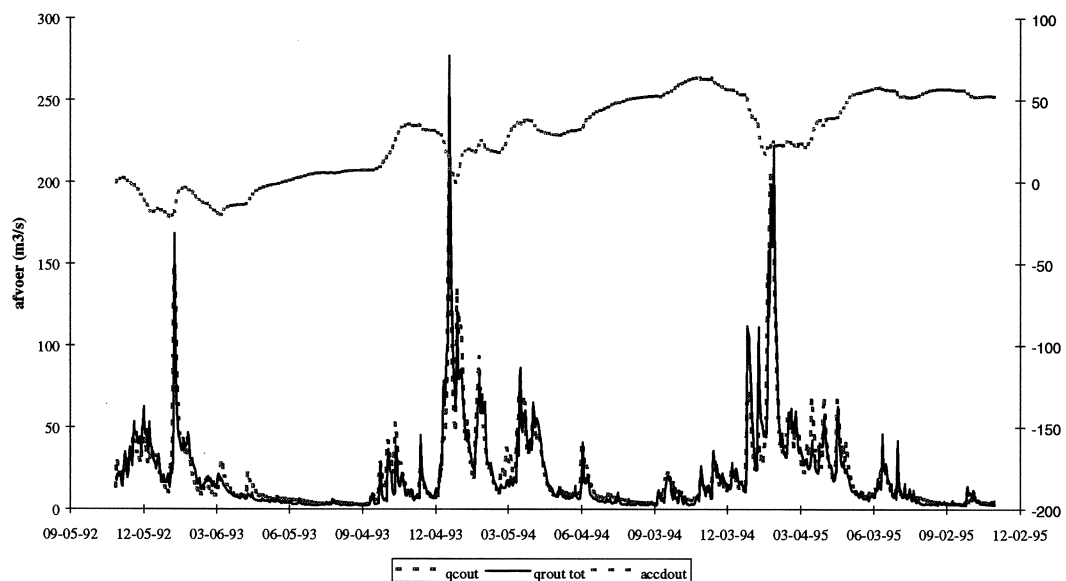
Tabel 4.8 Defaultwaarden en nieuwe waarden van de parameters voor de Amblève

Par.	Omschrijving	Def.	Waarde
pcorr	Correctiefactor van de neerslag	1	0.88
pcalt	Correctiefactor van de neerslag voor de hoogte (per 100m)	0.1	0.1
tcalt	Correctiefactor van de temperatuur voor de hoogte (°C/100m)	0.6	0.6
tt	Temperatuur waaronder neerslag valt als sneeuw (°C)	0	-0.1
cfmax	Sneeuwsmelt factor (mm/°C)	3.5	3.5
focfmax	Factor waarmee cfmax wordt vermenigvuldigd voor bos	0.6	0.6
FC	Maximale hoeveelheid die opgeslagen kan worden in de bodem (mm)	300	350
lp	Grens voor potentiële evapotranspiratie	< 1	0.95
Beta	Bepaalt welk deel van de effectieve neerslag tot afvoer komt	3	3
KHQ	Reservoircoëfficiënt bij de afvoer HQ	0.17	0.099
HQ	Afvoer waarvoor geldt dat k = KHQ	3	3.4
k4	Reservoircoëfficiënt laagste reservoir (diepe grondwater)	0.04	0.025
ALFA	Mate van niet-lineariteit van het bovenste reservoir	1	0.68
perc	Water dat van ondiep naar diep grondwater percoleert (mm/dag)	1.2	0.6
maxbas	Aantal dagen in de transformatie routine	1	2.1
cflux	Maximale capillaire opstijging vanuit het ondiepe grondwater naar de bodem	1	1

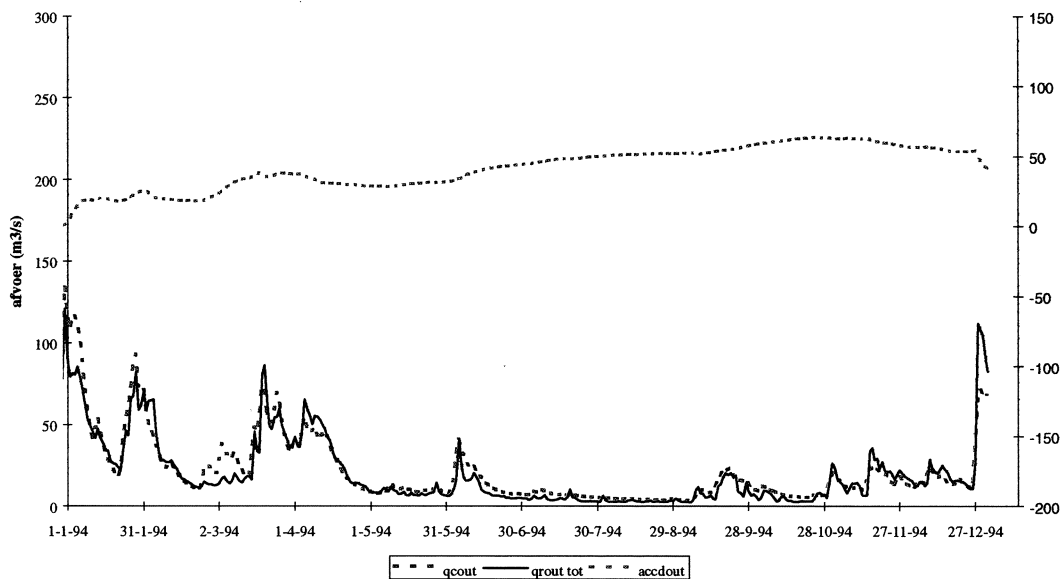
Par.	Omschrijving	Def.	Waarde
cevpfo	Correctiefactor voor potentiële evapotranspiratie in bossen	1.15	1.15
ecalt	Verdamping correctiefactor van verdamping ($e = 1-h*ecalt$)	0.1	0.1
icfo	Interceptie bergingscapaciteit in bosgebieden (mm)	1.5	1.5
icfi	Interceptie bergingscapaciteit in niet-bos gebieden (mm)	1	1

Bij de calibratie is een grote neerslagcorrectie toegepast om de gemeten- en berekende hoeveelheid afvoer over de totale periode met elkaar in overeenstemming te brengen. Deze correctiefactor benadrukt het belang van goede neerslagmeting. In Bijlage A wordt een overzichtje gegeven van het effect van enkele parameters op de verdamping en dus op de waterbalans. Hoewel met de overige modelparameters de waterbalans aan te passen is, blijft een neerslagcorrectie hier onvermijdbaar. Waarschijnlijk is dit stroomgebied te grof geschematiseerd en is het nodig het model op te delen in meerdere meer homogene subgebieden en meerdere neerslagstations te gebruiken. Dit geldt met name indien overgegaan wordt op een kortere tijdstap.

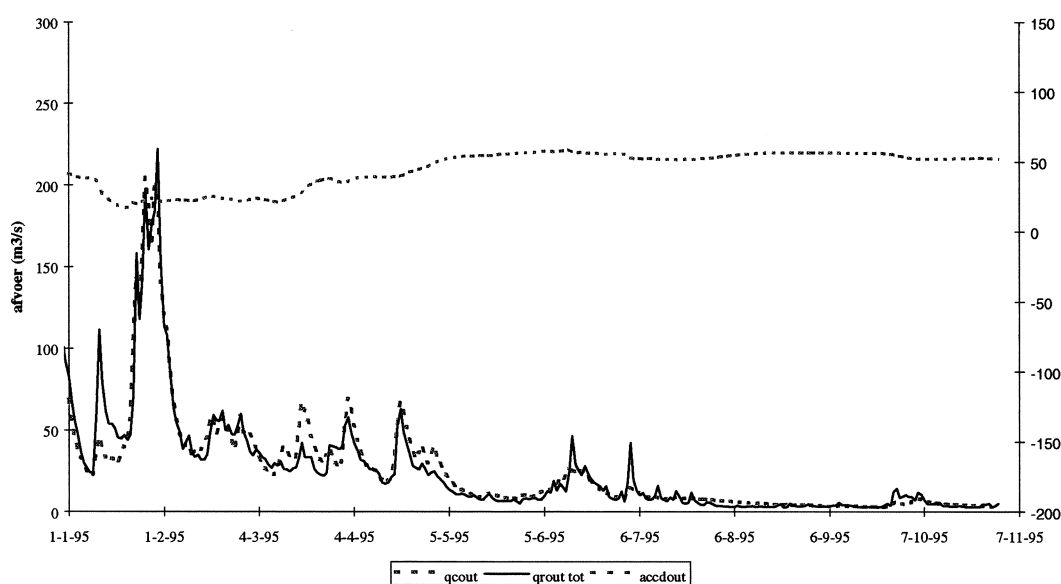
De calibratieresultaten van de Amblève zijn weergegeven in de onderstaande grafieken. Uit deze grafieken blijkt dat de timing van de pieken in alle drie de jaren goed is. De hoogte van de pieken wordt iets onderschat, de lage afvoeren worden iets overschat. Het totaalbeeld is echter erg goed.



Figuur 4.9 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Amblève over de gehele calibratieperiode



Figuur 4.10 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerloop en het cumulatieve verschil (accout) in de Amblève over 1994



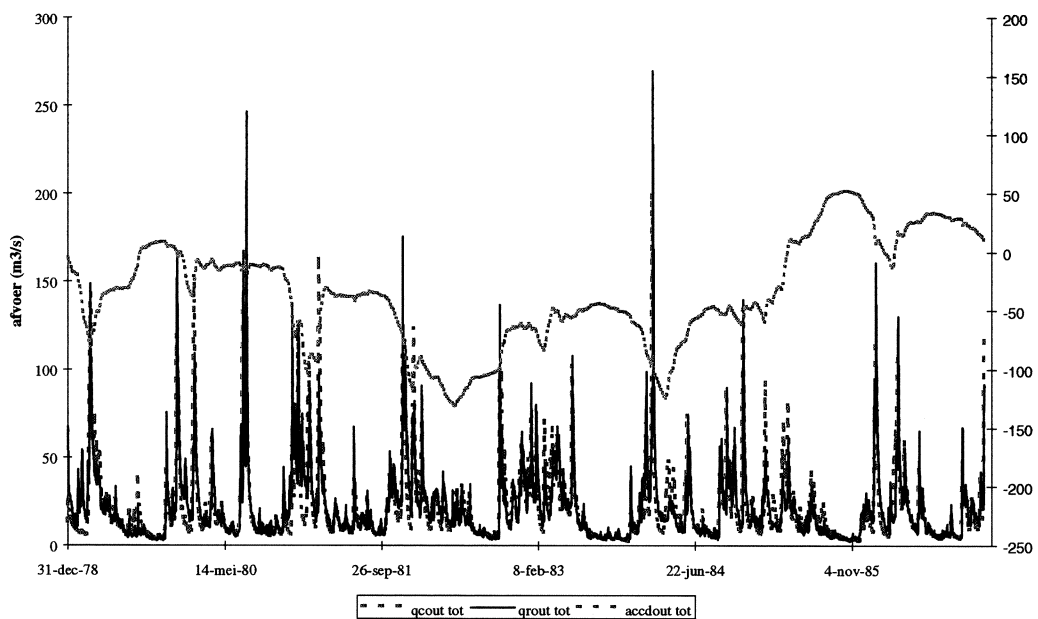
Figuur 4.11 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerloop en het cumulatieve verschil (accout) in de Amblève over 1995

De verklaarbare variantie R^2 over de gehele rekenperiode is 0.91, wat aangeeft dat de calibratie goed is gelukt. Het cumulatieve verschil van de gemeten en berekende afvoer (accout in de grafieken) bedraagt 52.3 mm, dit is 2.7 %.

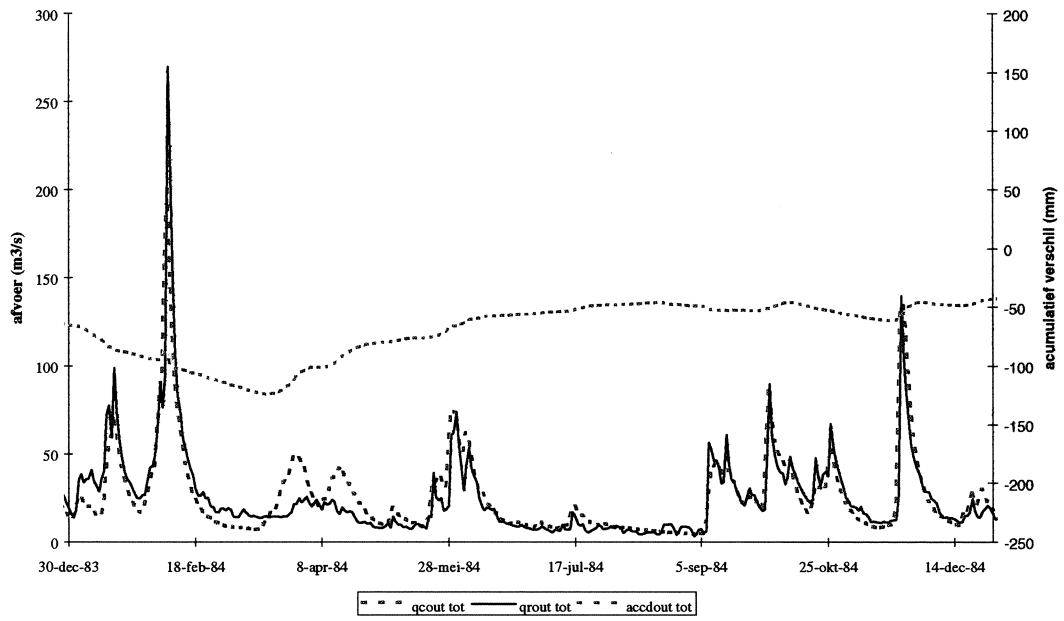
4.4.3 Validatieresultaten

De validatie van de Amblève leverde een verklaarbare variantie R^2 op van 0.75. De afvoer verlopen over de hele periode en over enkele (voor de Amblève) natte jaren zijn hieronder weergegeven.

