
R.G.J. Velner

Sectie Waterhuishouding

Begeleiders:
P.M.M. Warmerdam (WU)
M.C. Burgdorffer (RIZA)
C.O.G. van Haselen (RIZA)

Juni 2000

Neerslag-afvoer modellering van het stroomgebied van de Ourthe met het HBV model

*Een studie ten behoeve van verlenging van de zichttijd van
hoogwatervoorspellingen op de Maas*

RIZA werkdocument 2000.091X



Foto's op de voorkant:

Boven: De Ourthe bij Comblain-au-pont waar de Amblève zich bij de Ourthe voegt.

Linksonder: De spoorbrug bij het meetpunt Tabreux waar de afvoer van de Ourthe wordt gemeten.

Rechtsonder: Beekje dat uitmondt in de Ourthe nabij het meetpunt te Tabreux.

Neerslag-afvoer modellering van het stroomgebied van de Ourthe met het HBV model

Een studie ten behoeve van verlenging van de zichttijd van hoogwatervoorspellingen op de Maas

Sectie Waterhuishouding
Wageningen Universiteit

RIZA werkdocument 2000.091x

Auteur:

R.G.J. Velner

Begeleiders:

ir. P.M.M. Warmerdam (WU)
ing. M.C. Burgdorffer (RIZA)
ir. C.O.G. van Haselen (RIZA)

Juni 2000

Voorwoord

Dit is het eindresultaat van het afstudeervak dat ik begin 2000 heb uitgevoerd bij het RIZA afdeling rivieren, in Arnhem. Ik studeer hydrologie binnen de studie "Bodem, water en atmosfeer" aan Wageningen Universiteit. In dit verslag wordt neerslag-afvoer modellering met het Zweedse HBV model behandeld van het stroomgebied van de Ourthe. Dit is gedaan in het kader van verbetering van hoogwatervoorspellingen op de Maas.

Bij het maken van dit verslag heb ik hulp gehad van een aantal mensen. Ten eerste wil ik mijn begeleiders bij het RIZA, Cathelijne van Haselen en Mauk Burgdorffer, bedanken. Ik heb het grootste gedeelte van het werk in Arnhem verricht en kon altijd bij hen aankloppen voor advies, bedankt!

Mijn afstudeerbegeleider van Wageningen Universiteit was Piet Warmerdam. Hij heeft mij begeleid en allerlei aanwijzingen gegeven. Daarnaast hebben ik en deze drie begeleiders een bezoek gebracht aan het stroomgebied van de Ourthe in België. Een groot gedeelte van de foto's die in dit verslag zijn verwerkt zijn tijdens dit veldbezoek gemaakt. Het veldbezoek was naast het werken met modellen van het stroomgebied een leuke manier om meer inzicht te krijgen in de hydrologie van het gebied en een aantal markante punten te bezoeken.

Gedurende één van de weken dat ik voor dit afstudeervak in Arnhem ben geweest, kregen we bezoek van Judith Olofsson. Zij is een medewerker van het SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) waar het HBV model is ontwikkeld en veelvuldig wordt gebruikt. Zij heeft mij en een aantal anderen bij het RIZA veel uitleg en tips gegeven voor het werken met het HBV model. Ook naderhand kon ik vragen aan haar stellen via e-mail. Een aantal andere personen die ik geraadpleegd heb bij het doen van het afstudeervak zijn dr. ir. H.A.J. van Lanen, prof dr. ir. P.A. Troch en drs. P.J.J.F Torfs, zij zijn werkzaam voor Wageningen Universiteit.

Eenieder bedankt!

In the following I would like to thank Judith Olofsson for her advice and the work we have been doing on the HBV model for this thesis. You have been a great help during your stay in Holland and I am very grateful for all your responses at my questions by e-mail. Because I am going to send you a copy of this report I have included a summary in English. Thank you so much!

Roel Velner
23 juni 2000

Samenvatting

Naar aanleiding van de overstromingen van de Maas in 1993 en 1995 is er met het Actieplan Hoogwater Maas, een aanzet gegeven tot verbetering van modellen ter voorspelling van de waterstanden op de Maas. Het RIZA te Arnhem doet onderzoek naar het verbeteren van de modellering van het Maasstroomgebied. Er is verlenging van de zichttijd¹ gewenst van 12 tot 18 uur vooruit. Om dit te bereiken wordt het Zweedse neerslag-afvoer model HBV getest. Het HBV model is een conceptueel model waarin, uit neerslag, temperatuur en potentiële verdamping voor een te modelleren stroomgebied, een gebiedsafvoer wordt berekend voor een lozingspunt.

In deze studie is aandacht besteedt aan HBV modellen die rekenen met verschillende tijdsintervallen.

Voor deze studie die geldt als een afstudeervak is, als aanzet voor de modellering van het gehele Maasstroomgebied, het stroomgebied van de Ourthe in België als voorbeeld genomen. Dit is een relatief groot en snel op neerslag reagerend deelstroomgebied van het Maasstroomgebied.

Het is gangbaar om neerslag-afvoer modellen met dag intervallen te maken. Dit is ook voor veel Zweedse stroomgebieden met het HBV model gedaan. De aanname is alleen dat er met modellen die met kleinere tijdsintervallen rekenen betere resultaten kunnen worden behaald voor berekeningen voor deelstroomgebieden van de Maas. Dit komt door eigenschappen van het gebied. De zijrivieren van de Maas in de Belgische Ardennen hebben een steil verhang en wateren gebieden af die na een periode van veel neerslag snel verzadigd zijn en dus bij aanhoudende regen veel water tot afvoer laten komen.

In eerste instantie is er een model gemaakt dat rekent met dag intervallen. Dit model is gecalibreerd over de periode 1986 tot 1996 en geeft al redelijk goede resultaten. Dit model is gevalideerd voor de periode 1968 tot 1986. Ook hier presteert het model goed.

Ter bepaling van het eventueel kleinere tijdsinterval waarmee berekeningen moeten worden gedaan om de dynamiek van de afvoer van de Ourthe zo goed mogelijk weer te geven is gebruik gemaakt van een aantal hoogwaterperiodes. Deze waren januari en december 1993, januari 1995 en november 1998.

Hieruit kwam naar voren dat het maximale tijdsinterval waarmee het neerslag-afvoer model moet rekenen voor het stroomgebied van de Ourthe 6 uur bedraagt.

Vervolgens is vanuit het dagmodel een model dat werkt met intervallen van 6 uur gemaakt. Dit model presteert aanmerkelijk beter bij de berekening van afvoeren tijdens hoogwaterperiodes. Ook zijn de modefficiëntie en de relatieve fout van de berekende afvoer voor de gehele berekeningsperiode goed.

Er blijkt dat een omzetting van een goed gecalibreerd en gevalideerd dagmodel naar een model dat werkt met 6-uur intervallen een aanpassing van enkele parameters vereist. Hierdoor zijn de HBV modellen met dag intervallen goed om te zetten en geeft de meerwaarde van de betere invoer met kleinere tijdsintervallen een betere modelprestatie.

Er zijn 1-uurmodellen gemaakt om 6-uurmodellen te vergelijken met deze modellen. De invoer voor deze 1-uurmodellen was echter gedistribueerde 6-uur gegevens. Hierdoor was er geen duidelijk vergelijk mogelijk tussen modellen met 6-uur intervallen en 1-uur intervallen.

Het bleek dat het 1-uurmodel zoals dat hier gebruikt is geen meerwaarde had ten opzichte van het 6-uurmodel. Dit is bepaald aan de hand van de modefficiëntie over de gehele berekeningsperiode en visuele inspectie van de berekeningen van de afvoer ten tijde van hoogwaterperiodes waarvan 1-uur gegevens bekend zijn.

Conclusie is dat voor neerslag-afvoer modellering van het stroomgebied van de Ourthe een HBV model dat werkt met 6-uur intervallen gebruikt moeten worden. De parameters die voor deze studie zijn bepaald zijn te vinden in dit rapport. Het stroomgebied van de Ourthe is een relatief groot en langzamer reagerend stroomgebied dan enkele andere deelstroomgebieden van de Maas. Naar verwachting zal, wanneer ook de rest van de deelstroomgebieden van het Maasstroomgebied gaat worden gemodelleerd, voor een deel van deze stroomgebieden met nog kleinere tijdsintervallen dan 6 uur gewerkt moet gaan worden.

Wanneer dit nodig blijkt zal er een verbetering moeten plaatsvinden in de operationele beschikbaarheid en nauwkeurigheid van metingen en voorspellingen met deze meetintervallen.

¹ verschil tussen het tijdstip waarop een voorspelling wordt gedaan en het tijdstip waarop de voorspelde waterstand optreedt

Summary

The high floods on the Rhine and Meuse in 1993 and 1995 were cause for improvement of waterstage forecasting models for the river Meuse. RIZA in Arnhem is doing research for improvement of the models of the river basin of the Meuse. There are two reasons for making better models of the basin of the Meuse. The first is an improvement of the forecasts, the second is the desire to make calculations with predicted climatic changes to determine the influence of these on the runoff regime of the river Meuse. This report is written for a thesis at Wageningen University. The Swedish HBV model is used. This conceptual rainfall-runoff model has been tested for calculations with different time-intervals. This has been done for the basin of the river Ourthe upstream of the gauging station named "Tabreux" in Belgium. This is a relatively big and fast responding subbasin of the total basin of the river Meuse. A daymodel is a model that calculates with time-intervals of one day. The same for 6-hourmodels and 1-hourmodels, these are models calculating with intervals of 6 and 1 hours respectively. A daymodel is made for this subbasin, this model is intended to be used for calculations with climate scenarios. The assumption is that for improving forecasts smaller time-intervals should be used for the basin of the river Ourthe. This results into more accurate calculations.

First, a daymodel has been made with a calibration period from 1986 until 1996 and a validation period from 1968 until 1986. The model uses three meteorological stations and one gauging station in Tabreux to verify the calculated runoff. The model results are quite good (paragraph 10.2).

To determine an efficient time-interval which accurately describes the runoff, a calculation has been made with hour-measurements of the runoff in Tabreux during the high flood periods of January 1993, December 1993, January 1995 and November 1998. For longer periods than one hour the runoff data have been averaged. These periods were 3, 6, 12 and 24 hours long. The outcome was that for an accurate description of the dynamics of the runoff of the river Ourthe at Tabreux a time-interval of 6 hours should be used.

So the next step was to make a 6-hourmodel, with the daymodel as a lead. The calibration and validation periods were 1993 until 1995 and 1990 until 1993 respectively. The model results of a 6-hourmodel are better than the calculations of a daymodel. Model efficiency (R^2) and the relative error of the calculated runoff volume compared to the measured (relative accumulated difference *rel. acc. diff.*) for the calibration and validation periods are better than those of the daymodel (paragraph 10.2). Also the calculation of the peak discharge during high flood periods is more accurate and the visual inspection of the calculation period in general and high flood periods particular shows good results on the calculated runoff.

Only a small adaptation of parameter values has to be made when a daymodel is converted to models with smaller time-intervals. This makes the use of models with smaller time-intervals easier, when a daymodel already exists. The parameter value of h_q should be divided by the number of time-intervals per day for a model using these time-intervals. The parameter value of $maxbas$ needs adjustment to let the calculated and measured peaks occur at the same time.

Finally models with 1-hour intervals are made. Only during high flood periods there is input for the model of rainfall measurements for several stations converted into a rainfall for the whole subbasin at hourly bases. This is not the same as for the day- and 6-hourmodels, where there are three data sets for the three stations. Comparison of only the high flood periods show that the results of the 1-hourmodel are not better than for a 6-hourmodel. Because this comparison is based on only three high flood periods of 1 month each and a different set of rainfall data, it is not a very strong comparison. The rest of the time of the calculation with hour time-intervals, distributed 6-hour measurements are used. So the comparison of the R^2 and *rel. acc. diff.* for the whole of the calibration and validation periods is not solid. It shows that there is a big difference between calculated runoff volumes with the measured runoff volumes. The model efficiency for a whole calculation period of a 1-hourmodel is not better than that of a 6-hourmodel (paragraph 10.2).

The overall conclusion is that a 6-hourmodel should be used for rainfall-runoff calculations for the basin of the Ourthe upstream of Tabreux. When more subbasins of the river Meuse are to be modelled with the HBV model it could be necessary to use even smaller time-intervals. This is because the basin of the river Meuse consists of some subbasins that respond to rainfall even faster than the basin of the Ourthe upstream of Tabreux. When a rainfall-runoff model for the river Meuse is going to be made with time-intervals smaller than 6 hours, data availability should be improved. Operational access to short interval measurements and forecasts has to be improved during high floods especially.

Lijst met gebruikte afkortingen

acc. diff.	geaccumuleerde verschil tussen berekende en gemeten afvoer
ALFA	Recession parameter / Recessie parameter ter bepaling van Q_0
BETA / β	Soil parameter / Bodem(vocht) parameter
CFLUX	Capillary transport (maximum) / Capillaire opstijging (maximaal)
DIHO	Dienst Hydrologisch Onderzoek (Ministerie van de Vlaamse gemeenschap)
E / EP	Evapotranspiration / Evapotranspiratie (mm)
EA	Actual evapotranspiration / Actuele evapotranspiratie
EU	Europese Unie
FC	Field Capacity / Maximale hoeveelheid water aanwezig als bodemvocht (mm)
H	Waterstand (m +NAP)
HBV	Hydrologiska Byråns afdeling for Vattenbalans
ICBM	Internationale Commissie voor de Bescherming van de Maas
IN	Infiltration / Infiltratie
K	Recession / Recessie parameter voor het snelle afvoer reservoir
K_4	Recession / Recessie parameter voor het langzame afvoer reservoir
LP	Limit for potential evapotranspiration / Grens voor potentiële evapotranspiratie
LZ	Inhoud van het langzaam reagerende reservoir (mm) (langzame reservoir)
NAP	Normaal Amsterdams Peil
P	Precipitation / Neerslag (mm)
PERC	Percolation / Percolatie van snelle naar langzame reservoir
Q	Outflow / Debiet (m^3/s) (in het algemeen)
Q_0, Q_1	Afvoer voor respectievelijk snelle en langzame afvoer reservoir (in het HBV model)
R	Recharge / Zakwater naar snelle afvoer bakje vanuit bodemvocht
R^2	Nash-Sutcliffe coëfficiënt
rel. acc. diff.	acc. diff. gedeeld door de som van de totaal gemeten afvoer
RIZA	Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling
SM	Computed soil moisture storage / Berekende bodemvocht hoeveelheid (mm)
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
SP	Snowpack / De hoeveelheid water aanwezig in het sneeuwdek op het stroomgebied
T	Temperature / Temperatuur ($^{\circ}C$)
UZ	Inhoud van het snel reagerende reservoir (mm) (snelle reservoir)
WHM	Werkgroep Hoogwater Maas (Nederland, Frankrijk en de Vlaamse en Waalse gewesten van België)
dagmodel	HBV Model dat rekent met intervallen van een dag
6-uurmodel	HBV Model dat rekent met intervallen van 6 uur
1-uurmodel	HBV Model dat rekent met intervallen van 1 uur

Vertaling van Engelse termen gebruikt in het HBV model

Engels:

(air)temperature
 actual evapotranspiration
 capillary transport
 components
 correction factor
 distribution
 elevation
 end state

 field capacity

 high flow
 infiltration
 initial state

 input
 Integrated Hydrological Modelling System (IHMS)
 interception
 level
 lower response box
 outflow
 outlet
 percolation

 potential evapotranspiration
 precipitation
 rain
 recession coefficient
 recharge

 routine
 runoff
 snow accumulation
 snow melt
 soil
 soil moisture (SM)
 storage
 storage in lower response box (LZ)
 storage in upper response box (UZ)
 Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)
 threshold
 time step
 upper response box

Nederlands:

(lucht)temperatuur
 actuele verdamping (evapotranspiratie)
 capillaire opstijging
 delen (componenten)
 correctie factor
 verdeling / verspreiding
 hoogte
 eindwaarden van toestandsvariabelen SM, SP, UZ en LZ na een berekening met HBV
 veld capaciteit (maximale inhoud [mm] aan bodemvocht in onverzadigde zone)
 topafvoer
 infiltratie
 initiële toestand van de toestandsvariabelen waarmee een berekening begint
 invoer
 Geïntegreerd Hydrologisch Model Systeem
 interceptie
 niveau
 langzame afvoer reservoir
 afvoer in lozingspunt
 lozingspunt van een stroomgebied
 percolatie: hoeveelheid water dat per dag vanuit het snelle naar het langzame reservoir verplaatst
 potentiële verdamping (evapotranspiratie)
 neerslag
 regen
 uitputtingscoëfficiënt
 aanvoer van water vanuit bodemvocht naar snelle afvoer reservoir
 berekeningsprocedure
 afvoer
 sneeuw ophoping
 sneeuw afsmelting
 bodem
 bodem vocht
 berging
 inhoud van het langzaam reagerende reservoir
 inhoud van het snel reagerende reservoir
 Zweeds Meteorologisch en Hydrologisch Instituut

 drempel
 tijdsinterval / tijdstap
 snelle afvoer reservoir

Lijst met figuren

FIGUUR 1 HOOGWATER OP DE MAAS VEROORZAAKT OVERLAST (WHM, 1998)	11
FIGUUR 2 HET STROOMGEBIED VAN DE MAAS (WHM, 1998)	15
FIGUUR 3 HET VERHANG VAN DE MAAS EN HAAR VOORNAAMSTE ZIJRIVIEREN (MIN V&W, 1994).....	16
FIGUUR 4 GOLFAFVLAKKING VAN EEN HOOGWATERGOLF BIJ STROOMAFWAARTSE VERPLAATSING, ZONDER ZIJDELINGSE TOEVOER VAN WATER (MIN V&W, 1995).....	16
FIGUUR 5 LOOPTIJDEN VAN HOOGWATERGOLVEN VAN NAMEN TOT LITH (MIN V&W, 1994)	17
FIGUUR 6 VOORTPLANTINGSSNELHEDEN VAN EEN HOOGWATERGOLF OP VERSCHILLENDE TRAJECTEN TUSSEN NAMEN EN LITH.....	17
FIGUUR 7 DEFINITIE VAN VOORSPELLEN (WARMERDAM, SA).....	18
FIGUUR 8 LOOPTIJDEN VAN HOOGWATERGOLVEN OP DE MAAS VAN CHOOZ TOT BORGHAREN (MIN V&W, 1999).....	19
FIGUUR 9 SAMENVLOEIING VAN DE AMBLÈVE (LINKS) EN DE OURTHE (RECHTS).....	20
FIGUUR 10 HET STROOMGEBIED VAN DE OURTHE, DE MEETPUNTEN EN INDELING VAN HET THIESSENNET VOOR GEBIEDSNEERSLAG	21
FIGUUR 11 GEOLOGIE VAN WALLONIË (TILMONT ET AL., 1984)	22
FIGUUR 12 HET STROOMGEBIED ALS EEN HYDROLOGISCH SYSTEEM (HARLIN, 1992)	23
FIGUUR 13 SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN HET HBV-96 MODEL (SMHI, SA)	24
FIGUUR 14 BEPALING VAN REGEN- EN SNEEUWHOEEVELHEDEN IN HET HBV-96 MODEL (SMHI, SA)	25
FIGUUR 15 BEPALING VAN ZAKWATER HOEEVELHEID (R) EN VERDAMPING (EA) UIT DE BODEMVOCHT ZONE (SMHI, SA)	26
FIGUUR 16 BEPALING VAN DE RESESSIE COËFFICIËNT K_0 UIT PARAMETERS H_Q EN K_{H_Q} EN ALFA (SMHI, SA).....	27
FIGUUR 17 DE TRANSFORMATIE FUNCTIE (SMHI, SA).....	28
FIGUUR 18 VERSCHILLENDE VORMEN VAN GEVOELIGHEID BIJ EEN PARAMETER, RESPECTIEVELIJK: ZEER GEVOELIG, WEINIG GEVOELIG EN PLAATSELIJK GEVOELIG / ONGEVOELIG (TORFS, 1999).....	31
FIGUUR 19 CUMULATIEVE NEERSLAG GEMETEN BIJ SPA VOOR 6 EN 24-UUR INTERVALLEN IN EEN SCATTERPLOT	33
FIGUUR 20 CUMULATIEVE NEERSLAG GEMETEN BIJ ST-HUBERT VOOR 6 EN 24-UUR INTERVALLEN IN EEN SCATTERPLOT	33
FIGUUR 21 CUMULATIEVE NEERSLAG GEMETEN BIJ BIERSET VOOR 6 EN 24-UUR INTERVALLEN IN EEN SCATTERPLOT	33
FIGUUR 22 WATERSTAND MEETPUNT VOOR DE OURTHE TE TABREUX	35
FIGUUR 23 SPOORBRUG DIRECT NAAST HET MEETPUNT TE TABREUX.....	35
FIGUUR 24 DAGELIJKE AFVOEREN VAN DE OURTHE TE TABREUX (PERIODE 1968 TOT 1977).....	36
FIGUUR 25 DAGELIJKE AFVOEREN VAN DE OURTHE TE TABREUX (PERIODE 1978 TOT 1987).....	36
FIGUUR 26 DAGELIJKE AFVOEREN VAN DE OURTHE TE TABREUX (PERIODE 1988 TOT 1998).....	36
FIGUUR 27 UURMETINGEN AFVOEREN VAN DE OURTHE TE TABREUX (HOOGWATER JANUARI 1993)	37
FIGUUR 28 UURMETINGEN AFVOEREN VAN DE OURTHE TE TABREUX (HOOGWATER DECEMBER 1993)	37
FIGUUR 29 UURMETINGEN AFVOEREN VAN DE OURTHE TE TABREUX (HOOGWATER JANUARI 1995)	37
FIGUUR 30 UURMETINGEN AFVOEREN VAN DE OURTHE TE TABREUX (HOOGWATER NOVEMBER 1998).....	38
FIGUUR 31 BEHANDELING VAN NEERSLAG BIJ MIDDELEN OVER EEN PERIODE VAN 3, 6 EN 12 UUR	41
FIGUUR 32 TEMPERATUUR VERLOOP VOOR 24 UUR BEPAALD MET DAGMINIMUM EN -MAXIMUM.....	41
FIGUUR 33 HET PRINCIPE VAN DOWNSCALING (BIERKENS ET AL., 2000).....	43
FIGUUR 34 GEMIDDELDE AFVOER VAN DE OURTHE VOOR EEN TIJDSINTERVAL VAN 3 UUR (DECEMBER 1993)	44
FIGUUR 35 GEMIDDELDE AFVOER VAN DE OURTHE VOOR EEN TIJDSINTERVAL VAN 6 UUR (DECEMBER 1993)	44
FIGUUR 36 GEMIDDELDE AFVOER VAN DE OURTHE VOOR EEN TIJDSINTERVAL VAN 12 UUR (DECEMBER 1993)	44
FIGUUR 37 GEMIDDELDE AFVOER VAN DE OURTHE VOOR EEN TIJDSINTERVAL VAN 24 UUR (DECEMBER 1993)	45
FIGUUR 38 INVLOED VAN MIDDELING VAN INVOER OVER 1,3 EN 6 UREN VOOR HOOGWATER DECEMBER 1993.....	47
FIGUUR 39 INVLOED VAN MIDDELING VAN INVOER OVER 1 EN 12 UREN VOOR HOOGWATER DECEMBER 1993.....	47
FIGUUR 40 INVLOED VAN MIDDELING VAN INVOER OVER 1 EN 24 UREN VOOR HOOGWATER DECEMBER 1993.....	47
FIGUUR 41 INVLOED VAN MIDDELING VAN INVOER OVER 1, 3 EN 6 UREN VOOR HOOGWATER JANUARI 1995	48
FIGUUR 42 INVLOED VAN MIDDELING VAN INVOER OVER 1 EN 12 UREN VOOR HOOGWATER JANUARI 1995	48
FIGUUR 43 INVLOED VAN MIDDELING VAN INVOER OVER 1 EN 24 UREN VOOR HOOGWATER JANUARI 1995	48
FIGUUR 44 HOOGWATERPERIODE JANUARI 1995 MET MAXBAS IS 0.0417 BEREKEND MET UURMETINGEN.....	49
FIGUUR 45 HOOGWATERPERIODE JANUARI 1995 MET MAXBAS IS 0.0417 BEREKEND MET DAGELIJKE UURGEMIDDELLEN.....	49
FIGUUR 46 GEVOELIGHEIDSANALYSE CFMAX.....	53
FIGUUR 47 GEVOELIGHEIDSANALYSE FC	54
FIGUUR 48 GEVOELIGHEIDSANALYSE BETA.....	54

FIGUUR 49 GEVOELIGHEIDSANALYSE LP	55
FIGUUR 50 GEVOELIGHEIDSANALYSE HQ	55
FIGUUR 51 GEVOELIGHEIDSANALYSE KHQ	56
FIGUUR 52 GEVOELIGHEIDSANALYSE ALFA	56
FIGUUR 53 AFVOER CURVE VOOR HET SNELLE RESERVOIR BIJ PARAMETERS IN KOLOM 2 IN TABEL 9	58
FIGUUR 54 AFVOER CURVE VOOR HET SNELLE RESERVOIR BIJ PARAMETERS IN KOLOM 3 IN TABEL 9	58
FIGUUR 55 DE OURTHE NABIJ DURBUY	67
FIGUUR 56 HOOGTE CORRECTIES PCALT IN HET 1-UURMODEL VOOR DE PERIODE 1992 TOT 1995	69
FIGUUR 57 AFVOERGOLF 6-UUR MODEL DECEMBER 1993	70
FIGUUR 58 AFVOERGOLF 1-UUR MODEL DECEMBER 1993 (1-UUR NEERSLAG INVOER)	71
FIGUUR 59 AFVOERGOLF 6-UURMODEL JANUARI 1995	71
FIGUUR 60 AFVOERGOLF 1-UURMODEL JANUARI 1995 (1-UUR NEERSLAG INVOER)	71
FIGUUR 61 CUMULATIEVE GEBIEDSNEERSLAG (CPREC) BEREKEND DOOR HET HBV MODEL DECEMBER 1993	72
FIGUUR 62 CUMULATIEVE GEBIEDSNEERSLAG (CPREC) BEREKEND DOOR HET HBV MODEL JANUARI 1995	72
FIGUUR 63 GEVOELIGHEIDSANALYSE PCALT	100
FIGUUR 64 GEVOELIGHEIDSANALYSE TT	100
FIGUUR 65 GEVOELIGHEIDSANALYSE TTI	101
FIGUUR 66 GEVOELIGHEIDSANALYSE FOCFMAX	101
FIGUUR 67 GEVOELIGHEIDSANALYSE CFLUX	101
FIGUUR 68 GEVOELIGHEIDSANALYSE K ₄	102
FIGUUR 69 GEVOELIGHEIDSANALYSE PERC	102

Lijst met tabellen

TABEL 1 GEWICHTSFACTOREN VOOR DE METEOROLOGISCHE MEETSTATIONS	32
TABEL 2 TOP AFVOEREN TIJDENS EEN AANTAL HOOGWATERPERIODEN	38
TABEL 3 HOOGTEZONES MET BEDEKKINGSTYPE	38
TABEL 4 Q-H RELATIE VOOR BORGHAREN ROND EEN AFVOER NIVEAU VAN 3040 M ³ /S	39
TABEL 5 POTENTIËLE VERDAMPING VERGELEKEN MET NEERSLAG VOOR DEC 1993 EN JAN 1995	42
TABEL 6 HET PERCENTAGE VAN DE PIEKAFVOER BIJ 1-UUR INTERVALLEN VOOR AFVOEREN BIJ INTERVALLEN GROTER DAN 1 UUR	45
TABEL 7 OVERZICHT VAN DE LIGGING VAN DE TOP VAN DE AFVOER BIJ INTERVALLEN GROTER DAN 1 UUR	46
TABEL 8 OVERZICHT VAN STIJGEN EN DALEN BINNEN EEN TIJDSINTERVAL BIJ INTERVALLEN GROTER DAN 1 UUR	46
TABEL 9 PARAMETERSETS VAN TOEPASSING OP HET DAGMODEL	57
TABEL 10 BEREKENDE PIEKAFVOER ALS PERCENTAGE VAN UURLIJKSE METING VOOR EEN DAGMODEL	59
TABEL 11 PARAMETERSETS VAN TOEPASSING OP HET 6-UURMODEL	64
TABEL 12 BEREKENDE PIEKAFVOER ALS PERCENTAGE VAN UURLIJKSE METING VOOR EEN 6-UURMODEL	65
TABEL 13 PARAMETERSETS VAN TOEPASSING OP HET 1-UURMODEL	73
TABEL 14 BEREKENDE PIEKAFVOER ALS PERCENTAGE VAN UURLIJKSE METING VOOR EEN 1-UURMODEL	75
TABEL 15 PARAMETERS, CALIBRATIE EN VALIDATIE RESULTATEN VOOR ALLE MODELLEN	78
TABEL 16 BEREKENING VAN HET PERCENTAGE VAN DE PIEKAFVOER DOOR DE MODELLEN MET VERSCHILLENDE TIJDSINTERVALLEN	79
TABEL 17 OVERZICHT VAN AANWEZIGE GEGEVENS PLUS TIJDSPERIODE	90

Inhoud

1.	INLEIDING	11
2.	PROBLEEMSTELLING	13
3.	KORTE BESCHRIJVING VAN DE MAAS EN DE OURTHE	14
3.1	HET STROOMGEBIED VAN DE MAAS	14
3.1.1	<i>Inleiding</i>	14
3.1.2	<i>Voortplantingssnelheid van hoogwatergolven op de Maas</i>	16
3.1.3	<i>Hoogwatervoorspellingen voor de Maas</i>	18
3.2	HET STROOMGEBIED VAN DE OURTHE	20
4.	HBV MODEL	23
4.1	INLEIDING	23
4.2	MODEL STRUCTUUR	25
4.2.1	<i>Neerslag en bodemvocht</i>	25
4.2.2	<i>Berekening van de afvoer</i>	26
4.3	IJKING VAN DE HBV MODELLEN	29
4.3.1	<i>Parameters</i>	29
4.3.2	<i>Calibratie</i>	29
4.3.3	<i>Gevoeligheidsanalyse</i>	31
4.3.4	<i>Validatie</i>	31
5.	GEGEVENS	32
5.1	GEWICHTSFACTOREN METEOROLOGISCHE STATIONS	32
5.2	MEETREEKSEN	32
5.3	HOOGTEZONES	38
6.	TIJDSINTERVAL ONDERZOEK	39
6.1	BEPALING VAN HET TIJDSINTERVAL MET DE AFVOEREN VAN DE OURTHE	39
6.2	BEPALING VAN HET TIJDSINTERVAL MET BEHULP VAN HET HBV MODEL	40
6.3	DOWNSCALING VAN GEGEVENSREEKSEN	42
6.4	RESULTATEN	43
6.4.1	<i>Bepaling van het gewenste tijdsinterval met behulp van de afvoeren van de Ourthe</i>	43
6.4.2	<i>Invloed van het middelen van neerslag invoer op uitvoer van het HBV model</i>	46
6.5	CONCLUSIES	50
6.6	AANBEVELINGEN	50
7.	HBV MODEL: DAG INTERVALLEN	51
7.1	INLEIDING	51
7.2	GEGEVENSBEWERKING	51
7.3	INITIËLE TOESTAND	51
7.4	CALIBRATIE EN VALIDATIE	52
7.5	GEVOELIGHEIDSANALYSE	52
7.6	RESULTATEN	53
7.6.1	<i>Gevoeligheidsanalyse</i>	53
7.6.2	<i>Parameterwaarden</i>	57
7.6.3	<i>Modelprestatie</i>	59
7.7	CONCLUSIES	61
7.8	AANBEVELINGEN	61

8.	HBV MODEL: 6-UUR INTERVALLEN	62
8.1	INLEIDING	62
8.2	GEGEVENSBEWERKING	62
8.3	INITIËLE TOESTANDEN	62
8.4	CALIBRATIE EN VALIDATIE	63
8.5	RESULTATEN	64
8.5.1	<i>Parameterwaarden</i>	64
8.5.2	<i>Modelprestatie</i>	65
8.6	CONCLUSIES	66
8.7	AANBEVELINGEN	67
9.	HBV MODEL: 1-UUR INTERVALLEN	68
9.1	INLEIDING	68
9.2	GEGEVENSBEWERKING	68
9.3	CALIBRATIE EN VALIDATIE	69
9.4	RESULTATEN	70
9.4.1	<i>Berekeningen hoogwaters door een 1-uurmodel en een 6-uurmodel</i>	70
9.4.2	<i>Vergelijking van neerslag berekening van 1-uurmodel en 6-uurmodel</i>	72
9.4.3	<i>Parameterwaarden</i>	73
9.4.4	<i>Modelprestatie</i>	74
9.5	CONCLUSIES	76
9.6	AANBEVELINGEN	76
10.	VERGELIJK TUSSEN DE MODELLEN	77
10.1	INLEIDING	77
10.2	PARAMETERWAARDEN VAN DE GEMAAKTE HBV MODELLEN	77
10.3	EFFICIËNTIE EN RELATIEVE FOUT VAN BEREKENDE AFVOER VAN DE MODELLEN	78
10.4	BEREKENING VAN DE TOPAFVOER TIJDENS HOOGWATERPERIODEN	79
11.	DISCUSSIE	80
12.	SLOTCONCLUSIES	81
13.	AANBEVELINGEN	83
	LITERATUUR	84
	BIJLAGEN	85
	BIJLAGE 1 HOOGWATERPERIODEN 1993 EN 1995: AFVOEREN EN NEERSLAG	85
	BIJLAGE 2 PARAMETERS IN HET HBV MODEL	86
	BIJLAGE 3 AANWEZIGE GEGEVENS	90
	BIJLAGE 4 SCHAAL ONDERZOEK HOOGWATERPERIODE JANUARI 1993	91
	BIJLAGE 5 SCHAAL ONDERZOEK HOOGWATERPERIODE DECEMBER 1993	93
	BIJLAGE 6 SCHAAL ONDERZOEK HOOGWATERPERIODE JANUARI 1995	95
	BIJLAGE 7 SCHAAL ONDERZOEK HOOGWATERPERIODE NOVEMBER 1998	97
	BIJLAGE 8 TABEL MET UITKOMSTEN VAN DE GEVOELIGHEIDSANALYSE	99
	BIJLAGE 9 GRAFIEKEN VAN DE GEVOELIGHEIDSANALYSE	100
	BIJLAGE 10 AFVOERGOLVEN DAGMODEL TUSSENTIJDSE PARAMETERSETS	103
	BIJLAGE 11 AFVOERGOLVEN DAGMODEL DEFINITIEVE PARAMETERSET	109
	BIJLAGE 12 AFVOERGOLVEN 6-UURMODEL DEFINITIEVE PARAMETERSET	112
	BIJLAGE 13 AFVOERGOLVEN 1-UURMODEL DEFINITIEVE PARAMETERSET	114

1. Inleiding

De overstromingen van 1993 en 1995 veroorzaakten schade en maatschappelijke onrust in de landen van het Maasstroomgebied (figuur 1). Deze problemen gaven de aanzet tot internationale verklaringen waarin een integrale aanpak van hoogwatersituaties werd aanbevolen. De ministers van Milieu van de EU-lidstaten behorende tot de Rijn- en Maasoeverstaten hebben in de Verklaring van Arles van 4 februari 1995 aangegeven dat maatregelen genomen moeten worden om in de toekomst het schaderisico van overstromingen te verminderen. Op 29 november 1995 heeft de Internationale Commissie voor de Bescherming van de Maas (ICBM) de instelling van een aparte werkgroep voor de hoogwaterproblemen aanbevolen. De Werkgroep Hoogwater Maas (WHM) is hiertoe opgericht. Frankrijk, België (Waals en Vlaams gewest) en Nederland hebben zitting in deze werkgroep. Duitsland, Luxemburg en de ICBM zijn waarnemers. De WHM had als taak een actieplan tegen overstromingen en de daarmee gepaard gaande schade voor het stroomgebied van de Maas op te stellen. Het actieplan is inmiddels klaar. Er wordt een internationaal gemeenschappelijke aanpak door de landen en gewesten nagestreefd.