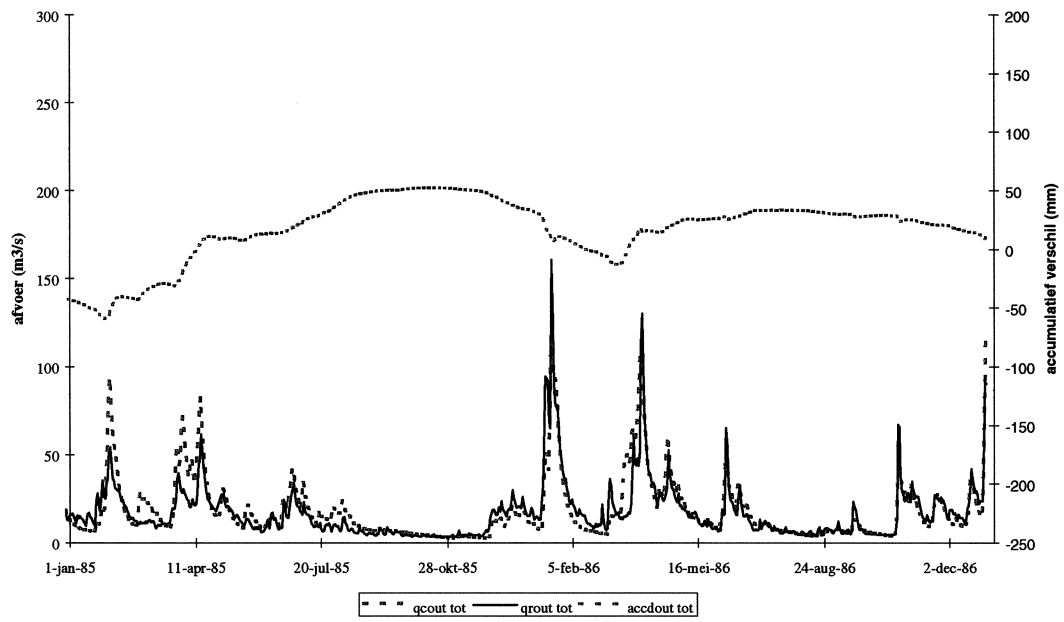
Uit de grafieken blijkt dat het model goed reageert, de timing is goed. De extreem hoge pieken worden redelijk voorspeld, de middelmatig hoge pieken iets minder goed. Ook de timing is bij deze lager pieken iets slechter. Het totaalbeeld is echter goed. Het cumulatieve verschil over de hele periode bedraagt 12 mm (0.2 %).



Figuur 4.12 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoer verloop in de Amblève over 1979-1986



Figuur 4.13 Gemeten (qgrout) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Amblève over 1984



Figuur 4.14 Gemeten (qgrout) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Amblève over 1985-1986

4.5 De Vesdre

4.5.1 Schematisatie en meteorologische invoer

De Vesdre is ingedeeld in de hoogte- en vegetatieklassen zoals beschreven in Tabel 4.9. In deze studie zijn de stuwmeren niet meegenomen, waardoor een afwijking kan ontstaan.

Tabel 4.9 Oppervlakte per hoogte- en vegetatieklassen en percentage bos voor de Vesdre (RIZA, 2000)

Hoogte	Opp. (km ²)	Opp Bos. (km ²)	% Bos
69-99	5	0.6	11.2
100-199	44	11.9	27.0
200-299	260	34.1	13.1
300-399	157	77.1	49.1
400-499	91	73.1	80.4
500-599	98	58	59.2
600-687	30	11.2	37.3
total	685	265.9	38.8

Voor de invoer zijn de meteorologische gegevens gemeten bij Spa en Bierset gebruikt. Op basis van Thiessenpolygonen, de hoogteligging van de stations en de neerslagtijdsreeks zijn de gewichten 0.8 voor Spa en 0.2 voor Bierset gebruikt. Spa en Bierset hebben een vergelijkbaar neerslagpatroon en een correlatie van maar liefst 0.90 voor de calibratieperiode. Wel is het zo dat in Spa veel meer neerslag valt dan in Bierset en dat de verschillen bij de pieken erg groot zijn.

4.5.2 Calibratieresultaten

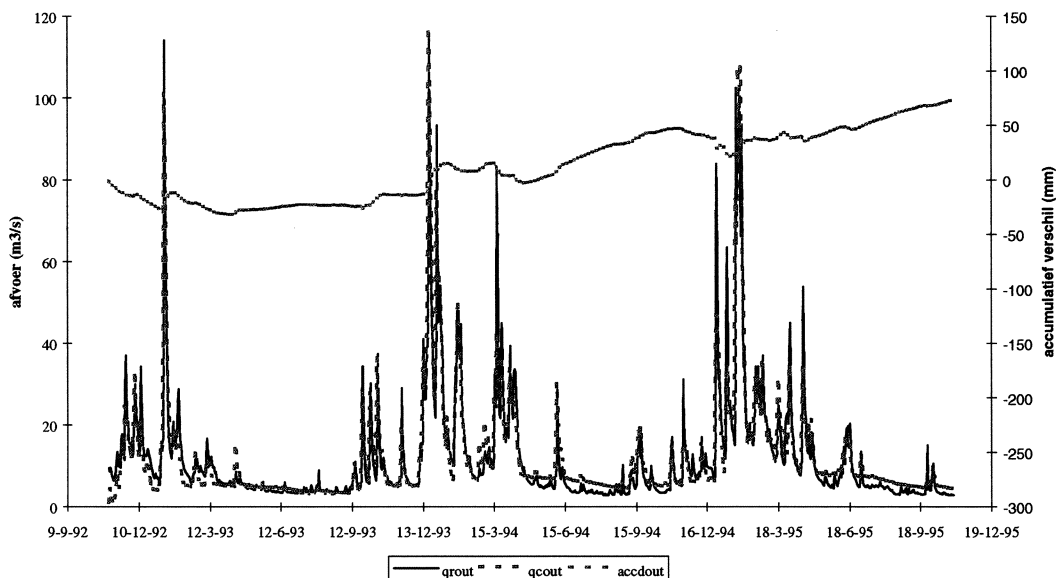
De afvoer waarop is gecalibreerd zijn de gemeten afvoeren bij Chaudfontaine. De uiteindelijke waarden van de modelparameters na de calibratie zijn beschreven in Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Defaultwaarden en nieuwe waarden van de parameters voor de Vesdre

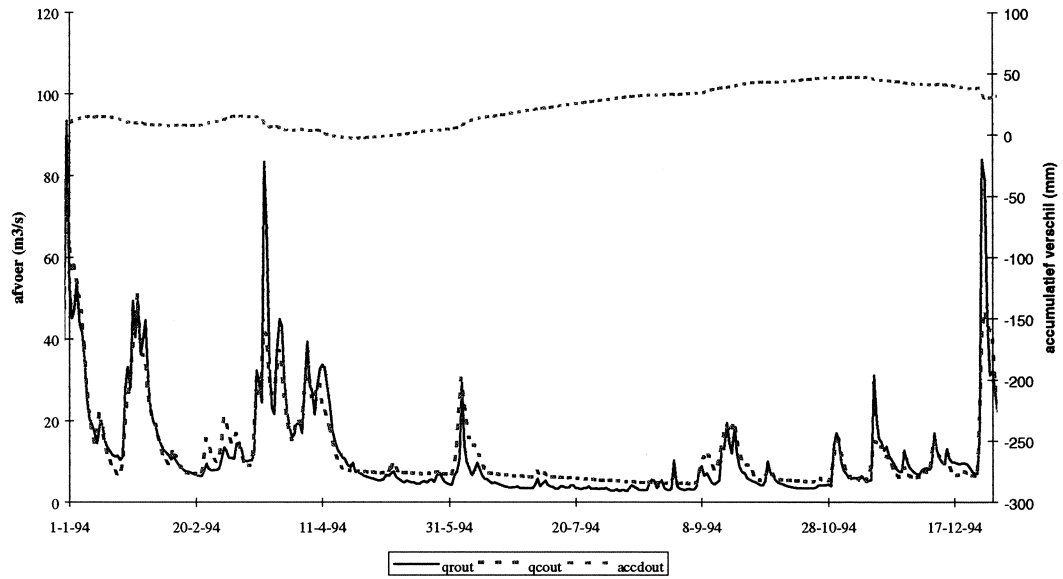
Par.	Omschrijving	Def.	Waarde
pcorr	Correctiefactor van de neerslag	1	0.88
pcalt	Correctiefactor van de neerslag voor de hoogte (per 100m)	0.1	0.1
tcalt	Correctiefactor van de temperatuur voor de hoogte (°C/100m)	0.6	0.6
tt	Temperatuur waaronder neerslag valt als sneeuw (°C)	0	-0.1
cfmax	Sneeuwsmelt factor (mm/°C)	3.5	3.5
focfmax	Factor waarmee cfmax wordt vermenigvuldigd voor bos	0.6	0.6
FC	Maximale hoeveelheid die opgeslagen kan worden in de bodem (mm)	300	250
lp	Grens voor potentiële evapotranspiratie	1	1
Beta	Bepaalt welk deel van de effectieve neerslag tot afvoer komt	3	2
KHQ	Reservoircoëfficiënt bij de afvoer HQ	0.17	0.155
HQ	Afvoer waarvoor geldt dat $k = KHQ$	3	3.4
k4	Reservoircoëfficiënt laagste reservoir (diepe grondwater)	0.04	0.009
ALFA	Mate van niet-lineariteit van het bovenste reservoir	1	0.5
perc	Water dat van ondiep naar diep grondwater percoleert (mm/dag)	1.2	1.2
maxbas	Aantal dagen in de transformatie routine	1	2.2

Par.	Omschrijving	Def.	Waarde
cflux	Maximale capillaire opstijging vanuit het ondiepe grondwater naar de bodem	1	0.8
cevpfo	Correctiefactor voor potentiële evapotranspiratie in bossen	1.15	1.15
ecalt	Verdamping correctiefactor van verdamping ($e = 1-h*ecalt$)	0.1	0.1
icfo	Interceptie bergingscapaciteit in bosgebieden (mm)	1.5	1.5
icfi	Interceptie bergingscapaciteit in niet-bos gebieden (mm)	1	1

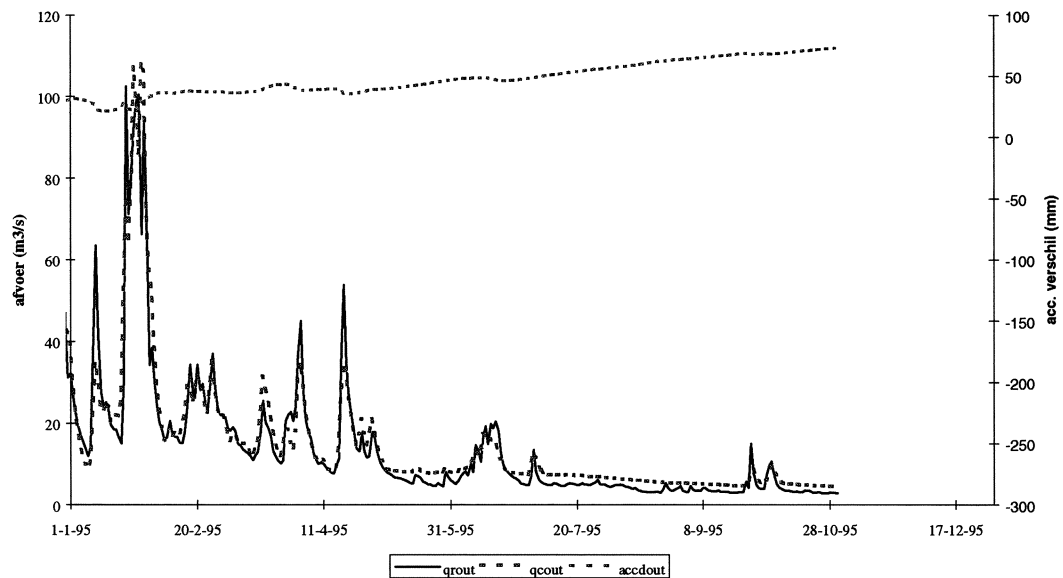
Uit de grafieken 4.15 t/m 4.17 blijkt dat de calibratieresultaten van de Vesdre redelijk goed zijn. Het volume van de piekafvoeren, die voor deze studie het belangrijkste is, wordt goed gesimuleerd. Ook de timing van de pieken en het uitzakkingsverloop van de pieken wordt goed weergegeven. De lijn die het geaccumuleerde verschil weergeeft (zie rechter y-as in de figuren), daalt tijdens de zomerperiode, waaruit blijkt dat de lage afvoer iets wordt onderschat. Deze lijn begint op ongeveer 140 door de verschillen die optreden in de inlooperperiode in 1992. Het geheel ziet er wel goed uit.



Figuur 4.15 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accout) in de Vesdre over de gehele calibratieperiode



Figuur 4.16 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Vesdre over 1994

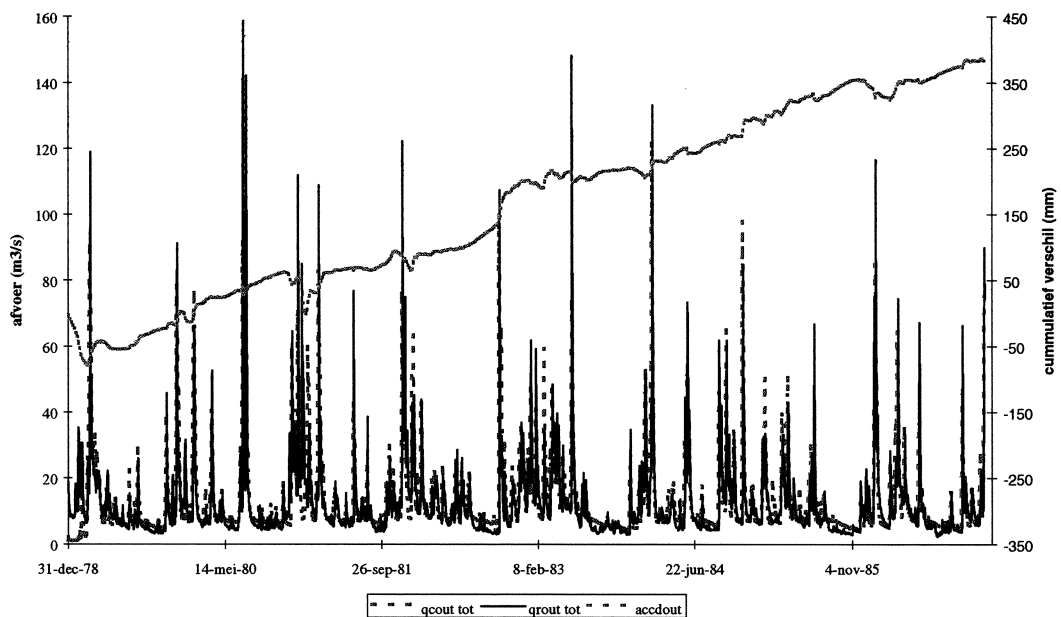


Figuur 4.17 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Vesdre over 1995

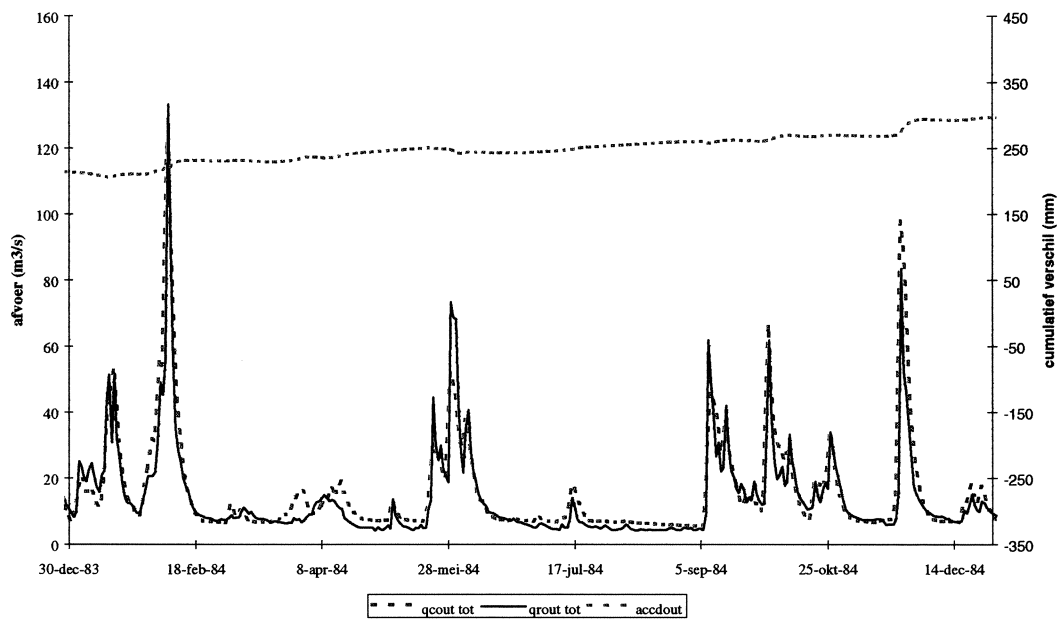
De verklaarbare variantie R^2 over de gehele rekenperiode, inclusief de inlooperperiode is 0.87. Dit betekent dat het model goed gecalibreerd is. Het cumulatieve verschil tussen de gemeten en berekende afvoeren bedraagt 74 mm (4.5%).

4.5.3 Validatieresultaten

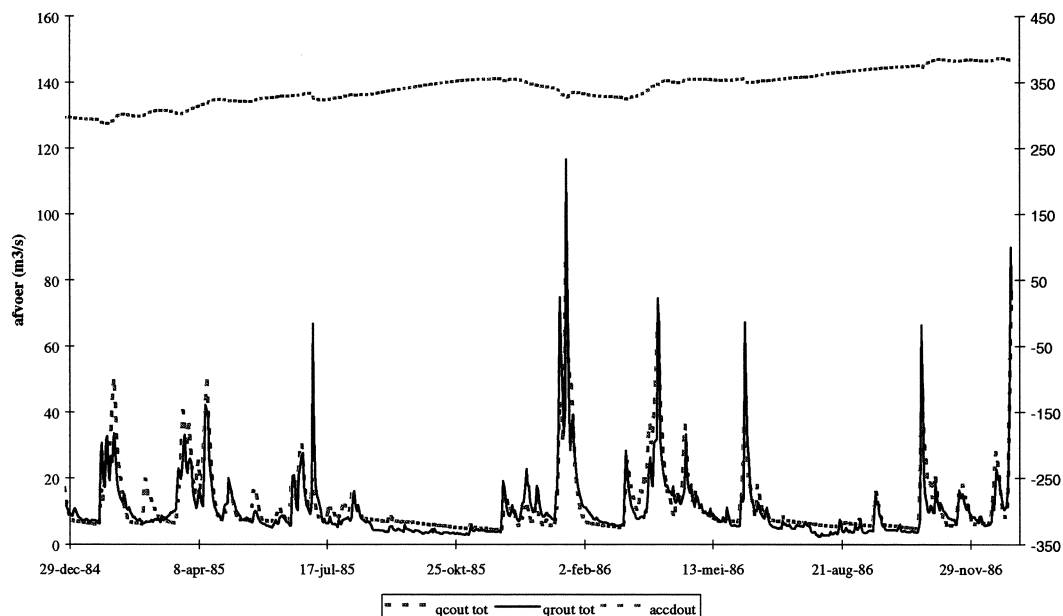
In grafiek 4.19 is te zien dat de validatieresultaten over de periode 79-83 redelijk zijn. De pieken worden iets onderschat en de uitzakking na een piek is het model iets erger dan in werkelijkheid, maar het geheel lijkt redelijk. Het verschil tussen de gemeten en berekende afvoeren loopt structureel omhoog, wat inhoudt dat de berekende afvoer te hoog is. Ook al is dit verschil niet echt groot, toch is dit vreemd. Misschien wordt er water onttrokken aan het stroomgebied voor gebruik elders. Het uitzoeken hiervan valt buiten het kader van deze studie.



Figuur 4.19 Gemeten (qrout) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Vesdre over 1979-1986



Figuur 4.20 Gemeten (qgrout) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Vesdre over 1984



Figuur 4.21 Gemeten (qgrout) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Vesdre over 1985-1986

De validatieresultaten voor de Vesdre zijn redelijk, ook al is er een structurele overschatting. Voor deze rivier wordt sterk aangeraden de invloeden en het gebruik van de stuwmeren te bepalen, indien een nauwkeurige afvoervoorspelling vereist is. De verklaarbare variantie R^2 over de hele periode is 0.61. Het cumulatieve verschil tussen de gemeten en berekende afvoeren bedraagt 8.1% van de totale afvoer.

4.6 Overzicht van de calibratieresultaten

In Tabel 4.11 is een overzicht gegeven van de waarden van de modelparameters in de verschillende substroomgebieden. In deze tabel is te zien, dat de parameters die het meest verschillen de parameters zijn, die de neerslag corrigeren. Verder zijn de FC, perc en de alfa's verschillend. Deze zijn ook sterk afhankelijk van de vorm van de hydrograph die weer afhangt van de gebiedseigenschappen.

Het is niet goed mogelijk bepaalde parameters direct te koppelen met fysische eigenschappen van een gebied. Meestal worden deze gebiedseigenschappen weergegeven in een combinatie van parameters, waardoor het moeilijker wordt de waarde van de parameters te schatten. Zo wordt de reactie van een gebied op de neerslag bepaald door FC, Beta, alfa, de gekozen reservoircoëfficiënten en perc. Wel is het natuurlijk zo dat de parameterwaarden van een snel reagerend gebied duidelijk anders zijn dan van een traag reagerend gebied.

Tabel 4.11: De belangrijkste gebruikte parameterwaarden in de verschillende modellen

Par.	Def.	eenheid	Opgegeven range	Lesse	Amblève	Vesdre
pcorr	1	-	-	1	0.88	0.88
pcalt	0.1	per 100 m stijging	-	0.1	0.1	0.1
tcalt	0.6	per 100 m stijging	-	0.6	0.6	0.6
tt	-0.1	°C	-2 - 2	-0.1	-0.1	-0.1
cfmax	3.5	mm/°C	-	3.5	3.5	3.5
FC	300	mm	100 - 400	210	350	250
lp	1	mm	-	1	0.95	1
Beta	3	-	1 - 4	2.8	3	2
KHQ	0.17	dag ⁻¹	-	0.15	0.099	0.155
HQ	3	mm/dag	-	3.5	3.4	3.4
k4	0.04	dag ⁻¹	-	0.04	0.025	0.009
ALFA	1	-	-	0.5	0.68	0.5
perc	1.2	mm/d	-	1	0.6	1.2
maxbas	1	-	-	2	2.1	2.2
cflux	1	mm/d	0-2	0.9	1	0.8
cevpfo	1.15	-	-	1.15	1.15	1.15
ecalt	0.1	per 100 m stijging	-	0.1	0.1	0.1
icfo	1.5	mm	-	1.5	1.5	1.5
icfi	1	mm	-	1	1	1

5 Discussie

Het doel van de HBV-modellen, zoals beschreven in het vorige hoofdstuk, is het bijdragen aan de afvoervoorspelling van hoge afvoeren bij Borgharen. Uit de resultaten van de vorige paragrafen blijkt dat de ontwikkelde modellen allemaal redelijk tot goed. De (kleine) afwijkingen tussen de berekende en gemeten afvoeren kunnen veroorzaakt worden door meerdere factoren. Hierover een korte discussie.

Het HBV-model geeft een vrij eenvoudige weergave van de werkelijkheid. Het HBV-model is een conceptueel model waarin de belangrijkste fysische processen wel berekend worden, maar de ruimtelijke differentiatie binnen een stroomgebied beperkt wordt meegenomen. Er wordt bijvoorbeeld aangenomen dat de neerslag binnen een stroomgebied homogeen is, het watervasthoudend vermogen van de bodems wordt door een soort gemiddelde gerepresenteerd en ook de locatie van de hogere delen binnen het stroomgebied wordt niet meegenomen. Dit leidt tot geringe afwijkingen tussen de gemeten en berekende waarden.

Ook kan de tijdstapgrootte voor een verschil in berekende en gemeten afvoeren zorgen. Door met een tijdstap van een dag te rekenen, kunnen piekneerslagen uitgemiddeld worden. Ook kan een bui die over de daggrens heen valt over 48 uur verdeeld worden, waardoor de intensiteit minder kan lijken dan in werkelijkheid is opgetreden.

Voor de verschillende stroomgebieden zijn erg weinig gegevens van meteorologische stations beschikbaar. Uit de resultaten van de calibratie en validatie blijkt dat bij een reken tijdstap van 1 dag met dit geringe aantal stations de piekafvoeren redelijk tot goed gesimuleerd kunnen worden. Is men echter geïnteresseerd in de kleinere pieken die in de zomer optreden, dan is het noodzakelijk om meer neerslagstations te gebruiken.