De WHM streeft na om te komen tot samenhangende maatregelen op korte, middellang en lange termijn, die ervoor zorgen dat de schade ten gevolge van hoge afvoeren in het stroomgebied van de Maas zoveel mogelijk wordt voorkómen of beperkt. Deze worden beschreven in het actieplan en zullen in 2001 in een vernieuwd actieplan gedetailleerd worden beschreven.



figuur 1 Hoogwater op de Maas veroorzaakt overlast (WHM, 1998)

Er zijn een aantal categorieën van maatregelen onderscheiden. Deze zijn op het niveau van het hele Maasstroomgebied, het riviersysteem van de Maas en op bestuurlijk en juridisch niveau. Onder deze laatste categorie vallen verdergaande voorzorgsmaatregelen om de kans op schade te verminderen. De verbetering van de voorspelling- en waarschuwingssystemen dragen bij aan de beperking van schade. Op basis van voorspellingsmodellen kunnen vroegtijdig maatregelen genomen worden tegen hoogwater zodat de dreiging van overstromingen en de gevolgen hiervan beperkt kunnen worden. Voorbeelden zijn evacuaties van mensen en dieren, het tijdelijk opwerpen van dijkjes of dijkversterking. Een huidige ontwikkeling in het kwantitatieve waterbeheer van de Nederlandse rivieren is het aanwijzen van locaties waar bij zeer hoge waterstanden op de rivieren in geval van nood water kan worden ingelaten, de zogenaamde 'calamiteitenpolders'. Deze beleidsrichting wordt door Rijk, Provincies, gemeenten en waterschappen voorgesteld om in te kunnen spelen op mogelijke klimaatveranderingen waaronder hogere piekafvoeren op de Rijn en de Maas. Het verlengen van de zichttijd waarbij de nauwkeurigheid van voorspellen gewaarborgd blijft is een belangrijk aandachtspunt. Verbeterde modellen dienen in de landen en gewesten ontwikkeld te zijn in 2000 en operationeel te zijn vóór 2005 (WHM, 1998).

De huidige zichttijd van de voorspellingen van de waterstand te Borgharen is 12 uur. Het streven is om een zichttijd van 18 uur te bereiken. Om in de toekomst nauwkeuriger voorspellingen van de waterstanden

te Borgharen met deze langere zichttijd te kunnen doen wordt onderzocht of dit met het HBV model kan worden bereikt.

Het HBV model is een conceptueel neerslag-afvoer model. Met dit model kunnen de afvoeren van de deelstroomgebieden van de Maas worden gemodelleerd. Deze afvoer berekeningen kunnen samen met hydrologische metingen als invoer dienen voor een model dat de waterstand bij Borgharen berekend. Het model zal alleen tijdens perioden met hoogwater operationeel zijn. Voor deze studie, die geldt als een afstudeervak, is als eerste aanzet tot modelering van het totale Maasstroomgebied een onderzoek gedaan naar een HBV model voor alleen het stroomgebied van de Ourthe. Vervolgens zullen neerslag-afvoer modellen voor alle deelstroomgebieden van het Maasstroomgebied gemaakt worden, dit valt echter buiten dit onderzoek.

Als eis wordt door het RIZA gesteld dat de uiteindelijke neerslag-afvoer modellen van het Maasstroomgebied twee doelen dienen, namelijk:

Korte termijn waterstandvoorspellingen

Langere termijn beleidsstudies

Voor lange termijn studies van de Maas ten behoeve van beleidsondersteuning zijn neerslag-afvoer modellen met tijdsintervallen van een dag voldoende. De berekeningen voor de beleidsstudies hebben als doel om de invloed van mogelijk toekomstige klimaatsveranderingen op zowel piekafvoeren als lage afvoeren te bepalen.

Voor een hoogwatervoorspelling voor de Maas (korte termijn) zijn berekeningen met kleinere tijdsintervallen wenselijk, gezien het snel reageren van afvoer op neerslag. Modellen die rekenen met een klein tijdsinterval geven naar verwachting een grotere nauwkeurigheid. Voorwaarde voor het uitvoeren van de berekening is dan wel dat de meetgegevens en de voorspelling van neerslag met dezelfde tijdsintervallen beschikbaar zijn.

2. Probleemstelling

Doelstellingen

Ter oriëntatie op de modellering van het hele Maasstroomgebied wordt een studie gedaan naar het neerslag-afvoerproces van het stroomgebied van de Ourthe. Dit stroomgebied wordt met het Zweedse HBV model gemodelleerd. Aandacht dient te worden geschonken aan de werking van het HBV model, het tijdsinterval waarmee gerekend moet worden ten behoeve van de hoogwatervoorspelling en de mogelijke relaties tussen de modellen die rekenen met verschillende tijdsintervallen.

De doelstellingen voor deze studie zijn de volgende:

- Het maken van een HBV model van het stroomgebied van de Ourthe dat rekent met invoer met dag intervallen (voor een simulatie over het hele jaar).
- Het maken van een HBV model dat rekent met gegevens met een kleiner tijdsinterval om tijdens hoogwaterperioden voorspellingen te kunnen doen.
- Onderzoeken of de parameterwaarden van het HBV dagmodel volgens een bepaalde methode omgezet kunnen worden naar waarden voor een model dat rekent met kleinere tijdsintervallen.

Onderzoeksvragen

Om aan de doelstellingen van dit onderzoek te voldoen zijn een aantal onderzoeksvragen opgesteld. De antwoorden op deze vragen geven weer of er mogelijkheden er zijn om met het HBV model neerslag-afvoer modellering van het stroomgebied van de Ourthe te doen en op welke manier dit zou moeten gebeuren.

De onderzoeksvragen voor deze studie zijn de volgende:

- Met welk tijdsinterval moet het neerslag-afvoerproces van de Ourthe gemodelleerd worden, waarbij een nauwkeurige voorspelling gedaan wordt en voornamelijk piekafvoeren goed worden berekend? *Er moet dus worden nagegaan wat de grootste intervallengte kan zijn waarbij pieken niet in die mate worden uitgemiddeld dat een bepaalde nauwkeurigheid niet meer wordt gehaald.*
- Kan met het HBV model met een gewenste tijdsschaal het stroomgebied van de Ourthe worden gemodelleerd en wat is de modelprestatie?
- Kan met het HBV model het hele stroomgebied van de Maas worden gemodelleerd en zodanig in de toekomst operationeel voor hoogwatervoorspellingen worden gebruikt?

3. Korte beschrijving van de Maas en de Ourthe

3.1 Het stroomgebied van de Maas

3.1.1 Inleiding

De Maas is een overwegend door regen gevoede rivier, waarvan het stroomgebied een oppervlakte van 35.000 km² beslaat. Het stroomgebied is in verschillende landen gelegen: Frankrijk (9.000 km²), Luxemburg (enkele km²), Waals gewest (12.000 km²), Vlaams gewest (4.000 km²), Duitsland (4.000 km²) en Nederland (6.000 km²). De bron van de Maas ligt in Frankrijk op het Plateau van Langres op 400 m hoogte. De lengte van de rivier is ongeveer 850 km van de bron tot aan de monding; het Hollands Diep (figuur 2).

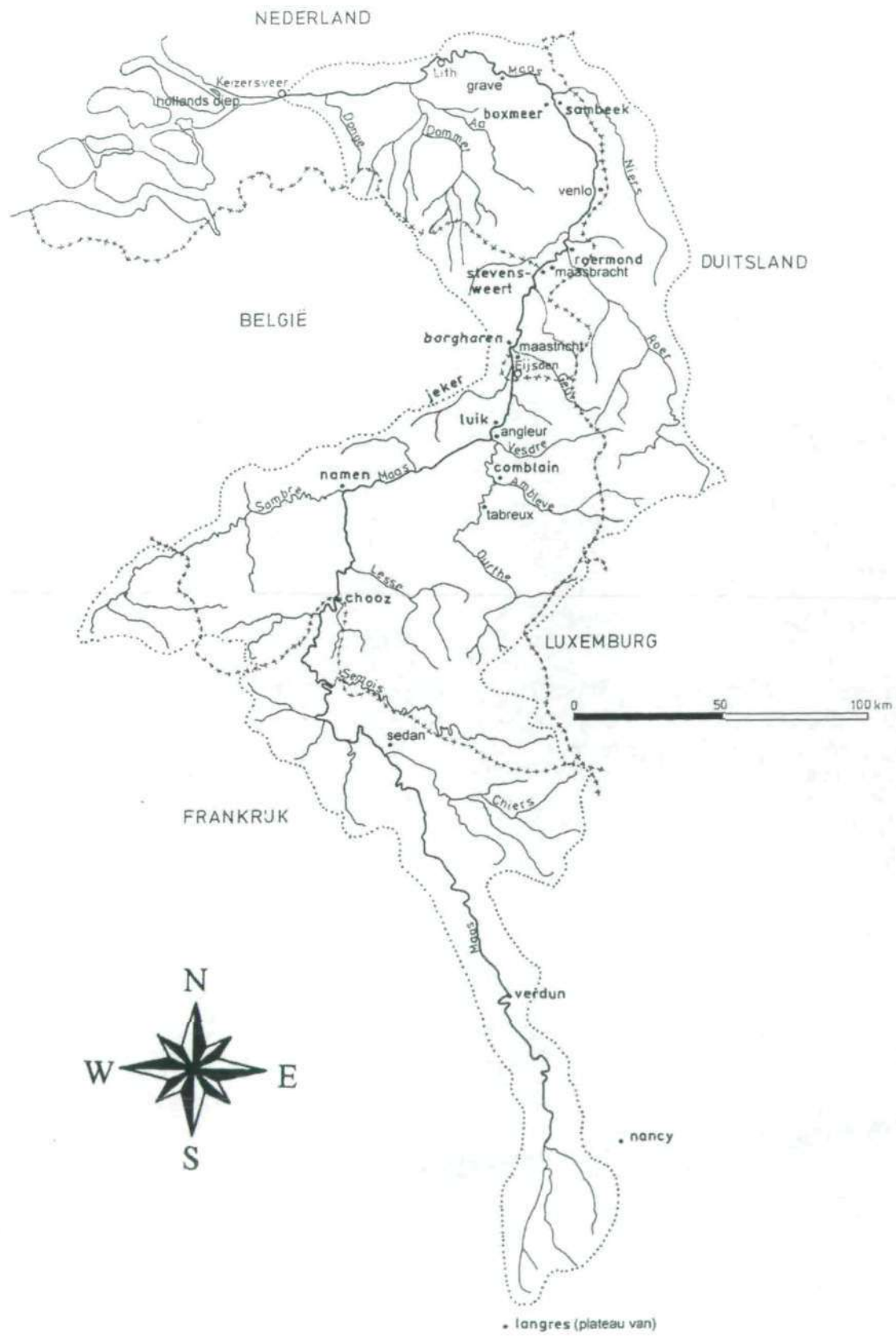
Het traject van de bron tot aan de plaats Sedan in Frankrijk wordt de Lotharingse Maas genoemd. Het rivierdal is enkele kilometers breed in een goed doorlatend terrein met kalkachtige bodem. De afvoercapaciteit van de rivier is hier gering, waardoor tijdens hoogwater het dal in de volle breedte onder water komt te staan.

Van Sedan tot aan Eijsden, bij de Belgisch/Nederlandse grens, loopt de Ardense Maas. Door de slecht doorlatende, rotsachtige bodem, de steile hellingen (figuur 3) en smalle dalen en het grote verhang van de zijrivieren en -beken komt neerslag in dit gebied snel tot afvoer. De jaarlijkse neerslag hoeveelheid is in de hooggelegen Ardennen ongeveer 1000 mm. Dit is vergeleken met andere delen van het stroomgebied van de Maas het hoogste gemiddelde. In perioden met hevige regenval komt een groot deel van de neerslag in de Ardennen vaak al binnen een dag via de zijrivieren op de Maas. De zijrivieren die op de Ardense Maas uitmonden zijn Semois, Lesse, Sambre en Ourthe (inclusief haar zijrivieren Amblève en Vesdre). In figuur 3, dat de lengteprofielen weergeeft, is te zien dat deze zijrivieren een groot verhang hebben waardoor afvoerpieken zich snel voortplanten. Deze rivieren spelen tijdens hoogwaterperioden een grote rol in het afvoerproces (Berger en Mugie, 1994).

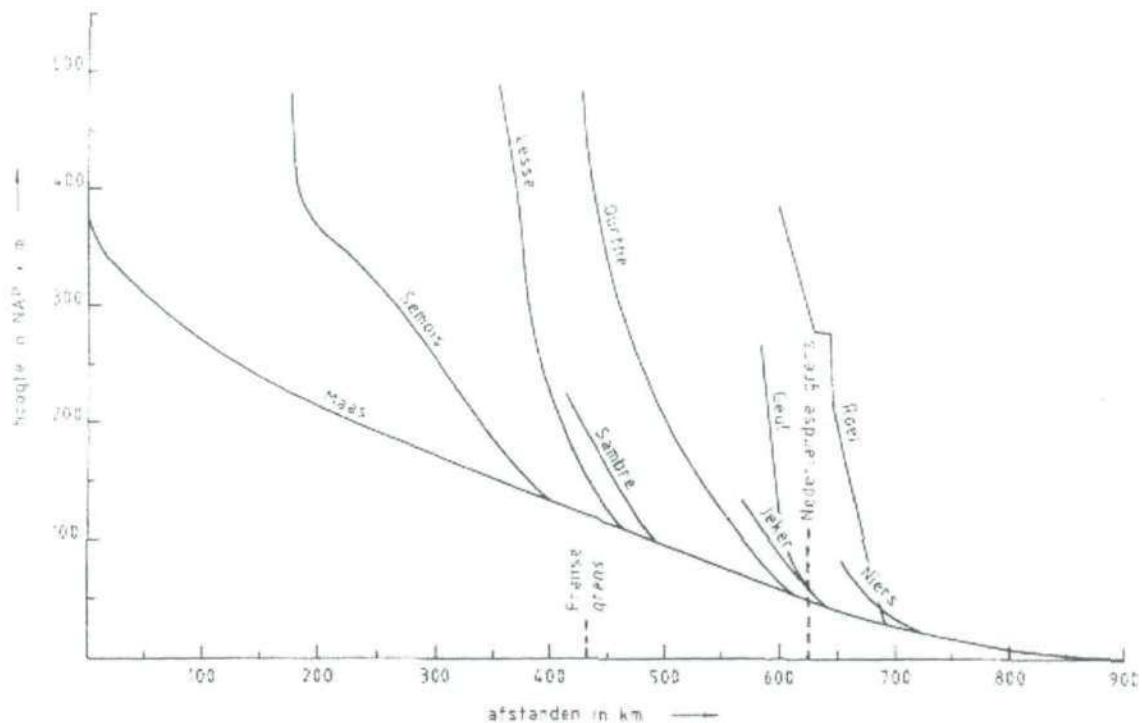
Vanaf Eijsden volgen achtereenvolgens de Grensmaas, de Maasplassen, de Zandmaas en de Getijdemaas. De Grensmaas is een ongestuwd en onbevaarbaar deel van de Maas met een vrij groot verhang. Dit gedeelte vormt de landsgrens tussen Nederland en België. De Maasplassen zijn ontstaan door grindwinning. Hier stroomt de rivier trager door vele meanders. Na de Maasplassen wordt de bodem zandig en volgt er een gestuwd traject tot aan Lith, genaamd de Zandmaas. Hierop is het hele jaar door scheepvaart mogelijk. Na Lith stroomt de Maas vrij af (WHM, 1998).

De Maas kent een zeer variërend afvoerproces. De gemiddelde afvoer bij Borgharen is 230 m³/sec.

Tijdens droge tijden kan de afvoer dalen tot onder 25 m³/sec. De hoogwatergolven in december 1993 en januari 1995 gaven respectievelijk een topafvoer bij Borgharen van 3120 m³/sec en 2870 m³/sec (DIHO, 1995).



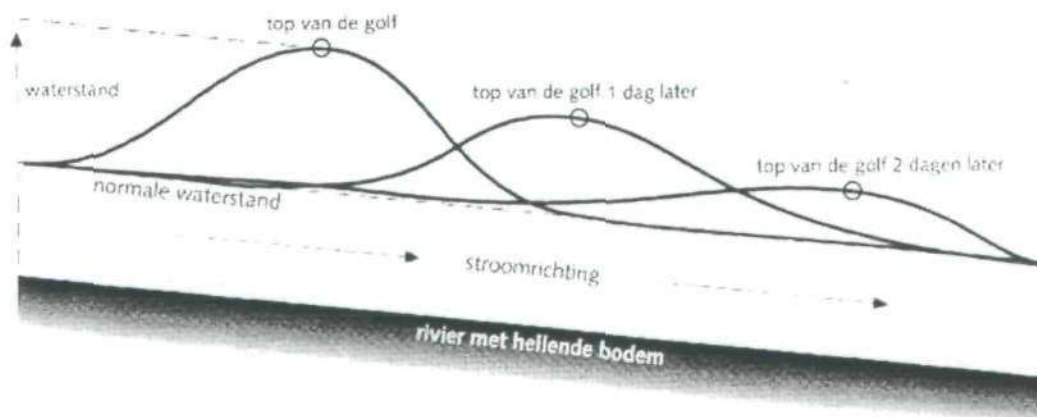
figuur 2 Het stroomgebied van de Maas (WHM, 1998)



figuur 3 Het verhang van de Maas en haar voornaamste zijrivieren (Min V&W, 1994)

3.1.2 Voortplantingssnelheid van hoogwatergolven op de Maas

In winter perioden met veel en langdurige neerslag in het hele gebied van de Maas kan een hoogwatergolf ontstaan. Tijdens de voortbeweging door de rivier zal de top van een hoogwatergolf, afhankelijk van zijdelingse toevoer, in meer of mindere mate afvlakken (figuur 4). Dit komt onder andere door het tijdelijk bergen van water in en langs de rivier in inundatiegebieden. Dit tijdelijk geborgen water zal na het passeren van de hoogwatergolf weer afstromen (Min V&W, 1995).



figuur 4 Golfafvlakking van een hoogwatergolf bij stroomafwaartse verplaatsing, zonder zijdelingse toevoer van water (Min V&W, 1995)

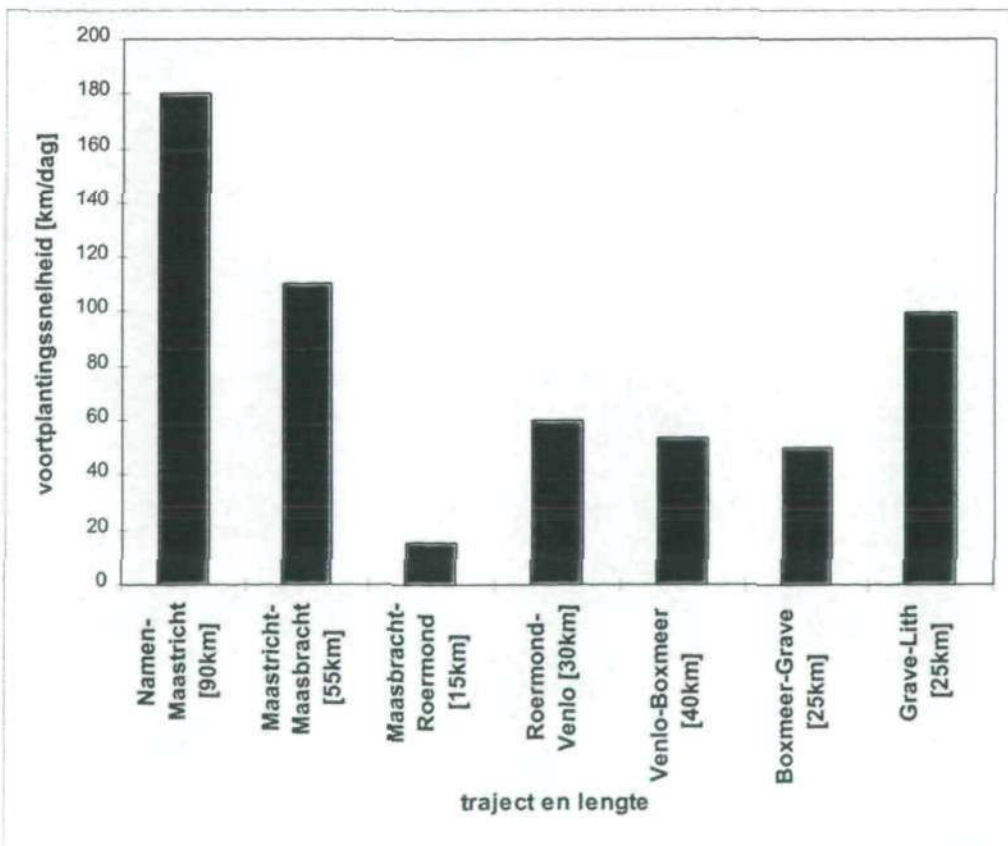
De voortplantingssnelheid van een hoogwatergolf is in de middenloop van de Maas, de Ardense Maas, het grootst omdat hier het verhang het grootst is. De voortplantingssnelheid wordt ook bepaald door de mogelijkheid tot berging van water, deze is in de middenloop van de Maas gering. De top van een

hoogwatergolf legt de afstand tussen Namen (Namur) en Maastricht (90 km) (figuur 5) slechts in een halve dag af. In de benedenloop is het verhang kleiner en zijn mogelijkheden voor berging groter waardoor een top het traject van Maastricht tot Lith (180 km) (figuur 5) ongeveer in drie dagen aflegt (Min V&W, 1994).

In figuur 6 zijn voor de verschillende trajecten op de Maas de voortplantingssnelheid van hoogwatergolven in kilometers per dag weergegeven. Er is duidelijk te zien dat de voortplantingssnelheid bovenstrooms groot is en in benedenstroomse richting afneemt. Op het traject van Namen tot Maastricht kent een hoogwatergolf een grote voortplantingssnelheid. Dit is het traject met een groot verhang en op dit traject monden de snel op neerslag reagerende zijrivieren van de Maas uit. Na Maastricht verloopt de afvoer van het water relatief traag, dit komt door meer berging van water en het kleinere verhang. De Maasplassen bevinden zich op het traject Maasbracht tot Roermond, duidelijk is te zien dat de hoogwatergolf hier vertraagd wordt. Vanaf Eijsden tot Boxmeer (figuur 2) stroomt de Maas in een natuurlijk dal. Na Boxmeer is de rivier bedijkt (WHM, 1998).

Namen-Maastricht (90 km)	ca 0.5 dag
Maastricht-Maasbracht (55 km)	ca 0.5 dag
Maasbracht-Roermond (15 km)	ca 1 dag
Roermond-Venlo (30 km)	ca 0.5 dag
Venlo-Boxmeer (40 km)	ca 0.75 dag
Boxmeer-Grave (25 km)	ca 0.5 dag
Grave-Lith (25 km)	ca 0.25 dag
Namen	Lith (280 km) ca. 4 dagen totale looptijd

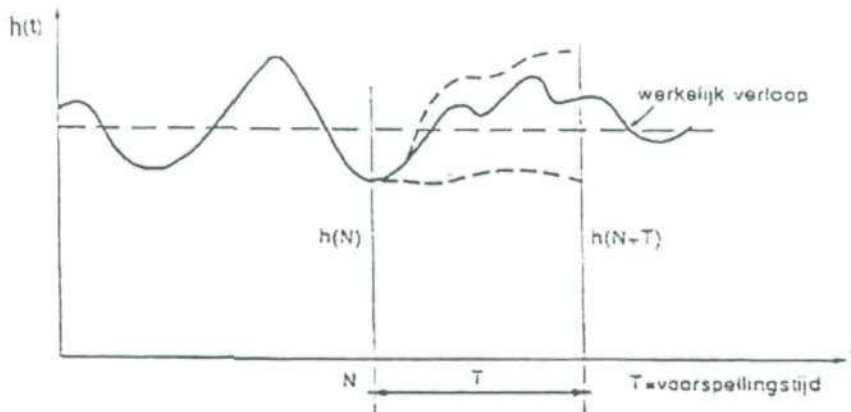
figuur 5 Looptijden van hoogwatergolven van Namen tot Lith (Min V&W, 1994)



figuur 6 Voortplantingssnelheden van een hoogwatergolf op verschillende trajecten tussen Namen en Lith

3.1.3 Hoogwatervoorspellingen voor de Maas

In figuur 7 is weergegeven wat onder het voorspellen van een waterstand of afvoer wordt verstaan. Aangenomen dat het verloop van de waterstand $h(t)$ tot het huidige tijdstip N bekend is, stelt men zich de vraag wat de waterstand op een komend tijdstip $N+T$ zal zijn. Hierin is T de voorspellingstijd of termijn (in deze studie zichttijd genoemd). De waarde van $h(N+T)$ zal sterker door de waarde van $h(N)$ worden bepaald naarmate T kleiner is. De betrouwbaarheid van de voorspelling hangt niet alleen af van de lengte van de termijn T , maar veelal ook van de nauwkeurigheid waarmee de neerslag over termijn T wordt geschat. De modelmatige beschrijving van het systeem dat het verloop van de waterstand als uitkomst heeft is het gereedschap om te voorspellen (Warmerdam, sa).



figuur 7 Definitie van voorspellen (Warmerdam, sa)

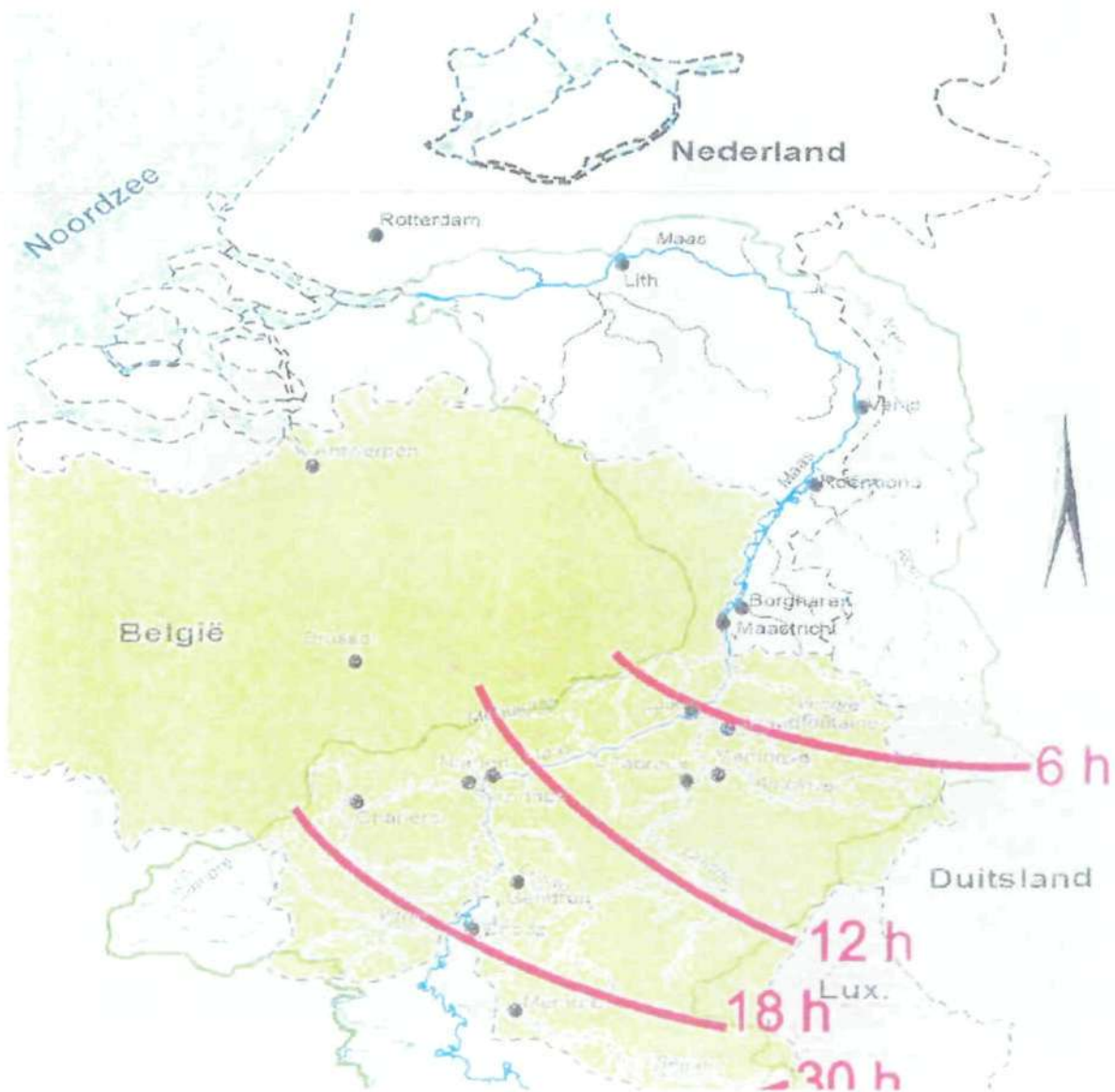
Bij Borgharen waar de Maas Nederland binnenkomt wordt de waterstand gemeten. Uit deze waterstanden worden met behulp van de zogenaamde Q-h relatie, debieten bepaald. Ten tijde van hoogwater worden voorspellingen van de waterstand te Borgharen gedaan door het RIZA met een computermodel. In dit model worden het debiet van de Maas op de Frans/Belgische grens (Chooz), de afvoeren van de Belgische zijrivieren van de Maas, de waargenomen en verwachte neerslag in het Belgische deel van het stroomgebied, de afvoer en waterstand bij Borgharen ingevoerd. Hoe groter de zichttijd wordt gekozen, hoe groter de invloed van de neerslagverwachting op de voorspelde waterstanden. Omdat neerslag verwachtingen snel onnauwkeuriger worden naarmate ze verder vooruit gelden, wordt ook de voorspelling van de waterstand onnauwkeuriger naarmate de zichttijd vergroot wordt.

De looptijd van de top van een hoogwatergolf van Chooz tot Borgharen is 18 uur (figuur 8). Bij hoogwatervoorspellingen met een zichttijd van 18 uur heeft de neerslag die binnen die tijdsperiode bovenstrooms van Chooz valt geen invloed op de voorspelling. Deze neerslag bovenstrooms van Chooz speelt pas weer een rol in de voorspelling met een zichttijd groter dan 18 uur (Burgdorffer pers. med.). Voor de voorspelling van de waterstand te Borgharen is een goede berekening van de afvoer van de Ourthe belangrijk. De Ourthe stroomt ongeveer 40 km bovenstrooms van Borgharen uit in de Maas. Een snelle stijging van de afvoer van de Ourthe door veel neerslag op het stroomgebied heeft een snelle stijging van de waterstand te Borgharen tot gevolg. Het is daarom van groot belang voor hoogwatervoorspellingen dat de afvoer van de Ourthe goed berekend wordt, een beschrijving van het stroomgebied van de Ourthe is in de volgende paragraaf opgenomen.

Hoe eerder problemen worden gesignaleerd die ontstaan tijdens een hoogwatergolf, hoe meer schade kan worden voorkomen. Er kan dijkbewaking worden ingesteld, duikers kunnen worden afgesloten, veerponten uit de vaart genomen, mensen en dieren zo nodig geëvacueerd. Van hoogwater op de Maas is sprake als de afvoer hoger wordt dan $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij een beginnend hoogwater stelt het RIZA de hoogwaterberichtgeving voor de Maas in als de waterstand in Borgharen NAP +4410 cm passeert en er een verdere stijging wordt verwacht (Middelkoop, 1998). Vele instanties worden gewaarschuwd door middel van een zogenaamd hoogwaterbericht. Dit gebeurt door het Berichtencentrum in Lelystad.

Een aantal van deze instanties is hier opgesomd.

- Betrokken Gemeenten
- Betrokken Hoogheemraadschappen
- Betrokken Provincies
- Betrokken Waterschappen
- Een aantal dagbladen en omroepen
- Koninklijke Landmacht
- Ministerie van Binnenlandse Zaken (Nationaal coördinatie centrum)
- Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap
- Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat (Directie Voorlichting)
- Regionale brandweerkorpsen
- Rijksvoorlichtingsdienst
- Rijkswaterstaat directies (o.a. Limburg)
- Rijkswaterstaat hoofdkantoor
- Rijkswaterstaat RIZA Berichtencentrum
- Waals Ministerie



figuur 8 Looptijden van hoogwatergolven op de Maas van Chooz tot Borgharen (Min V&W, 1999)

3.2 Het stroomgebied van de Ourthe

De Ourthe stroomt in het oosten van Wallonië. Het totale stroomgebied van de Ourthe bovenstrooms van Angleur beslaat 3626 km² (figuur 2). Het stroomgebied van de Ourthe is het grootste deelstroomgebied van de Maas. De Ourthe kent relatief grote en snel stijgende afvoeren in hoogwaterperioden en heeft hierdoor grote invloed op de waterstanden in het Nederlandse deel van de Maas. De Ourthe zal dus een belangrijke rol spelen in de voorspelling van de afvoer van de Maas.

De bovenloop van de Ourthe bestaat uit twee takken, de Ourthe Occidentale en de Ourthe Orientale. Deze twee takken voegen zich te Nisramont samen in een stuwmeer. Bij Comblain(-au-Pont) voegt de Amblève zich bij de Ourthe (figuur 9) en bij Angleur mondt de Vesdre uit in de Ourthe waarna de Ourthe snel uitmondt in de Maas. De Ourthe is gerekend vanaf de bron van de Ourthe Occidentale 175 km lang. De Vesdre en de Amblève zijn hydrologisch gezien twee zeer belangrijke zijrivieren van de Ourthe (figuur 2). Er zijn drie redenen waarom er apart naar deze twee rivieren moet worden gekeken, dit zijn:

1. De afvoeren van de Vesdre en de Amblève kunnen groter zijn dan die van veel andere zijrivieren van de Maas. Het is noodzakelijk om deze twee rivieren apart van de Ourthe bovenstrooms van de Amblève te beschouwen.
2. De mondingen van de twee rivieren op de Ourthe liggen relatief dicht bij de monding van de Ourthe op de Maas, waardoor de drie rivieren niet zozeer elkaar veel beïnvloeden maar samen een grote bijdrage kunnen leveren aan de afvoer van de Maas.
3. Het meetpunt in de Ourthe nabij de monding levert door wisselende stuwstanden van de stuw Grosses Battes te Angleur niet altijd betrouwbare afvoeren. Door nu op de drie verschillende rivieren bovenstrooms debietmetingen te doen kunnen metingen van de afvoeren met grotere betrouwbaarheid worden verkregen.

Debietmetingen van de Ourthe worden gedaan te Tabreux, van de Vesdre te Chaudfontaine en van de Amblève te Martinrive. (Berger en Mugie, 1994)



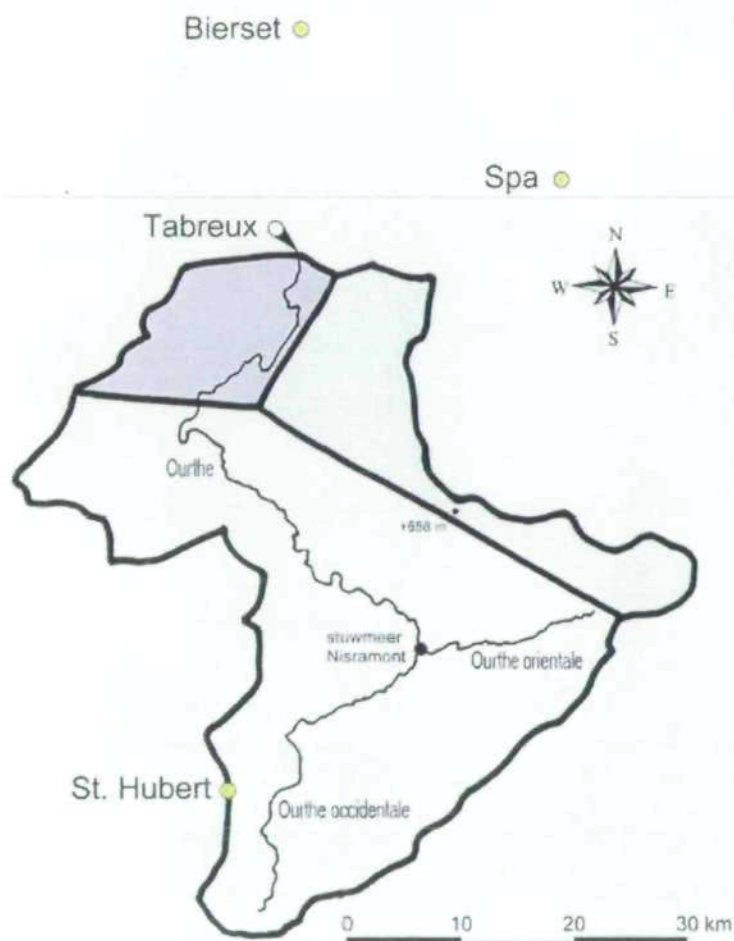
figuur 9 Samenvloeiing van de Amblève (links) en de Ourthe (rechts)

Voor deze studie is het stroomgebied bovenstrooms van het debietmeetpunt te Tabreux genomen. Dit is het stroomgebied exclusief de stroomgebieden van de Amblève en de Vesdre. Bovenstrooms bestaat de Ourthe uit twee takken. De Ourthe Occidentale ontspringt op NAP +500 m hoogte en de Ourthe Orientale op NAP +520 m hoogte (figuur 10). Na het stuwmeer van Nisramont vloeit de Ourthe voort in één bedding. Tot Tabreux komen nog een groot aantal kleine zijrivieren uit in de Ourthe. Enkele hiervan zijn de Marchette, de Aisne, de Neblon en de Lembree.