Als de afvoeren voorspeld moeten worden met een kleinere tijdstap, bv. per uur en derhalve uurneerslagen worden gebruikt, zal de ruimtelijke variabiliteit in de neerslag toenemen en zal naar verwachting het gebruik van meer meetstations noodzakelijk zijn. Dit geldt met name in gebieden met grote hoogteverschillen. Om de neerslagspreiding binnen het gebied mee te nemen, kan het dan ook nodig zijn om met kleinere homogene substroomgebieden te gaan rekenen.

In de stroomgebieden liggen nog stuwmeertjes die de afvoerverdeling over de tijd enigszins zullen beïnvloeden. Deze meren zijn niet meegenomen in de schematisatie, dit geldt met name voor de Vesdre. Voor dit stroomgebied heeft H. E. J. Berger aangegeven dat deze meren (reservoirs) een rol spelen bij de piekreductie.

Tenslotte dient opgemerkt te worden dat gebleken is dat er vele parametersets binnen HBV gelijke resultaten opleveren. Op basis van de huidige grove schematisering en de beperkte hoeveelheid beschikbare gegevens van het gebied is er één parameterset gekozen die de werkelijke afvoer simuleert. Voor de gekozen tijdstap van een dag zijn de resultaten nog goed, maar bij een kleinere tijdstap is het waarschijnlijk niet mogelijk een parameterset te vinden voor deze grove schematisatie en het geringe aantal beschikbare neerslagstations die goede resultaten geeft.

6 Conclusies

De belangrijkste conclusie uit deze studie is:

- Voor de onderzochte periode kan de afvoer van de stroomgebieden van de Lesse, Amblève en Vesdre met het HBV-model op basis van de beschikbare meteorologische gegevens redelijk goed worden gesimuleerd. Zowel de timing als de absolute hoogte van de afvoer komt redelijk overeen met de werkelijkheid. Dit wordt geïllustreerd door de hoge waarde van de Nash Sutcliff coëfficiënten voor de efficiency.
- Gezien het doel van de modellen, gebruik bij afvoervoorspelling op dagbasis lijkt de kwaliteit van het HBV-model voldoende om als basis voor de voorspelling te dienen
- Afwijkingen tussen de gesimuleerde en gemeten afvoeren kunnen deels het gevolg zijn van het gebruik van een zeer beperkt aantal meteorologische stations. Dat aantal is voor berekeningen op dagbasis aan de kleine kant. Dit kan gemakkelijk tot fouten leiden bij simulatie van piekafvoeren veroorzaakt door individuele onweersbuien. Voor de afvoer in de Maas heeft dit mogelijk slechts een beperkt effect. Voor de zijrivieren kan het effect wel groot zijn.

Als voorspellingen op uurbasis moeten worden gesimuleerd, is zeker een groter aantal neerslagstations gewenst. Ook een opdeling van de huidige stroomgebieden in homogene substroomgebieden kan dan noodzakelijk zijn.

7 Aanbevelingen

Om de voorspellingen voor de afvoer bij Borgharen te verbeteren, is het aan te raden om een nadere analyse van de neerslagverdeling binnen het Belgische deel van het stroomgebied van de Maas te doen. Met name als gekeken gaat worden naar voorspellingen op een kleinere tijdschaal, zal de variabiliteit in de neerslag groter worden, waardoor de kwaliteit van de voorspelling op basis van de neerslagstations zoals gebruikt in deze studie, afnemen.

Ook zal de invloed van de stuwmeren op de afvoerpieken in de Vesdre mogelijk groter worden als op uurbasis gerekend gaat worden. Het is aan te bevelen deze invloed te onderzoeken. Uitgangspunt hiervoor kan het proefschrift van F. Diermanse zijn (Diermanse, 2000 in prep.).

8 Literatuurlijst

- Berger, H.J.E., 1992. *Flow Forecasting for the River Meuse*. Dissertatie Technische Universiteit Delft.
- Diermanse, F.L.M., 2000 (in prep). *Physically based modelling of rainfall runoff processes*. Dissertation, Delft Technical University, Delft.
- Min. V&W, 1994. *Onderzoek watersnood Maas. Deelrapport 4, Hydrologische aspecten*.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles*. Journal of Hydrology, no 10, p. 282-290.
- RIZA, 2000 Gebiedsgegevens zoals aangeleverd door RIZA Arnhem t.b.v. dit project.
- SMHI, s.a.. IHMS: Integrated Hydrological Modelling System, Manual Version 4.3. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden.

BIJLAGEN

A Vergelijking twee mogelijke schematisaties

In deze bijlage zijn de schematisaties met- en zonder gebruik van de parameter alfa vergeleken. Indien deze parameter niet gebruikt wordt, wordt de snelle afvoer weergegeven door twee lineaire reservoirs. In eerste instantie komt het water dat uit de bodemroutine komt terecht in het reservoir 1 met reservoirconstante k_1 . Stijgt het volume water in dit reservoir echter tot boven de drempel uz_{10} , dan wordt het surplus aan water boven die drempel afgevoerd met de snelheid bepaald door reservoircoëfficiënt k_0 .

Indien alfa gebruikt wordt, wordt de snelle component als het ware berekend met een continu toenemende reservoircoëfficiënt (zie ook hoofdstuk 3). Deze parameter alfa is vooral geïntroduceerd om het aantal parameters in het model te verlagen. Door het gebruik van minder parameters wordt de fit wel iets minder. (Er zijn minder knoppen om aan te draaien.)

Tabel 1: De gebruikte parameterwaarden in de verschillende modellen

Par.	Default	Lesse		Amblève		Vesdre	
		Nieuw	Oud	Nieuw	Oud	Nieuw	Oud
pcorr	1	1.0	1.158	0.88	0.95	0.88	1.01
pcalt	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.01
tt	0	-0.1	-0.1	-0.1	-1	-0.1	-0.1
FC	300	210	270	350	310	250	325
Beta	3	2.8	4.3	3	5	2	1.7
uz10	10	-	33	-	35	-	24
k0	0.2	-	0.28	-	0.28	-	0.21
k1	0.2	-	0.135	-	0.12	-	0.21
k4	0.04	0.04	0.046	0.025	0.03	0.009	0.052
ALFA	1	0.5	-	0.68	-	0.5	-
khq		0.15	-	0.099	-	0.155	-
hq	3	3.5	-	3.4	-	3.4	-
perc	1.2	1	0.85	0.6	1.6	1.2	2.1
maxbas	1	2	2	2.1	2	2.2	2
cflux	1	0.9	1	1	1	1	0.8
ecalt	0.1	0.1	0	0.1	0	0.1	0
R2 -cal	-	0.89	0.91	0.91	0.92	0.87	0.88

Nieuw: met gebruik van de parameter ALFA, Oud: zonder gebruik van de parameter ALFA

Deze twee schematisaties zijn onafhankelijk van elkaar ontstaan. Wat opvalt is dat behalve de parameters van de afvoercomponent ook de overige parameters sterk verschillen. Opgemerkt dient te worden dat bij de schematisaties zonder de parameter ALFA met name getracht is de extreme piekafvoeren goed gesimuleerd te krijgen, terwijl bij de andere schematisaties meer aandacht is gegeven aan het totaalbeeld. Het is bekend dat in het HBV model meerdere parametersets mogelijk zijn die vergelijkbare resultaten opleveren, ook dit is een verklaring voor de grote verschillen.

Op basis van de beschikbare gegevens is het niet mogelijk om te komen tot een optimale parameter set. Ook is niet te bepalen of een van de bovenstaande schematisaties beter is. Een argument dat genoemd kunnen worden is dat de oude schematisatie iets betere resultaten en een betere massabalans geeft. Bovendien is deze wijze van schematiseren eenvoudiger te doorgronden dan een schematisatie met de alfa. Daar tegenover staat dat de nieuwe schematisatie met name voor de Beta fysisch gezien logischere waarden heeft en dus eenvoudiger te verdedigen is.

B Invloed van Beta en FC op de massabalans

De invloed van Beta

Bij met name de Amblève bleek bij toepassing van de default parameters en een neerslagcorrectiefactor van 0.95 de som van de gemeten en berekende afvoer nogal van elkaar te verschillen. Dit verschil kan verkleind worden door de verdamping te vergroten of een neerslagcorrectie toe te passen. De verdamping reageert met name op de parameters Beta en FC (zie hoofdstuk 3).

Naar aanleiding van dit verschil is een korte gevoeligheidstest uitgevoerd op de invloed van de Beta (zie hoofdstuk 3) en de FC op de massabalans.

In Tabel 1 is de invloed van de Beta op de massabalans weergegeven. In deze tabel is de gemiddelde afvoer over de calibratie in m³/s gegeven voor een schematisatie waarbij Beta de waarde 1, 2, 3 en 5 heeft gekregen en voor de gemeten afvoer. Ook is het percentuele verschil in afvoer over deze periode gegeven.

Tabel 1: Invloed van Beta op de massabalans

	Gemeten	Berekend			
Beta	-	1	2	3	5
Q gemiddeld (m ³ /s)	21.1	29.1	27.3	26.4	25.4
Vershil met gemeten afvoer (%)	0	37.3	28.7	24.4	20.1

Uit deze tabel blijkt dat hoe hoger de waarde van Beta, hoe lager de gemiddelde afvoer en dus hoe groter de verdamping. Dit is te verklaren uit de formule waarmee het gedeelte uit de bodem dat ten afvoer komt, wordt berekend (zie hoofdstuk 3). Er komt een groter deel van de netto neerslag tot afvoer naarmate de rechter term van vergelijking 1 groter is.

$$\Delta Q / \Delta P = (SM / FC)^\beta \quad (\text{Vergelijking 1})$$

Deze rechter term is groter naarmate Beta kleiner is. Zoals te zien in de tabel zijn de verschillen aanzienlijk.

Verder bleek uit de grafieken dat met name de lagere pieken hoger worden bij een lage Beta, en de hogere pieken bij een hoge Beta.

Het verschil voor de lage pieken is verklaarbaar: bij een hogere beta vult de bodem zich sneller. Als de bodem eenmaal vol is, wordt alle resterende neerslag afgevoerd. Bij een hogere Beta gaat deze reactie geleidelijker: er wordt een groter deel van de neerslag afgevoerd, waardoor de bodem langzamer vult en dus pas op een later tijdstip vol zit.

Voor de hogere pieken begrijp is de oorzaak van het verschil moeilijk te verklaren.

De invloed van FC

Tabel 2 geeft de invloed van de FC op de massabalans.

Tabel 2: Invloed van FC op de massabalans.

	Gemeten	Berekend		
		100	200	300
FC	-	100	200	300
Q gemiddeld (m ³ /s)	21.2	28.3	27.3	26.4
Verskil met gemeten afvoer (%)	0	33.7	28.7	24.3

Hier is duidelijk te zien dat de afvoer toe- en de verdamping afneemt naar mate de FC groter is. Dit is te verklaren uit het feit dat de verdamping een functie is van de verhouding tussen het actuele vochtgehalte en het maximale vochtgehalte (FC) in de bodem. Ook hier is te zien dat de invloed van de FC groot is. Vanzelfsprekend geeft de variant met FC=100 de hoogste pieken en het “zenuwachtigste verloop”.

Resultaat

Uit deze twee tabellen blijkt dat zowel de FC als Beta een grote invloed hebben op de massabalans. Deze invloed is echter onvoldoende groot om met deze parameters de massabalans in de Amblève te corrigeren. Een grotere neerslagcorrectie is nodig om de berekende afvoer meer te laten lijken op de gemeten afvoer. Waarschijnlijk is dit het gevolg van het geringe aantal neerslagstations en de simpele wijze van schematisatie van het gebied.

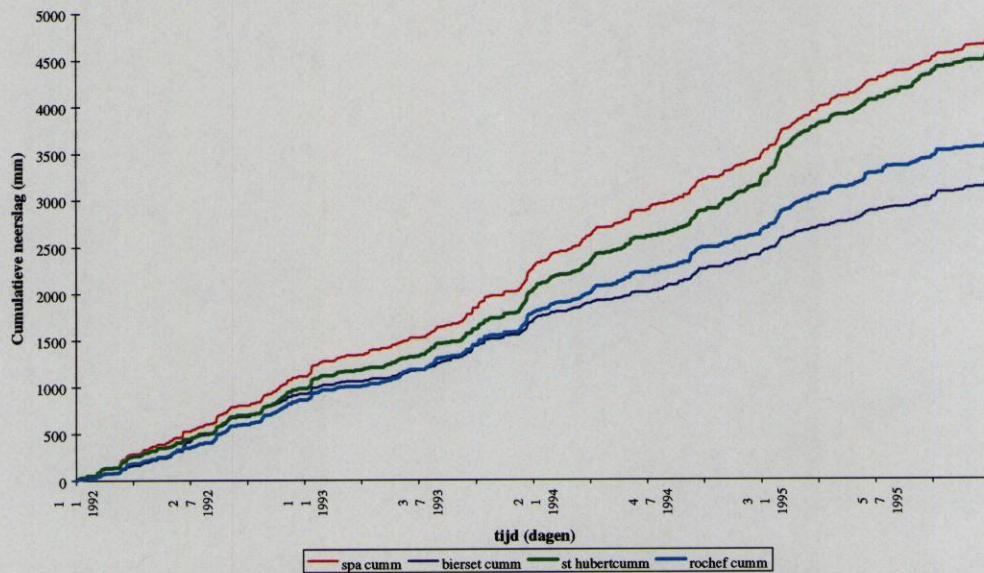
Ook dient opgemerkt te worden dat de invloed van FC en Beta sterk afhangt van de waarden van de overige parameters. Zoals genoemd is in deze gevoeligheidstesten een neerslagcorrectie van 0.95 gebruikt en is aan alle overige parameters de default waarde toegekend.

4.2 Analyse van de neerslagtijdreeksen

Om een beter beeld van de ruimtelijke spreiding van de neerslag te krijgen zijn de meetreeksen van de verschillende stations geanalyseerd. In Figuur 4.1 is de grafiek weergegeven met de cumulatieve neerslag over de hele calibratieperiode. Uit deze grafiek is te zien dat de verschillen in de hoeveelheden geaccumuleerde neerslag aanzienlijk zijn. In totaal viel er ter plaatse van de stations Spa en St-Hubert meer neerslag dan bij de andere stations. St-Hubert ligt erg hoog (zie Tabel 4.2), wat de hoge neerslag kan verklaren. Spa ligt echter een stuk lager (279 m). Bierset heeft de laagste neerslag.

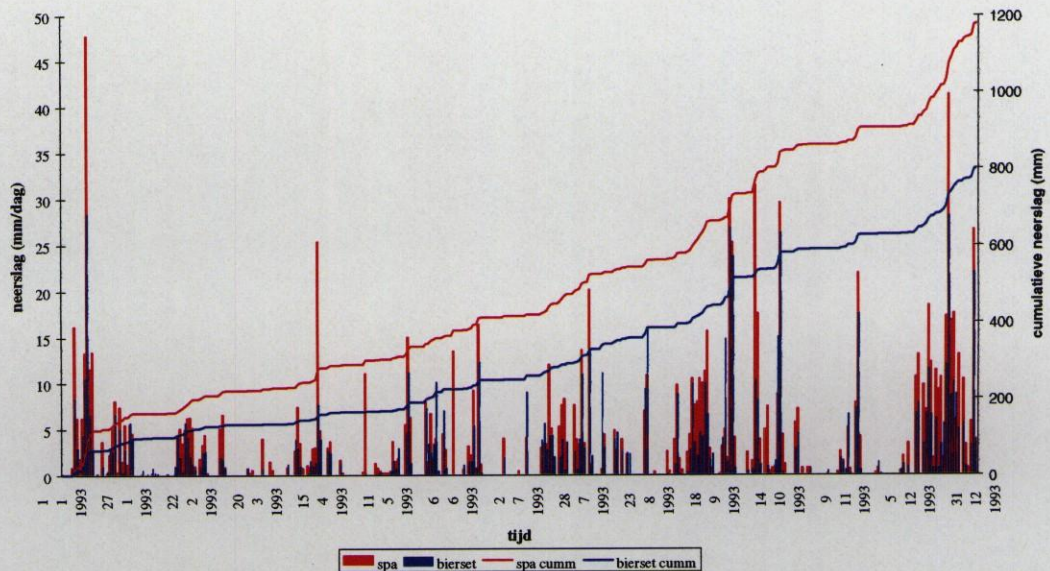
Tabel 4.2. Hoogte neerslagstations

Station	Hoogte (m t.o.v. NAP)
Bierset	191
Rochefort	193
St-Hubert	556
Spa	279



Figuur 4.1 Cumulatieve dagneerslag over de periode 1992-1995 van de verschillende neerslagstations

In de Figuren 4.2 is de dagneerslag van 1993 weergegeven om te laten zien dat de hoogte van de pieken erg kan verschillen. Soms bedragen de verschillen ruim 20 mm. Uit deze grafieken blijkt dat de timing van de neerslag bij de verschillende neerslagstations wel redelijk overeenkomt.



Figuur 4.2 Dagneerslag en cumulatieve neerslag over 1993 bij Bierset en Spa

Ook is de correlatie op dagbasis berekend voor de calibratie- en validatieperiode. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabellen 4.3 en 4.4. Uit deze tabellen blijkt dat de correlatie tussen de verschillende stations vrij goed is (in het algemeen hoger dan 0.7). Dit betekent dat de neerslag op de verschillende meetlocaties ongeveer op dezelfde tijdstippen valt en in vaste verhoudingen. De homogeniteit van de neerslag lijkt dus redelijk te zijn, waardoor de vertaling van punt- naar stroomgebiedsneerslag waarschijnlijk ook redelijk betrouwbaar is. Wel is de correlatie tussen de neerslagstations in de calibratieperiode hoger dan in de validatieperiode. In de periode 1979-1986 viel de regen blijkbaar iets meer gevarieerd. Dit verkleint de betrouwbaarheid van de neerslagstations als representatieve punten voor het gehele stroomgebied. De correlatiewaarden zijn echter ook in de validatieperiode nog hoog.

Tabel 4.3 Correlatiematrix van de verschillende neerslagstations berekend over de calibratieperiode

Naam	Bierset	Rochefort	Spa	St-Hubert
Bierset	1.0000	.81	.91	.84
Rochefort	.81	1.0	.87	.90
Spa	.91	.87	1.0	.89
St-Hubert	.84	.90	.89	1.0

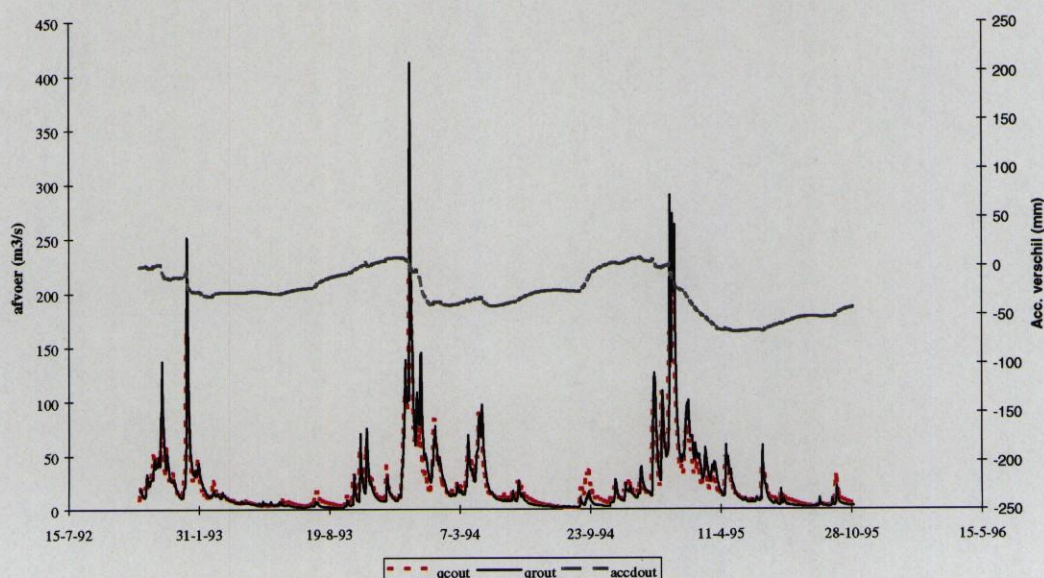
Tabel 4.4 Correlatiematrix van de verschillende neerslagstations berekend over de validatieperiode

Naam	Bierset	Rochefort	Spa	St-Hubert
Bierset	1.0	.75	.81	.72
Rochefort	.75	1.0	.76	.84
Spa	.81	.76	1.0	.79
St-Hubert	.72	.84	.79	1.0

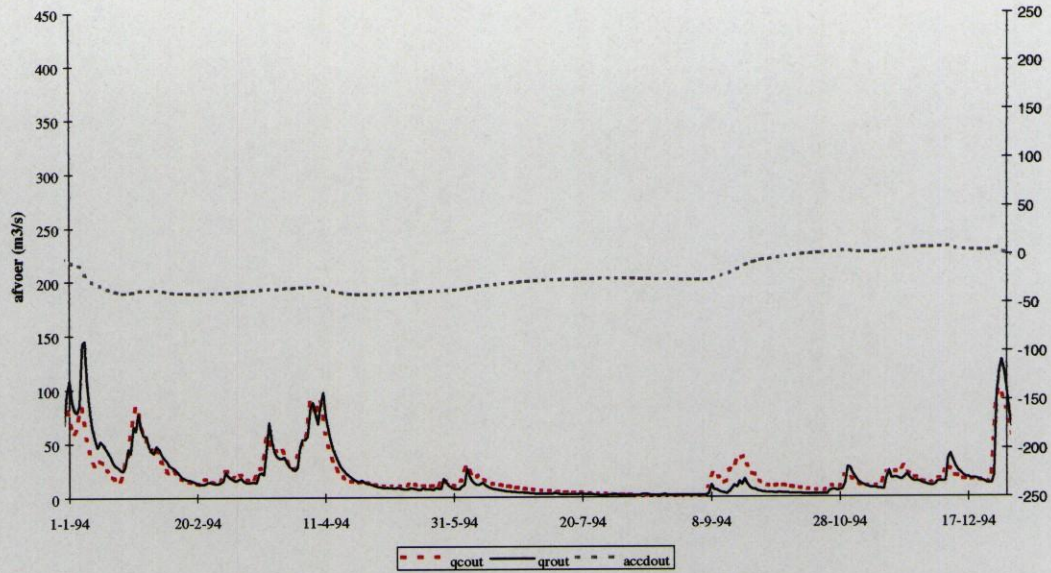
Tabel 4.6 Defaults en nieuwe waarden van de parameters voor de Lesse

Par.	Omschrijving	Def.	Waarde
pcorr	Correctiefactor van de neerslag	1	1
pcalt	Correctiefactor van de neerslag voor de hoogte (per 100m)	0.1	0.1
tcalt	Correctiefactor van de temperatuur voor de hoogte (°C/100m)	0.6	0.6
tt	Temperatuur waaronder neerslag valt als sneeuw (°C)	0	-0.1
cfmax	Sneeuwsmelt factor (mm/°C)	3.5	3.5
focfmax	Factor waarmee cfmax wordt vermenigvuldigd voor bos	0.6	0.6
FC	Maximale hoeveelheid die opgeslagen kan worden in de bodem (mm)	300	210
lp	Grens voor potentiële evapotranspiratie	1	1
Beta	Bepaalt welk deel van de effectieve neerslag tot afvoer komt	3	2.8
KHQ	Reservoircoëfficiënt bij de afvoer HQ	0.17	0.15
HQ	Afvoer waarvoor geldt dat $k = KHQ$	3	3.5
k4	Reservoircoëfficiënt laagste reservoir (diepe grondwater)	0.04	0.05
ALFA	Mate van niet-lineariteit van het bovenste reservoir	1	0.5
perc	water dat van ondiep naar diep grondwater percoleert (mm/dag)	1.2	1
maxbas	Aantal dagen in de transformatie routine	1	2
cflux	Maximale capillaire opstijging vanuit het ondiepe grondwater naar de bodem	1	0.9
cevpfo	Correctiefactor voor potentiële evapotranspiratie in bossen	1.15	1.15
ecalt	Verdamping correctiefactor voor de hoogte : $e = 1-h*ecalt$	0.1	0.1
icfo	Interceptie bergingscapaciteit in bosgebieden (mm)	1.5	1.5
icfi	Interceptie bergingscapaciteit in niet-bos gebieden (mm)	1	1

Tijdens de calibratie zijn met name de FC, alfa, reservoircoëfficiënten aangepast. In Figuur 4.3 is te zien dat het model het verloop van de afvoer goed simuleert. De timing is zeer goed en ook de hoogte van de afvoer pieken wordt redelijk gehaald. De hoogste pieken worden iets onderschat, maar het verschil in volume is zeer klein. De lijn die het cumulatieve verschil tussen de gemeten en berekende afvoeren aangeeft (accdout) loopt iets af, maar het totale verschil bedraagt slechts 42 mm (2.5 %).