Het stroomgebied van de Ourthe boven Tabreux heeft een oppervlak van 1597 km². Het hoogste punt bevindt zich op NAP +658 m (figuur 10). Het gebied is bergachtig van karakter en 42% is bedekt met bos waarvan 70% loofhout. De verdeling van het bosoppervlak naar hoogte ligging wordt verder uitgewerkt in Hoofdstuk 5.

Het stuwmeer van Nisramont, dat sinds 1958 bestaat, heeft een capaciteit van 3*10⁶ m³. Het stuwmeer functioneert als reservoir voor drinkwatervoorziening en voor elektriciteitsopwekking. Het meer functioneert niet als bergingsreservoir tijdens hoogwater en zal de hoogte en de vorm van een hoogwater weinig beïnvloeden. De invloed van het stuwmeer op de afvoer te Borgharen is hierdoor zeer gering of in het geheel afwezig.

De afvoeren van de Ourthe tijdens de hoogwaters van december 1993 en januari 1995 zijn in Bijlage 1 weergegeven evenals de cumulatieve neerslag. Van deze twee maanden is de neerslag per uur beschikbaar en is in Bijlage 1 weergegeven vanaf de eerste dag van de maand (Berger en Mugie, 1994).



Totale oppervlakte van het stroomgebied: 1597 km²

- Invloedsgebied Bierset
- Invloedsgebied Spa
- Invloedsgebied St. Hubert
- Meteorologisch meetstation
- Debiet meetstation

figuur 10 Het stroomgebied van de Ourthe, de meetpunten en indeling van het Thiessennet voor gebiedsneerslag

4. HBV model

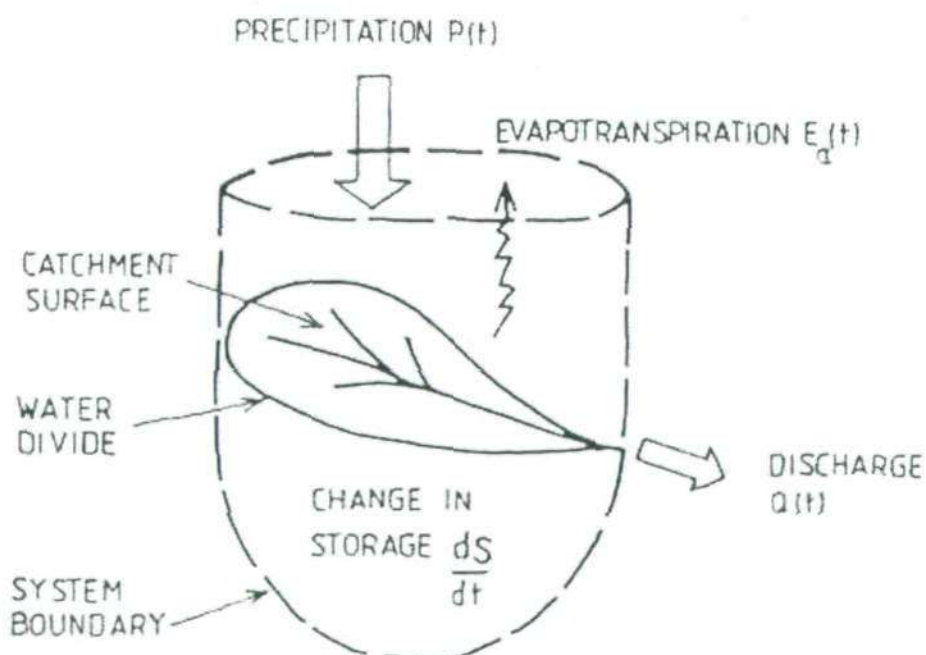
4.1 Inleiding

De hydrologische kringloop bestaat uit veel complexe processen. Door de grote variabiliteit in de processen wordt veralgemenisering van processen op een kleine schaal zeer moeilijk. De dynamiek van de neerslag-afvoerprocessen kan worden benaderd vanuit een aanpak waarbij een stroomgebied als een hydrologisch systeem wordt onderscheiden. Een van de definities van een systeem is als volgt: "Onderling verbonden delen die een geheel vormen. De hydrologische kringloop mag worden behandeld als een systeem met de componenten: neerslag, verdamping, afvoer en andere fases van de hydrologische kringloop.". Door het systeem concept te gebruiken worden relaties tussen de invoer en uitvoer van een systeem gelegd in plaats van gedetailleerde procesbeschrijvingen met exacte fysische wetten. Modellen zijn benaderingen van de werkelijkheid. De fundamentele waterbalans voor een stroomgebied is vergelijking 4.1.

vergelijking 4.1
$$Q(t) = P(t) - E_a(t) - dS/dt$$

Q(t)	afvoer
P(t)	neerslag
E _a	evapotranspiratie
dS/dt	verandering in berging van water

Deze vergelijking is geldig in het lozingspunt zolang water de grenzen van het systeem niet overschrijdt en alleen in het lozingspunt wordt afgevoerd (figuur 12). Het achterliggende idee van hydrologische modellering is het vaststellen van eenvoudige relaties tussen de variabelen van vergelijking 4.1. Deze variabelen beschrijven de verdeling van de neerslag over verdamping, afvoer en berging. Op deze manier kan het verloop van de componenten van de water balans worden gesimuleerd (Harlin, 1992).



figuur 12 Het stroomgebied als een hydrologisch systeem (Harlin, 1992)

Het HBV model is een neerslag-afvoer model dat door het "Swedish Meteorological and Hydrological Institute" (SMHI) te Norrköping in Zweden is ontworpen. In deze studie is gebruik gemaakt van het HBV96 model IHMS versie 4.5 (datum 1999-12-13). Het HBV96 model is de meest recente versie.

Het model is een semi-distributed model omdat het voor de afvoerberekening van een stroomgebied onderscheid maakt tussen zones in het stroomgebied naar hoogteligging en naar het wel of niet aanwezig zijn van bos. Het model vraagt drie typen gegevens als invoer. Dit zijn neerslag, temperatuur en potentiële verdamping, welke gewoonlijk als dagwaarden worden ingevoerd. Het is echter mogelijk kleinere tijdsintervallen te gebruiken.

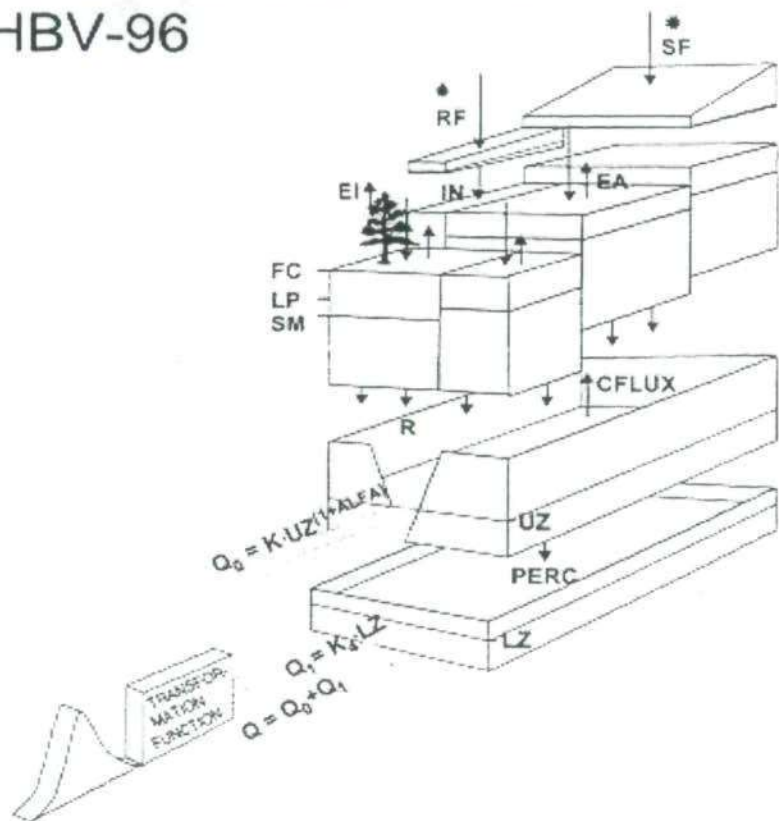
De temperatuur gegevens worden gebruikt om de hoeveelheid sneeuwval te berekenen en vervolgens de ophoping en afsmelt van de sneeuw te bepalen. Een schematische weergave van het model is te zien in figuur 13. Er zijn vijf stappen aangegeven waarmee wordt gerekend om neerslag in een periode tot afvoer te laten komen (SMHI, sa).

In paragraaf 4.3.1 wordt een algemene uitleg over parameters gegeven. De parameters die in het HBV model worden gebruikt worden besproken in Bijlage 2.

De volgende vijf onderdelen van het model zijn in paragraaf 4.2 verder uitgewerkt.

1. Een **neerslag** verrekening gebeurt aan de hand van temperatuur, hoogte en vegetatie type.
2. Het **Bodemvocht** verloop in de tijd wordt berekend uit aanvoer van water door neerslag en verlies door verdamping en afvoer naar het snelle reservoir.
3. Het **Snelle afvoer reservoir** berekent de snelle afvoer in natte perioden.
4. Het **Langzame afvoer reservoir** berekent de base flow.
5. De **Transformatie functie** vertraagt en vakt de afvoer af in het lozingspunt.

HBV-96



P = Precipitation
 T = Temperature
 SF = Snow
 RF = Rain
 IN = Infiltration
 EA = Actual evapotranspiration
 EI = Evaporation from interception
 SM = Soil moisture storage
 FC = Maximum soil moisture storage
 LP = Limit for potential evapotranspiration

R = Recharge
 CFLUX = Capillary transport
 UZ = Storage in upper response box
 LZ = Storage in lower response box
 PERC = Percolation
 K, K₂ = Recession parameters
 ALFA = Recession parameter
 Q₀, Q₁ = Runoff components

figuur 13 Schematische weergave van het HBV-96 model (SMHI, sa)

4.2 Model structuur

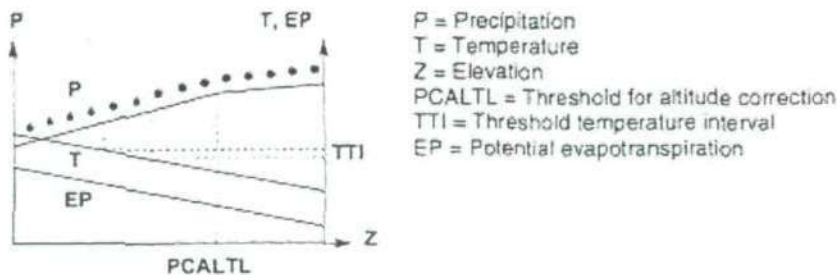
4.2.1 Neerslag en bodemvocht

Neerslag

Bepaling van de gebiedsneerslag door het HBV model uit metingen op verschillende meteorologische stations vindt plaats aan de hand van hoogte-, vegetatie- en neerslagcorrecties. De neerslaggegevens worden vermenigvuldigd met de neerslag correctie factor (pcorr). Deze is in principe 1.0 maar wanneer structurele fouten in metingen moeten worden gecorrigeerd kan dat worden gedaan met deze parameter, zonder dat de gehele gegevensreeks aangepast dient te worden. In aanvulling hierop kunnen verschillende correctie factoren gebruikt worden voor sneeuwval (sfcf) en regenval (rfcf).

Voor de verschillende hoogtezones wordt daarna een correctie (pcalt) toegepast voor de neerslag hoeveelheid, hoe hoger een zone hoe meer neerslag er valt. Deze correctie factor is een fractie die per 100 meter stijging bij de neerslag correctie factor wordt opgeteld. Deze correcties worden toegepast ten opzichte van de hoogte waarop de neerslag is gemeten. Vervolgens wordt de accumulatie en smelt van sneeuw berekend met behulp van de lucht temperatuur. Daartoe wordt eerst de temperatuur voor verschillende hoogtezones bepaald met een correctie, voor de hoogte, op de gemeten temperaturen op meetstations. TTI in figuur 14 is het temperatuur interval waarin neerslag zowel als sneeuw en regen valt. Wanneer de temperatuur lager is wordt ingevoerde neerslag alleen als sneeuw geaccumuleerd. Bij hogere temperaturen wordt geen sneeuw berekend.

Uit de voorgaand aangegeven berekeningen wordt de hoeveelheid effectieve neerslag per tijdsinterval bepaald. Sneeuwval en accumulatie hebben tot gevolg dat er water tijdelijk geborgen is op het oppervlak. Na afsmelten kan dit water pas tot afstroming komen. In figuur 14 is weergegeven hoe hoeveelheden regen- en sneeuwval worden bepaald uit de gebiedsneerslag (SMHI, sa).



figuur 14 Bepaling van regen- en sneeuwhoeveelheden in het HBV-96 model (SMHI, sa)

Bodemvocht

De hoeveelheid bodemvocht in het stroomgebied wordt berekend met een bodemvocht reservoir, dat als onverzadigde zone kan worden gesymboliseerd. De hoeveelheid bodemvocht in dit reservoir wordt met SM (soil moisture) aangeduid. De maximale hoeveelheid die het reservoir kan bevatten is FC (field capacity). Het bodemvocht wordt aangevuld door regen- en smeltwater, als de infiltratie weergegeven als IN in figuur 15. Water gaat verloren door actuele evapotranspiratie (EA in figuur 15) en zakwater (R in figuur 15) naar het snelle afvoer reservoir. De waarde van SM hangt af van de parameters LP, FC en beta.

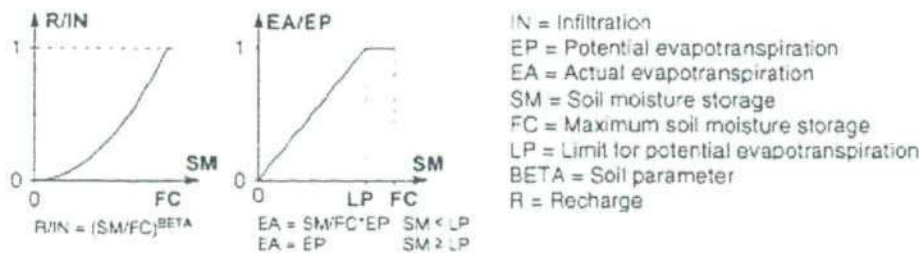
De waarde van beta is medebepalend voor de fractie van de infiltratie (R/IN) die via de bodemvocht zone aan het snelle reservoir ten goede komt (figuur 15). Deze wordt berekend door de bodemvocht hoeveelheid te delen door de maximale hoeveelheid bodemvocht en deze deling vervolgens tot de macht beta te nemen (vergelijking 4.2).

vergelijking 4.2
$$R / IN = (SM / FC)^{\beta}$$

De vorm van de grafiek in figuur 15 waarin R/IN als functie van SM en FC is uitgezet wordt bepaald door de waarde van beta. Wanneer het bodemvocht reservoir vol is dan is SM gelijk aan FC waardoor R/IN gelijk wordt aan 1.0. De neerslag die optreedt wanneer SM gelijk is aan FC komt dan direct ten goede aan het snelle afvoer reservoir en wordt dus niet tijdelijk in het bodemvocht reservoir geborgen.

vergelijking 4.3 $EA = (SM / FC) \cdot EP$

Water verlaat het bodemvocht reservoir door evapotranspiratie. Het HBV model berekent uit potentiële evapotranspiratie een actuele evapotranspiratie. LP is de bodemvocht hoeveelheid waarboven de evapotranspiratie gelijk is aan de potentiële evapotranspiratie, EP. Bij een bodemvocht hoeveelheid kleiner dan LP wordt de actuele evapotranspiratie, EA, berekend volgens vergelijking 4.3 (figuur 15) (SMHI, sa).



figuur 15 Bepaling van zakwater hoeveelheid (R) en verdamping (EA) uit de bodemvocht zone (SMHI, sa)

4.2.2 Berekening van de afvoer

Het HBV model kent twee afvoer componenten. Deze worden gerepresenteerd door een snel en een langzaam afvoer reservoir. Al het zakwater, R, komt in het snelle reservoir. Het water in het snelle reservoir wordt verdeeld over drie processen, namelijk de snelle afvoer, de capillaire opstijging naar de bodemvocht zone en een percolatie naar het langzame afvoer reservoir. Dit langzame afvoer reservoir geeft de baseflow. De som van de afvoer uit het snelle reservoir en het langzame reservoir levert de afvoer van het stroomgebied op een bepaald tijdstip.

Snelle afvoer reservoir

De toevoer naar het snelle reservoir wordt getransformeerd tot snelle afvoer door een niet-lineair reservoir. De bijdrage aan de afvoer van het snelle afvoer reservoir (Q_0) is een functie van de geborgen hoeveelheid water in dit reservoir. De afvoer Q_0 wordt volgens vergelijking 4.4 berekend.

vergelijking 4.4 $Q_0 = k_0 \cdot UZ^{(alfa+1)}$

- Q_0 afvoer uit het snelle reservoir [mm/dag]
- k_0 recessie coëfficiënt van het snelle reservoir [$1/(dag \cdot mm^{alfa})$]
- UZ geborgen hoeveelheid water in het snelle reservoir [mm]
- alfa parameter [-]

De vergelijking 4.4 geeft Q_0 als niet-lineaire functie van UZ. Dit betekent dat de waarde van Q_0 exponentieel toeneemt met toename van de hoeveelheid UZ. De waarde van de parameter alfa bepaald de mate van niet-lineariteit van het reservoir. Bij een alfa met waarde 0 is het afvoer reservoir een lineair reservoir. $UZ^{(alfa+1)}$ is dan immers gelijk aan UZ^1 waardoor er een lineaire vergelijking ontstaat. Bij een waarde voor alfa groter dan 0 is het een niet-lineaire vergelijking.

De waarde voor k_0 voor het snelle afvoer reservoir wordt volgens een bepaalde methodiek berekend uit de parameters hq , khq en α (figuur 16). Het HBV model gebruikt de parameters hq en khq en α om de waarde voor k_0 te bepalen zodanig dat vergelijking 4.5 geldt. De waarden van hq en Q_0 zijn dan gelijk en bij een bekende α en khq kan dan UZ_{hq} en vervolgens k_0 berekend worden.

vergelijking 4.5
$$hq = khq \cdot UZ_{hq}$$

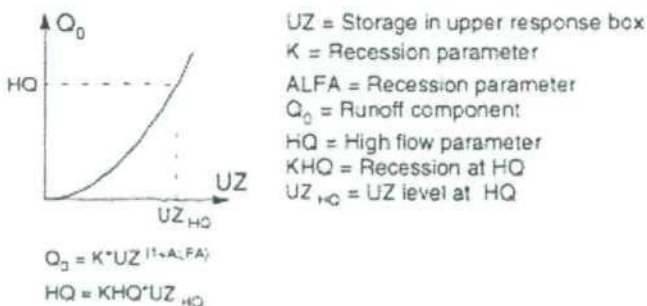
- hq topafvoer [mm/dag]
- khq recessie coëfficiënt bij de topafvoer, hq [1/dag]
- UZ_{hq} de hoeveelheid water in het snelle afvoer reservoir bij de topafvoer [mm]

De parameter hq is een topafvoer waarbij de recessie coëfficiënt khq is verondersteld. De waarde van hq wordt bepaald door de wortel uit het product van de gemiddelde afvoer en de gemiddelde topafvoer per jaar te nemen (vergelijking 4.6).

vergelijking 4.6
$$hq = \sqrt{mq \cdot mhq}$$

- hq topafvoer [mm/dag]
- mq gemiddelde afvoer [mm/dag]
- mhq gemiddelde topafvoer per jaar [mm/dag]

Een benadering van de parameter khq in de vergelijking 4.5 is de helling van de gemeten afvoergolf, bij een afvoer intensiteit gelijk aan hq , na het uitzakken van een piekafvoer. Om te voorkomen dat de recessie gedurende een tijdsinterval de waarde 1 overschrijdt wordt er binnen het HBV model met een kleiner tijdsinterval gerekend. Een parameter (recstep) geeft aan hoeveel berekeningsstapjes het model uitvoert binnen het tijdsinterval waarop het model uitvoert produceert.



figuur 16 Bepaling van de resessie coëfficiënt k_0 uit parameters hq en khq en α (SMHI, sa)

De percolatie van het snelle naar het langzame reservoir wordt bepaald door een parameter ($perc$) met een vaste waarde per tijdsinterval, in het HBV model is dit een waarde met als eenheid mm/dag. Zolang het snelle afvoer reservoir voldoende water bevat zal elk tijdsinterval een hoeveelheid water gelijk aan de intensiteit van $perc$ uit het snelle reservoir naar het langzame reservoir percoleren.

De capillaire opstijging is in het model afhankelijk van de mate waarin de bodemvocht zone gevuld is (vergelijking 4.7). Door de parameter $cflux$ wordt een grenswaarde voor de capillaire opstijging vastgesteld. De capillaire opstijging is afhankelijk van het bodemvocht tekort dit is het verschil tussen FC en SM . Wanneer dit verschil niet nul is maar positief zal er een fractie van $cflux$ capillair opstijgen. Wanneer het bodemvocht tekort nul is vindt er geen capillaire opstijging plaats.

vergelijking 4.7 $CO = cflux \cdot (FC - SM) / FC$

CO	capillaire opstijging [mm/dag]
cflux	maximale capillaire opstijging [mm/dag]
FC	field capacity (maximum voor SM) [mm]
SM	bodemvocht hoeveelheid [mm]

Langzame afvoer reservoir

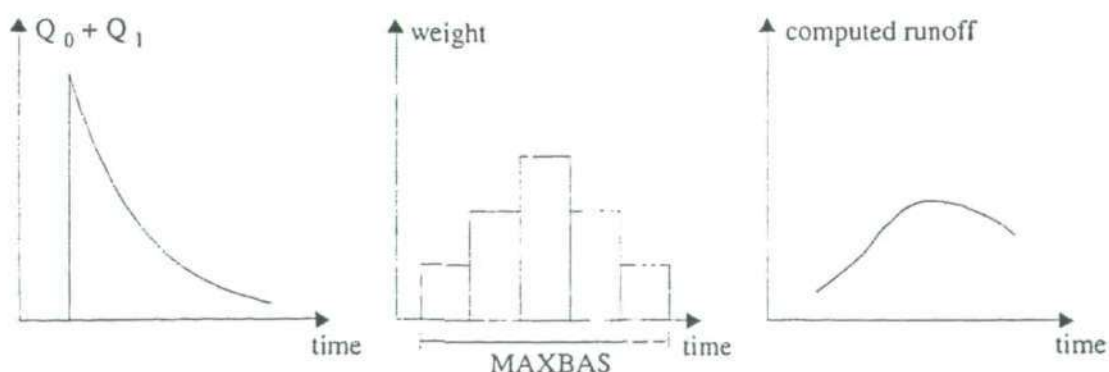
De langzame afvoer wordt getransformeerd door een lineair reservoir. De bijdrage aan de afvoer van het langzame afvoer reservoir (Q_1) is een lineaire functie van de hoeveelheid geborgen water in dit reservoir. De berekening van Q_1 gaat volgens vergelijking 4.8.

vergelijking 4.8 $Q_1 = k_4 \cdot LZ$

Q_1	afvoer uit het langzame reservoir [mm/dag]
k_4	recessie coëfficiënt van het langzame reservoir [1/dag]
LZ	geborgen hoeveelheid water in het langzame reservoir [mm]

Transformatie functie

Met behulp van een transformatie functie wordt er een afvoerverloop bij het lozingspunt van het stroomgebied bepaald. De transformatie functie is een simpele filter techniek waarbij een driehoekige gewichtsverdeling wordt gebruikt, zoals weergegeven in figuur 17. Een parameter (maxbas) bepaald hoelang de basis is van de driehoek bij deze driehoekige gewichtsverdeling. Op basis van deze driehoek worden de berekende afvoeren Q_1 en Q_2 omgezet in het afvoerverloop. Deze afvoer wordt in het HBV model qcout genoemd. Deze bewerking brengt een vertraging aan in de modeluitvoer. Hoe groter de waarde van de parameter maxbas hoe groter de periode waarover Q_0 en Q_1 worden verdeeld. Dit heeft ook tot gevolg dat de afvoer wordt afgevlakt (SMHI, sa).



figuur 17 De transformatie functie (SMHI, sa)

De waarde voor de parameter maxbas wordt altijd ingevoerd met een eenheid in dagen. Wanneer de waarde van maxbas 1 [dag] is in een dagmodel komen Q_0 en Q_1 diezelfde dag nog tot afvoer. Wanneer aan maxbas een waarde van 3 [dagen] wordt gegeven worden Q_0 en Q_1 volgens de driehoekige verdeling in figuur 17 in de tijd over 3 dagen verdeeld. Bij modellen met kleinere tijdsintervallen dan 1 dag kan maxbas een waarde kleiner dan 1 hebben.

4.3 IJking van de HBV modellen

4.3.1 Parameters

Modellen bevatten parameters, dit zijn onbekende coëfficiënten waaraan door calibratie van het model met gegevens van het gebied waarden worden toegekend. Deze waarden worden zodanig toegekend dat het modelresultaat zo goed mogelijk overeenstemt met het gemeten verloop. Meestal wordt alleen op het afvoerverloop gecalibreerd.

De betrouwbaarheid van de modelresultaten is in sterke mate afhankelijk van de calibratie procedure. Gewoonlijk wordt het HBV model gecalibreerd door handmatig te zoeken naar één set van parameterwaarden die meest optimale modelresultaten geeft. Uit ervaringen met verschillende modellen blijkt dat het zeer moeilijk is om een unieke parameterset te vinden. Dit komt door de gekozen model structuur en de kwaliteit van de gegevens. Afhangelijkheid tussen de verschillende parameters kan ervoor zorgen dat geen optimaal calibratie resultaat wordt behaald (Warmerdam, 2000, pers. med.).

Dit maakt de verwachting dat een gebruikte parameterset de meest optimale is, niet aannemelijk. Er zijn, bij afhankelijkheid tussen parameters, veel combinaties van waarden van de parameters waarbij voor een te modelleren periode de kwaliteit van het model gelijk is. De grote vraag in dit geval is welke set voor toekomstige perioden voldoet. Veel combinaties zullen niet goed voldoen wanneer ze toegepast worden op andere perioden.

Het vinden van een unieke parameterset wordt bemoeilijkt wanneer het aantal gebruikte parameters toeneemt. Wanneer er daarentegen meer informatie beschikbaar is over het systeem dat wordt gemodelleerd zal een parameterset makkelijker te vinden zijn. Met een zogenaamde Monte Carlo procedure kan parameter onzekerheid worden onderzocht. Dit wordt gedaan door een groot aantal model runs te doen met willekeurig bepaalde parameterwaarden. Hierna wordt per parameter bekeken hoe goed de gemeten afvoer kan worden benaderd met verschillende parameterwaarden. Vaak wordt de mate van onzekerheid van de parameterwaarden van een model getest door de gevoeligheid te bepalen van de modeluitvoer voor veranderingen in één parameterwaarde, terwijl de andere constant worden gehouden. Het voordeel van de Monte Carlo procedure is dat de afhankelijkheid van parameters onderling is weggelaten doordat parametersets werden gevarieerd in plaats van individuele parameterwaarden (Seibert, 1997).

4.3.2 Calibratie

Calibratie is het proces van aanpassen van de model parameters zodanig dat de modelprestatie optimaal is volgens vooropgestelde criteria. Om een model te calibreren moeten er voor een voldoende lange periode metingen beschikbaar zijn. Voor het model is invoer nodig om de door het model berekende afvoer te vergelijken met de gemeten afvoer.

Een model is een vereenvoudiging van de werkelijkheid en zal geen resultaten geven die exact gelijk zijn aan de waarnemingen. Er kan bij het ijken vooral gekeken worden naar een goede simulatie van de pieken, of juist van de lage afvoeren. Er kan ook voor worden gekozen een zo goed mogelijke simulatie van zowel pieken als lage afvoeren te bereiken en zo een model dat over een geheel jaar betrouwbare resultaten geeft (Warmerdam, 2000, pers. med.).

Om te bepalen bij welke combinatie van parameterwaarden de beste simulatie door het model berekend wordt, is een objectief criterium nodig. Er zijn een aantal manieren om de 'goodness of fit' (model kwaliteit) van een model te bepalen. Hieronder zijn twee manieren beschreven waarop voor een continue afvoergolf de 'goodness of fit' bepaald kan worden (Wilby, 1997).

Calibratie perioden zullen voor alle HBV modellen in deze studie beginnen op de datum 1 oktober en eindigen op 30 september. Dit wordt gedaan omdat er in de periode van eind september tot begin oktober gemiddeld genomen sprake is van lage afvoeren waardoor er een zo klein mogelijke fout in de waterbalans ontstaat door deze datums als start en eind te nemen voor de calibratie perioden.

Het SMHI heeft de beschikking over een automatische calibratie procedure. Wanneer hiervan gebruik wordt gemaakt is het belangrijk eerst met de hand de parameters aan te passen om een zo goed mogelijke beginsituatie voor de automatische calibratie te creëren. Hiermee wordt zoveel mogelijk voorkomen dat tijdens een automatische calibratie lokale maxima worden gevonden met nadelige gevolgen voor de model kwaliteit. Een lokaal maximum is niet gelijk aan het grootst mogelijke maximum bij een andere, meest optimale, combinatie van parameterwaarden.

Afwijking van afvoer volumes (D_v)

Dit criterium, D_v (vergelijking 4.9), geeft aan wat het relatieve verschil is tussen de gemeten en berekende afvoer ten opzichte van de gemeten afvoer, het kan zijn dat dit criterium nul nadert maar tegelijkertijd het verloop van de berekende afvoergolf totaal verschilt van de gemeten. D_v is een maat voor de waterbalans van het model. D_v kan elke waarde aannemen en heeft de waarde nul als er geen verschil is tussen het gemeten en berekende afvoer volume (Wilby, 1997).

vergelijking 4.9
$$D_v = \frac{V - V^1}{V} \cdot 100$$

D_v	relatieve afwijking van het berekende en het gemeten afvoer volume [range: $-\infty$ tot ∞ %]
V	gemeten jaarlijkse of seizoen afvoer volume [m^3]
V^1	met het model berekende afvoer volume [m^3]

In het HBV model is een soortgelijk criterium aanwezig. Dit wordt relative accumulated difference (rel. acc. diff.) genoemd. Dit is het gesommeerde verschil tussen de berekende en gemeten afvoer. Een negatieve waarde betekent dus een te kleine berekende afvoer over de berekeningsperiode en een positieve waarde betekent een te grote hoeveelheid afvoer over de berekeningsperiode. Dit criterium geeft enkel informatie over de totale hoeveelheid afvoer die is berekend, deze wordt vergeleken met de hoeveelheid gemeten afvoer. Of de afvoer intensiteiten ook in de tijd goed worden berekend wordt niet door dit criterium bevat. Het is daarom belangrijk naast dit criterium ook visueel te calibreren en de R^2 uit te rekenen, zie hieronder.

In het HBV model wordt er niet met honderd vermenigvuldigd waardoor het een relatieve fractie van de gemeten afvoer blijft. Bij een goed model heeft dit criterium een waarde tussen de -0.01 en 0.01 [-]. Dit komt overeen met een relatief geaccumuleerd verschil tussen de -1 en 1 procent (Burgdorffer, 2000, pers. med.). Het is belangrijk voor een goede calibratie dat de waterbalans klopt. De som van afvoer en verdamping over een lange periode moet gelijk zijn aan de neerslag in deze periode. Is dit niet het geval, dan moet er een correctie worden toegepast (Warmerdam, 2000 pers. med.).

Nash-Sutcliffe coëfficiënt (R^2)

De Nash-Sutcliffe coëfficiënt R^2 (vergelijking 4.10) is een maat voor het verklarende vermogen van de door het model berekende dagelijkse afvoer ten opzichte van de gemiddelde dagelijkse afvoer. Dit wordt ook wel de efficiëntie van het model genoemd.

vergelijking 4.10
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_i^1)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_m)^2}$$

R^2	Nash-Sutcliffe coëfficiënt [range: $-\infty$ tot 1]
n	aantal dagen [-]
Q_i	gemeten afvoer intensiteit [m^3/s]
Q_i^1	berekende afvoer intensiteit [m^3/s]
Q_m	gemiddelde van de gemeten afvoer intensiteit [m^3/s]

Wanneer R^2 gelijk is aan nul beschrijft het model de werkelijkheid evengoed als het gemiddelde dat zou doen. Wanneer R^2 kleiner is dan nul, is het model slechter dan gewoonweg het gemiddelde te nemen. Het maximum voor R^2 is 1.0 en dit geeft aan dat het model exact de gemeten waarden berekent. Wanneer R^2 een waarde van 0.75 of hoger heeft kan het model als goed worden beschouwd (Wilby, 1997). In het HBV model wordt voor elke model run de waarde van R^2 berekend.

Visuele calibratie

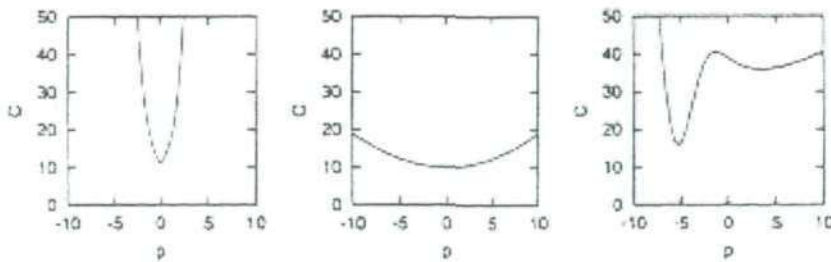
R^2 en rel. acc. diff. tezamen geven een beeld van de model kwaliteit. R^2 geeft aan hoe goed het berekende afvoerverloop het gemeten afvoerverloop volgt. Het relatieve geaccumuleerde verschil geeft aan of de gemeten hoeveelheid afvoer over de periode ook door het model berekend wordt. Als alleen naar dit laatste criterium wordt gekeken kunnen er foute conclusies worden getrokken. Een totale hoeveelheid berekende afvoer over een bepaalde periode kan wel net zo groot zijn als een gemeten hoeveelheid afvoer, terwijl het verloop in de tijd totaal verschilt. Daarom is het zeer belangrijk naast het calibreren met de criteria R^2 voor de vorm en rel. acc. diff. voor de waterbalans, visueel te controleren of een berekend afvoerverloop het gemeten afvoerverloop volgt. Afbeeldingen van modeluitvoer en gemeten afvoer waarop visueel gecalibreerd kan worden zijn weergegeven in Bijlage 10 tot en met Bijlage 13.

4.3.3 Gevoeligheidsanalyse

Gevoeligheidsanalyse wordt gebruikt om inzicht te krijgen in welke mate veranderingen van parameters en/of randvoorwaarden de modelresultaten beïnvloeden (Torfs, 1999).

Nadat het HBV dagmodel is gecalibreerd wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd. Voor parameters die met de hand worden gecalibreerd wordt de gevoeligheid van de model efficiëntie (R^2) en het geaccumuleerde verschil tussen gemeten en berekende afvoer (Acc. Diff.) bepaald. Dit wordt gedaan door, bij gelijk blijven van de overige parameterwaarden, steeds een parameterwaarde te variëren. De parameterwaarde wordt vermeerderd met achtereenvolgens -75, -50, -25, 0, 25, 50 en 75 procent van zijn eigen absolute waarde en vervolgens wordt het model uitgevoerd. Bij elk van de parameterwaarden wordt door het model een waarde voor R^2 en Acc. Diff. berekend. Deze waarden worden vervolgens in een grafiek uitgezet, zie paragraaf 7.6.1.

De mate van de kromming waarmee de lijn door deze punten loopt geeft aan hoe gevoelig het model is voor verandering van de desbetreffende parameter (figuur 18).



figuur 18 Verschillende vormen van gevoeligheid bij een parameter, respectievelijk: zeer gevoelig, weinig gevoelig en plaatselijk gevoelig / ongevoelig (Torfs, 1999)

4.3.4 Validatie

Om er voor te zorgen dat een model dat is gecalibreerd objectief wordt getest moet het worden gevalideerd. Dit is een essentieel onderdeel van modelleren in het algemeen. Valideren is het toetsen van het model voor een gegevens set die niet is gebruikt voor de calibratie.