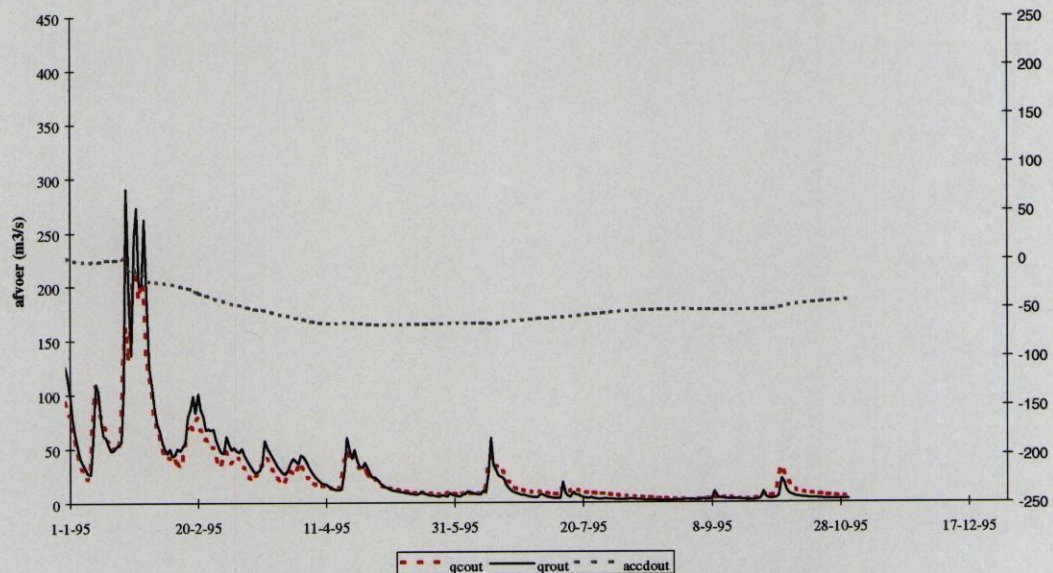


Figuur 4.3 Gemeten (qrouit) en berekend (qcout) afvoerloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Lesse over november 1993 t/m oktober 1995



Figuur 4.4 Gemeten (qrouit) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Lesse over 1994

Ook de resultaten van de jaren 1994 en 1995 lijken erg goed (Figuur 4.4 en Figuur 4.5).



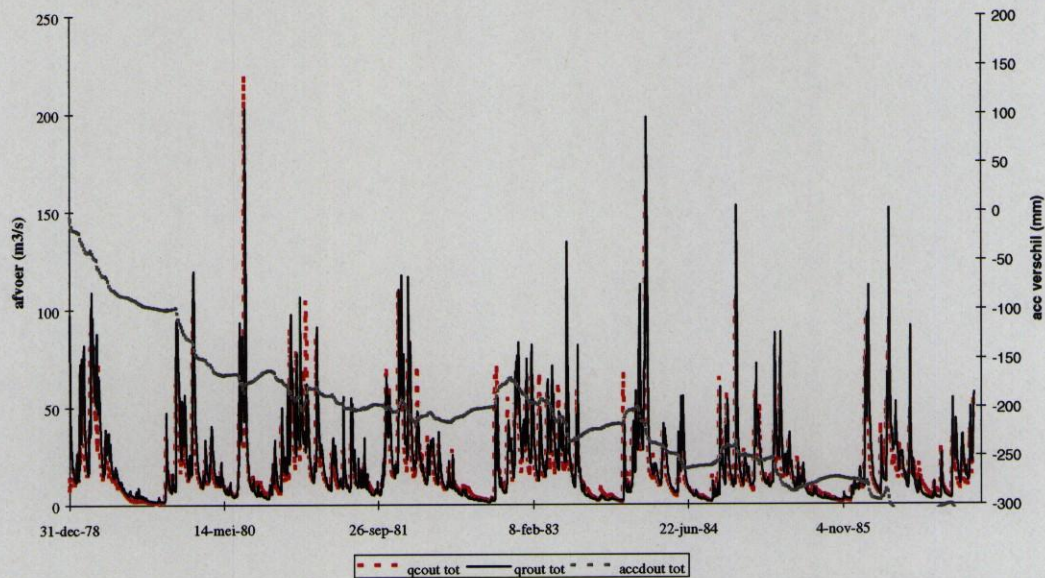
Figuur 4.5 Gemeten (qrouit) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Lesse over 1995

De berekende verklaarbare variantie R^2 over de hele rekenperiode inclusief de eerste paar maanden kwam uit op 0.89, wat betekent dat de calibratie van het model goed is. De afvoeren van de eerste paar maanden worden erg beïnvloed door begin voorwaarden, die natuurlijk onmogelijk de werkelijke begin situatie goed kunnen weergeven. Indien de R^2 berekend zou zijn zonder deze eerste maanden mee te nemen, zou de R^2 waarschijnlijk nog hoger geworden zijn.

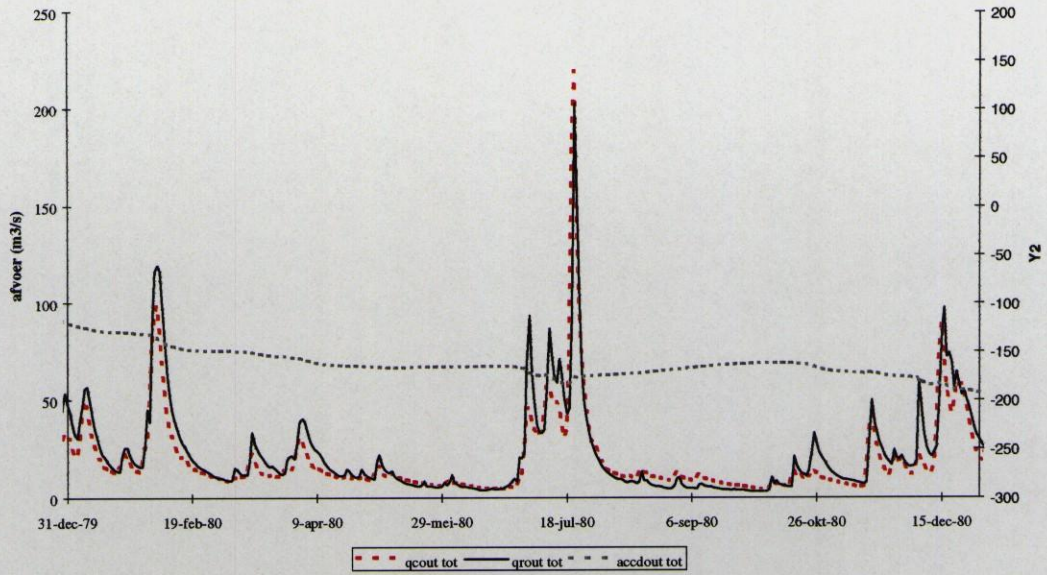
4.3.3 Validatieresultaten

Zoals in de onderstaande grafieken te zien is, zijn de validatieresultaten van de Lesse erg goed. De timing van de pieken en de uitzakking van de pieken is in het algemeen goed en ook de hoogte van de pieken wordt redelijk gesimuleerd. Op enkele momenten wordt de hoogte van de pieken soms iets over- of onderschat maar zeker qua volume afvoer zijn de verschillen minimaal (Figuren 4.6, 4.7 en Figuur 4.8).

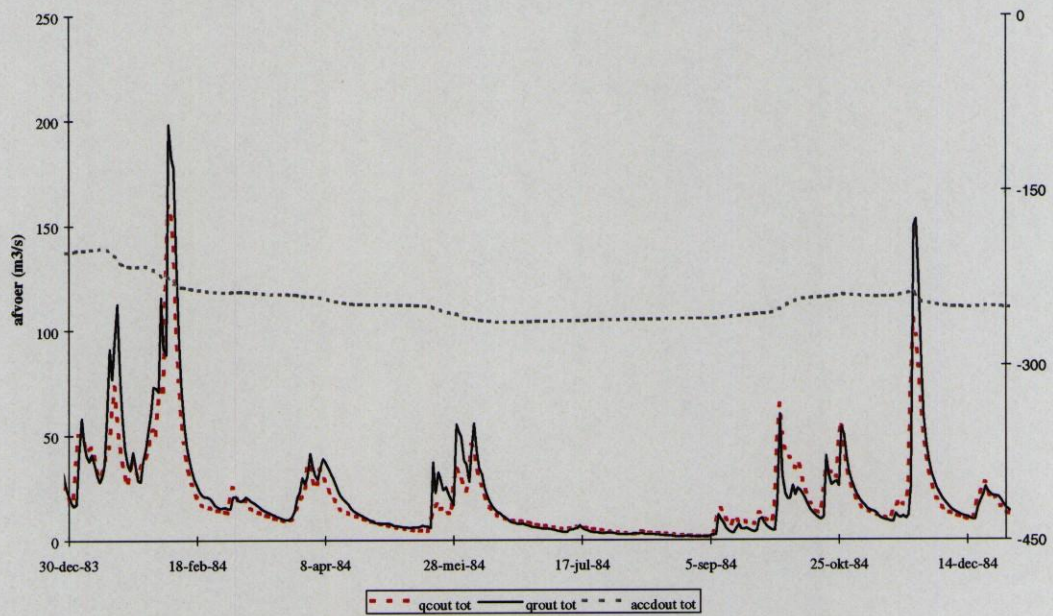
De verklaarbare variantie, R^2 is 0.82, wat goed is, zeker gezien het feit dat deze weer berekend is over de gehele rekenperiode inclusief de slechtere inlooperperiode, waarin een verschil tussen gemeten en berekende waarden ontstaat als gevolg van verkeerde initiële voorwaarden. Het cumulatieve verschil tussen de gemeten en berekende afvoer over de hele periode is 331 mm (8 %).



Figuur 4.6 Gemeten (qrouit) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Lesse over de totale validatie periode



Figuur 4.7 Gemeten (qrou) en berekend (qcou) afvoerverloop in de Lesse over 1980

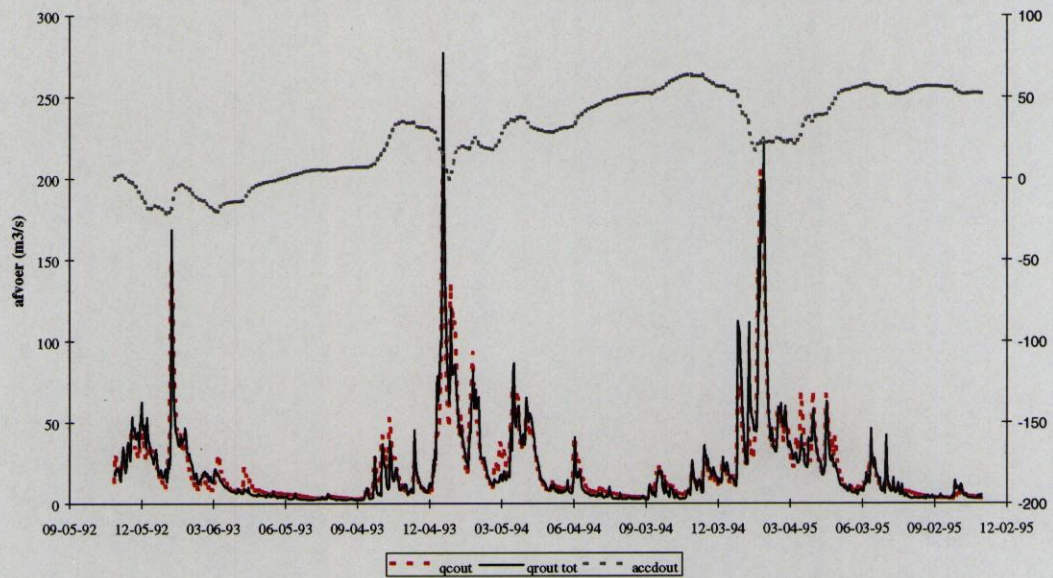


Figuur 4.8 Gemeten (qrou) en berekend (qcou) afvoerverloop in de Lesse over 1984

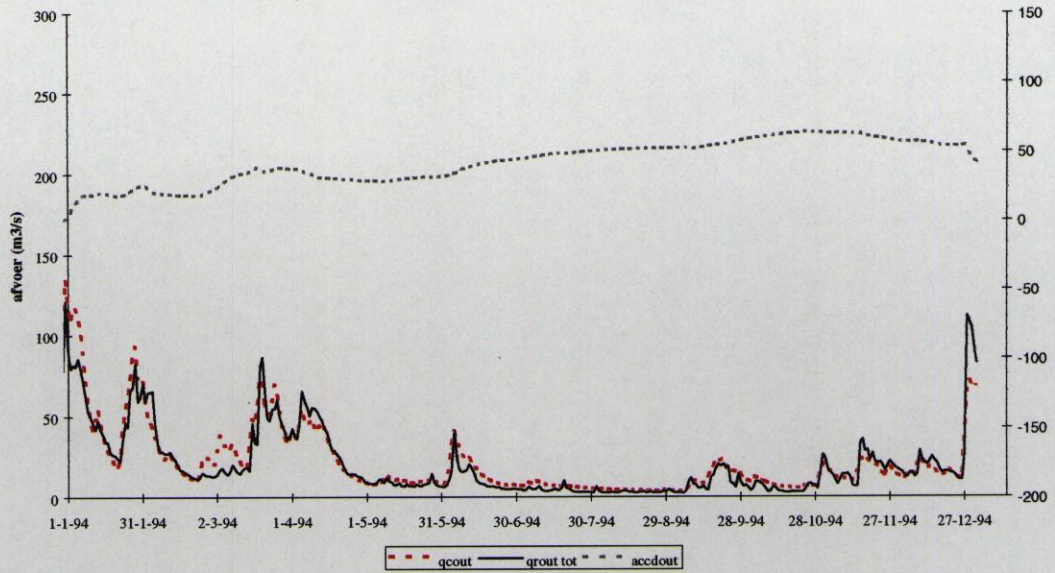
Par.	Omschrijving	Def.	Waarde
cevpfo	Correctiefactor voor potentiële evapotranspiratie in bossen	1.15	1.15
ecalt	Verdamping correctiefactor van verdamping ($e = 1-h*ecalt$)	0.1	0.1
icfo	Interceptie bergingscapaciteit in bosgebieden (mm)	1.5	1.5
icfi	Interceptie bergingscapaciteit in niet-bos gebieden (mm)	1	1

Bij de calibratie is een grote neerslagcorrectie toegepast om de gemeten- en berekende hoeveelheid afvoer over de totale periode met elkaar in overeenstemming te brengen. Deze correctiefactor benadrukt het belang van goede neerslagmeting. In Bijlage A wordt een overzichtje gegeven van het effect van enkele parameters op de verdamping en dus op de waterbalans. Hoewel met de overige modelparameters de waterbalans aan te passen is, blijft een neerslagcorrectie hier onvermijdbaar. Waarschijnlijk is dit stroomgebied te grof geschematiseerd en is het nodig het model op te delen in meerdere meer homogene subgebieden en meerdere neerslagstations te gebruiken. Dit geldt met name indien overgegaan wordt op een kortere tijdstap.