Normaal gesproken is een periode waarop gevalideerd wordt net zolang als een periode waarop gecalibreerd wordt. De hydrologische omstandigheden zouden gelijk moeten zijn gedurende calibratie en validatie. Het model wordt echter sterker op de proef gesteld wanneer de hydrologische omstandigheden verschillen gedurende de calibratie en validatie periode, wanneer bijvoorbeeld de validatie periode veel natter is en er hogere piekafvoeren voorkomen. Wanneer het model deze piekafvoeren goed berekend kan het model als bruikbaar worden bestempeld. Net als bij de calibratie zullen perioden beginnen op een dag met de datum 1 oktober en eindigen op een dag met de datum 30 september.

5. Gegevens

5.1 Gewichtsfactoren meteorologische stations

Om door het HBV model uit de gegevens van de drie meetstations gebiedswaarden voor neerslag, temperatuur en evapotranspiratie te laten berekenen moet per station een gewichtsfactor worden bepaald. Deze waarde moet voor elk station in het HBV model worden ingevoerd. De gewichtsfactor is bepaald door Thiessenpolygonen te maken voor de meteorologische stations: Bierset, Spa en St-Hubert. Eerst worden de drie stations met behulp van drie lijnen verbonden. Daarna wordt op elke lijn de middelloodlijn getrokken. Dit zijn ook drie lijnen, deze lijnen komen op een locatie in het gebied tezamen en bakenen de gebieden af die voor de verschillende drie stations representatief zijn. Deze gebieden zijn invloedsgebieden genoemd en zijn afgebeeld in figuur 10.

Op basis van de verhouding tussen oppervlakten van deze invloedsgebieden zijn voor de meetstations gewichtsfactoren bepaald. Deze oppervlakten en gewichtsfactoren zijn weergegeven in tabel 1.

tabel 1 Gewichtsfactoren voor de Meteorologische meetstations

Meteorologisch meetstation	Oppervlakte [km ²]	Gewichtsfactor [-]
Bierset	177	0.11
Spa	355	0.22
St-Hubert	1065	0.67
Totale oppervlakte stroomgebied	1597	

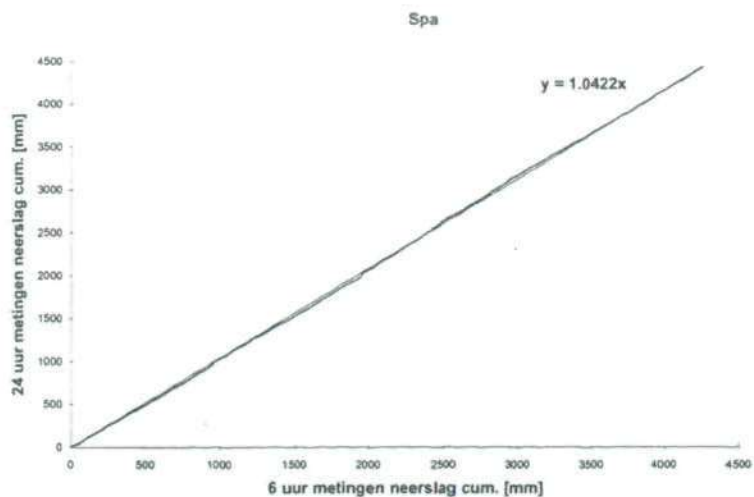
5.2 Meetreeksen

Een overzicht van alle gebruikte gegevens is opgenomen in Bijlage 3. Van het stroomgebied van de Ourthe zijn ten behoeve van de HBV modellering van de volgende meteorologische stations metingen beschikbaar en gebruikt: Bierset, Spa en St-Hubert. Van deze stations zijn neerslag, potentiële verdamping en temperatuur over bepaalde perioden met 24 uur en 6-uur intervallen gebruikt.

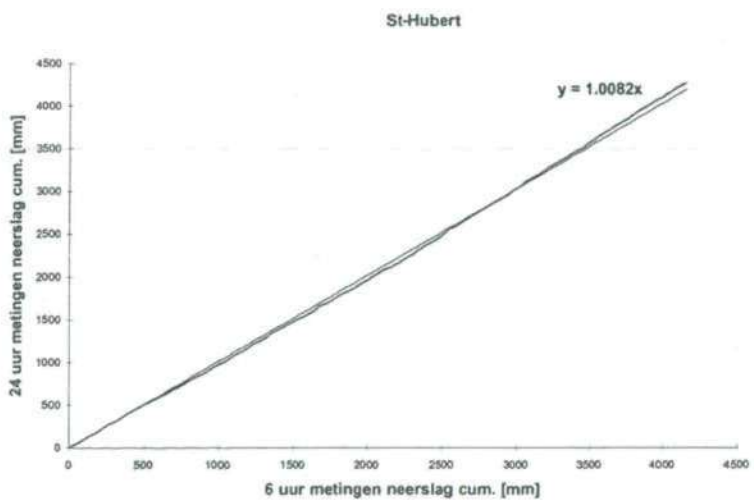
Neerslag

Neerslag is tijdens de jaren 1967 tot en met 1996 met dag intervallen gemeten. Voor de periode van 8 september 1990 tot 12 oktober 1995 is neerslag met 6-uur intervallen bekend. Ontbrekende waarden in de neerslag reeks zijn op nul gesteld.

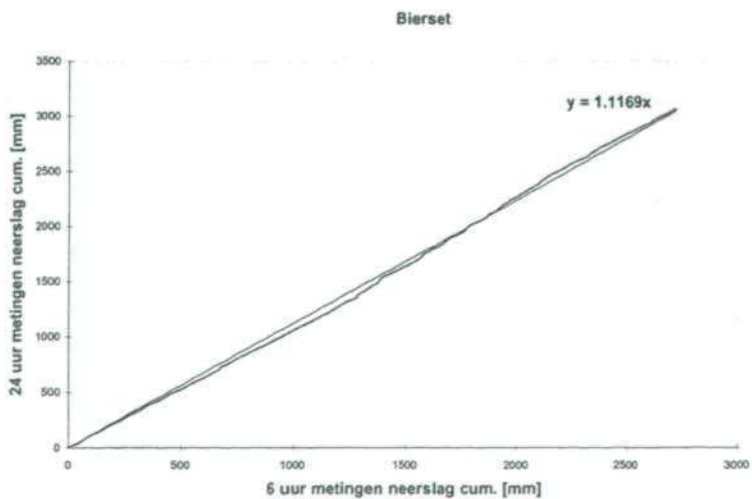
Omdat de neerslagreeksen met verschillende regenmeters gemeten zijn, wordt een vergelijking tussen de meetreeksen gedaan. Wanneer de reeksen sterk van elkaar blijken af te wijken, mag hiermee geen vergelijkende studie worden gedaan tussen modellen met verschillende tijdsintervallen. Voor de vergelijking tussen 24-uur intervallen en 6-uur intervallen zijn de metingen van de neerslag op de drie stations cumulatief tegen elkaar uitgezet, voor de periode van 1 januari 1991 tot en met 31 december 1994 zoals te zien is in figuur 19, figuur 20 en figuur 21.



figuur 19 Cumulatieve neerslag gemeten bij Spa voor 6 en 24-uur intervallen in een scatterplot



figuur 20 Cumulatieve neerslag gemeten bij St-Hubert voor 6 en 24-uur intervallen in een scatterplot



figuur 21 Cumulatieve neerslag gemeten bij Bierset voor 6 en 24-uur intervallen in een scatterplot

Er is in elke grafiek aangegeven wat de vergelijking is voor de lineaire trendlijn die door de oorsprong gaat. In het meest ideale geval wanneer de gegevens met 6 en 24-uur intervallen perfect overeenkomen is de vergelijking $y=x$. Waarbij y de cumulatieve neerslag met 24-uur intervallen op een bepaald tijdstip is en x de cumulatieve neerslag met 6-uur intervallen op hetzelfde tijdstip. De vergelijkingen voor de drie stations zijn hieronder weergegeven. Ook is de vergelijking weergegeven voor het geval dat de drie stations naar gewicht zouden worden verrekend.

Spa	$y = 1.042x$
St-Hubert	$y = 1.008x$
Bierset	$y = 1.117x$
Alle stations (gewichten)	$y = 1.028x$

De neerslag gegevens met 6-uur meetintervallen zijn bruikbaar voor deze studie, voor de stations Spa en St-Hubert zijn de gegevens reeksen met 24-uur en 6-uur meetintervallen nagenoeg gelijk. De neerslag met 6-uur meetintervallen voor station Bierset is te laag. Bierset is het station dat het kleinste aandeel heeft in de bepaling van de gebiedsneerslag (zie paragraaf 5.1) hierdoor wordt de invloed op de bepaling van de hoeveelheid gebiedsneerslag met de modellen met een dag en een 6-uur interval van het verschil in neerslagen met dag en 6-uur interval gemeten te Bierset kleiner.

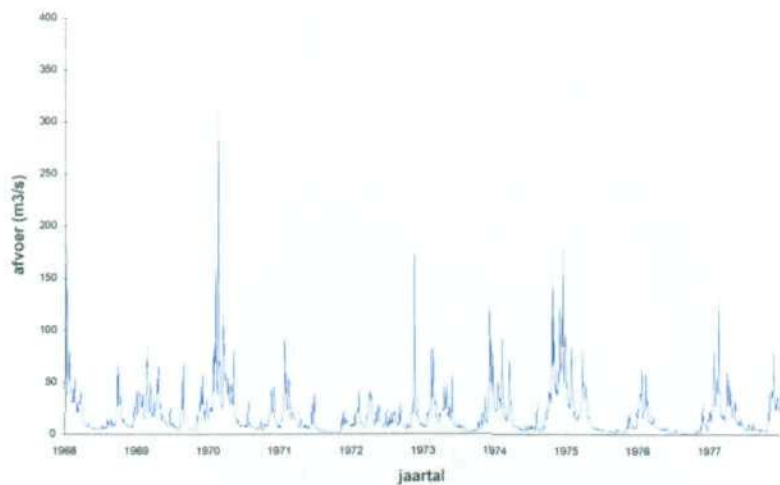
Wanneer met behulp van deze gewichtsfactoren de afwijking van de 6-uur gegevens ten opzichte van de 24-uur gegevens wordt berekend komt naar voren dat de 6-uur neerslag gegevens 2.7% kleiner zijn dan de 24-uur gegevens. Dit is geen ernstige afwijking.

De oorzaak van het verschil tussen 6- en 24-uurmetingen voor station Bierset kan bijvoorbeeld een groot aantal ontbrekende waarden in de 6-uur intervallen reeks zijn. Wanneer deze ontbrekende waarden door nul worden vervangen wordt als gevolg hiervan de cumulatieve hoeveelheid bij metingen met 6-uur interval kleiner. Een andere verklaring zou een systematische fout van de gebruikte regenmeter op station Bierset kunnen zijn.

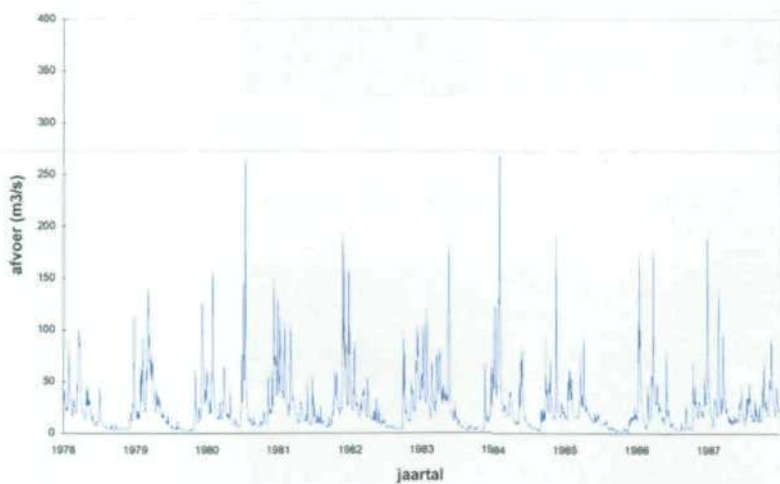
Naast metingen met 6 en 24-uur intervallen op de drie stations is ook een neerslagreeks met een uur interval voor december 1993 en januari 1995 gebruikt. Deze gebiedsneerslag gevalideerd en gebaseerd op een aantal stations en representatief voor het gebied bovenstrooms van Tabreux. Voor de perioden maart en december 1979, juli 1980, februari 1984 en januari en februari 1988 zijn ook gebiedsneerslagen voor het gebied bovenstrooms van Tabreux aanwezig maar niet gebruikt.

Afvoer gegevens

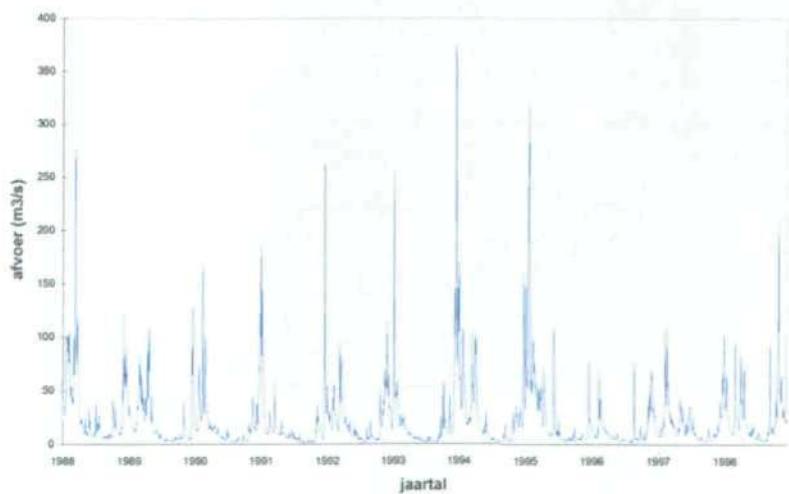
Om met het HBV model te calibreren is een gemeten afvoerreeks van de Ourthe gebruikt. Deze gegevens zijn gemeten te Tabreux, een foto van het meetpunt is opgenomen in figuur 22. In figuur 23 is een foto van de spoorbrug naast de meetopstelling gegeven. Bij extreem hoge afvoeren zal water zeer hoog komen te staan. Aan beide kanten van de peiler van de spoorbrug zal waarschijnlijk stroming plaatsvinden. Welk effect dit heeft op de metingen is niet onderzocht maar het zou kunnen zijn dat bij de berekening van zeer hoge debieten een extrapolatie op de metingen moet worden gedaan die tot onzekere waarden leidt. Het is niet met zekerheid te zeggen of de Q-h relatie dan nog geldig is. Voor dag intervallen zijn dagelijkse afvoeren te Tabreux aanwezig van 1968 tot en met 1998 (figuur 24, figuur 25 en figuur 26). Daarnaast zijn er 1-uurmetingen aanwezig voor een aantal hoogwaterperioden in maart en december 1979, juli 1980, februari 1984, januari en februari 1988, januari en december 1993, januari 1995 en november 1998 (figuur 27 tot en met figuur 30).



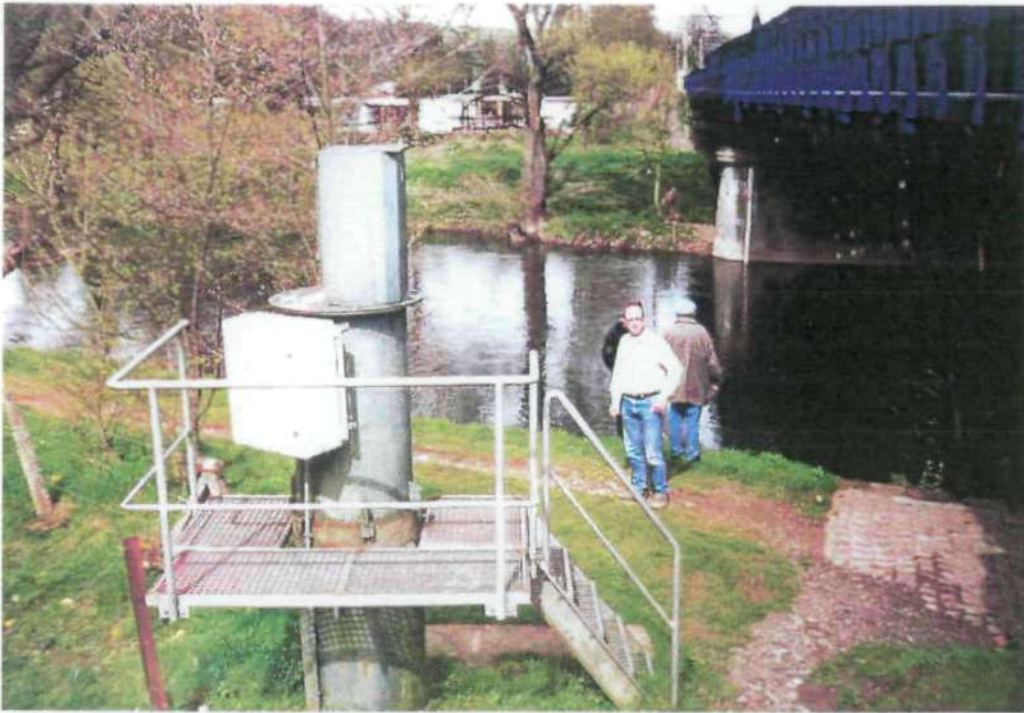
figuur 24 Dagelijkse afvoeren van de Ourthe te Tabreux (periode 1968 tot 1977)



figuur 25 Dagelijkse afvoeren van de Ourthe te Tabreux (periode 1978 tot 1987)



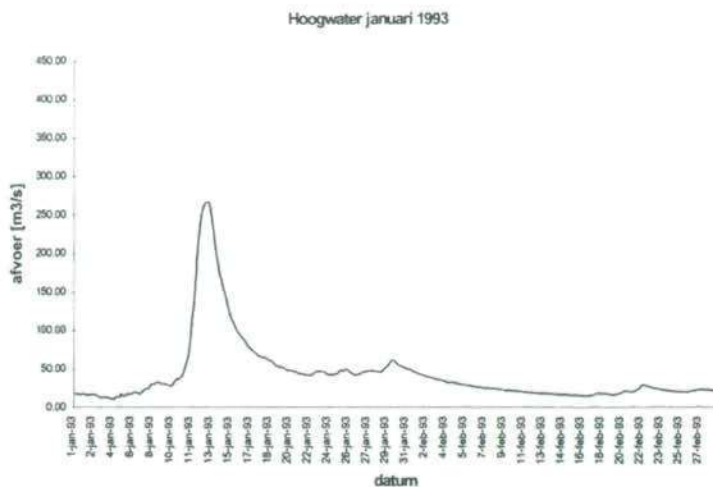
figuur 26 Dagelijkse afvoeren van de Ourthe te Tabreux (periode 1988 tot 1998)



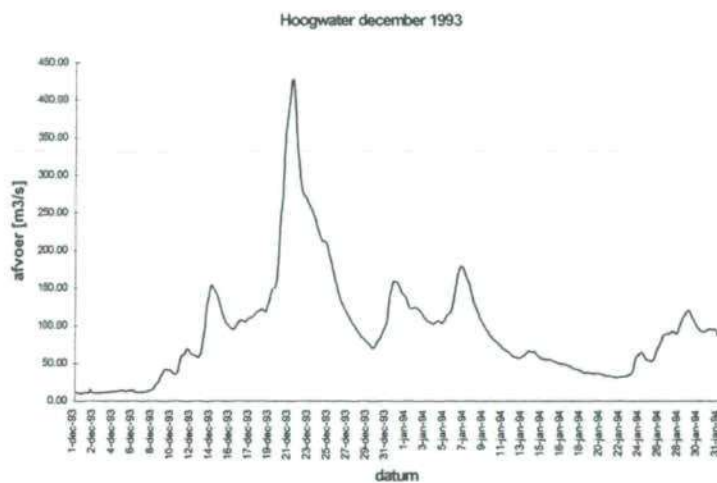
figuur 22 Waterstand meetpunt voor de Ourthe te Tabreux



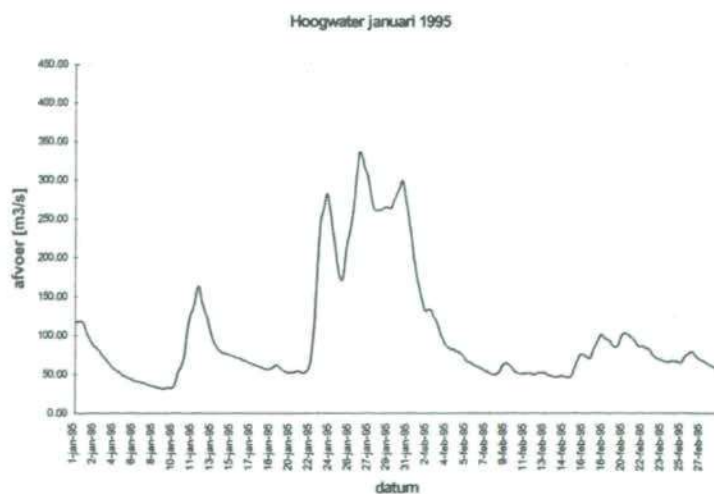
figuur 23 Spoorbrug direct naast het meetpunt te Tabreux



figuur 27 Uurmetingen afvoeren van de Ourthe te Tabreux (hoogwater januari 1993)

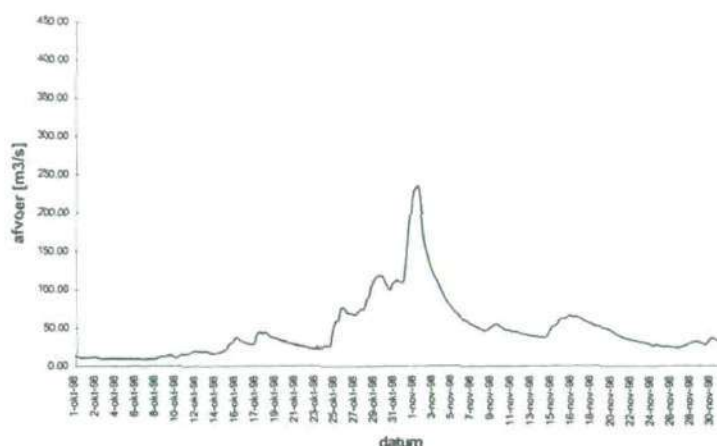


figuur 28 Uurmetingen afvoeren van de Ourthe te Tabreux (hoogwater december 1993)



figuur 29 Uurmetingen afvoeren van de Ourthe te Tabreux (hoogwater januari 1995)

Hoogwater november 1998



figuur 30 Uurmetingen afvoeren van de Ourthe te Tabreux (hoogwater november 1998)

De top afvoeren tijdens de bovengenoemde hoogwaterperioden zijn weergegeven in tabel 2. Deze waarden zijn bepaald met behulp van de metingen met uur intervallen en zijn in het vervolg van het onderzoek gebruikt om de kwaliteit van de modellen te testen.

tabel 2 Top afvoeren tijdens een aantal hoogwaterperioden

mnd-j	mrt-79	dec-79	jul-80	feb-84	jan-88	feb-88	jan-93	dec-93	jan-95	nov-98
m3/s	150	143	270	311	102	107	267	428	337	235

Temperatuur en potentiële verdamping

Daggemiddelde temperaturen zijn bekend voor de periode 1967 tot en met 1996. Daarnaast zijn dagminima en -maxima van 8 september 1990 tot 12 oktober 1995 gemeten. Het dagminimum wordt bepaald uit de temperaturen tussen 19 uur en 07 uur, het dagmaximum wordt bepaald uit de temperaturen tussen 07 uur en 19 uur.

Potentiële verdamping is voor de jaren 1967 tot en met 1996 met de methode van Makkink berekend. Voor elke dag is een aantal millimeters water berekend dat maximaal kan verdampen. Hiermee kan dan met behulp van het HBV model een actuele verdamping berekend worden (vergelijking 4.3).

5.3 Hoogtezones

Naast de bovenstaande gegevens is er met behulp van een GIS programma een aantal hoogtezones bepaald met de bijbehorende percentages aan bos en niet beboste oppervlakten van deze zones. Dit is gedaan voor het oppervlak van het stroomgebied bovenstrooms van Tabreux. De resultaten van deze GIS bewerking zijn weergegeven in tabel 3.

tabel 3 Hoogtezones met bedekkingstype

Num.	hoogte	stroomgebied oppervlak [km ²]	bos		niet bos	
	[m+NAP]		oppervlak [km ²]	percentage [%]	oppervlak [m ²]	percentage [%]
1	150	98	35	36	63	64
2	250	388	142	37	246	63
3	350	299	150	50	149	50
4	450	588	229	39	359	61
5	550	224	110	49	114	51
	totaal	1597	666	42	931	58

Totale oppervlakte stroomgebied: 1597 km²

6. Tijdsinterval onderzoek

Bij het modelleren van een stroomgebied is het belangrijk om een indruk te krijgen van de tijdsduur waarin neerslag wordt omgezet in gebiedsafvoer in het lozingspunt. De neerslag in grote stroomgebieden komt vertraagd tot afstroming door de bufferwerking. In grote stroomgebieden zal deze bufferwerking groter zijn dan in kleinere gebieden. Maar ook de geologische gesteldheid, menselijke invloeden, helling en landgebruik van een stroomgebied spelen bij de bufferende werking een rol. Het tijdsinterval waarmee gerekend wordt moet hierop zijn afgestemd. In kleine gebieden en snel reagerende gebieden zal met een kleiner interval gerekend moeten worden dan in grote en langzaam reagerende gebieden.

Ter illustratie; de afvoer van de Rijn bij Lobith heeft een verloop in de tijd dat goed met dagelijkse meet intervallen gevolgd kan worden, de dynamiek van de afvoer komt goed in beeld en er zullen geen pieken tijdens hoogwater worden gemist. De afvoer van Maas daarentegen heeft een grotere dynamiek in de tijd. De afvoer van de Maas reageert sneller op neerslag in het bovenstroomse gebied doordat het stroomgebied kleiner is en door de snel reagerende deelstroomgebieden in de Belgische Ardennen (paragraaf 3.1). Om het afvoerloop goed te volgen is het nodig met een voldoende klein tijdsinterval te meten en te modelleren. In de volgende paragrafen worden onderwerpen behandeld die te maken hebben met het tijdsinterval van rekenen en van de aanwezige gegevens en de wijze waarop deze gebruikt zijn in het HBV model.

6.1 Bepaling van het tijdsinterval met de afvoeren van de Ourthe

Om een beeld te krijgen van het tijdsinterval waarop metingen of berekeningen van de afvoer te Tabreux moeten plaatsvinden om het afvoerloop en haar dynamiek goed weer te geven zijn er een aantal bewerkingen uitgevoerd op de gemeten afvoerintensiteiten te Tabreux tijdens hoogwaterperioden. Er is uitgegaan van vier reeksen van uurmetingen voor twee hoogwaterperioden in 1993, een in 1995 en een in 1998. Op basis van deze uurmetingen zijn reeksen voor intervallen van 3, 6, 12, en 24 uur berekend. Dit is gedaan door over een periode van 3, 6, 12 of 24 uur gemiddelden te nemen van de uurwaarnemingen. Door nu criteria op te leggen aan eigenschappen van het afvoerloop bij tijdsintervallen groter dan 1 uur kan een uitspraak worden gedaan over het gewenste tijdsinterval van modelleren, waarbij pieken niet te veel mogen afvlakken. De voor deze studie gebruikte criteria voor het bepalen van het gewenste interval zijn hieronder uitgewerkt. In paragraaf 6.4 worden per criterium de resultaten besproken.

Hoogte van de afvoer piek tijdens hoogwater

Om een dusdanig interval te kiezen waarbij de piekafvoer intensiteit qua waarde goed wordt weergegeven wordt gekeken naar pieken in het afvoerloop bij middeling over steeds groter wordende perioden. De waarde van de piekafvoer [m^3/s] tijdens een hoogwaterperiode, gemeten met waarnemingen met uur intervallen, moet ook bij de berekening met een groter interval dan 1 uur gehaald worden.

Een piek van de afvoer met uur intervallen zal altijd groter dan of gelijk zijn aan een piek van gemiddelde afvoeren over een groter tijdsinterval dan 1 uur. Het criterium vereist dat de gemiddelde piekafvoer over een groter tijdsinterval dan 1 uur, tijdens een hoogwaterperiode groter moet zijn dan een vast te stellen percentage van de piekafvoer met uur intervallen.

De Q-h relatie te Borgharen, te vinden in de afvoertabel voor Borgharen (Min V&W, 1999), voor een hoog afvoer niveau rond $3040 m^3/s$ is weergegeven in tabel 4.

tabel 4 Q-h relatie voor Borgharen rond een afvoer niveau van $3040 m^3/s$

Waterstand (h)	Afvoer (Q)
[m +NAP]	[m^3/s]
45.70	2925
45.80	3040
45.90	3170

Om een afvoer bij Borgharen binnen 10 cm nauwkeurig te berekenen is er een afvoer marge toegestaan van $(3170-2925) = 245 \text{ m}^3/\text{s}$ op $3040 \text{ m}^3/\text{s}$. Door dit toe te passen op Tabreux, kan gesteld worden dat de top van een afvoergolf te Tabreux bij een groter tijdsinterval dan 1 uur moet liggen binnen de procentuele marge van $(3040 - (0.5 \cdot 245)) / 3040$ tot $(3040 + (0.5 \cdot 245)) / 3040$. Dit betekent dat de marge van 96% tot 104% van de uurmetingen van de afvoer gehaald moet worden om bij Borgharen een hoogwater golf met maximaal 10 cm nauwkeurigheid te berekenen. Bij middelen van een afvoerreeks wordt het maximum voor een tijdsinterval altijd kleiner dus geldt voor dit criterium dat de piekafvoer bij grotere tijdsintervallen groter moet zijn dan 96%, anders wordt het tijdsinterval verworpen.

Er wordt van uitgegaan dat de nauwkeurigheid van de berekening van de afvoer te Borgharen alleen afhangt van de nauwkeurigheid van de berekening van de afvoeren in elk afzonderlijk deelstroomgebied. Hierdoor wordt de fout gemaakt bij de flood-routing door de Maas niet meegerekend. Wanneer er bij één of meerdere hoogwaterperiodes voor een bepaald tijdsinterval wordt geconstateerd dat de piek niet wordt gehaald dan wordt dit tijdsinterval als niet geschikt beschouwd.

Ligging van de golftop in de tijd

De top van de afvoergolf moet bij een groter tijdsinterval samenvallen met de golftop van de uurwaarnemingen. Door de afvoeren met uur intervallen in een zelfde grafiek uit te zetten als de voor een bepaalde periode gemiddelde afvoer, kan visueel bepaald worden of de top van een afvoergolf bij een groter tijdsinterval samenvalt met de top in de uurwaarnemingen. Wanneer er bij één of meerdere hoogwaterperiodes voor een bepaald tijdsinterval wordt geconstateerd dat de ligging niet goed is wordt dit tijdsinterval als te groot dus niet goed beschouwd.

Stijging en daling van de afvoer

Volgens dit criterium mogen bij een groter tijdsinterval dan 1 uur de uurmetingen van de afvoer niet stijgend en tevens dalend zijn, binnen het grotere tijdsinterval. Wanneer dit wél het geval is geeft het tijdsinterval waarop gemeten is de dynamiek van het afvoerverloop niet goed weer. Het zowel stijgend als dalend zijn binnen een tijdsinterval doet zich voor bij toppen en dalen. Dit zijn juist de momenten dat de afvoer goed berekend moet worden dus mag hier geen informatie verloren gaan. Dit criterium kan eveneens in de grafieken gemaakt voor het vorige criteria voor de verschillende hoogwaterperiodes visueel bepaald worden. Wanneer er bij één of meerdere hoogwaterperiodes voor een bepaald tijdsinterval wordt geconstateerd dat de afvoer met uur intervallen zowel stijgend als dalend is binnen een groter tijdsinterval wordt dit tijdsinterval als te groot dus niet goed beschouwd.

6.2 Bepaling van het tijdsinterval met behulp van het HBV model

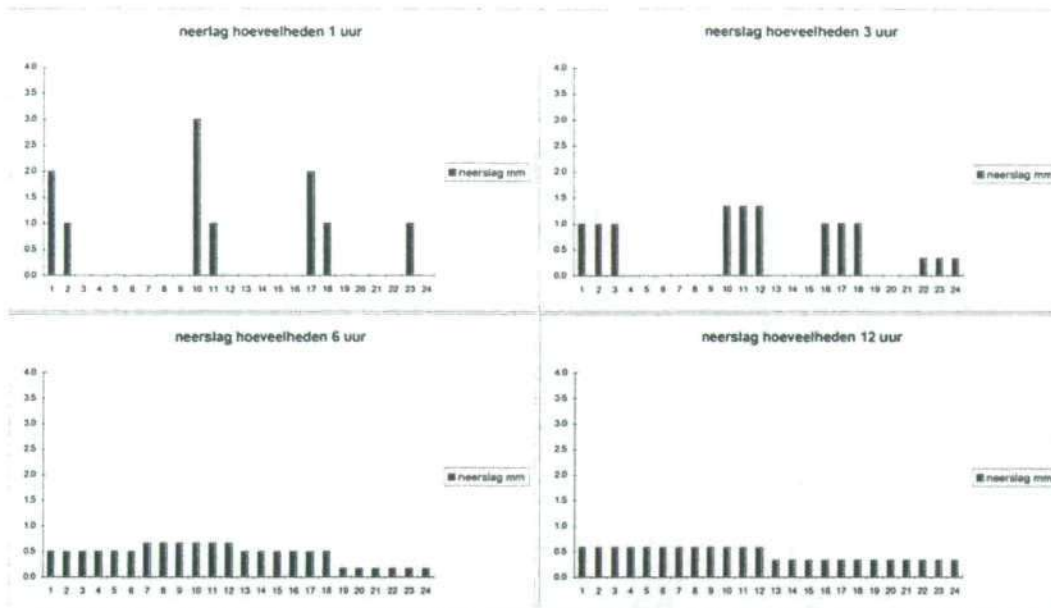
Een tweede manier om te bepalen met welk tijdsinterval gemodelleerd dient te worden is een berekening met behulp van het HBV model zelf. Door een HBV model te maken dat met uur intervallen rekent kan met behulp van 1-uur gegevens van gebiedsneerslag en afvoer gegevens te Tabreux een model voor het stroomgebied bovenstrooms van Tabreux gemaakt worden. Vervolgens kan dit model gevoed worden met verschillende neerslag reeksen. De eerste reeks bestaat uit 1-uur gegevens van neerslag hoeveelheden. De volgende reeksen bevatten gemiddelden over 3, 6, 12 en 24 uur. Deze gemiddelden zijn per uur ingevoerd zoals weergegeven in figuur 31. Op deze manier kan het effect van het tijdsinterval waarop neerslag, temperatuur en potentiële verdamping in het HBV model wordt ingevoerd worden bekeken. Wanneer bij het vergroten van het tijdsinterval de berekende afvoer sterk af begint te wijken van de berekende afvoer bij 1-uur neerslag invoer voldoet het daarbij behorende tijdsinterval niet als interval voor de modellering van het stroomgebied van de Ourthe. Dit kan visueel worden bepaald.

Voor de perioden 1 december 1993 tot en met 31 december 1993 en 1 januari 1995 tot en met 31 januari 1995 zijn gebiedsneerslagen berekend, dit zijn gegevens met uur intervallen. Voor deze twee perioden zijn ook uurmetingen voor de afvoer te Tabreux beschikbaar. De invoergegevens voor E en T moeten op een bepaalde manier tot gegevens met uur intervallen omgezet worden, dit is hieronder uitgewerkt.

Neerslag P

De invoer van het model (1-uur gebiedsneerslagen) wordt over een aantal tijdsperiodes gemiddeld tot uurwaarden. Dit betekent dat voor het tijdsinterval van 1 uur de berekende uurwaarden van de neerslag worden gebruikt. Voor een tijdsperiode van 3 uur wordt voor drie achtereenvolgende uren drie maal het

gemiddelde uurtotaal voor deze periode van drie uren ingevoerd. Dit gebeurt ook voor de tijdsintervallen van 6, 12 en 24 uur. Een fictieve weergave van een middeling over deze tijdsperioden is gegeven in figuur 31.

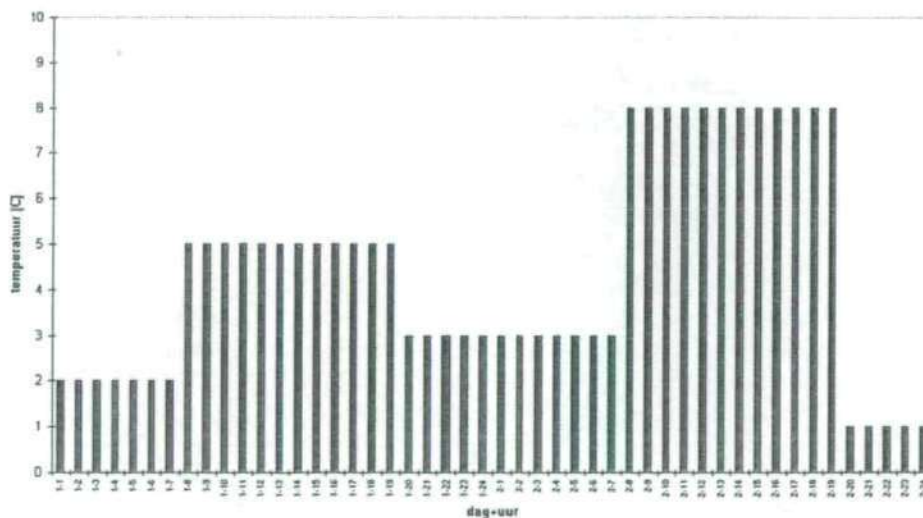


figuur 31 Behandeling van neerslag bij middelen over een periode van 3, 6 en 12 uur

Temperatuur T

Voor de temperatuur zijn dagminima en dagmaxima bekend voor de twee hierboven genoemde perioden. Deze kunnen omgezet worden naar temperaturen voor elk van de 24 uren in een dag. Voor de uren 1 t/m 7 geldt het dagminimum van dezelfde dag, voor de uren 8 t/m 19 geldt het dagmaximum van dezelfde dag en voor de uren 20 t/m 24 geldt het dagminimum van de volgende dag. In figuur 32 is voor twee fictieve dagen te zien hoe het temperatuur verloop is bepaald aan de hand van de twee dagminima en -maxima. Voor dag 1 geldt een minimum temperatuur van 2 °C en een maximum temperatuur van 5 °C. Voor dag 2 is dit respectievelijk 3 °C en 8 °C, het dagminimum dat geldt voor dag 3 en dus de laatste uren van dag 2 is 1 °C.

Temperatuur verloop van twee dagen aan de hand van dagminimum en -maximum



figuur 32 Temperatuur verloop voor 24 uur bepaald met dagminimum en -maximum

Dit verloop kan gehandhaafd worden voor de tijdsintervallen 1 uur tot en met het tijdsinterval van 12 uur. De scheiding tussen de 12 uur tijdsintervallen ligt namelijk tussen uur 7 en 8 uur en 19 en 20 uur. Voor een invoer van een daggemiddelde voor alle 24 uren moet het dagminimum en -maximum gemiddeld worden en voor alle 24 uren worden ingevoerd.

Potentiële verdamping E

Waarden voor potentiële verdamping zijn tijdens de twee perioden alleen als dagwaarden berekend. Deze waarden geven het aantal millimeters dat per dag potentieel kan verdampen. Om invoer voor het model mogelijk te maken met uur intervallen moet de waarde gedeeld worden door 24.

Wanneer de potentiële verdamping tijdens deze periode nagenoeg nul is kan ervoor gekozen worden om bij alle berekeningen nulwaarden voor potentiële verdamping te nemen.

In tabel 5 is te zien dat de totale hoeveelheid potentiële verdamping slechts een gering deel is van de neerslag tijdens de hoogwaterperioden in december 1993 en januari 1995. Omgerekend met behulp van de gewichtsfactoren (paragraaf 5.1) voor de stations is de procentuele verhouding E/P voor december 1993 gelijk aan 2.7% en voor de periode januari 1995 is dit 3.8%.

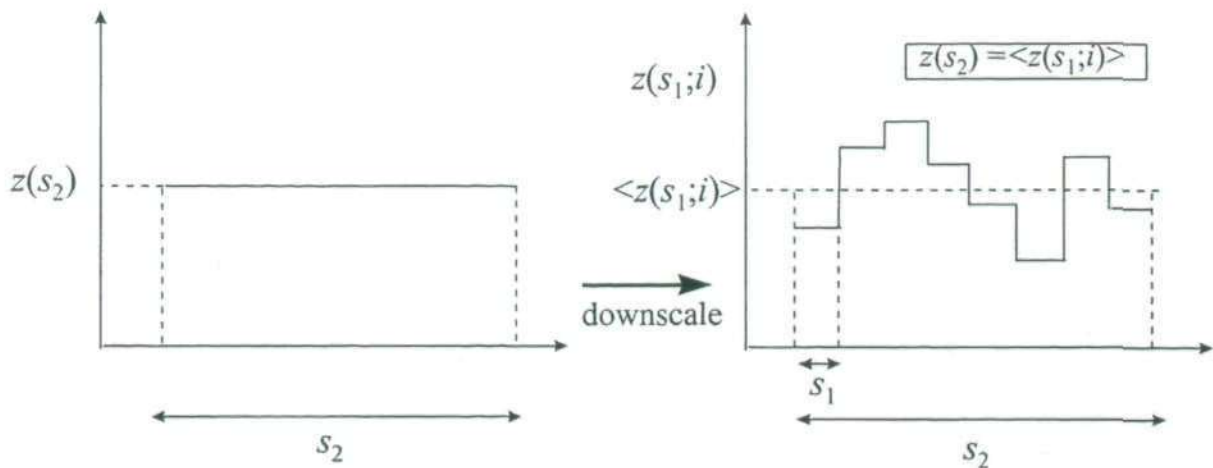
Voor de vergelijkende studie met behulp van het HBV model ter bepaling van het gewenste tijdsinterval zal er daarom gewerkt worden met een model waarin de verdamping tijdens deze perioden op nul is gesteld. Voor het HBV model betekent dit dat er een "dummy-file" voor E aangemaakt is waarbij de gemiddelde maandelijkse waarden voor E op nul zijn gesteld.

tabel 5 Potentiële verdamping vergeleken met neerslag voor dec 1993 en jan 1995

dec-93	P	E	%	jan-95	P	E	%
St-Hubert	[mm]	[mm]		St-Hubert	[mm]	[mm]	
gem.	8.5	0.1		gem.	9.7	0.2	
max.	38.6	0.5		max.	45.5	1.2	
min.	0.0	0.0		min.	0.0	0.0	
totaal	263.1	3.8	1	totaal	300.5	7.1	2
Spa	[mm]	[mm]		Spa	[mm]	[mm]	
gem.	8.8	0.3		gem.	7.6	0.3	
max.	41.3	0.9		max.	32.4	0.9	
min.	0.0	0.0		min.	0.0	0.0	
totaal	273.3	9.1	3	totaal	234.8	9.8	4
Bierset	[mm]	[mm]		Bierset	[mm]	[mm]	
gem.	5.5	0.5		gem.	4.4	0.5	
max.	28.2	1.0		max.	26.4	1.6	
min.	0.0	0.0		min.	0.0	0.0	
totaal	171.8	15.4	9	totaal	137.2	16.0	12
Procentuele verhouding verdamping / neerslag incl. gewichtsfactor							
			2.7				3.8

6.3 Downscaling van gegevensreeksen

Van de gegevens die voor de Ourthe en haar stroomgebied beschikbaar zijn is het grootste deel met dag intervallen gemeten. Er is een neerslagreeks van 1990 tot 1995 met 6-uur intervallen aanwezig. Afvoeren zijn tijdens hoogwaters met uur intervallen beschikbaar maar voor het overige van de periode 1968 tot 1998 enkel met dag intervallen. Om nu toch met afvoeren te kunnen werken met een kleiner tijdsinterval kunnen de dagwaarden omgezet worden naar 6 uur waarden. Er zijn een aantal technieken om gegevensreeksen zogenaamd te 'downscalen'. Dit houdt in dat gegevensreeksen met een groter tijdsinterval (s_2 in figuur 33) naar een kleiner tijdsinterval (s_1 in figuur 33) worden gebracht.



figuur 33 Het principe van downscaling (Bierkens et al., 2000)

De variatie van de grootte met het tijdsinterval s_1 kan met oneindig veel functies uit het gemiddelde met een tijdsinterval s_2 bepaald worden, bij voorwaarde van gelijkblijvend gemiddelde (Bierkens et al., 2000). In het geval van het calibreren van een model met een gemeten afvoerreeks zijn er niet oneindig veel functies waarmee een afvoerreeks van een groter naar een kleiner tijdsinterval omgezet kan worden. Het afvoerverloop met een kleiner tijdsinterval zal dezelfde trend moeten vertonen als het verloop met een groter tijdsinterval.

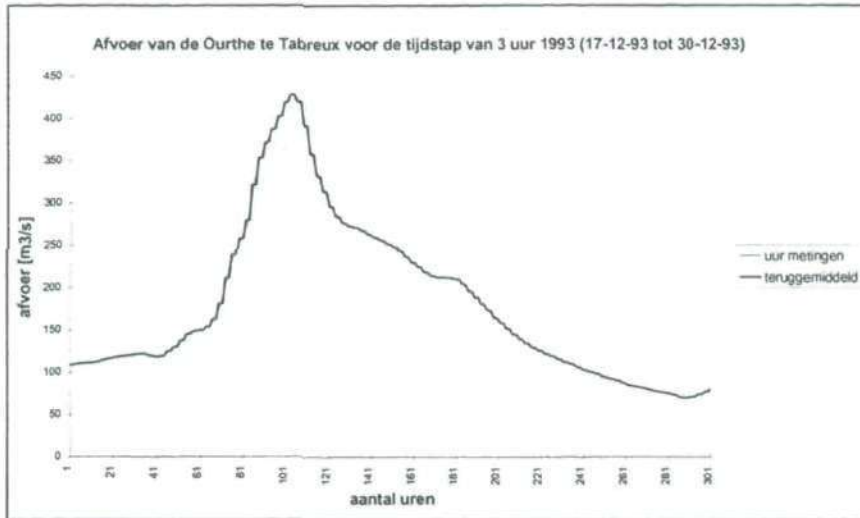
De functie waarmee het gemiddelde voor een tijdsinterval s_2 omgezet wordt naar een tijdsinterval s_1 is niet voor elke waarde van de grootte gelijk. Daarnaast is de functie ook afhankelijk van het stijgend of dalend zijn van het afvoerverloop. Ten behoeve van een model dat rekent met 6-uur intervallen moet besloten worden op welke manier de gemeten afvoeren ingevoerd moeten worden.

Er is in deze studie voor gekozen om voor de gemeten afvoer intensiteiten te Tabreux de dagwaarden te nemen bij modellen die rekenen met kleinere tijdsintervallen dan een dag. Er worden dus bij modellen met meerdere intervallen binnen een dag dezelfde waarden voor de afvoer intensiteit ingevoerd per interval. De manier waarop alle invoer is behandeld voor de verschillende HBV modellen is beschreven in de paragrafen 7.2, 8.2 en 9.2.

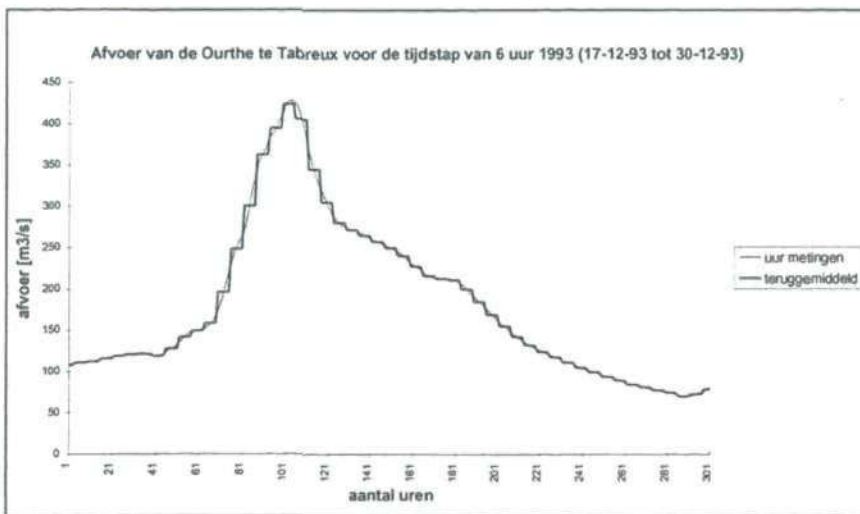
6.4 Resultaten

6.4.1 Bepaling van het gewenste tijdsinterval met behulp van de afvoeren van de Ourthe

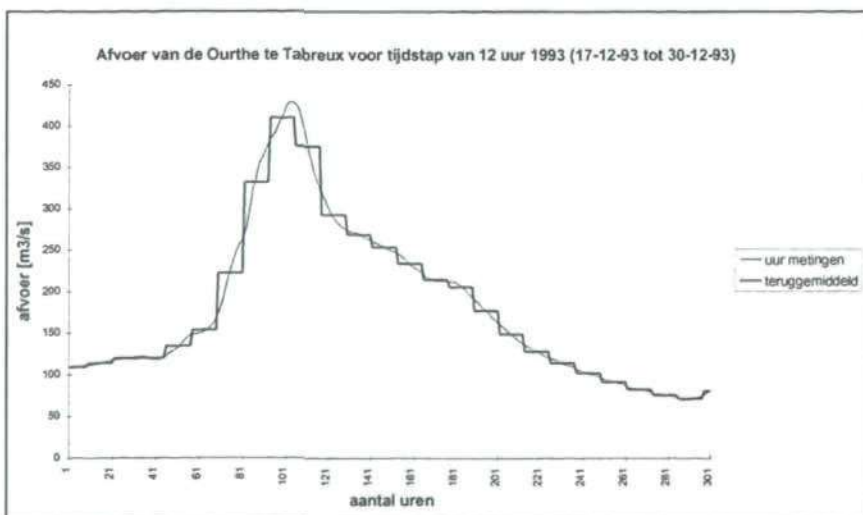
Zoals in paragraaf 6.1 is omschreven zijn er voor vier hoogwaterperioden vanuit uurmetingen gemiddelde afvoeren bepaald over tijdsintervallen van 3, 6, 12 en 24 uur. Voor de hoogwaterperiode van december 1993 zijn hier de resultaten gegeven in figuur 34 tot en met figuur 37. Alle vier hoogwaterperioden (januari 1993, december 1993, januari 1995 en november 1998) zijn te vinden in Bijlage 4 tot en met Bijlage 7. Met terugmiddelen wordt in deze figuren middelen over een langere periode dan 1 uur bedoeld.



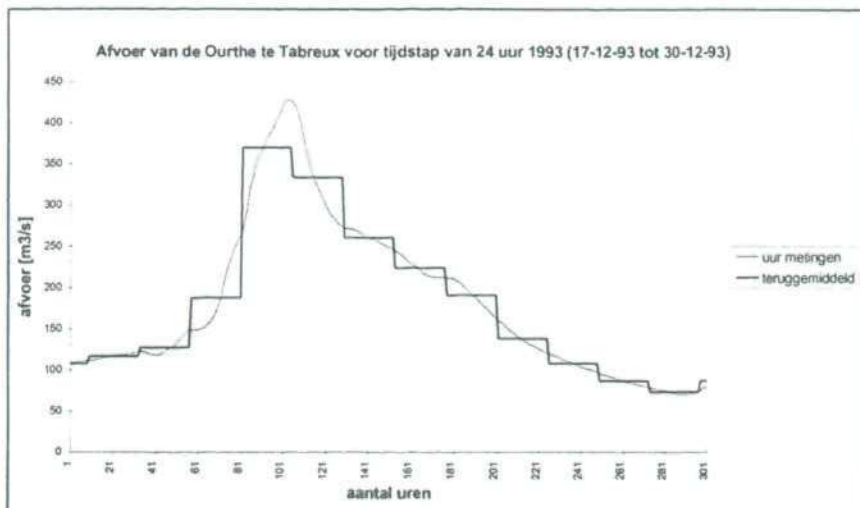
figuur 34 Gemiddelde afvoer van de Ourthe voor een tijdsinterval van 3 uur (december 1993)



figuur 35 Gemiddelde afvoer van de Ourthe voor een tijdsinterval van 6 uur (december 1993)



figuur 36 Gemiddelde afvoer van de Ourthe voor een tijdsinterval van 12 uur (december 1993)



figuur 37 Gemiddelde afvoer van de Ourthe voor een tijdsinterval van 24 uur (december 1993)

Hoogte van een afvoer piek tijdens hoogwater

Voor de vier hoogwaterperioden is in tabel 6 weergegeven welk percentage van de piekafvoer gemeten met uur intervallen wordt gehaald bij een middeling over 3, 6, 12 en 24-uur intervallen.

De afvoeren bij middelen zijn voor december 1993 weergegeven in figuur 34 tot en met figuur 37. Voor alle hoogwaterperioden wordt verwezen naar Bijlage 4 tot en met Bijlage 7.

Wanneer het criterium van de marge van 96 tot 104 procent wordt gehanteerd kan worden gezegd dat voor intervallen van 3 en 6 uur geldt dat ze voor elke hoogwaterperiode voldoen. Voor het tijdsinterval van 12 uur geldt dat het gemiddelde 96 procent is, in het geval van de hoogwaterperiode van december 1993 echter is de waarde van de piekafvoer slechts 93 procent. Omdat een voorspelmodel voor elke hoogwaterperiode goede uitkomsten moet geven wordt een tijdsinterval van 12 niet aangeraden. Tot slot is te zien dat voor geen enkele hoogwaterperiode bij een tijdsinterval van 24 uur de piekafvoer met 96 procent nauwkeurigheid wordt gehaald.

tabel 6 Het percentage van de piekafvoer bij 1-uur intervallen voor afvoeren bij intervallen groter dan 1 uur

Tijdsinterval [uren]	Hoogwaters				gem.
	jan-93	dec-93	jan-95	nov-98	
3	100	100	100	100	100
6	100	98	99	99	99
12	98	93	96	96	96
24	90	82	90	84	87

Ligging van de golftop in de tijd

In tabel 7 is aangegeven of de ligging van de golftop in de tijd van de afvoer piek goed (g) of slecht (s) is. In de laatste kolom is aangegeven of de ligging van de toppen voor het tijdsintervallen goed of slecht is. Er kan uit tabel 7 afgeleid worden dat de intervallen van 3 en 6 uur een goed beeld geven en dat bij grotere tijdsintervallen de ligging van de top van een afvoergolf in de tijd niet juist wordt weergegeven. Een interval van 12 uur geeft niet voor alle hoogwaterperioden een slechte ligging van de top, maar omdat een voorspelmodel voor alle mogelijke hoogwaterperioden een goede uitkomst moet geven wordt dit tijdsinterval verworpen. Voor het interval van 24 uur geldt dat voor alle perioden een slechte ligging van de top wordt verkregen.

tabel 7 Overzicht van de ligging van de top van de afvoer bij intervallen groter dan 1 uur

Tijdsinterval [uren]	Hoogwaters				alle
	jan-93	dec-93	jan-95	nov-98	
3	g	g	g	g	g
6	g	g	g	g	g
12	g	s	s	g	s
24	s	s	s	s	s

Stijging en daling van de afvoer

In tabel 8 is aangegeven of de afvoer gemeten met uur intervallen stijgt én daalt (sd) binnen een groter tijdsinterval of niet (n). De laatste kolom geeft aan of het tijdsinterval voldoet (g) of niet (s). Aangaande het stijgen en dalen van de uurmetingen van de afvoer binnen groter tijdsinterval kan gezegd worden dat tijdsintervallen van 3 en 6 uur voldoen aan de eis dat de afvoer niet stijgend en tevens dalend mag zijn binnen een groter tijdsinterval dan 1 uur. Voor 12 uur geldt dat dit wel zo is voor twee hoogwaterperiodes. Voor een tijdsinterval van 24 uur is dit het geval voor alle hoogwaterperiodes.

tabel 8 Overzicht van stijgen en dalen binnen een tijdsinterval bij intervallen groter dan 1 uur

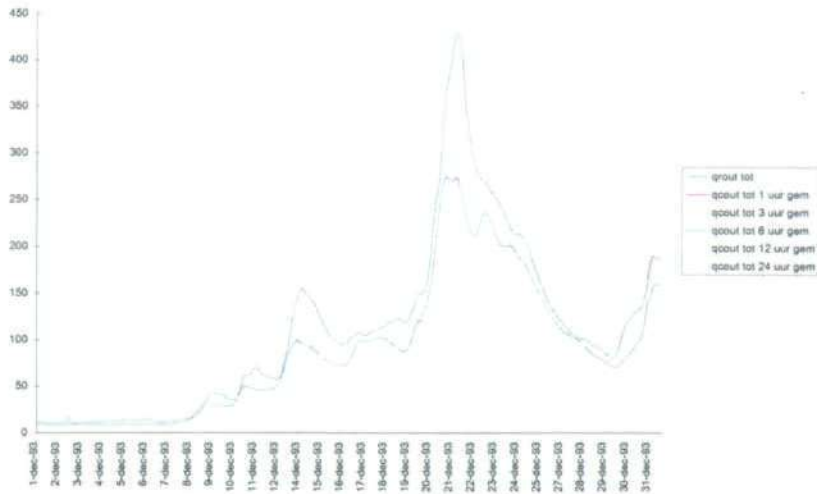
Tijdsinterval [uren]	Hoogwaters				alle
	jan-93	dec-93	jan-95	nov-98	
3	n	n	n	n	g
6	n	n	n	n	g
12	n	n	sd	sd	s
24	sd	sd	sd	sd	s

6.4.2 Invloed van het middelen van neerslag invoer op uitvoer van het HBV model

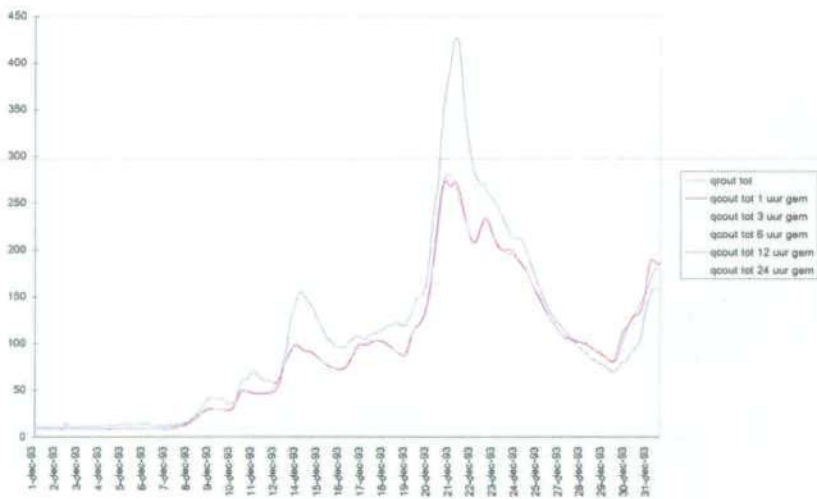
Voor de resultaten van dit onderdeel van het tijdsinterval onderzoek is het 1-uurmodel gebruikt dat in hoofdstuk 9 is uitgewerkt. Voordat deze resultaten konden worden verkregen moest er dus eerst een 1-uurmodel worden gemaakt. Voor de volledigheid zijn de resultaten in dit hoofdstuk geplaatst.

In de volgende berekeningen is gebruik gemaakt van gegevens met 1-uur intervallen. Deze gegevens geven volgens paragraaf 9.4.2 een te lage gebiedsneerslag die door het HBV model wordt berekend. Toch is hiermee de invloed van het middelen van uurmetingen op de uitvoer van het HBV model onderzocht. Er wordt gekeken naar de afwijkingen die ontstaan bij uitvoer van het model bij de invoer met verschillende tijdsintervallen zoals omschreven in paragraaf 6.2.

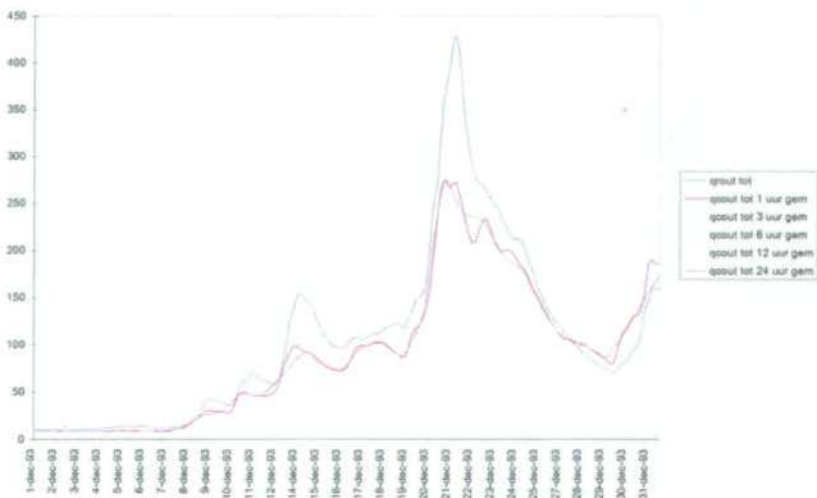
Voor deze berekeningen zijn initiële toestanden gebruikt, berekend door het 1-uurmodel voor de periode 1992 tot 1995. De parameterset die gebruikt is bij deze berekeningen is de definitieve parameterset in kolom 8 van tabel 13. In figuur 38 tot en met figuur 40 is het effect van middeling weergegeven. Figuur 60 bevat de berekende afvoergolven voor 1 uur invoer waarden, 3 uur invoer gemiddelden en 6 uur invoer gemiddelden. Figuur 61 bevat 1 uur invoer waarden en 12 uur invoer gemiddelden en figuur 62 bevat de berekende afvoer golf voor 1 uur invoer waarden en 24 uur gemiddelden alle figuren bevatten ook de gemeten afvoer genaamd q_{rout}. Een zelfde soort berekening is ook gedaan voor de hoogwaterperiode van januari 1995. De resultaten zijn weergegeven in figuur 41 tot en met figuur 43.



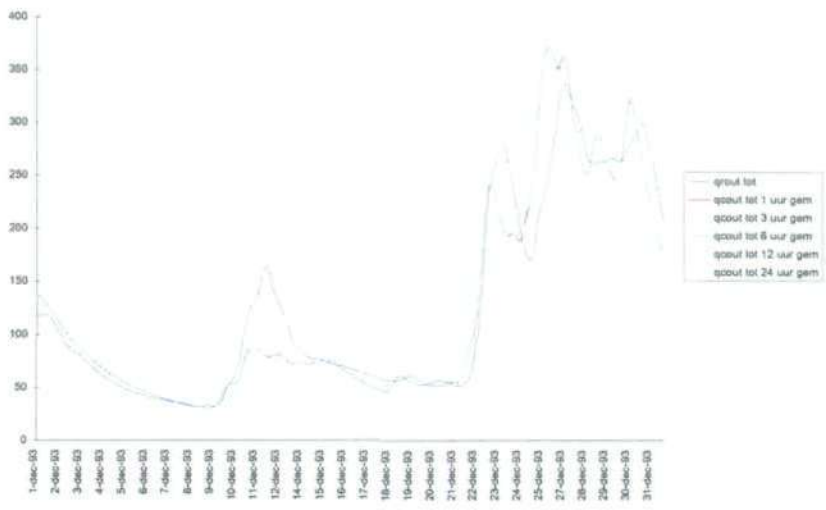
figuur 38 Invloed van middeling van invoer over 1,3 en 6 uren voor hoogwater december 1993



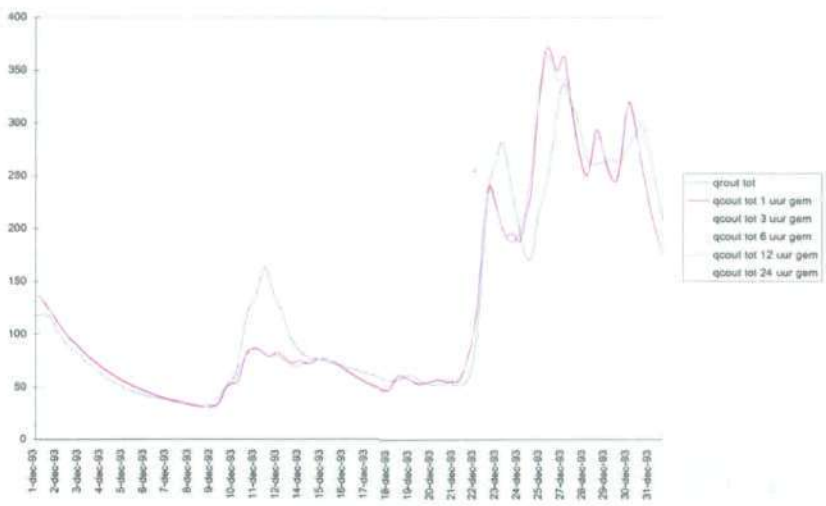
figuur 39 Invloed van middeling van invoer over 1 en 12 uren voor hoogwater december 1993



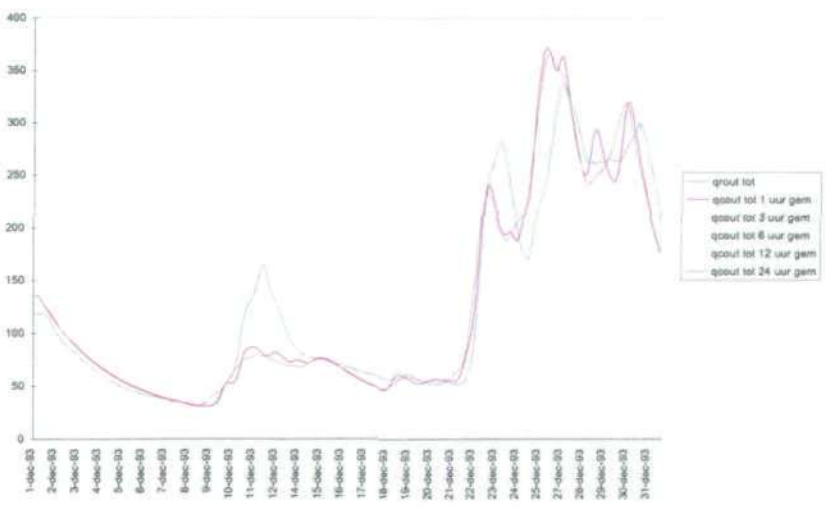
figuur 40 Invloed van middeling van invoer over 1 en 24 uren voor hoogwater december 1993



figuur 41 Invloed van middeling van invoer over 1, 3 en 6 uren voor hoogwater januari 1995



figuur 42 Invloed van middeling van invoer over 1 en 12 uren voor hoogwater januari 1995

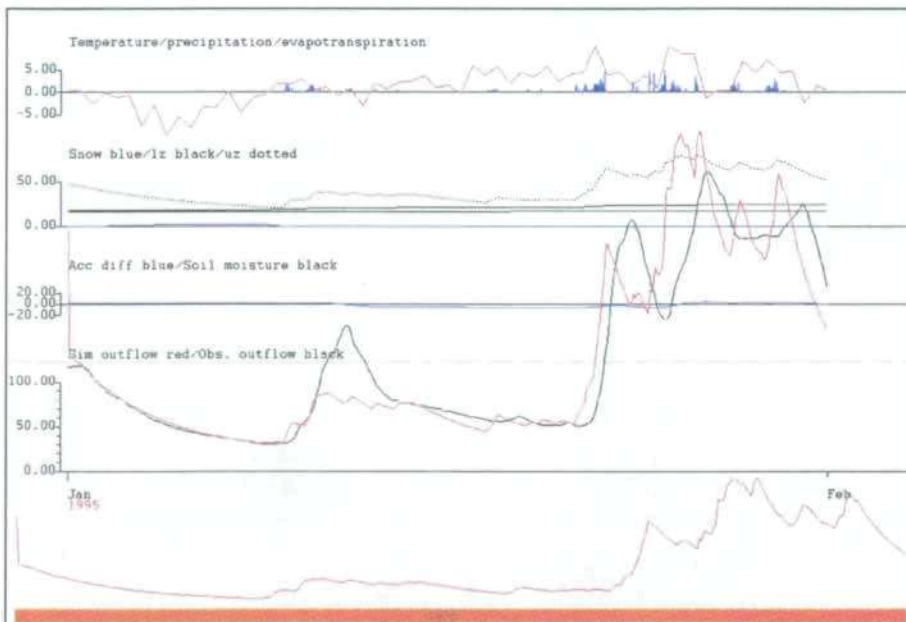


figuur 43 Invloed van middeling van invoer over 1 en 24 uren voor hoogwater januari 1995

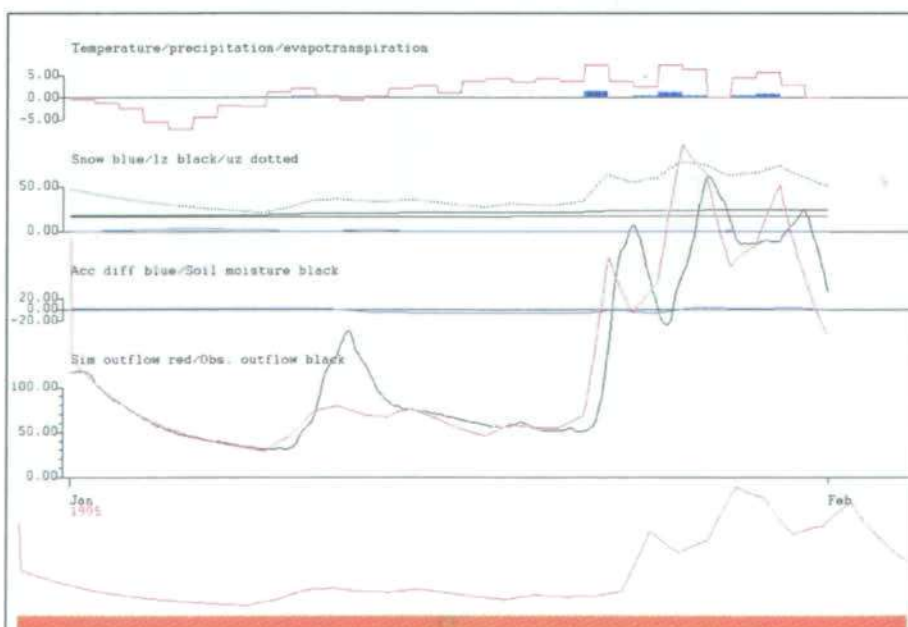
In figuur 38 is te zien dat er geen verschil is tussen de uitvoer van het model bij invoer van uurmetingen of *gemiddelden over 3 of 6 uur*. Wanneer er echter per uur 12 uur *gemiddelden* ingevoerd worden begint de berekende afvoer golf af te wijken van de afvoer golf bij invoer van metingen met uur intervallen. Bij invoer waarbij elk uur de dagelijkse gemiddelde hoeveelheid neerslag gedeeld door 24 wordt ingevoerd zien we nog grotere afwijkingen, zie figuur 40.

In figuur 40 valt op dat hoewel er per uur een dagelijks gemiddelde gedeeld door 24 wordt ingevoerd, de piekafvoer die berekend wordt niet verschilt van die berekend door invoer van uurmetingen. Ditzelfde geldt ook voor figuur 41 tot en met figuur 43, voor de hoogwaterperiode in januari 1995.

De overeenkomst in de berekende afvoer golven heeft temaken met de hoge waarde voor maxbas, namelijk 0.66. Wanneer maxbas op 0.0417 (1/24) wordt gezet zien de afvoer grafieken er voor uurmetingen (figuur 44) en voor dagelijkse uurgemiddelden (figuur 45) er als volgt uit.



figuur 44 hoogwaterperiode januari 1995 met maxbas is 0.0417 berekend met uurmetingen



figuur 45 hoogwaterperiode januari 1995 met maxbas is 0.0417 berekend met dagelijkse uurgemiddelden

Een waarde voor de parameter maxbas van 0.0417 geeft echter een verkeerde weergave van de top van de afvoergolf. Een hogere waarde voor de parameter maxbas zorgt voor een vertraging in het systeem dat ervoor zorgt dat de afvoer pieken in de tijd goed worden weergegeven. Bij een waarde voor maxbas van 0.66 is het gevolg dat de modeluitvoer na middelen van de invoer minder zichtbaar verandert. Om deze reden is de methode ter bepaling van het tijdsinterval, met behulp van het HBV model, niet bruikbaar. Het geeft geen goed beeld van wat de consequenties zijn van een gemiddelde invoer over langere perioden dan 1 uur.

6.5 Conclusies

- Geconcludeerd kan worden dat op basis van afvoerreksen van de Ourthe te Tabreux tijdsintervallen van 3 en 6 uur voldoen voor een goede weergave van de dynamiek van de afvoer van de Ourthe. Een tijdsinterval van 12 uur geeft voor een deel van de hoogwaterperioden een slechte weergave van het afvoerverloop, waardoor dit interval ongeschikt wordt geacht. Een interval van 24 uur geeft voor alle hoogwaterperioden een slecht beeld. Daarom is dit ook een ongeschikt tijdsinterval.
- Een berekening met het HBV model ter bepaling van het te gebruiken tijdsinterval is niet bruikbaar. De modeluitvoer is teveel afhankelijk van de mate waarin vertraging van de afvoer in het systeem wordt aangebracht met behulp van de parameter maxbas. Hierdoor is niet zuiver te bepalen wat de invloed van middelen van model invoer, op de uitvoer is.