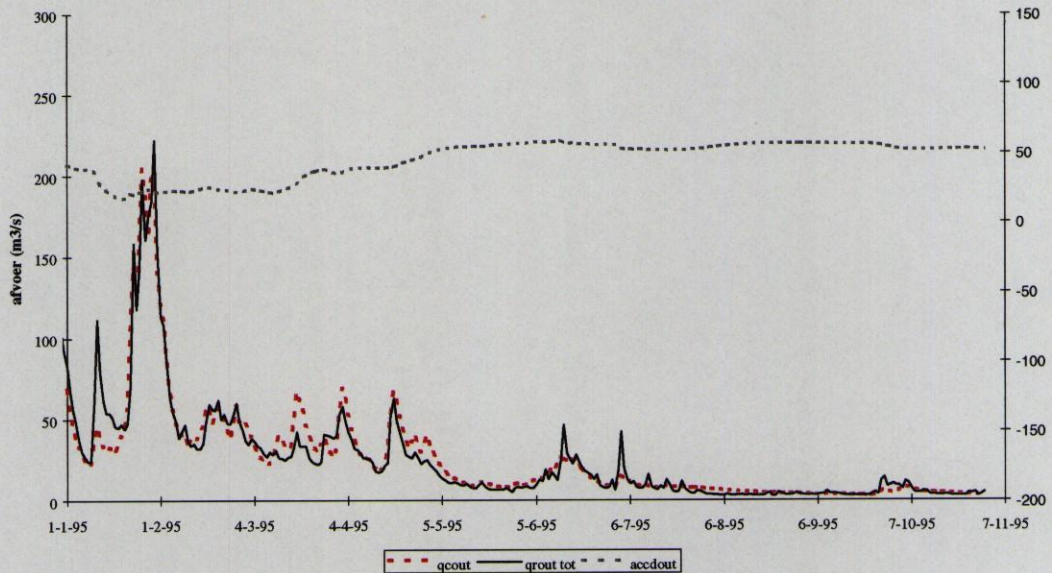
De calibratieresultaten van de Amblève zijn weergegeven in de onderstaande grafieken. Uit deze grafieken blijkt dat de timing van de pieken in alle drie de jaren goed is. De hoogte van de pieken wordt iets onderschat, de lage afvoeren worden iets overschat. Het totaalbeeld is echter erg goed.



Figuur 4.9 Gemeten (qroul) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Amblève over de gehele calibratieperiode



Figuur 4.10 Gemeten (qrout) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Ambliève over 1994



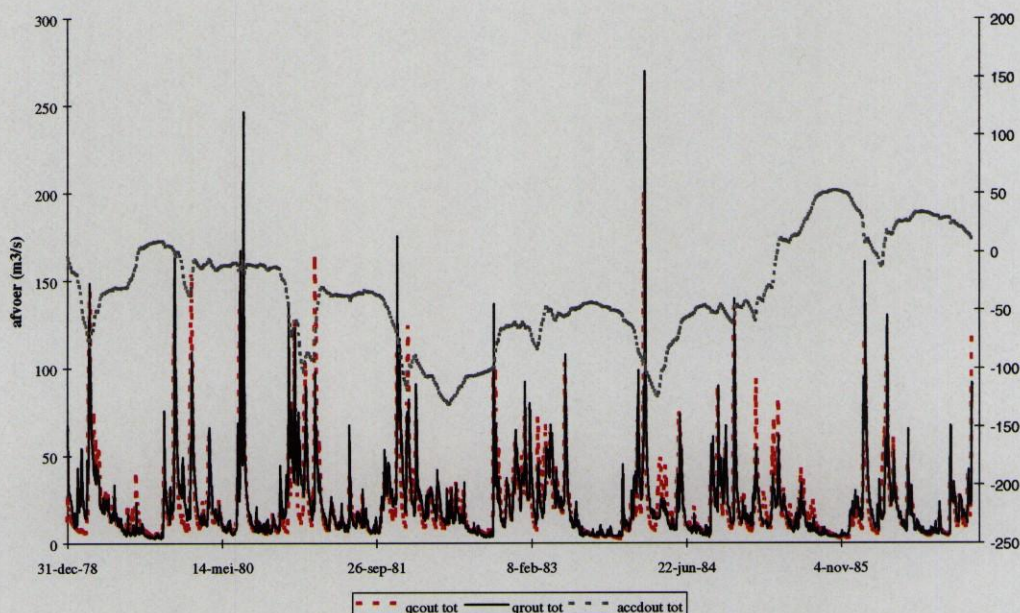
Figuur 4.11 Gemeten (qrout) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Ambliève over 1995

De verklaarbare variantie R^2 over de gehele rekenperiode is 0.91, wat aangeeft dat de calibratie goed is gelukt. Het cumulatieve verschil van de gemeten en berekende afvoer (accout in de grafieken) bedraagt 52.3 mm, dit is 2.7 %.

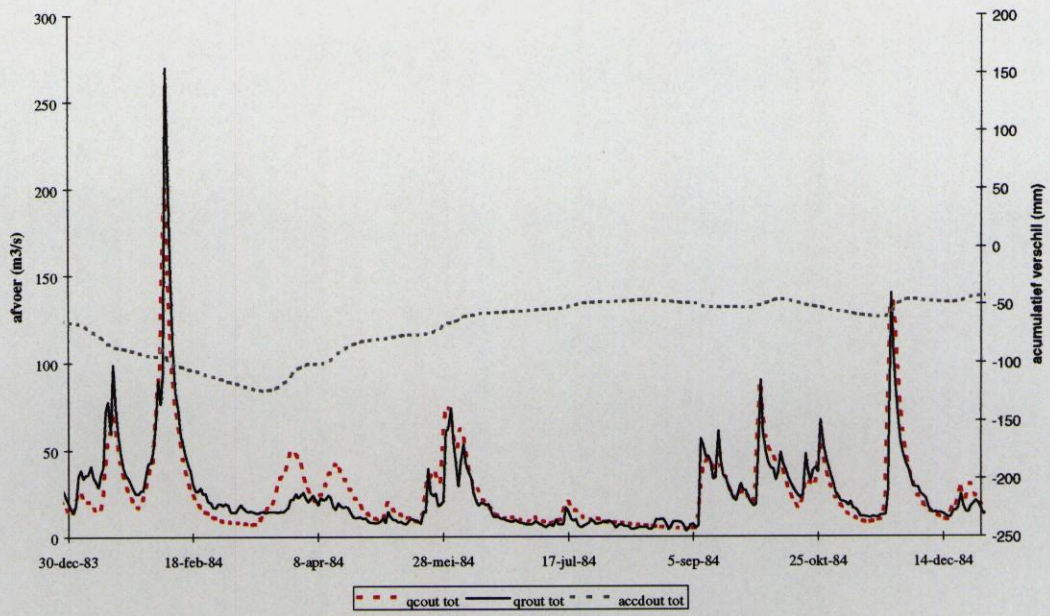
4.4.3 Validatieresultaten

De validatie van de Amblève leverde een verklaarbare variantie R^2 op van 0.75. De afvoerverlopen over de hele periode en over enkele (voor de Amblève) natte jaren zijn hieronder weergegeven.

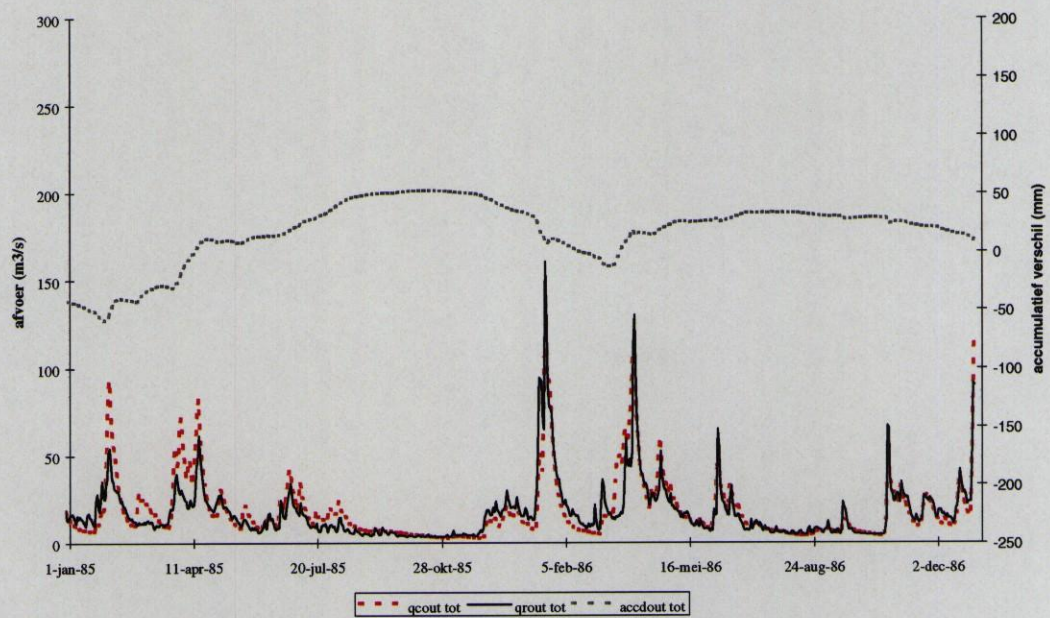
Uit de grafieken blijkt dat het model goed reageert, de timing is goed. De extreem hoge pieken worden redelijk voorspeld, de middelmatig hoge pieken iets minder goed. Ook de timing is bij deze lager pieken iets slechter. Het totaalbeeld is echter goed. Het cumulatieve verschil over de hele periode bedraagt 12 mm (0.2 %).



Figuur 4.12 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Amblève over 1979-1986



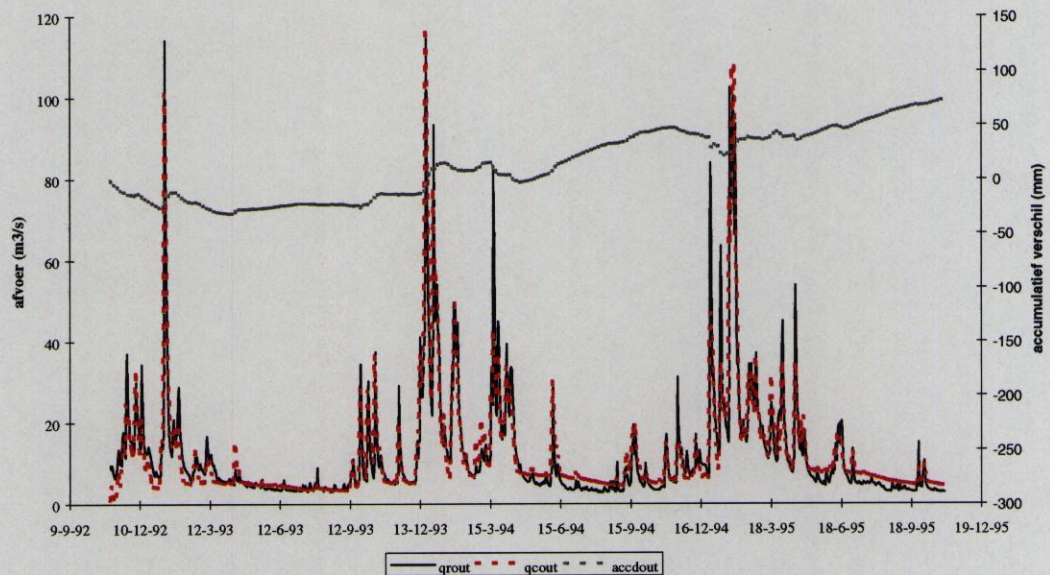
Figuur 4.13 Gemeten (qroul) en berekend (qcoul) afvoerverloop in de Amblève over 1984



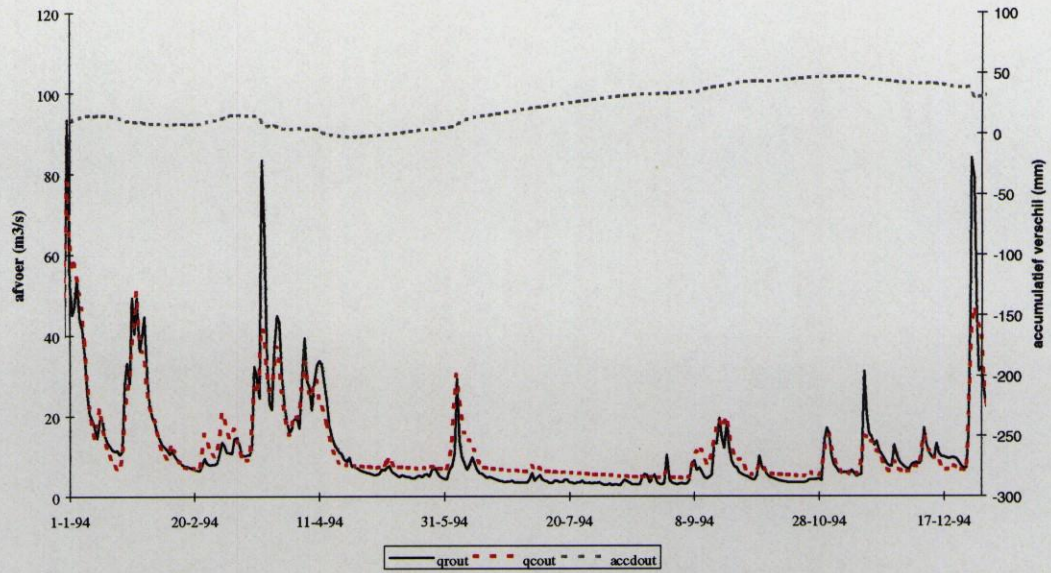
Figuur 4.14 Gemeten (qroul) en berekend (qcoul) afvoerverloop in de Amblève over 1985-1986

Par.	Omschrijving	Def.	Waarde
cflux	Maximale capillaire opstijging vanuit het ondiepe grondwater naar de bodem	1	0.8
cevpfo	Correctiefactor voor potentiële evapotranspiratie in bossen	1.15	1.15
ecalt	Verdamping correctiefactor van verdamping ($e = 1-h*ecalt$)	0.1	0.1
icfo	Interceptie bergingscapaciteit in bosgebieden (mm)	1.5	1.5
icfi	Interceptie bergingscapaciteit in niet-bos gebieden (mm)	1	1

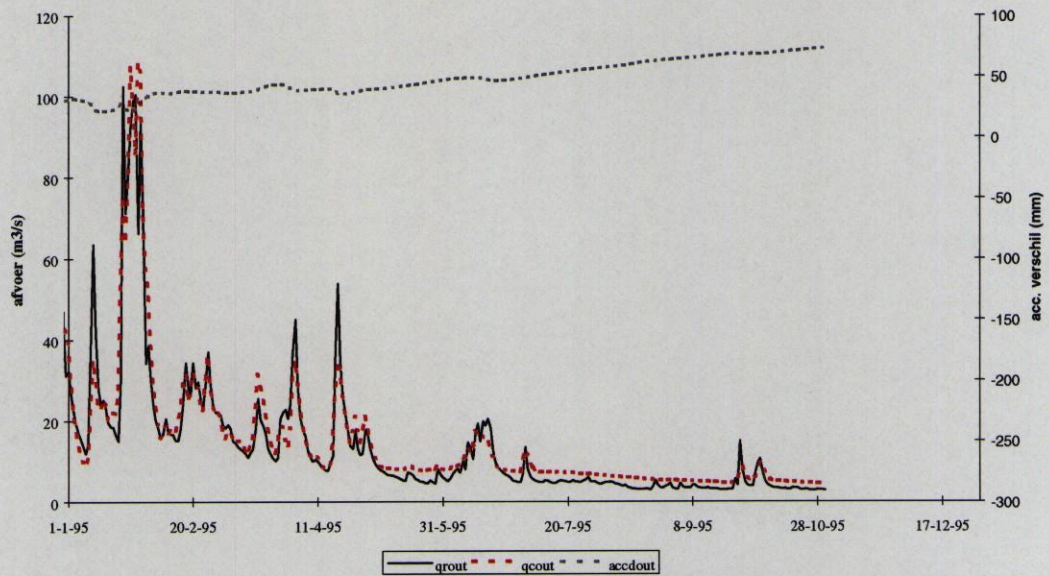
Uit de grafieken 4.15 t/m 4.17 blijkt dat de calibratieresultaten van de Vesdre redelijk goed zijn. Het volume van de piekafvoeren, die voor deze studie het belangrijkste is, wordt goed gesimuleerd. Ook de timing van de pieken en het uitzakkingsverloop van de pieken wordt goed weergegeven. De lijn die het geaccumuleerde verschil weergeeft (zie rechter y-as in de figuren), daal tijdens de zomerperiode, waaruit blijkt dat de lage afvoer iets wordt onderschat. Deze lijn begint op ongeveer 140 door de verschillen die optreden in de inlooperperiode in 1992. Het geheel ziet er wel goed uit.



Figuur 4.15 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Vesdre over de gehele calibratieperiode



Figuur 4.16 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Vesdre over 1994

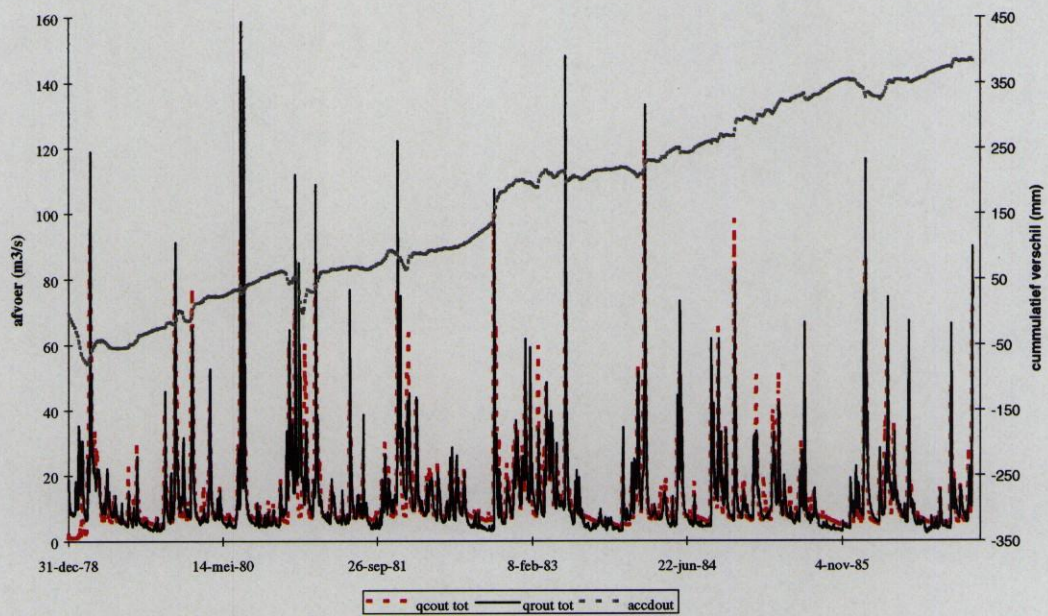


Figuur 4.17 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop en het cumulatieve verschil (accdout) in de Vesdre over 1995

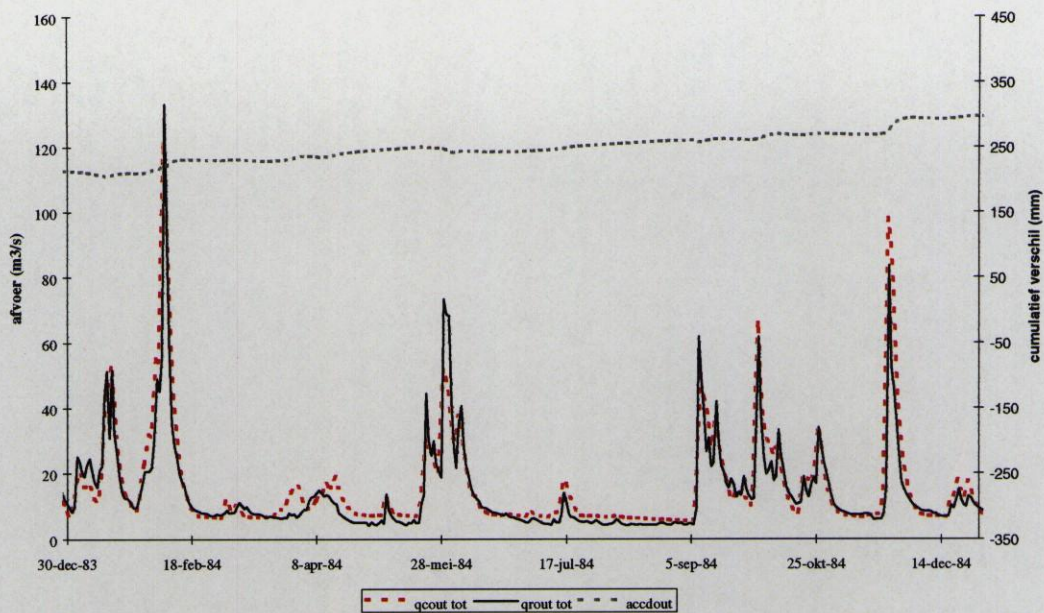
De verklaarbare variantie R^2 over de gehele rekenperiode, inclusief de inlooperperiode is 0.87. Dit betekent dat het model goed gecalibreerd is. Het cumulatieve verschil tussen de gemeten en berekende afvoeren bedraagt 74 mm (4.5%).

4.5.3 Validatieresultaten

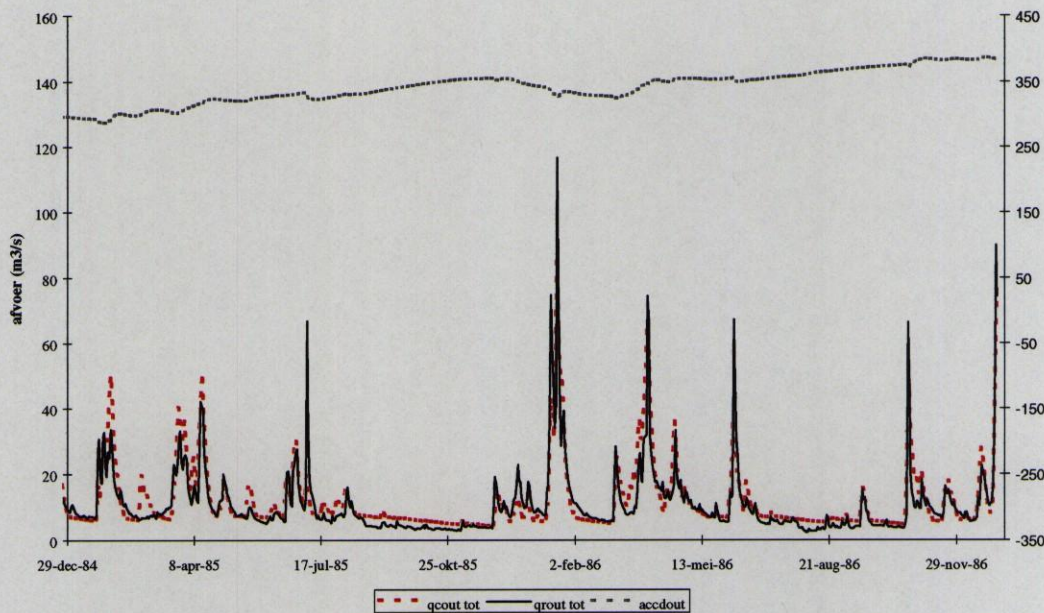
In grafiek 4.19 is te zien dat de validatieresultaten over de periode 79-83 redelijk zijn. De pieken worden iets onderschat en de uitzakking na een piek is het model iets erger dan in werkelijkheid, maar het geheel lijkt redelijk. Het verschil tussen de gemeten en berekende afvoeren loopt structureel omhoog, wat inhoudt dat de berekende afvoer te hoog is. Ook al is dit verschil niet echt groot, toch is dit vreemd. Misschien wordt er water onttrokken aan het stroomgebied voor gebruik elders. Het uitzoeken hiervan valt buiten het kader van deze studie.



Figuur 4.19 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Vesdre over 1979-1986



Figuur 4.20 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Vesdre over 1984



Figuur 4.21 Gemeten (qrou) en berekend (qcout) afvoerverloop in de Vesdre over 1985-1986

De validatieresultaten voor de Vesdre zijn redelijk, ook al is er een structurele overschatting. Voor deze rivier wordt sterk aangeraden de invloeden en het gebruik van de stuwmeren te bepalen, indien een nauwkeurige afvoervoorspelling vereist is. De verklaarbare variantie R^2 over de hele periode is 0.61. Het cumulatieve verschil tussen de gemeten en berekende afvoeren bedraagt 8.1% van de totale afvoer.