6.6 Aanbevelingen

- In het vervolg van deze studie zal als gevolg van de voorgaande conclusies naast een HBV dagmodel een model dat werkt met tijdsintervallen van 6 uur worden gemaakt. Naast het feit dat de afvoerpieken goed worden weergegeven, bij een tijdsinterval van 6 uur, speelt mee dat tijdens hoogwaterperioden momenteel alleen 6 uur gegevens operationeel beschikbaar zijn vanuit België om daarmee neerslag-afvoer modellen te voeden (Hoofdstuk 8).
- Om het tijdsinterval onderzoek te doen met het HBV model was het nodig om een 1-uurmodel te maken. Vervolgens is een vergelijk tussen het dag, 6 uur en 1-uurmodel aan te raden.

7. HBV model: dag intervallen

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het iken van een HBV dagmodel behandeld en de manier waarop invoer gegevens zijn bewerkt. Dit dagmodel zal als uitgangspunt voor de modellen met kleinere tijdsintervallen dienst doen. Zoals in de doelstellingen op blz. 13 is verwoord zal dit model worden gebruikt voor een simulatie over het hele jaar. Het HBV dagmodel zal naar verwachting ook gebruikt kunnen worden voor het doorrekenen van verschillende klimaatscenario's. Dit zal dan gebeuren met een neerslag-afvoer model gemaakt voor het hele Maasstroomgebied, dit valt echter buiten het bereik van deze studie. Naast de ijking wordt er een gevoeligheidsanalyse gedaan en de prestatie van het model wordt bekeken.

7.2 Gegevensbewerking

Voor het opstellen van een HBV dagmodel zijn de gemiddelde dagafvoeren van de Ourthe te Tabreux van 1968 tot en met 1998 gebruikt om te calibreren en valideren. Daarnaast zijn de dagwaarden van P, T en E van de drie meteorologische stations gebruikt van 1967 tot en met 1996. De gemiddelde waarde van de temperatuur geldt voor 24 uur. De neerslag hoeveelheid per dag wordt door het HBV model op het eind van de dag geplaatst. De potentiële verdamping wordt door het model omgerekend in actuele verdamping. Er is uiteindelijk een HBV dagmodel gemaakt met invoer voor de periode 1 oktober 1968 tot en met 30 september 1996. Binnen deze periode kan het model gecalibreerd en gevalideerd worden.

7.3 Initiële toestand

Om een berekening met het HBV model te starten is een initiële toestand nodig om de beginwaarden voor de toestandvariabelen vast te stellen. Deze toestandvariabelen zijn de hoeveelheid water in de reservoirs van het bodemvocht (SM), de snelle afvoer (UZ) en de langzame afvoer (LZ) en de hoeveelheid water geborgen als sneeuw (SP).

Wanneer het HBV model gestart wordt voor een berekening tijdens een hoogwater is het belangrijk te weten wat de begintoestand van het model is. Er dient opgemerkt te worden dat:

1. Hoogwaterperioden meestal plaatsvinden tijdens winterperioden, waardoor verdamping een kleine rol speelt vanwege de lage temperaturen.
2. Voorafgaand aan een hoogwaterperiode het al over een lange tijd geregend zal hebben. Hierdoor zullen de poriën in de bodem voor het grootste gedeelte gevuld zijn met water. Met andere woorden, de mogelijkheid om neerslag in de bodem te bergen zal gering zijn. Dit betekent dat de waarde van SM bij een beginnend hoogwater al nabij de maximumwaarde (FC) zal liggen.

Als initiële toestand voor de eerste dag van de berekening is een door het HBV model aangemaakte initiële toestand gebruikt. Het model berekent dan voor alle SM start waarden een waarde van 90% van de FC parameterwaarde, de UZ krijgt een waarde van 0 mm en ook voor de LZ wordt een waarde aangemaakt. Over het algemeen zal aan het begin van een periode de afvoer laag zijn, dit is ook het geval want de hoeveelheid water in het snelle reservoir is 0 mm en de afvoer uit het langzame reservoir is slechts een kleine fractie (k_4) van de hoeveelheid water die daarin is geborgen. Omdat het bodemvocht reservoir al voor 90% gevuld is zal een groot deel van de neerslag direct naar het snelle reservoir gaan waardoor deze wordt gevuld en afvoer gaat geven. Er zal door verdamping water worden onttrokken aan het bodemvocht reservoir.

Als initiële toestand voor de periode 1 oktober 1986 tot 30 september 1996 is de eindtoestand van de berekening van de eerste dag tot 30 september 1986 gebruikt. De gegevens in het HBV dagmodel bestaan voor de volledige periode uit gemeten waarden. Hierdoor is er geen probleem met het bepalen van de initiële toestand, alleen de allereerste dag 1 oktober 1968 gebruikt een door het model aangemaakte initiële toestand. Voor de rest van de gehele periode kan een eindtoestand van een berekening tot en met de voorgaande dag gebruikt worden.

7.4 Calibratie en validatie

Een handmatige eerste calibratie van het dagmodel is uitgevoerd over de periode van 1 oktober 1968 tot 30 september 1988. Hiermee is een globale indicatie van de parameterwaarden verkregen. Vervolgens heeft het SMHI met deze startwaarden voor de parameters een automatische calibratie uitgevoerd. Deze automatische calibratie is gedaan voor de periode 1 januari 1987 tot 31 december 1996. Deze twee perioden zijn niet hetzelfde. Het zou het beste zijn geweest wanneer de automatische calibratie ook had plaatsgevonden over deze periode. Om toch gebruik te kunnen maken van deze automatische calibratie worden enkele aanpassingen gedaan.

De periode van deze automatische calibratie beslaat niet de periode van oktober tot september. Hiernaast is er bij de eerste handmatige en de automatische calibratie een onjuist berekende waarde voor de parameter h_q gebruikt. Om deze twee zaken bij te stellen is er een aanpassing geweest van de periode waarover gecalibreerd wordt en zijn de parameterwaarden voor h_q en diens gevolg kh_q bij een gelijkblijvende waarde van α gewijzigd.

De periode voor de uiteindelijke calibratie is gekozen van 1 oktober 1986 tot 30 september 1996. In paragraaf 7.6.1 zal worden besproken hoe de aanpassing van de parameterwaarden van h_q en kh_q heeft plaatsgevonden. Vervolgens is de periode 1 oktober 1968 tot 30 september 1986 gebruikt om de parameterset te valideren. Een periode van achttien jaren wordt dus gebruikt voor de validatie van het model dat is gecalibreerd met een periode van tien jaren.

7.5 Gevoeligheidsanalyse

Er is voor gekozen om de parameters $pcalt$, tt , tti , $cfmax$, $focfmax$, FC , β , lp , $cflux$, k_4 , $perc$, h_q , kh_q en α (Bijlage 2) te gebruiken voor een gevoeligheidsanalyse. Deze parameters worden tijdens de calibratie bijgesteld. De rest van de gebruikte parameters zijn niet in een gevoeligheidsanalyse meegenomen. Deze parameters die niet zijn meegenomen hebben over het algemeen een vaste waarde die tijdens de calibratie niet wordt veranderd. De waarden voor deze parameters zijn default waarden bepaald door het SMHI en te vinden in Bijlage 2.

Er wordt op deze manier onderscheidt gemaakt tussen zogenaamde ongevoelige parameters en onzekere parameters. Ongevoelige parameters worden in een model in praktijk op een vaste waarde gezet. Onzekere parameters worden gebruikt om het model vervolgens te calibreren (Seibert, 1997). De ongevoelige parameters zijn $pcorr$, $tcalt$, r_{cf} , s_{cf} , f_{oscf} , s_{class} , s_{distfo} , s_{distfi} , whc , $recstep$, cfr en $cevpfo$ (Bijlage 2), de waarden van deze parameters blijven constant tijdens calibratie. Uitzonderingen zijn de parameters $maxbas$ en dtm (Bijlage 2), deze parameters worden tijdens calibratie wel aangepast maar zijn niet meegenomen in de gevoeligheidsanalyse.

Wanneer er tijdens een automatische calibratie voor gekozen wordt te calibreren op de invoer van de neerslag met de correcties $pcorr$, r_{cf} , s_{cf} en f_{oscf} heeft een verandering van deze parameters uiteraard een invloed op de modelprestatie. Omdat een verandering van de invoer door correcties anders is dan een verandering van de werking van het model door aanpassen van de onzekere parameters zijn de correctie parameters op de invoer niet meegenomen in de gevoeligheidsanalyse.

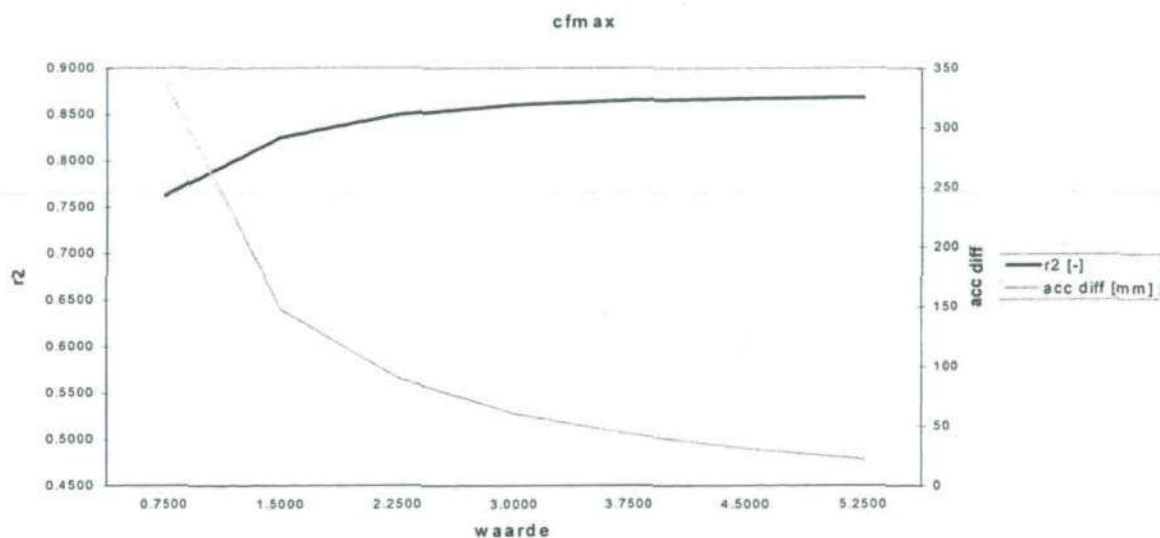
7.6 Resultaten

7.6.1 Gevoeligheidsanalyse

Na de eerste handmatige calibratie van het HBV dagmodel is voor de parameterset in kolom 1 van tabel 9 een gevoeligheidsanalyse gemaakt. Dit is gedaan voor de periode van 01-10-1968 tot 09-09-1988. De tabel met waarden is opgenomen in Bijlage 8.

Het HBV model is vooral gevoelig voor verandering van de parameterwaarden van cf_{max} , FC, beta, l_p , h_q , kh_q en alfa. Deze zijn hieronder in grafiekvorm uitgezet, de rest van de grafieken is te zien in Bijlage 9. De middelste waarde op de x-as is de uitgangswaarde. Voor de onderzochte parameter zijn vervolgens drie waarden hoger en drie waarden lager dan de uitgangswaarde genomen. De zwarte lijn is de R^2 bij de verschillende parameterwaarden en de lichte lijn is het verloop van het geaccumuleerde verschil tussen gemeten en berekende afvoer bij de verandering van de parameterwaarden.

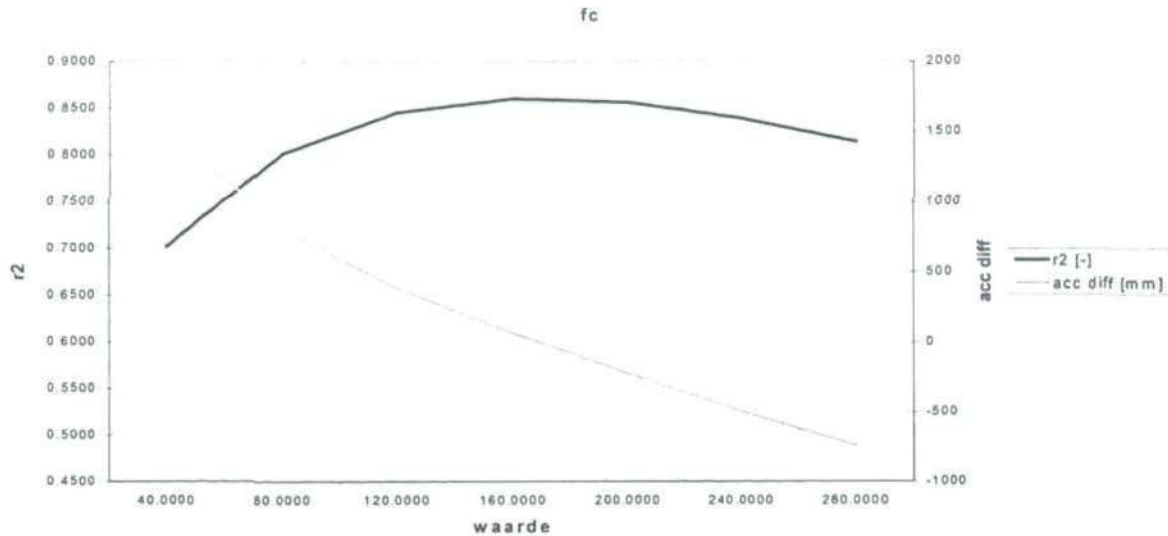
Verandering van de waarde van deze parameters beïnvloedt de kwaliteit van het model het meest. Bij calibratie zal daarom dan ook vooral aandacht aan deze parameters moeten worden geschonken. De andere parameterwaarden zullen voor het te modelleren stroomgebied zo goed mogelijk bepaald moeten worden en daarna minder aandacht krijgen.



figuur 46 Gevoeligheidsanalyse cf_{max}

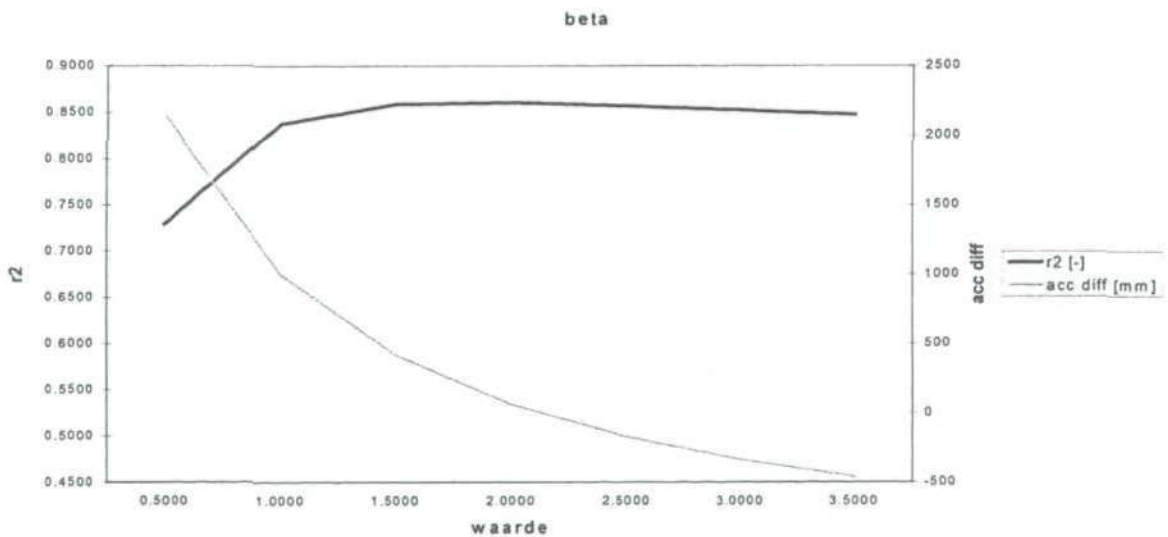
In figuur 46 is te zien dat bij een vergroting van de waarde van cf_{max} de modelprestatie licht toeneemt. Bij een verlaging ten opzichte van de uitgangswaarde 3.0 neemt de modelprestatie af. Dit verloop is te verklaren door het feit dat er in het stroomgebied van de Ourthe weinig sneeuw voorkomt. Wanneer dit door een te lage smeltsnelheid lang blijft liggen en niet tot afvoer komt geeft dit een slechte modelprestatie. Wanneer echter door een hoge waarde van de afsmelt snelheid opgehoopte sneeuw ook weer snel tot afstroming komt zal dit tot niet tot verslechtering van de modelprestatie leiden, vanwege het kleine aandeel van sneeuwsnelt in de afvoer.

Op basis hiervan is het de vraag in hoeverre sneeuwophoping een rol speelt in het stroomgebied van de Ourthe. Accumulatie van sneeuw kan bij afsmelten zorgen voor een extra hoeveelheid afvoer, die een verbetering in de afvoer berekening tot gevolg heeft.



figuur 47 Gevoeligheidsanalyse FC

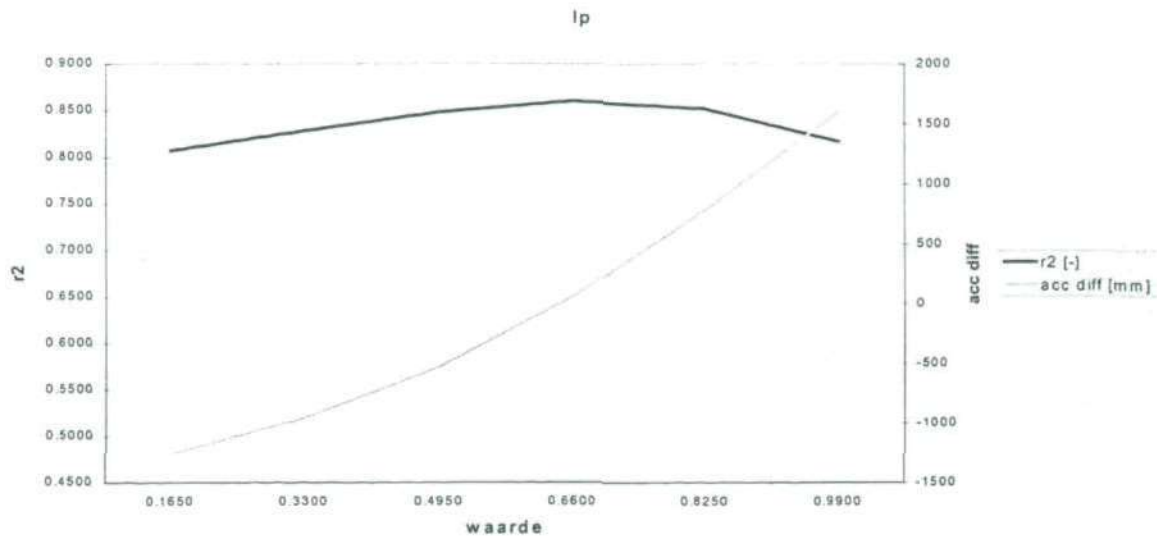
In figuur 47 is duidelijk te zien dat het maximum voor de R^2 waarde bij de uitgangswaarde voor FC ligt. De maximale hoeveelheid mm die in de bodemvocht zone kan worden geborgen zal voor dit stroomgebied dan ook nabij 160 mm moeten worden genomen. Een sterke verandering van deze waarde geeft sterke afwijkingen in waarde voor R^2 . Er is ook heel duidelijk te zien dat een lage waarde van FC tot gevolg heeft dat er teveel afvoer wordt berekend. Dit komt naar voren in de hoge positieve waarde van acc. diff.. Er is te weinig berging mogelijk in het bodemvocht reservoir. Een te lage waarde van FC geeft juist teveel berging in het bodemvocht reservoir waardoor er te weinig afvoer wordt berekend. Bij een grote waarde voor FC heeft acc. diff. een grote negatieve waarde. De berekende afvoer is kleiner dan de gemeten afvoer.



figuur 48 Gevoeligheidsanalyse beta

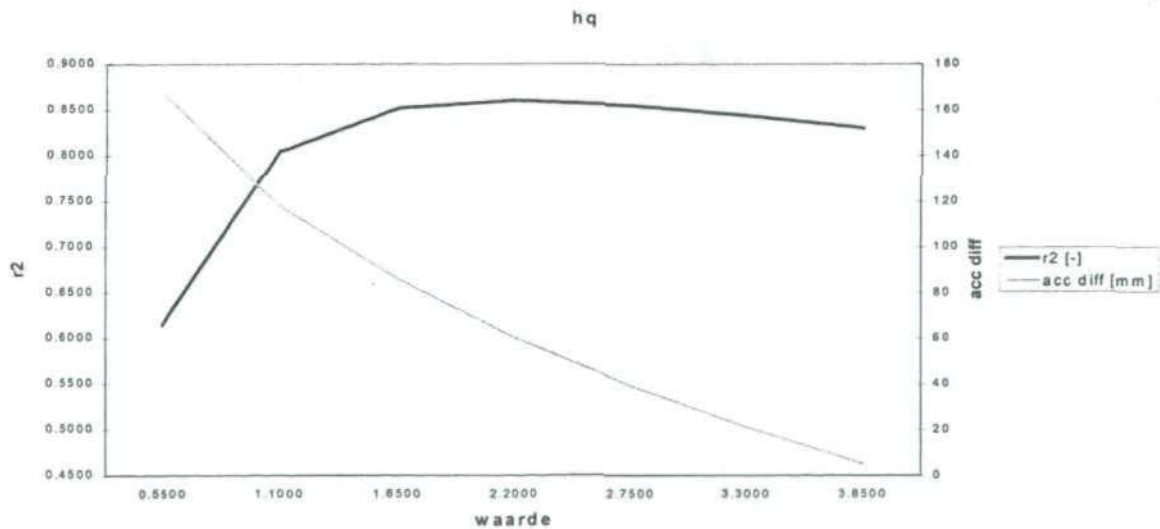
In figuur 48 is te zien dat een vergroting van de waarde voor beta ten opzichte van de uitgangswaarde van 2.0 [-] een lichte verslechtering van de modelprestatie geeft. Een verlaging echter geeft een duidelijk grotere verslechtering van de modelprestatie. Een verlaging van beta heeft tot gevolg dat een groter deel van de effectieve neerslag direct naar het snelle reservoir wordt geleid volgens vergelijking 4.2. Hierdoor berekent het model te snel hoge afvoeren. Bij een hoge waarde voor beta zal de fractie van de neerslag dat naar het snelle reservoir gaat kleiner zijn, echter, het bodemvocht reservoir vult zich dan sneller. Hierdoor wordt de fractie in vergelijking 4.2 weer groter, door een grotere waarde voor SM, waardoor toch

meer aanvulling van het snelle reservoir plaatsvindt. Dit compenseert elkaar voor een deel bij een hoge waarde voor beta, waardoor de efficiëntie van het model niet veel kleiner wordt. Het maximum voor R^2 ligt bij een waarde voor beta van ongeveer 2.0 [-].



figuur 49 Gevoeligheidsanalyse lp

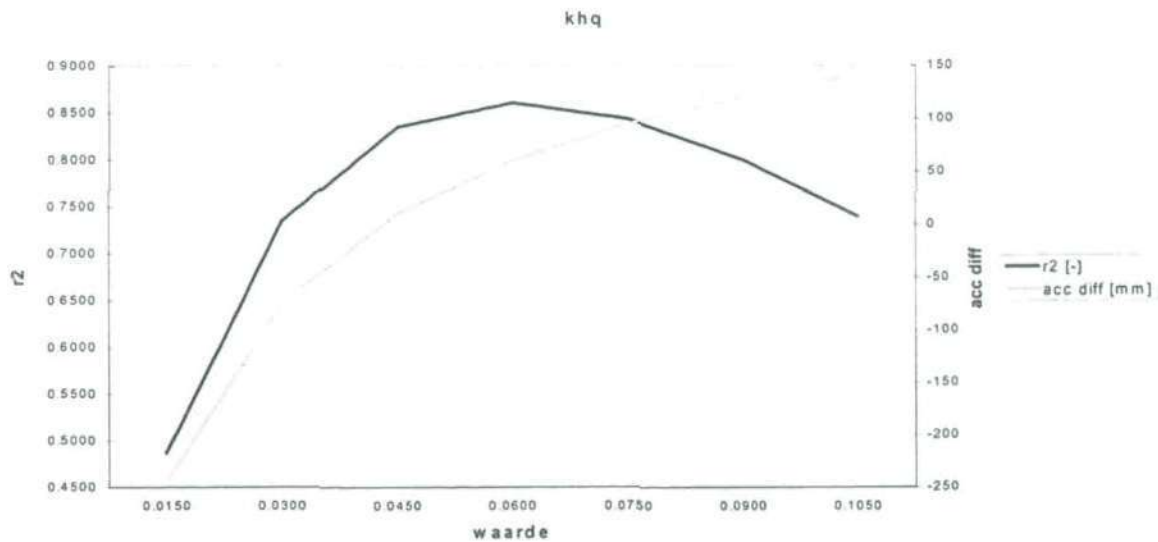
In figuur 49 is de uitgangswaarde van lp 0.66 [-]. De waarde kan niet groter zijn dan 1 [-]. Er blijkt dat het optimum voor R^2 ligt bij deze waarde voor lp. Een toe of afname van de parameterwaarde geeft een verslechtering van de modelprestatie. Dit betekent dat wanneer het bodemvocht reservoir voor 66% of meer gevuld is, er potentiële verdamping plaatsvindt. Dit blijkt voor dit stroomgebied zo te zijn. Andere stroomgebieden zouden andere waarden voor lp kunnen hebben.



figuur 50 Gevoeligheidsanalyse hq

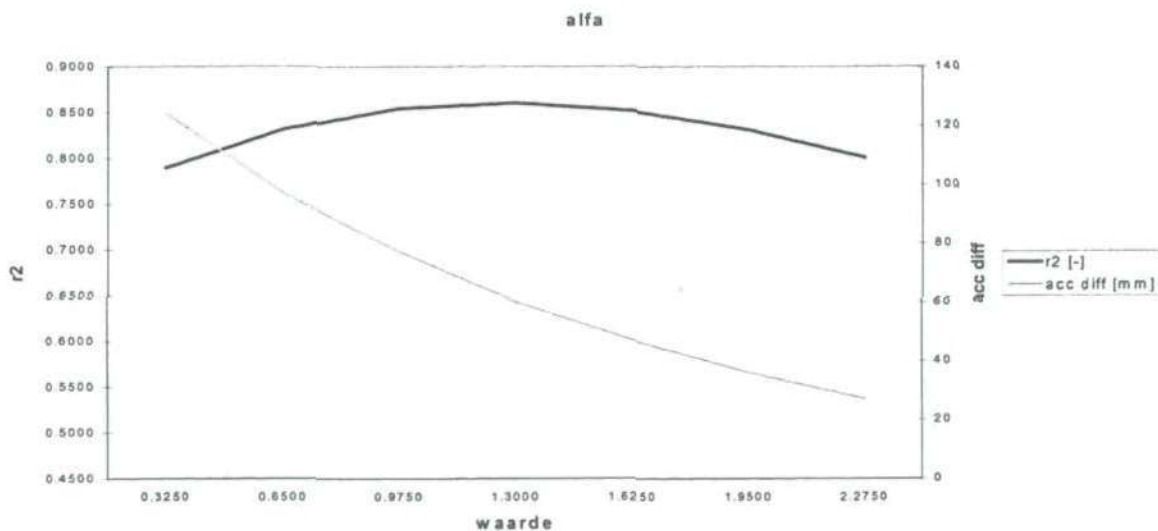
Vooraf een afname van de parameterwaarde van hq geeft een slechtere modelprestatie zoals is te zien in figuur 50. De parameters hq, khq en alfa samen bepalen de waarde voor de reservoircoëfficiënt, k_0 , van het snelle reservoir. Een verkleining van hq zorgt voor een vergroting van k_0 via vergelijking 4.4 en vergelijking 4.5 zodat het afvoerproces versneld wordt. Dit levert snelle, hoge pieken en een lage uitzakking na een piek. Een hoge waarde voor hq zorgt voor een lagere k_0 maar deze afvoer verlaging heeft tot gevolg dat de hoeveelheid water in het snelle reservoir toeneemt, met als gevolg een afvoer stijging. Dit heft elkaar deels op en geeft zo een minder grote verslechtering van R^2 bij een hoge waarde van hq.

Er is bij de gevoeligheidsanalyse een waarde voor h_q gebruikt die later is bijgesteld. De nieuwe waarde voor h_q is 3.4, dit ligt buiten het in deze grafiek beschouwde interval voor de h_q waarden.



figuur 51 Gevoeligheidsanalyse khq

Voor de parameter kh_q is figuur 51 een duidelijk optimum in modelprestatie rond de uitgangswaarde. Er is een bepaalde afhankelijkheid tussen de parameters h_q en kh_q zie paragraaf 4.2.2. Deze afhankelijkheid zorgt er waarschijnlijk voor dat bij een verandering van de waarde van kh_q in combinatie met de h_q waarde een niet juiste waarde voor k_0 wordt berekend, met als gevolg een verslechterde modelprestatie. Door de verandering van de waarde van h_q van 2.2 naar 3.4 moest ook de waarde van kh_q aangepast worden. De uitgangswaarde bij de gevoeligheidsanalyse was 0.06, deze waarde is later aangepast tot 0.0998 [dag^{-1}].



figuur 52 Gevoeligheidsanalyse alfa

De modelprestatie heeft een optimum voor een waarde van α rond de uitgangswaarde. Zowel een vergroting als een verkleining van de waarde van α heeft een verkleining van de waarde van R^2 tot gevolg. Door het SMHI wordt aangeraden α geen waarde groter dan 1.1 te geven.

7.6.2 Parameterwaarden

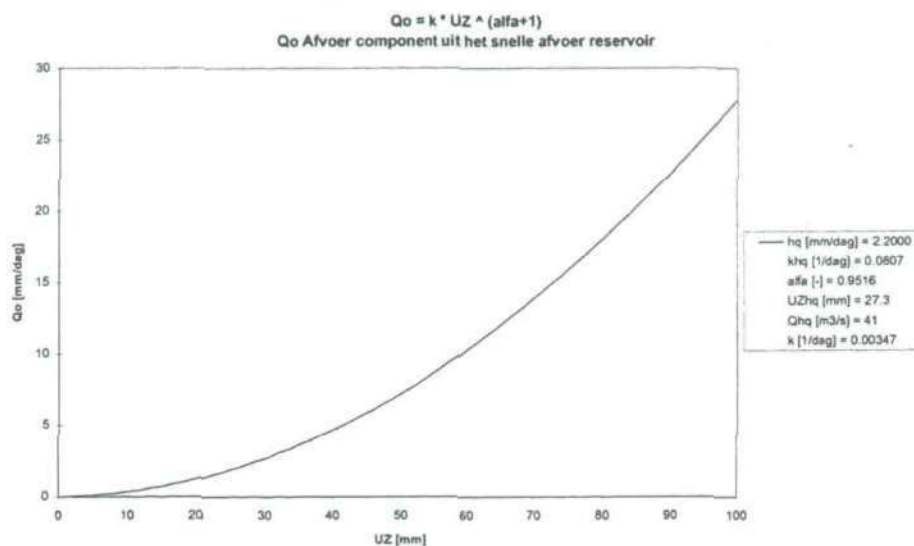
De parametersets die door calibratie verkregen zijn met het dagmodel zijn weergegeven in tabel 9. Verdere uitleg over de betekenis van de sets in de verschillende kolommen is opgenomen in het vervolg van deze paragraaf.

tabel 9 Parametersets van toepassing op het dagmodel

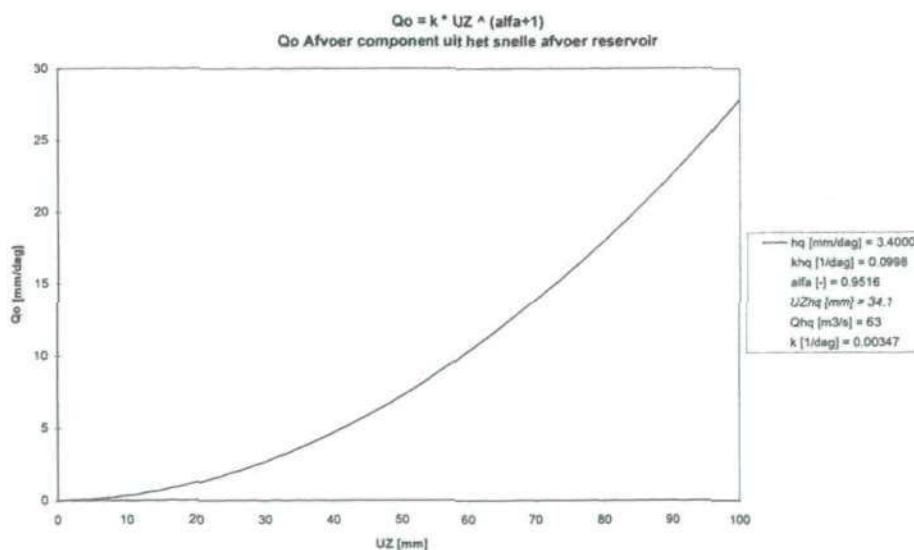
- kolom 1: Eerste handmatige calibratie voor de periode 1 oktober 1968 tot en met 30 september 1988.
 kolom 2: Automatische calibratie met onjuiste waarde voor h_q .
 kolom 3: Parameterset waarbij h_q en kh_q zijn aangepast en waarbij de calibratie periode van oktober 1986 tot september 1996 wordt gebruikt.
 kolom 4: Parameterset waarbij FC, perc en alfa zijn aangepast zodat piekafvoeren zo goed mogelijk worden berekend.

kolom	1	2	3	4
model	dag	dag	dag	dag
parameter	waarde	waarde	waarde	waarde
pcorr	1	1	1	1
pcalt	0.1	0.1	0.1	0.1
tcalt	0.6	0.6	0.6	0.6
sfcf	0.95	1.01758	1.01758	1.01758
fosfcf	0.9	0.8	0.8	0.8
cfmax	3	3.75653	3.75653	3.75653
focfmax	0.8	0.6	0.6	0.6
tt	-0.6	-1.41934	-1.41934	-1.41934
dttm	0	0.54391	0.54391	0.54391
cfr	0.05	0.05	0.05	0.05
whc	0.1	0.1	0.1	0.1
FC	160	196.71886	196.71886	180
lp	0.66	0.66	0.66	0.66
beta	2	1.79743	1.79743	1.79743
cflux	1	1.3799	1.3799	1.3799
cevpl	1	1	1	1
k4	0.01	0.02307	0.02307	0.02307
perc	0.48	0.59808	0.59808	0.4
maxbas	1	1	1	1
recstep	999	999	999	999
critstep	1	1	1	1
ecorr	1	1	1	1
rfcf	1	0.99714	0.99714	0.99714
sfdistfi	0.5	0.5	0.5	0.5
sclass	3	3	3	3
khq	0.06	0.08069	0.0998	0.0998
alfa	1.3	0.95162	0.95162	1.1
hq	2.2	2.2	3.4	3.4
sfdistfo	0.2	0.2	0.2	0.2
tti	1	1	1	1
cevpfo	1.15	1.15	1.15	1.15
CALIBRATIE	periode	periode	periode	periode
begin	19681001	19870101	19861001	19861001
eind	19880930	19961231	19960930	19960930
R ² [-]	0.86	0.92	0.92	0.91
acc. diff. [mm]	60.2	5.7	-8.6	14.3
rel. acc. diff. [-]	0.0068	0.0013	-0.0019	0.0031
VALIDATIE	periode	periode	periode	periode
begin	19880101	19681001	19681001	19681001
eind	19961231	19860930	19860930	19860930
R ² [-]	0.91	0.87	0.87	0.85
acc. diff. [mm]	180.3	-52.9	-52.9	-5.9
rel. acc. diff. [-]	0.0538	-0.0069	-0.0069	-0.0008

Het RIZA heeft geen beschikking over een automatische calibratie procedure voor het HBV model. Het dagmodel dat met de hand gecalibreerd was (kolom 1) is door het SMHI vervolgens automatisch gecalibreerd (kolom 2). Zo kan de modelprestatie verbeterd worden. In de eerste handmatige calibratie staat een waarde voor alfa van 1.3 [-]. Dit is een te grote waarde, de maximale waarde die door het SMHI wordt aangeraden is 1.1 [-]. Grotere waarden van alfa zijn niet realistisch. Dit komt door het feit dat door *grotere waarden dan 1.1 de niet-lineariteit van het snelle reservoir te groot wordt. Het model kan dan niet realistische afvoeren gaan berekenen.* Dit is niet duidelijk in de gevoeligheidsanalyse te zien. Wanneer echter het model gebruikt wordt met invoer die qua eigenschappen afwijkt van de invoer gebruikt bij de ijking kan het fout gaan. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij invoer gebaseerd op klimaat scenario's. De parameters in de automatisch gecalibreerde set die veranderd zijn ten opzichte van die in de eerste handmatig bepaalde set zijn variabel gesteld in de automatische calibratie. Dit zijn de parameters sf_{cf} , cf_{max} , tt , dtm , FC , β , $cflux$, k_4 , $perc$, r_{cf} , khq en α . De parameters fos_{cf} en foc_{fmax} zijn voor de automatische calibratie eenmalig aangepast. De rest is op een vaste waarde gehouden. Tijdens de handmatige calibratie is een onjuist berekende waarde voor hq gebruikt. Dit heeft als gevolg gehad dat de automatische calibratie gebruik heeft gemaakt van deze onjuist hq waarde. De eerste twee kolommen bevatten de foutieve waarde van 2.2 mm/dag voor hq .



figuur 53 Afvoer curve voor het snelle reservoir bij parameters in kolom 2 in tabel 9



figuur 54 Afvoer curve voor het snelle reservoir bij parameters in kolom 3 in tabel 9

De juiste waarde van h_q wordt berekend aan de hand van vergelijking 4.6. Voor de Ourthe te Tabreux gelden voor m_q en m_{hq} de volgende waarden.

Gemiddelde afvoer intensiteit [mm/dag]	1.200
Gemiddelde topafvoer intensiteit per jaar [mm/dag]	9.541

Door nu de wortel uit het product van deze twee waarden te nemen kan de waarde voor h_q berekend worden zie vergelijking 4.6. De waarde voor h_q is 3.4 [mm/dag]. Door nu deze waarde voor h_q in te voeren en, bij een gelijkblijvende α , de waarde van kh_q zo aan te passen dat de k -waarde voor het snelle afvoer reservoir gelijk blijft zijn de resultaten voor het model bij de twee parametersets in kolommen 2 en 3 van tabel 9 gelijk. Kolom 3 bevat echter de juiste waarde voor h_q . Voor de bepaling van de correcte waarden van h_q en kh_q voor stroomgebieden zijn methoden opgesteld door het SMHI. Deze methoden zijn al besproken in paragraaf 4.2.2.

In figuur 53 en figuur 54 zijn de twee afvoer curven voor het snelle reservoir gegeven voor de parameterwaarden van h_q , kh_q en α in respectievelijk kolom 2 en kolom 3 van tabel 9. Er is te zien dat voor de twee verschillende combinaties dezelfde afvoer curve geldt, met dezelfde waarden voor k_0 , de reservoircoëfficiënt van het snelle afvoer reservoir. In tabel 9 is ook te zien dat de waarden voor de drie kwaliteit criteria R^2 , acc. diff. en rel. acc. diff. gelijk zijn voor de validatie van de twee parametersets. Dit is niet het geval voor de calibratie periode omdat deze niet geheel hetzelfde zijn, hoewel de waarden voor R^2 ook bij calibratie dezelfde zijn voor kolom 2 en 3.

7.6.3 Modelprestatie

R² en rel. acc. diff.

Het verschil tussen de kwaliteit van het met de hand gecalibreerde dagmodel (kolom 1) en het automatisch gecalibreerde model (kolom 3) is zichtbaar wanneer gekeken wordt naar de waarden voor de efficiëntie (R^2) en het relatieve geaccumuleerde verschil (rel. acc. diff.). De waarden voor R^2 en rel. acc. diff. hebben voor het aangepaste automatisch gecalibreerde model bij de calibratie betere resultaten. Bij de validatie geeft het hand gecalibreerde model een betere R^2 waarde, echter wanneer naar het criterium rel. acc. diff. wordt gekeken zien we dat het automatisch gecalibreerde model veel beter presteert dan het met de hand gecalibreerde model. Bij validatie heeft het automatisch gecalibreerde model een rel. acc. diff. van -0.0069 terwijl het handmatig gecalibreerde model een slechter resultaat van 0.0538 haalt.

Door het model berekende percentage van de piekafvoeren bij uurmetingen

De waarden van de piekafvoeren voor de hoogwaterperioden berekend met het dagmodel kunnen vergeleken worden met de gemeten uurwaarden. Een dagmodel vergelijken met uurmetingen is een oneigenlijke vergelijking, het is echter wel gedaan om ook de berekeningen van een 6-uurmodel en die van een 1-uurmodel met uurmetingen te kunnen vergelijken. Zo wordt een onderlinge vergelijking mogelijk gemaakt tussen onder meer de hoogte van de piekafvoer tijdens hoogwaterperioden.

Door de berekende waarde van de topafvoer als percentage te nemen van de gemeten topafvoer kunnen prestaties van de modellen met verschillende tijdsintervallen worden vergeleken. Resultaat van deze berekening voor het dagmodel voor parametersets in kolom 3 en kolom 4 is weergegeven in tabel 10.

tabel 10 Berekende piekafvoer als percentage van uurlijkse meting voor een dagmodel

mnd-jr	uur meting	dag intervallen kolom 3		dag intervallen kolom 4	
	m3/s	m3/s	%	m3/s	%
mrt-79	150	140	93	149	99
dec-79	143	111	78	125	88
jul-80	270	217	80	236	88
feb-84	311	198	64	213	68
jan-88	102	78	77	81	79
feb-88	107	91	85	95	88
jan-93	267	180	67	205	77
dec-93	428	269	63	292	68
jan-95	337	309	92	327	97

Er is te zien dat de parametersets in kolommen 3 en 4 van tabel 9 qua topafvoer berekening verschillen. Door de aanpassing van de parameters FC, perc en alfa is de modelprestatie ten aanzien van de piekafvoer verbeterd. De berekende piekafvoeren van de hoogwaterperioden in 1984 en 1993 blijven nog aan de lage kant.

Afvoergolf

Wanneer de grafieken van enkele hoogwaterperioden worden bekeken die zijn berekend met parameters uit kolom 1 en 3 kan er verschil worden gezien in de prestaties van de twee parametersets. Voor de hoogwaterperioden maart 1979, juli 1980, februari 1984, januari 1993, december 1993 en januari 1995 zijn in Bijlage 10 de afvoergolven gegeven voor zowel de handmatig als de automatisch gecalibreerde parameterset.

Voor maart 1979 zien we dat de handmatige set de afvoer nog overschat, terwijl de automatisch gecalibreerde set de topafvoer in maart 1979 goed berekent. Voor de rest van de hoogwaterperioden is er *weinig verschil te zien, tussen de twee parametersets, in de waarde van de topafvoer. Er valt op dat de topafvoeren over het algemeen niet worden gehaald, de berekende topafvoer is voor alle hoogwaterperioden te laag.* Omdat er tijdens deze studie speciale aandacht aan hoogwaterperioden wordt besteed moet er gestreefd worden naar een betere prestatie van het model tijdens deze perioden.

Om te proberen de waarden van de topafvoeren beter te benaderen kunnen enkele waarden van parameters in de automatisch gecalibreerde set gewijzigd worden. Parameters die invloed hebben op de hoogte van de afvoer pieken zijn FC, alfa en khq. De parameterwaarden moeten zodanig veranderd worden dat de piekafvoeren beter worden berekend en het geaccumuleerde verschil tussen gemeten en berekende afvoer niet veel groter of kleiner wordt. Met dit doel is de parameter perc, na aanpassing van FC en alfa, gebruikt om het verschil tussen gemeten en berekende afvoer weer te minimaliseren. Dit alles is een extra calibratie van een aantal parameters om de berekening van de pieken beter te maken.

Door de waarde van alfa te vergroten naar 1.1 kan ervoor gezorgd worden dat de berekende pieken hoger worden. Het snelle afvoer reservoir reageert sterker niet-lineair op neerslag. Dit is de maximale waarde waarbij alfa nog realistisch is, grotere waarden worden in praktijk niet gebruikt (Olofsson, 2000, pers. med.). *De parameter FC wordt verlaagd tot 180 mm. Dit zorgt ervoor dat er minder berging is in de bodemvocht zone waardoor toevoer van water naar het snelle afvoer reservoir voor en tijdens hoogwater sneller maximaal is, dit zorgt voor een grotere afvoer.* De parameterwaarde khq is gelijk gehouden. De parameter perc wordt verkleind tot 0.4 om het geaccumuleerde verschil te minimaliseren. Dit zorgt er tevens voor dat er minder water weglekt uit het snelle afvoer reservoir zodat er hogere afvoeren tijdens hoogwaterperioden ontstaan. De parameter khq blijft gelijk ten opzichte van de automatische calibratie. De nieuwe parameterwaarden en de bijbehorende kwaliteit criteria staan in kolom 4 van tabel 9. De berekening van afvoergolven voor de definitieve parameterset uit kolom 4 zijn gegeven in Bijlage 11. Deze figuren zijn onder andere gebruikt om tijdens de calibratie de berekeningen visueel te controleren.

7.7 Conclusies

- Het neerslag-afvoer model HBV kan gebruikt worden om het stroomgebied van de Ourthe met dag intervallen te modelleren. De prestatie tijdens hoogwaterperioden is niet altijd goed.
- Voor het HBV dagmodel van het stroomgebied van de Ourthe bovenstrooms van Tabreux moeten de parameterwaarden uit kolom 4 in tabel 9 gebruikt worden. Deze set geeft de beste resultaten voor het behalen van de afvoeren tijdens hoogwaterperioden. Tevens zijn de efficiëntie, de visuele inspectie en het geaccumuleerde verschil tussen gemeten en berekende afvoer bij calibratie en validatie goed.
- Gevoelige parameters in het HBV model zijn de parameters c_{fmax} , FC, beta, I_p , h_q , kh_q en alfa. Bij de calibratie van HBV modellen in het algemeen moet vooral aandacht aan de waarden voor deze parameters geschonken worden.

7.8 Aanbevelingen

- IJk een HBV 6-uurmodel en vergelijk de modelprestaties met die van een HBV dagmodel.
- Er moet een methode gevonden worden om ervoor te zorgen dat de toestandvariabelen in een model bij de start van berekeningen ten behoeve van waterstand voorspellingen op een goede manier bepaald zijn. Dit is zeker van belang bij modellen met een kleiner tijdsinterval dan een dag, hiervan zijn gegevens over kortere perioden van bekend waardoor er correcte initiële toestanden vereist zijn om een berekening te starten.
- Ga na of het mogelijk is om een eindtoestand op een bepaalde datum van een berekening met een dagmodel te gebruiken als initiële toestand voor berekeningen met modellen met een kleinere tijdsintervallen, startend op diezelfde datum.
- Ga na of bij de bepaling van parameters voor een model met kortere tijdsintervallen, gebruik gemaakt kan worden van de parameterwaarden voor het dagmodel. Kunnen deze parameterwaarden op een bepaalde manier afgeleid worden van parameterwaarden van het dagmodel?
- Gebruik geen waarden voor de parameter alfa groter dan 1.1 [-]. Dit kan leiden tot te sterke niet-lineairiteit van het snelle reservoir en zo bijvoorbeeld uitkomsten van studies naar de invloed van klimaatveranderingen op de afvoer onbetrouwbaar maken.
- Gebruik bij calibratie van stroomgebieden met het HBV model een automatische calibratie procedure. Wanneer eerst met een handmatige calibratie startwaarden voor de automatische calibratie worden bepaald verbeterd dit de prestatie van het model. Er bestaat een automatische calibratie procedure voor het HBV model, het is in gebruik door het SMHI.

8. HBV model: 6-uur intervallen

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zal naar aanleiding van de resultaten van het Tijdsinterval onderzoek (paragraaf 6.4) een 6-uurmodel worden gecalibreerd. De gegevensbewerking, calibratie en validatie en modelprestatie komen aan bod. Er zal worden getracht antwoorden te geven op aanbevelingen uit het vorige hoofdstuk aangaande de bepaling van de initiële toestand van een model met kleinere tijdsintervallen dan een dag en op welke manier de parameterwaarden van een dagmodel in relatie staan tot die van een model met kleinere tijdsintervallen.

Daarnaast zal door de analyse van een hoogwaterperiode, de hoeveelheden afvoer worden vergeleken met de neerslag in deze periode. Dit wordt gedaan om te onderzoeken of de neerslag die tijdens hoogwaterperioden valt ook daadwerkelijk in deze periode tot afstroming komt en niet wordt geborgen.

8.2 Gegevensbewerking

Het 6-uurmodel rekent met vier invoer waarden per dag. Deze waarden worden toegekend aan de tijdstippen 1, 7, 13 en 19 uur op elke dag. Dit zijn de uren waarvoor de neerslag van de afgelopen 6 uur gemeten is. Voor het maken van een 6-uurmodel is gebruik gemaakt van de metingen van P met 6-uur intervallen, T met 12 uur intervallen en E met 24-uur intervallen op de meteorologische stations; Bierset, Spa en St-Hubert.

Voor de hoogwaterperioden zijn uit de uurmetingen van de afvoer intensiteit 6-uur gemiddelden berekend. Om de afvoeren tussen de hoogwaterperioden te kunnen modelleren is voor deze perioden voor de 6 uur waarden de dagwaarde geldend op de overeenkomstige dag genomen. Dit geeft dus voor de vier 6 uur waarden op een dag vier maal dezelfde waarde als de metingen met dag intervallen.

De 6 uurwaarden voor E zijn bepaald door de dagwaarden te delen door 4 en deze op de 4 tijdstippen op de dag te plaatsen. Hierdoor wordt er geen dagvariatie in de potentiële verdamping aangebracht. Dit heeft voor de waterbalans geen gevolgen, de hoeveelheid water die per dag verdampt blijft immers gelijk.

Tijdens hoogwaterperioden is de potentiële verdamping in praktijk nagenoeg nul, extreme hoogwaterperioden komen voor in de winterhalfjaren wanneer de temperatuur laag is. Deze verwaarlozing van de dagelijkse variatie in de verdamping heeft daardoor zeer weinig invloed op de berekening van de afvoer tijdens hoogwaterperioden.

Voor de bepaling van 6 uur waarden van de temperatuur is gebruik gemaakt van het dagminimum en het dagmaximum. De temperatuur invoer voor het HBV 6-uurmodel is bepaald door het dagminimum aan de tijdstippen 1 en 7 uur toe te kennen en het dagmaximum aan de tijdstippen 13 en 19 uur. Dit heeft als gevolg dat de temperatuur voor de eerste twee tijdstippen (1 en 7 uur) op een dag onderschat wordt en voor de laatste twee tijdstippen (13 en 19 uur) wordt de temperatuur overschat. Dit heeft binnen het model gevolgen voor de sneeuwval, -accumulatie en -smelt. Er zal, wanneer de temperatuur tijdens het eerste dagdeel systematisch lager is, meer sneeuwval uit neerslag berekend worden in koude perioden. Het zal dan ook langer blijven liggen door de systematisch lagere temperaturen. Wanneer vervolgens de ingevoerde temperaturen voor het tweede dagdeel systematisch te hoog worden ingevoerd zal de eventuele sneeuw ook weer versneld afsmelten. Deze systematische temperatuur over- en onderwaardering zal over een dag genomen waarschijnlijk geen effect hebben.

8.3 Initiële toestanden

Er kan op een aantal manieren worden omgegaan met de schatting van de initiële waarden van de toestandsvariabelen van een model met kleinere tijdsintervallen dan een dag. Ten eerste kan de beginwaarde voor SM op de maximale waarde worden gezet, dit kan verantwoord worden doordat het

voorafgaande aan een hoogwaterperiode veel heeft geregend waardoor de mogelijkheid tot berging minimaal is (Warmerdam, 2000 pers. med.).

Ten tweede zou een eindtoestand van een berekening tot aan het begin van een hoogwaterperiode met een dagmodel gebruikt kunnen worden als initiële toestand voor een model dat rekent met kleinere tijdsintervallen. Voordeel hiervan is dat er met gegevens die over het gehele jaar beschikbaar zijn een berekening kan worden gedaan met een groter tijdsinterval om vervolgens wanneer de situatie er om vraagt hoogwaterperiodes door te rekenen.

Op het moment is het gebruiken van een eind toestand van een dagmodel als initiële toestand voor een model met kortere tijdsintervallen met het HBV model nog niet uitvoerbaar, een bug in het programma verhindert dit (Olofsson, 2000, pers. med.). Daarom is voor de oplossing gekozen om gegevens met een groter tijdsinterval in te voeren in een model dat rekent met kleinere tijdsintervallen. Dit betekent dat dagwaarden voor neerslag en verdamping opgedeeld worden wanneer ze bijvoorbeeld in een 6-uurmodel ingevoerd moeten worden. In dit geval moet dan gedeeld worden door 4. Het distribueren van gegevens kan met behulp van het HBV model gedaan worden. Dit gaat als volgt in zijn werk. Er is een model dat rekent met de kleinere tijdsintervallen. Hierin worden gegevens ingelezen met een groter tijdsinterval. Vervolgens worden de gegevens door middel van de menu balk "Data" → "PTQW" → "Data distribution..." verdeeld over de kleinere tijdsstappen. Voor de temperatuur wordt dezelfde waarde met de kleinere tijdsintervallen ingevoerd. Voor neerslag en verdamping wordt een gelijke verdeling gemaakt over de kleinere tijdsintervallen.

Met behulp van deze ingelezen gegevens die gedistribueerd zijn over de kleinere tijdsintervallen moet dan een berekening worden gedaan tot het tijdstip waarop begonnen wordt met de invoer met het gebruikte kleinere tijdsinterval. De eindtoestand van deze berekening kan gebruikt worden als begin toestand voor een berekening ten behoeve van een hoogwatervoorspelling. Het is praktischer om de berekening door te laten lopen en niet te onderbreken.

Nu kan er met één en hetzelfde model met gelijke tijdsintervallen gewerkt worden. Alleen het tijdsinterval waarop metingen en voorspellingen van neerslag, temperatuur en potentiële verdamping aanwezig zijn wijzigt dan tijdens een hoogwaterperiode naar een kleiner tijdsinterval.

8.4 Calibratie en validatie

Voor de calibratie en validatie van het 6-uurmodel zijn de periode van 1 oktober 1993 tot 30 september 1995 respectievelijk de periode 1 oktober 1990 tot 30 september 1993 genomen. De parameters zijn gelijkgehouden aan die van het dagmodel. Enkel de waarden voor h_q en max_{bas} zijn aangepast. De parameter h_q heeft de eenheid [mm/tijdsinterval]. De waarde van deze parameter is een hoge afvoer intensiteit omgerekend met behulp van de oppervlakte van het stroomgebied, in een tijdsperiode gelijk aan het gebruikte tijdsinterval. In het geval van een 6-uurmodel moet h_q dus gedeeld worden door 4. De parameterwaarde van max_{bas} moet zodanig worden aangepast dat de gemeten top van de afvoergolf tijdens een hoogwater in de tijd samenvalt met de top van de met het HBV model berekende afvoer piek. De parameter max_{bas} heeft een waarde gelijk aan, of groter dan het gebruikte tijdsinterval, met dagen als eenheid (Olofsson, 2000 pers. med.).

8.5 Resultaten

8.5.1 Parameterwaarden

De parametersets die door calibratie verkregen zijn met het 6-uurmodel zijn weergegeven in tabel 11.

tabel 11 Parametersets van toepassing op het 6-uurmodel

kolom 5: Parameterset voor het 6-uurmodel waarbij maxbas en hq aangepast zijn ten opzichte van het dagmodel (kolom 4).
kolom 6: Parameterset waarbij FC, perc en alfa zijn aangepast zodat piekafvoeren zo goed mogelijk worden berekend.

kolom	5	6
model	6uur	6uur
parameter	waarde	waarde
pcorr	1	1
pcalt	0.1	0.1
tcalt	0.6	0.6
sfcf	1.01758	1.01758
fosfcf	0.8	0.8
cfmax	3.75653	3.75653
focfmax	0.6	0.6
tt	-1.41934	-1.41934
dtm	0.54391	0.54391
cfr	0.05	0.05
whc	0.1	0.1
FC	196.7	180
lp	0.66	0.66
beta	1.79743	1.79743
cflux	1.3799	1.3799
cevpl	1	1
k4	0.02307	0.02307
perc	0.59808	0.4
maxbas	0.66	0.66
recstep	999	999
critstep	1	1
ecorr	1	1
rfcf	0.99714	0.99714
sfdistfi	0.5	0.5
sclass	3	3
khq	0.0998	0.0998
alfa	0.95162	1.1
hq	0.85	0.85
sfdistfo	0.2	0.2
tti	1	1
cevpfo	1.15	1.15
CALIBRATIE	periode	periode
begin	19931001	19931001
eind	19950930	19950930
R ² [-]	0.93	0.94
acc. diff. [mm]	1.1	12.0
rel. acc. diff. [-]	0.0008	0.0095
VALIDATIE	periode	periode
begin	19901001	19901001
eind	19930930	19930930
R ² [-]	0.92	0.91
acc. diff. [mm]	29.4	36.3
rel. acc. diff. [-]	0.0270	0.0335

Het blijkt dat de parameter maxbas voor een 6-uurmodel van het stroomgebied van de Ourthe teruggebracht moet worden naar een waarde van 0.66 [dag]. Bij deze waarde voor maxbas valt de berekende top van een piekafvoer in de tijd samen met de bijbehorende gemeten top van de piekafvoer. Een waarde van 0.66 [dag] voor maxbas betekent dat over een periode van (0.66 maal 24 is) 16 uur, de neerslag via een driehoeksverdeling wordt omgezet tot het berekende afvoerverloop (figuur 17). De waarde van maxbas is altijd gelijk aan of groter dan het interval waarmee gerekend wordt. Het kan dus zijn dat een waarde van maxbas uit een parameterset van een dagmodel bij omzetting naar een 6-uurmodel nog aangepast moet worden tot een waarde kleiner dan de minimale waarde van 1 voor het dagmodel. De eenheid blijft echter dagen.

Het HBV model zet de waarde voor h_q [mm/dag] niet automatisch om in een waarde van het gebruikte tijdsinterval. Deze parameter zal gedeeld moeten worden door het aantal tijdsintervallen dat per dag wordt gebruikt. Wanneer een waarde voor h_q van een dag- naar een 6-uur intervallen waarde moet worden omgezet, moet gedeeld worden door 4. Omzetting naar een 1-uurmodel behoeft deling door 24 (Olofsson, 2000 pers. med.).

8.5.2 Modelprestatie

R² en rel. acc. diff.

Voor beide parametersets van het 6-uurmodel in kolommen 5 en 6 van tabel 11 geldt dat ze een zeer goede efficiëntie opleveren voor zowel calibratie als validatie. Kolom 5 heeft een R^2 van 0.93 terwijl de uiteindelijke, aangepaste set een R^2 waarde van 0.94 heeft. Het kwaliteit criterium rel. acc. diff. heeft bij calibratie voor kolom 5 een waarde van 0.0008 en voor kolom 6 een waarde van 0.0095. Bij beide sets blijft het gesommeerde verschil tussen gemeten en berekende afvoer dus onder de 1 procent. Dit is goed te noemen.

Bij validatie geldt voor kolom 5 een waarde van 0.0270 en voor kolom 6 een waarde van 0.0335 voor rel. acc. diff., dit zijn grotere waarden dan bij de calibratie. Het verschil in rel. acc. diff. tussen de twee kolommen is echter kleiner geworden. Bij validatie wordt de afvoer hoeveelheid over de periode overschat met ongeveer 3 procent. Een relatief geaccumuleerd verschil van ongeveer 3 procent is echter wel aan de hoge kant. Hiermee moet toch genoeg genomen worden vanwege de nadruk die bij modellering gelegd wordt op hoogwaterperioden. Wanneer het HBV 6-uurmodel eventueel gebruikt gaat worden voor klimaat studies moet wellicht een aanpassing van de parameter FC worden overwogen om het relatieve geaccumuleerde verschil terug te brengen tot onder de 1 procent.

Door het model berekende percentage van de piekafvoeren bij uurmetingen

De waarden van de piekafvoeren voor de hoogwaterperioden kunnen vergeleken worden met de gemeten uurwaarden. Resultaat van deze berekening voor het 6-uurmodel voor parametersets in kolom 5 en kolom 6 in tabel 11 is weergegeven in tabel 12.

tabel 12 Berekende piekafvoer als percentage van uurlijkse meting voor een 6-uurmodel

	uur meting	6-uur intervallen kolom 5		6-uur intervallen kolom 6	
mnd-jr	m3/s	m3/s	%	m3/s	%
jan-93	267	216	81	253	95
dec-93	428	272	63	300	70
jan-95	337	321	95	342	101

Er is te zien dat de parametersets in kolommen 5 en 6 van tabel 11 qua topafvoer berekening verschillen. Door de aanpassing van de parameters FC, perc en alfa is de modelprestatie ten aanzien van de piekafvoer verbeterd. De berekende piekafvoer van de hoogwaterperiode in december 1993 blijft aan de lage kant, dit is ook het geval bij het dagmodel.

Afvoergolf

De berekende afvoergolven voor de hoogwaterperioden januari 1993, december 1993 en januari 1995 zijn weergegeven in Bijlage 12. Wanneer de afvoergolven van het 6-uurmodel voor de perioden januari 1993 en januari 1995 vergeleken worden met de afvoergolven van het dagmodel, valt te zien dat het 6-uurmodel in deze twee perioden het gemeten afvoerverloop veel beter volgt dan dat het dagmodel doet.

Voor de hoogwaterperiode van december 1993 is de piekafvoer berekend door het 6-uurmodel hoger dan berekend door het dagmodel maar het berekende afvoerverloop volgt het gemeten afvoerverloop niet goed. Oorzaak hiervan zou foutieve neerslag invoer kunnen zijn. Wanneer er te weinig neerslag wordt ingevoerd haalt de berekende afvoer piek niet het niveau van de gemeten afvoer piek.

8.6 Conclusies

- De parameterwaarden in kolom 6 van tabel 11 moeten gebruikt worden voor een HBV 6-uurmodel van het stroomgebied van de Ourthe bovenstrooms van Tabreux. Dit is de parameterset die voor het dagmodel is gebruikt met aan een 6-uurmodel aangepaste waarden voor h_q en $maxbas$. Deze set geeft betere resultaten bij het berekenen van de topafvoeren, dan de parameters in kolom 5. Dit komt door een lagere waarde voor FC en $perc$ en een hogere waarde voor α .
- Parameters met een tijdsdimensie worden door het HBV model omgerekend naar waarden voor een kleiner tijdsinterval dan een dag wanneer het model met deze kleinere tijdsintervallen werkt. Deze parameters die omgerekend worden zijn c_{fmax} , c_{flux} , k_4 , $perc$ en khq en moeten dus in de eenheid per dag worden ingevuld. Er kan voor gekozen worden deze parameters licht bij te stellen na overzetting van een dagmodel naar een model met kleinere tijdsintervallen maar dit is in principe niet nodig. Het is in het geval van het hier gebruikte 6-uurmodel dan ook niet gebeurd. Een uitzondering vormen de parameters h_q [mm/tijdsinterval] en $maxbas$ [dagen], deze moeten door de gebruiker aangepast worden. De parameter $maxbas$ kan in het geval van een dagmodel niet een waarde kleiner dan 1 aannemen. Voor een model met kleinere tijdsintervallen is dit echter wel mogelijk. Daarom moet deze parameter bij overgang naar een kleiner tijdsinterval opnieuw beschouwd worden hoewel de eenheid "dagen" wel in stand blijft.
- De parameters die geen tijdsdimensie hebben dienen bij omzetting van een parameterset van een HBV dagmodel naar een model met een kleiner tijdsinterval niet veranderd te worden. Aanpassingen van deze waarden zijn in eerste instantie minimaal omdat deze parameterwaarden onafhankelijk zijn van het tijdsinterval waarmee het model rekent. Om de modelprestatie vervolgens te optimaliseren zouden kleine aanpassingen van parameterwaarden kunnen worden toegepast.
- Een end-state van een berekening met een dagmodel kan niet gebruikt worden als initiële toestand voor een model met kleinere tijdsintervallen. Er zal dus voor berekeningen genoeg moeten worden genomen met een onstabiele periode aan het begin van berekeningen. Om een berekening te beginnen kan daarom gekozen worden voor een aanloop periode met gedistribueerde invoer met grotere tijdsintervallen (bijvoorbeeld dag intervallen) om zo de start van de berekening met invoer met kleinere tijdsintervallen een stabiel begin te geven.

8.7 Aanbevelingen

- Een 1-uurmodel kan misschien afvoertoppen beter simuleren dan een 6-uurmodel. Het 6-uurmodel berekent nog te lage afvoer in de hoogwaterperiode van december 1993. Aanbeveling verdient het maken van een 1-uurmodel. Hoe dit is gedaan is omschreven in paragrafen 9.2 tot en met 9.4. Een interessant onderzoek is het vergelijken van een 1-uurmodel met het 6-uurmodel. Kan een 1-uurmodel de afvoer nog beter weergeven, in termen van kwaliteit criteria, of zijn de prestaties van een 6-uurmodel gelijk aan die van een 1-uurmodel?
- Pas bij de omzetting van een HBV dagmodel naar een HBV 6-uurmodel alleen de waarde van h_q aan. Reken h_q om naar een waarde per tijdsinterval van 6 uur. De parameterset voor een 6-uurmodel hoeft dus niet opnieuw door calibratie bepaald te worden. Daarnaast is een aanpassing van de waarde van $maxbas$ eventueel nodig. Dit kan een verbetering van de topafvoeren in de tijd opleveren.
- Gebruik, wanneer er niet voldoende gegevens met 6-uur intervallen aanwezig zijn, gedistribueerde dagwaarden als invoer voor het HBV 6-uurmodel tot aan het moment waar gegevens wel met 6-uur intervallen zijn gemeten. Zo kan een berekening met 6-uurmetingen worden gestart met een goede benadering voor de initiële toestand.
- Wanneer het HBV 6-uurmodel, zoals dat voor deze studie is gebruikt, wordt gebruikt voor een berekening over een lange periode ten behoeve van bijvoorbeeld klimaatstudies moet eerst een aanpassing aan parameterwaarden gedaan worden om de fout tussen berekende en gemeten afvoer te verkleinen. Deze is bij de in dit rapport beschreven 6-uurmodel ijking nog 3 procent, dit komt door het feit dat bij de ijking vooral de nadruk lag op hoogwaterperiodes. Hierdoor worden berekeningen over zeer lange perioden onbetrouwbaar. Een verbetering van de fout tussen berekende en gemeten afvoer kan door aanpassing van de parameterwaarden van bijvoorbeeld $perc$ en FC worden gerealiseerd.



figuur 55 De Ourthe nabij Durbuy

9. HBV model: 1-uur intervallen

9.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de ijking van 1-uurmodellen beschreven. Er wordt naar 1-uurmodellen gekeken om te onderzoeken of modellen met 1-uur intervallen tijdens hoogwaterperioden beter presteren dan modellen met 6-uur intervallen. Daarnaast is een 1-uurmodel gebruikt om het tijdsinterval te bepalen waarmee het stroomgebied van de Ourthe gemodelleerd dient te worden. Dit is al behandeld in paragraaf 6.2. Een belangrijk aspect is de correcte werking van het model bij kleine tijdsintervallen. Kan het HBV model wel met deze kleine tijdsintervallen rekenen? Ontstaan er hierdoor geen fouten in berekeningen?

9.2 Gegevensbewerking

Er zijn in eerste instantie drie verschillende 1-uurmodellen gemaakt. Twee modellen met drie jaar aan gegevens (1-uurmodellen: drie jaar gegevens) en één om het tijdsinterval onderzoek te doen (1-uurmodel: tijdsinterval onderzoek).

1-uurmodellen: drie jaar gegevens

Voor twee perioden is een 1-uurmodel toegepast. Dit zijn de perioden *1 oktober 1977 tot en met 30 september 1980* en *1 oktober 1992 tot en met 30 september 1995*. Er is een mogelijkheid om een bewerking, waarbij invoer met grotere intervallen wordt verdeeld over kleinere, in het menu van het HBV model uit te voeren. Deze verdelingsmogelijkheid heet distributie. Het verdelen van gegevens over kleinere tijdsintervallen wordt in het vervolg distribueren genoemd. Er zijn voor de berekeningsperiode 1992-1995 de 6 uurmetingen van afvoer, neerslag, temperatuur en potentiële verdamping verdeeld over de afzonderlijke uren. Voor de periode 1977-1980 zijn dagelijkse waarden voor deze vier grootheden verdeeld.

Deze twee modellen maken dus voor het grootste gedeelte van de perioden geen gebruik van uurmetingen van de afvoeren of neerslagen. Deze zijn echter wel aanwezig voor een aantal korte hoogwaterperioden. Bij de verdeling van de gegevens is het aan te raden om eerst de neerslag en verdamping te vermenigvuldigen met 100. Vervolgens moet in de parameterset voor het 1-uurmodel de parameter *pcorr* gedeeld worden door 100. Dit moet worden gedaan om te voorkomen dat er bij de verdeling neerslag "verloren" gaat door het feit dat de file *dos_ptqw* van het HBV model maar een decimaal bevat voor de gegevens. Wanneer dus bijvoorbeeld op een dag 1 mm neerslag valt, dit vervolgens door 24 wordt gedeeld bij verdeling, geeft dit uurwaarden met een decimaal van 0.0 terwijl de werkelijke waarde 0.0417 had moeten zijn. Door vermenigvuldigen met 100 wordt dus voorkomen dat er foutieve neerslag wordt ingevoerd.

Vervolgens moeten de 1-uur gebiedsneerslagen en -afvoeren worden ingevoerd. Hierbij ontstaat een probleem voor de neerslag. Door het HBV model wordt normaal gesproken gebruik gemaakt van hoogte- en neerslag correcties. De hoogte correcties zijn echter niet van toepassing op de voor hoogwaterperioden bepaalde gebiedsneerslag.

De neerslag en hoogte correcties hebben al plaatsgevonden op de berekende gebiedsneerslag. Het volgende kan worden gedaan. In het HBV model bestaat de mogelijkheid om de neerslag en hoogte correcties op de neerslag een begin en eind datum mee te geven. Door nu meerdere *pcorr* en *pcalt* parameters in te voeren kunnen voor een hoogwaterperiode de parameters *pcorr* en *pcalt* op nul worden gesteld en voor elk station dezelfde bepaalde gebiedsneerslag worden ingevoerd. Op deze manier kan tijdens hoogwaterperioden toch met berekende gebiedsneerslagen met 1-uur intervallen gerekend worden.

In dit geval moet ervoor gekozen worden de gebiedsneerslagen voor de hoogwaterperioden in te voeren in honderdste millimeters waardoor de eenmalige neerslag correctie, *pcorr*, van 0.01 van toepassing blijft en dus niet opgedeeld wordt in een aantal perioden. De hoogte correctie parameters moeten voor elke

hoogwaterperiode op nul gesteld worden zoals weergegeven in figuur 56 in de rijen 4, 6 en 8 voor respectievelijk de hoogwaterperioden januari 1993, december 1993 en januari 1995.

	Parameter	Value	First day	Last day
1	group	0.00000		
2	pcorr	0.01000		
3	pcalt	0.10000	19921001	19921231
4	pcalt	0.00000	19930101	19930131
5	pcalt	0.10000	19930201	19931130
6	pcalt	0.00000	19931201	19931231
7	pcalt	0.10000	19940101	19941231
8	pcalt	0.00000	19950101	19950131
9	pcalt	0.10000	19950201	19950930

figuur 56 Hoogte correcties pcalt in het 1-uurmodel voor de periode 1992 tot 1995

Dit moet ook voor de hoogwaterperioden in het 1-uurmodel voor 1977 tot 1980 gebeuren. Op deze manier kan er in een model tevens met station metingen en berekende gebiedsneerslagen worden gewerkt. Er moet wel gezegd worden dat er alleen een vergelijking gemaakt mag worden tussen 6-uur- en 1-uurmodellen op basis van deze hoogwaterperioden. Deze perioden die vergeleken worden zijn dan januari 1993, december 1993 en januari 1995.

1-uurmodel: tijdsinterval onderzoek

Dit 1-uurmodel rekent voor de hoogwaterperioden december 1993 en januari 1995 met invoer zoals omschreven in paragraaf 6.2. Het model maakt gebruik van de parameters bepaald in de aangepaste automatische calibratie van de 1-uurmodellen met gegevens van drie jaar, hierboven omschreven. Het maakt tevens gebruik van end-states bepaald met het bovenstaande model om de initiële toestanden voor 1993120100 en 1995010100 te bepalen. Op deze manier kan de invloed van het midden van 1-uur neerslag op de uitvoer van het HBV model bepaald worden. De resultaten zijn verwerkt in paragraaf 6.4.2.

9.3 Calibratie en validatie

1-uurmodel voor periode 1992 - 1995

Met een HBV model met uur intervallen is het niet mogelijk om uitvoer voor langere perioden dan één jaar in grafieken weer te geven. De periode 1992-10-01 tot 1995-09-30 is opgedeeld in drie perioden van een jaar, namelijk 1992-10-01 tot 1993-09-30 / 1993-10-01 tot 1994-09-30 / 1994-10-01 tot 1995-04-14. De automatisch gecalibreerde parameterset met aangepaste waarden voor h_q , FC, perc en alfa wordt toegepast met een 1-uurmodel voor het jaar van 1 oktober 1993 tot 30 september 1994, dit geldt als calibratie. Er worden eventuele aanpassingen gedaan. Daarna wordt het 1-uurmodel gevalideerd op de periode 1 oktober 1992 tot 30 september 1993 en 1 oktober 1994 tot 14 april 1995. Hiernaast heeft het SMHI een automatische calibratie uitgevoerd. Deze automatische calibratie van het 1-uurmodel heeft voor de periode 1 oktober 1993 tot en met 30 september 1994 plaatsgevonden. De parameter alfa is door haar op 1.1 gesteld om de berekende afvoer pieken zo hoog mogelijk te maken. De resultaten van de calibratie en validatie zijn weergegeven in paragraaf 9.4.2.

1-uurmodel voor periode 1977 - 1980

Omdat van deze periode geen 6-uurmodel aanwezig is, kan dit 1-uurmodel niet vergeleken worden met een 6-uurmodel. Het is echter wel nuttig bij het vaststellen van de parameterset voor een 1-uurmodel. Ook voor dit model kunnen de model kwaliteit criteria bij de verschillende sets worden bepaald. Er kan een run worden gedaan over de hele periode. Een grafisch resultaat kan alleen worden getoond wanneer er enkel een jaar wordt doorgerekend.

9.4 Resultaten

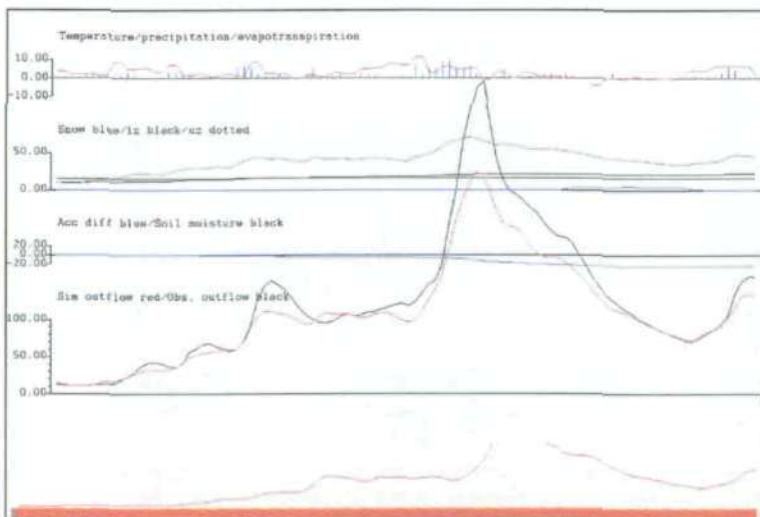
9.4.1 Berekeningen hoogwaters door een 1-uurmodel en een 6-uurmodel

Een groot probleem bij het maken en draaien van 1-uurmodellen is de minimale beschikbaarheid van gegevens die daadwerkelijk met uur intervallen is gemeten. Er zijn alleen tijdens enkele hoogwaterperioden uurmetingen aanwezig. Het vergelijk tussen een 6-uur intervallen en een 1-uurmodel moet dan ook plaatsvinden op basis van deze hoogwaterperioden. De neerslag gegevens zijn aanwezig in de vorm van gebiedsneerslagen. Dit maakt het moeilijk om hiermee de voor een langere periode bekende gegevens per meetstation te combineren.

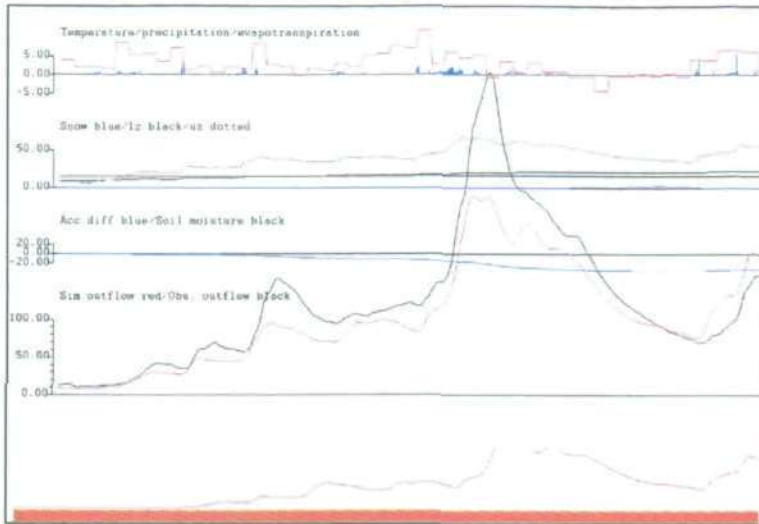
Er zijn voor twee hoogwaterperioden 1-uur en tevens 6-uur neerslag gegevens aanwezig. Dit zijn de perioden december 1993 en januari 1995. Deze twee perioden, berekend met een 6- en een 1-uurmodel, worden met elkaar vergeleken. De initiële toestand voor zowel het 6- als het 1-uurmodel wordt berekend met respectievelijk het 6-uur intervallen en het 1-uurmodel over de voorafgaande periode. De invoer is in deze periode bij het 1-uurmodel gedistribueerd.

De berekening van de initiële toestand voor het 6-uurmodel is voor de periode december 1993 bepaald met behulp van de periode 1990-10-01 tot 1993-11-30. Voor de hoogwaterperiode van januari 1995 is deze periode verlengd tot 1994-12-31. Voor de initiële toestanden voor de 1-uurmodellen was de start datum voor de berekening later namelijk 1992-10-01.

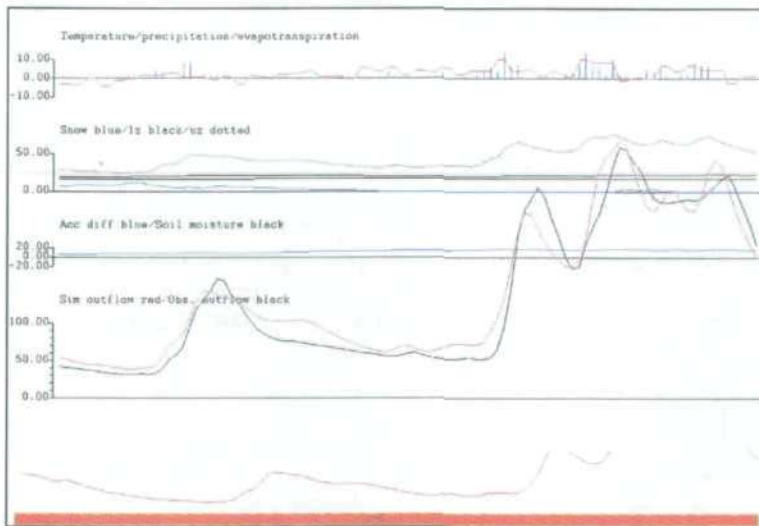
De initiële toestanden voor de twee modellen komen overeen. Voor december 1993 waren de start bodemvocht hoeveelheden voor zowel het 6- als het 1-uurmodel ongeveer 155 mm. De inhoud van het snelle afvoer reservoir was voor het 1-uurmodel 7 mm en voor het 6-uurmodel 8 mm. Het langzame afvoer reservoir was in beide modellen gevuld met 15 mm water. Voor januari waren in beide modellen de start waarden voor SM, UZ en LZ respectievelijk 170, 48 en 16 mm. De afvoergolven van de 1-uur- en 6-uurmodellen zijn voor de hoogwaterperioden in 1993 en 1995 weergegeven in figuur 57 tot en met figuur 60. Er valt op dat er een verschil is in de hoeveelheden afvoer voor de twee modellen. Bij het 1-uurmodel is de afvoer lager dan bij het 6-uurmodel. Daarom wordt er in de volgende paragraaf gekeken naar de door het HBV model berekende gebiedsneerslag in de twee perioden en deze worden met elkaar vergeleken.



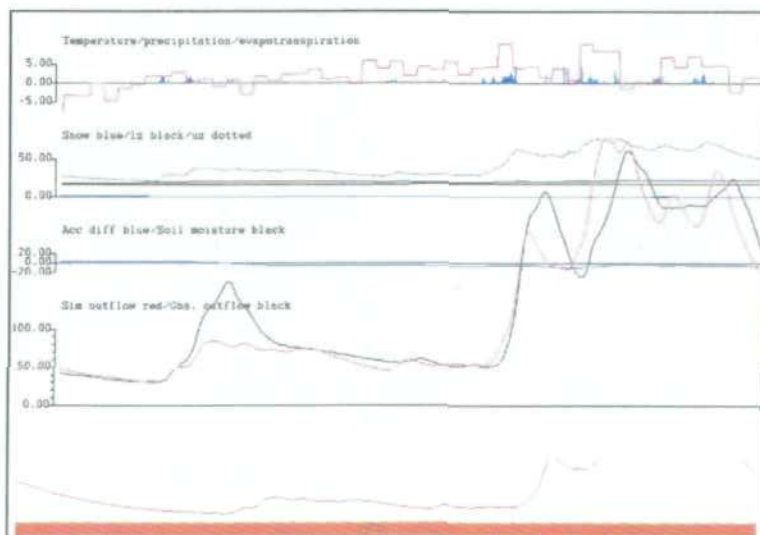
figuur 57 Afvoergolf 6-uur model december 1993



figuur 58 Afvoergolf 1-uur model december 1993 (1-uur neerslag invoer)



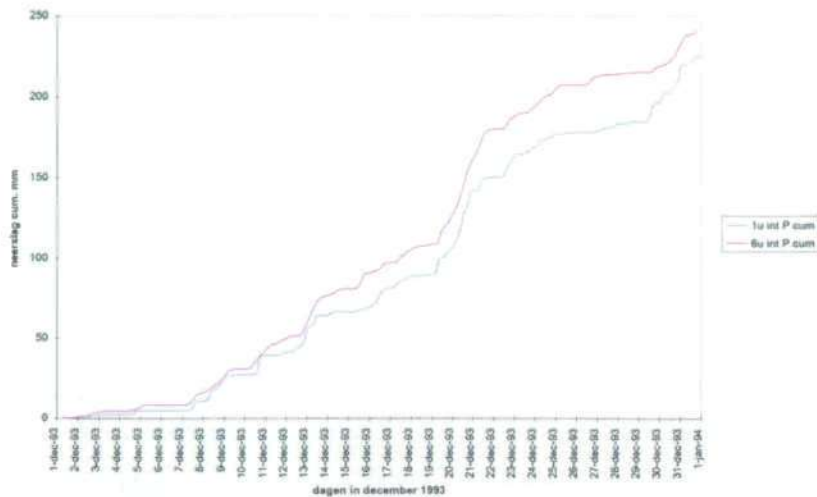
figuur 59 Afvoergolf 6-uurmodel januari 1995



figuur 60 Afvoergolf 1-uurmodel januari 1995 (1-uur neerslag invoer)

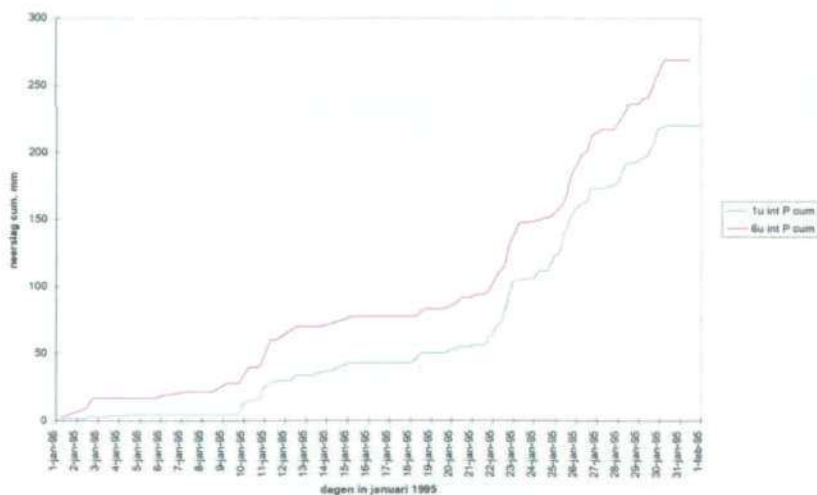
9.4.2 Vergelijking van neerslag berekening van 1-uurmodel en 6-uurmodel

Door een berekening te maken met de twee modellen voor de twee hoogwaterperioden en vervolgens de door het model berekende gebiedsneerslag, cprec, uit te voeren kan worden gekeken of deze voor de twee modellen overeenkomen. De resultaten van deze bewerking voor beide perioden zijn gegeven in figuur 61 en in figuur 62. Cprec is de door het model berekende gebiedsneerslag. Dit is de neerslag na hoogte correctie en weging over de verschillende stations. Voor het 1-uurmodel is er geen hoogte correctie en worden voor de drie stations dezelfde neerslag hoeveelheden per uur ingevuld. Voor een 6-uurmodel is er wel een weging over de stations en een hoogte correctie.



figuur 61 Cumulatieve gebiedsneerslag (cprec) berekend door het HBV model december 1993

Er is te zien dat voor december 1993 de uurmetingen van neerslag (1u int P cum) niet gelijk loopt qua hoeveelheden met de 6-uurmetingen van de neerslag (6u int P cum). Op een aantal momenten ontstaan er grote verschillen in hoeveelheid neerslag bij de uurmetingen. Dit kan het gevolg zijn van ontbrekende metingen. Het kan ook zo zijn dat de uur intervallen metingen systematisch afwijken.



figuur 62 Cumulatieve gebiedsneerslag (cprec) berekend door het HBV model januari 1995

Hetzelfde dat voor december 1993 geldt is het geval voor januari 1995. Weer blijven de uurmetingen van de neerslag achter bij de neerslag met 6-uur intervallen die door het HBV model wordt berekend. Dit is vooral zichtbaar op de dagen 1,2 en 3 januari.

Een vergelijking tussen de twee modellen op basis van twee verschillende invoer reeksen is niet wenselijk. Daarom wordt ervoor gekozen om een vergelijking te maken tussen het 6 uur en 1-uurmodel op basis van een 1-uurmodel met gedistribueerde gegevens voor de periode 1992 tot en met 1995.

9.4.3 Parameterwaarden

Zoals in paragraaf 9.4.2 is gesteld wordt de calibratie en validatie van het 1-uurmodel met gedistribueerde gegevens gedaan, hierdoor ontstaan geen problemen met verschillen in de ingevoerde water hoeveelheden. Een vergelijking tussen de uur en 6-uurmodellen wordt zo eerlijker. De calibratie van het 1-uurmodel houdt in dat alle parameters gelijk zijn gehouden ten opzichte van het 6-uurmodel, er is alleen bepaald welke waarde maxbas moet hebben in het 1-uurmodel. De parameter maxbas bleek net als in het 6-uurmodel de waarde 0.66 te moeten hebben in het 1-uurmodel.

De parametersets die van toepassing zijn op het 1-uurmodel zijn weergegeven in tabel 13. Deze tabel is opgedeeld over twee pagina's, op de tweede pagina zijn de calibratie en de validatie resultaten weergegeven. Verdere uitleg over de betekenis van de sets in de verschillende kolommen is opgenomen in het vervolg van deze paragraaf.

tabel 13 Parametersets van toepassing op het 1-uurmodel

- kolom 7: Parameterset voor het 1-uurmodel waarbij maxbas en hq aangepast zijn ten opzichte van het dagmodel.
 kolom 8: Definitieve parameterset waarbij FC, perc en alfa zijn aangepast zodat piekafvoeren zo goed mogelijk worden berekend.
 kolom 9: Parameterset voor het 1-uurmodel bepaald met een automatische calibratie uitgevoerd door het SMHI met een aangepaste hq waarde ten opzichte van het dagmodel.

kolom	7	8	9
model	1uur	1uur	1uur
parameter	waarde	waarde	Waarde
pcorr	0.01	0.01	0.01
pcalt	0.1	0.1	0.1
tcalt	0.6	0.6	0.6
sfcf	1.01758	1.01758	1.01758
fosfcf	0.8	0.8	0.8
cfmax	3.75653	3.75653	2.03625
focfmax	0.6	0.6	0.6
tt	-1.41934	-1.41934	-1.41934
dttm	0.54391	0.54391	0.54391
cfr	0.05	0.05	0.05
whc	0.1	0.1	0.1
FC	196.7	180	196.7
lp	0.66	0.66	1
beta	1.79743	1.79743	4
cflux	1.3799	1.3799	1.3799
cevpl	1	1	1
k4	0.02307	0.02307	0.03734
perc	0.59808	0.4	0.77995
maxbas	0.66	0.66	0.66
recstep	999	999	999
critstep	1	1	1
ecorr	0.01	0.01	0.01
rfcf	0.99714	0.99714	0.99714
sfdistfi	0.5	0.5	0.5
sclass	3	3	3
khq	0.0998	0.0998	0.11724
alfa	0.95162	1.1	1.1
hq	0.14167	0.14167	0.14167
sfdistfo	0.2	0.2	0.2
tti	1	1	1
cevpfo	1.15	1.15	1.15

- kolom 7: Parameterset voor het 1-uurmodel waarbij maxbas en hq aangepast zijn ten opzichte van het dagmodel.
kolom 8: Definitieve parameterset waarbij FC, perc en alfa zijn aangepast zodat piekafvoeren zo goed mogelijk worden berekend.
kolom 9: Parameterset voor het 1-uurmodel bepaald met een automatische calibratie uitgevoerd door het SMHI met een aangepaste hq waarde ten opzichte van het dagmodel.

kolom	7	8	9
CALIBRATIE	periode	periode	periode
begin	19931001	19931001	19931001
eind	19940930	19940930	19940930
R ² [-]	0.87	0.90	0.92
acc. diff. [mm]	-81.6	-69.5	-75.0
rel. acc. diff. [-]	-0.1287	-0.1098	-0.1195
VALIDATIE	periode	periode	periode
begin	19921001	19921001	19921001
eind	19930930	19930930	19930930
R ² [-]	0.93	0.90	0.93
acc. diff. [mm]	4.26	14.0	2.82
rel. acc. diff. [-]	0.0117	0.0385	0.0078
VALIDATIE	periode	periode	periode
begin	19941001	19941001	19941001
eind	19950930	19950930	19950930
R ² [-]	0.96	0.96	0.94
acc. diff. [mm]	44.6	63.2	60.6
rel. acc. diff. [-]	0.0857	0.1215	0.1164
VALIDATIE	periode	periode	periode
begin	19771001	19771001	19771001
eind	19800930	19800930	19800930
R ² [-]	0.92	0.89	0.82
acc. diff. [mm]	37.7	53.0	165
rel. acc. diff. [-]	0.0268	0.0378	0.1175

Een 1-uurmodel gebruikt dezelfde parameters als een 6-uurmodel. Alleen de parameter hq moet aangepast worden. Deze moet ten opzichte van het dagmodel gedeeld worden door 24. Daardoor wordt de waarde dus $3.4/24$ is 0.14167 . Er is gecalibreerd op de periode 1 oktober 1993 tot en met 30 september 1994. Daarna is gevalideerd voor periode 1 oktober 1992 tot en met 30 september 1993. Omdat de periode 1 oktober 1994 tot en met 14 april 1995 de hoogwaterperiode van januari 1995 bevat is hiervoor ook een berekening gedaan. Vervolgens is er met het 1-uurmodel voor 1977 tot en met 1980 ook een run gedaan.

9.4.4 Modelprestatie

Er worden afzonderlijke jaren doorgerekend met het 1-uurmodel. Hierdoor is het moeilijk om een goede waarde voor het geaccumuleerde verschil tussen de berekende en gemeten afvoer te bewerkstelligen. Omdat het geaccumuleerde verschil voor het dagmodel over een langere periode goed is bij overeenkomende parameters wordt de nadruk bij het analyseren van het 1-uurmodel gelegd op de waarde voor R², de afvoergolf en het halen van de piekafvoer.

R² en rel. acc. diff.

Er is gekozen om de parameterwaarden voor het 1-uurmodel, op de waarde van hq na, ten opzichte van het 6-uurmodel niet te wijzigen. Dit geeft bij de berekeningen met het model over de periode van één jaar grote waarden voor het geaccumuleerde verschil tussen berekende en gemeten afvoer. Wanneer er echter een langere periode (1977-1980) wordt genomen neemt de acc. diff. al af. De veronderstelling is dat wanneer met de parameters in kolom 8 een langere periode met uur intervallen wordt berekend de pieken tijdens hoogwater goed gesimuleerd worden en het geaccumuleerde verschil sterk afneemt. De waarden van R² voor de parametersets verschillen niet veel van elkaar. Alleen de waarde voor R² bij de validatie over de periode 1 oktober 1977 tot en met 30 september 1980 van de parameters in kolom 9 wijkt veel af. Ook is bij deze parameterset het geaccumuleerde verschil over deze drie jaar groter dan de andere twee kolommen. De keuze van de uiteindelijke parameterset zal op basis van de berekening van de pieken gebeuren en op de vorm van de afvoergolf.

Door het model berekende percentage van de piekafvoeren bij uurmetingen

De piekafvoeren zijn met behulp van de parameterwaarden in kolom 7, 8 en 9 van tabel 13 bepaald voor de 6 maanden in de onderstaande tabel 14. De veranderingen van FC, alfa en perc in kolom 8 hebben naar verwachting een positief effect op de berekening van de piekafvoeren. Ook zijn de piekafvoeren voor de automatisch gecalibreerde set gegeven.

tabel 14 Berekende piekafvoer als percentage van uurlijkse meting voor een 1-uurmodel

mnd-jr	uur meting	1-uur intervallen kolom 7		1-uur intervallen kolom 8		1-uur intervallen kolom 9	
	m3/s	m3/s	%	m3/s	%	m3/s	%
mrt-79	150	152	101	166	111	212	141
dec-79	143	104	73	128	90	136	95
jul-80	270	237	88	264	98	321	119
jan-93	267	233	87	268	100	302	113
dec-93	428	225	53	251	59	283	66
jan-95	337	324	96	345	102	375	111

De parameterset in kolom 8 geeft het beste resultaat bij berekening van de piekafvoeren. De hoogwaterperiode in maart 1979 wordt overschat terwijl voor de overige perioden de piekafvoeren in deze kolom het dichtst bij de 100% liggen. Hoewel de prestatie van kolom 9 in de perioden december 1979 en 1993 beter is dan die van kolom 8 wordt deze set toch verworpen omdat voor de overige perioden de piekafvoeren erg worden overschat.

De berekening voor de hoogwaterperiode in december 1993 geeft net als bij het dag- en 6-uurmodel veel te lage waarden voor de piekafvoeren. Een verklaring kan een tekort aan ingevoerde neerslag zijn.

Afvoergolf

De afvoergolven voor de hoogwaterperioden die zijn berekend met het 1-uurmodel zijn gegeven in Bijlage 13. Voor maart 1979 wordt de topafvoer te hoog berekend en het model reageert te heftig op neerslag na de hoogste gemeten piek waardoor het afvoerverloop te hoog piekt.

De hoogwaterperiode in december 1979 wordt door het 1-uurmodel niet goed weergegeven. Als gevolg van drie regen perioden volgen er drie pieken achter elkaar. Deze zijn ongeveer even hoog. Dit is echter niet in overeenstemming met het gemeten afvoerverloop. Dit verloop is ook te zien in de berekening met het dagmodel.

De hoogste piek van de hoogwaterperiode in juli 1980 wordt goed weergegeven, de twee pieken daarvoor bevatten echter een te groot volume water in de berekening. De hoogwaterperiode in januari 1993 wordt goed berekend, die in december van hetzelfde jaar vertoont net als in het dag- en 6-uurmodel een te lage afvoer berekening. De berekende afvoer is tijdens deze periode zo laag dat een mogelijke oorzaak buiten de prestatie van het model kan liggen. Er kan gedacht worden aan te lage neerslag gegevens of afvoer die te hoog is. Waarschijnlijk bevat de neerslag meting voor deze hoogwaterperiode niet genoeg water. De drie meteorologische stations zijn vooral tijdens deze hoogwaterperiode niet representatief voor het stroomgebied. Wanneer dus verbetering aangebracht moet worden in de berekeningen zal van meerdere meetstations gebruik gemaakt moeten worden. Zo kan de gebiedsneerslag beter worden bepaald. De afvoergolf in januari 1995 wordt goed berekend door het 1-uurmodel.

9.5 Conclusies

- De parameters voor het 1-uurmodel zijn, op de waarde voor h_q na, identiek aan de parameters voor het 6-uurmodel gehouden. Ook de parameterwaarde voor $maxbas$ bleek gelijk aan die voor het 6-uurmodel, namelijk 0.66 [dagen]. De parameterset voor een 1-uurmodel is te vinden in kolom 9 van tabel 13.
- Een goede analyse van het geaccumuleerde verschil is niet mogelijk bij de berekeningen over korte perioden met het 1-uurmodel. Er zullen, wanneer dit technisch mogelijk wordt, berekeningen met 1-uurmodellen over perioden langer dan 10 jaar gedaan moeten worden.

9.6 Aanbevelingen

- Om een goede vergelijking te maken tussen 1-uur, 6-uur en dagmodellen zou een lange periode van uurmetingen aanwezig moeten zijn. Deze zou dan gemiddeld kunnen worden over de tijdsintervallen van 6 en 24 uur. Dit zorgt ervoor dat in ieder geval de gegevens identiek zijn.
- Verbeter de databeschikbaarheid van meerdere stations. Voor het stroomgebied van de Ourthe zijn extra stations nodig om een betere berekening van de gebiedsneerslag te doen. De stations die voor deze studie gebruikt zijn liggen niet in het gebied zelf. Zo kan de berekening van hoogwater afvoer intensiteiten beter worden gedaan en kunnen slechte berekeningen zoals die optreden bij het hoogwater van bijvoorbeeld december 1993 worden verbeterd.
- Het is wellicht interessant om te onderzoeken hoe nauwkeurig een Q-h relatie is bij hoge afvoeren voor debiet meetpunten in het Maasstroomgebied. Hoe goed zijn de meetpunten gesitueerd en hoe worden bij hoge waterstanden de debieten berekend?
- Er zou met een 1-uurmodel gerekend kunnen worden met invoer die met langere tijdsintervallen gemeten is. Zo wordt er uitvoer per uur gegenereerd, die als invoer kan dienen voor een flood-routing programma voor de Maas. Onderzoek naar bijvoorbeeld de verschillen tussen uitvoer van een 6-uurmodel met 6-uur invoer en een 1-uurmodel met 6-uur invoer is in dit rapport niet diepgaand aan de orde gekomen. Er zou hier een onderzoek naar kunnen worden gedaan.

10. Vergelijk tussen de modellen

10.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de modellen die in de voorgaande drie hoofdstukken zijn behandeld onderling vergeleken. Er zal gekeken worden naar verschillen en overeenkomsten in parameterwaarden en de verschillende modelprestaties van de modellen. Ten aanzien van de efficiëntie, de relatieve fout van gemeten en berekende afvoer en de visuele controle van de modelberekeningen. Een belangrijke vergelijking is de prestatie tijdens hoogwaterperioden van de modellen. Dit wordt gemeten aan de hand van de berekening van de piekafvoer.

10.2 Parameterwaarden van de gemaakte HBV modellen

De parameterwaarden en de daarbij behorende calibratie en validatie resultaten voor de modellen met verschillende tijdsintervallen zijn weergegeven in tabel 15. Voor het 1-uurmodel wordt verwezen naar de genoemde tabel voor efficiëntie en relatieve fout in berekende afvoer. Er zijn namelijk voor een aantal perioden berekeningen gedaan en meerdere waarden voor de efficiëntie en relatieve fout van de afvoerberekening kwamen hieruit naar voren. Voor de waarden van R^2 en (rel.) acc. diff. zijn voor de validatie gemiddelde waarden gegeven berekend voor de meerdere validatie perioden, deze waarden zijn blauw gekleurd.

De parameterwaarden die verschillen bij de verschillende modellen zijn in de tabel rood gekleurd. Verschillen in parameterwaarden zijn te zien voor de parameters pcorr, ecorr, maxbas en hq. De parameterwaarde voor pcorr en ecorr is voor het 1-uurmodel honderd maal zo klein als de waarde voor het dagmodel en het 6-uurmodel. Dit heeft als oorzaak dat bij het maken van een 1-uurmodel, de aanwezige 6-uur gegevens zijn verdeeld over het kleinere interval van 1 uur. De data file van het HBV model bevat slechts 1 decimaal. Om ervoor te zorgen dat er geen informatie verloren gaat bij de verdeling van hoeveelheden neerslag en verdamping, werden de waarden van deze invoer voor de verdeling vermenigvuldigd met honderd. Hierdoor moeten de correctie parameters pcorr en ecorr dit weer rechtzetten door gedeeld te worden door honderd.

Voor aanpassing van een dagmodel naar een 6-uurmodel en vervolgens een 1-uurmodel zijn aanpassing van 2 parameterwaarden vereist. Het gaat om de parameters hq en maxbas. Wanneer de parameterwaarde van hq voor het dagmodel bekend is, kan de waarde voor een 6-uurmodel en een 1-uurmodel bepaald worden door te delen door het aantal intervallen per dag waarmee deze modellen rekenen. Voor een 6-uurmodel betekent het een deling van de waarde van hq van een dagmodel door 4 en voor een 1-uurmodel moet de waarde van hq van het dagmodel gedeeld worden door 24.

De parameter maxbas heeft dagen als eenheid. De waarde van de parameter is niet kleiner dan de grootte van het tijdsinterval waarmee gerekend wordt in dagen. Voor het dagmodel is de kleinst mogelijke waarde van maxbas 1, voor een 6-uurmodel is dit 0.25 (1/4) en voor een 1-uurmodel is dit 0.04167 (1/24). Het kan zijn dat wanneer de waarde van maxbas in een dagmodel 1 (de kleinst mogelijke waarde) is, er aanpassing van deze waarde nodig is wanneer een 6-uur- of 1-uurmodel wordt gebruikt. De juiste waarde voor maxbas kan worden gevonden door aanpassingen te doen, zodanig dat de berekende en gemeten toppen in de tijd samenvallen (meer informatie over parameters is te vinden in paragraaf 4.2).

tabel 15 Parameters, calibratie en validatie resultaten voor alle modellen

model	dagmodel	6-uurmodel	1-uurmodel
parameter	waarde	Waarde	waarde
pcorr	1	1	0.01
pcalt	0.1	0.1	0.1
tcalt	0.6	0.6	0.6
sfcf	1.01758	1.01758	1.01758
fosfcf	0.8	0.8	0.8
cfmax	3.75653	3.75653	3.75653
focfmax	0.6	0.6	0.6
tt	-1.41934	-1.41934	-1.41934
dtm	0.54391	0.54391	0.54391
cfr	0.05	0.05	0.05
whc	0.1	0.1	0.1
FC	180	180	180
lp	0.66	0.66	0.66
beta	1.79743	1.79743	1.79743
cflux	1.3799	1.3799	1.3799
cevpl	1	1	1
k4	0.02307	0.02307	0.02307
perc	0.4	0.4	0.4
maxbas	1	0.66	0.66
recstep	999	999	999
critstep	1	1	1
ecorr	1	1	0.01
rfcf	0.99714	0.99714	0.99714
sfdistfi	0.5	0.5	0.5
sclass	3	3	3
khq	0.0998	0.0998	0.0998
alfa	1.1	1.1	1.1
hq	3.4	0.85	0.14167
sfdistfo	0.2	0.2	0.2
tti	1	1	1
cevpfo	1.15	1.15	1.15
CALIBRATIE	periode	periode	periode
begin	19861001	19931001	19931001
eind	19960930	19950930	19940930
R ²	0.91	0.94	0.90
acc. diff.	14.3	12.0	-69.5
rel. acc. diff.	0.0031	0.0095	-0.1098
VALIDATIE	periode	periode	Periode
begin	19681001	19901001	Zie
eind	19860930	19930930	tabel 13
R ²	0.85	0.91	0.92
acc. diff.	-5.9	36.3	70
rel. acc. diff.	-0.0008	0.0335	0.0700

10.3 Efficiëntie en relatieve fout van berekende afvoer van de modellen

Door rekenen met een 6-uurmodel in plaats van het dagmodel wordt een verbetering in de efficiëntie van de modelberekeningen verkregen. Zowel de efficiëntie voor calibratie als validatie van het 6-uurmodel zijn beter dan die van het dagmodel. Het 1-uurmodel geeft geen goede resultaten omdat de berekende gebiedsneerslag uit uurmetingen te laag is in vergelijking tot de neerslag berekend uit 6 uurmetingen (zie paragraaf 9.4.2). Dit staat een zuiver vergelijk van het 1-uurmodel met het 6-uurmodel in de weg. Het in

deze studie gebruikte 1-uurmodel op basis van gedistribueerde 6-uur invoer, presteert voor de hoogwaterperioden in januari en december 1993 en januari 1995 niet beter dan het 6-uurmodel. De waarden voor efficiëntie en (rel.) acc. diff. voor de validatie is in tabel 16 een gemiddelde voor de waarden bepaald voor meerdere validatie perioden voor het 1-uurmodel. De waarde van de efficiëntie van het 1-uurmodel is niet beter en over het geaccumuleerde verschil kunnen geen zekere uitspraken worden gedaan omdat het 1-uurmodel hiervoor met te korte perioden rekent. Dit komt door het feit dat in het HBV model geen perioden langer dan 4 jaar aan 1-uur gegevens kunnen worden ingevoerd. De relatieve fout tussen gemeten en berekende afvoer wordt hierdoor groot. Op basis van deze resultaten voor efficiëntie en relatieve fout in berekende afvoer, wordt geconcludeerd dat voor de neerslag-afvoer modellering met de huidige aanwezige gegevens het HBV model met 6-uur intervallen de beste resultaten geeft.

10.4 Berekening van de topafvoer tijdens hoogwaterperioden

In tabel 16 is weergegeven voor de verschillende modellen wat het percentage is van de berekende topafvoer ten opzichte van de gemeten topafvoer voor een aantal hoogwaterperioden. Voor een aantal hoogwaterperioden in de eerste kolom zijn de gemeten topafvoeren aangegeven in de tweede kolom. Vervolgens zijn voor het dagmodel, het 6-uurmodel en het 1-uurmodel de berekende topafvoeren weergegeven samen met het percentage van de gemeten topafvoeren.

Er is te zien dat het dagmodel een redelijke prestatie heeft bij de berekening van de topafvoeren. Er zijn echter enkele perioden waarbij de berekende topafvoer de gemeten topafvoer niet benadert. Dit geldt vooral voor de hoogwaterperioden in februari 1984, januari 1988 en januari en december 1993. Er is slechts voor 1990 tot 1995 een 6-uurmodel beschikbaar. De berekeningen voor de hoogwaterperioden in 1993 en 1995 met het dagmodel kunnen met die van het 6-uurmodel vergeleken worden. De berekening van de topafvoer voor januari 1993 verbetert goed bij overstap op het 6-uurmodel, deze stijgt van 77 procent naar 95 procent. De berekening voor de hoogwaterperiode in januari 1995 is 1 procent hoger dan de gemeten topafvoer. Voor de hoogwaterperiode van december 1993 blijft de berekening van de topafvoer sterk achter bij de gemeten topafvoer. Ten opzichte van het dagmodel verbetert de berekening van de topafvoer slechts weinig. Om dit te verklaren zou in plaats van slechte modelprestatie gedacht kunnen worden aan fouten in de meting van topafvoer of neerslag gegevens. Daarnaast zou voor deze hoogwaterperiode de berekening van gebiedsneerslag uit de drie meteorologische stations niet representatief kunnen zijn voor het gebied. Hierdoor kan een te lage neerslag berekend worden. Wanneer wordt gekeken naar de berekening van de topafvoer door het 1-uurmodel in perioden waarin 1-uur invoer aanwezig is, zien we een te hoog berekende topafvoer in maart 1979 en wederom een zeer lage waarde voor de topafvoer in december 1993. De invoer van neerslag is in het 1-uurmodel niet identiek aan het 6-uurmodel. Voor het 1-uurmodel zijn berekende gebiedsneerslagen gebruikt. Te zien is dat ten opzichte van het 6-uurmodel de berekening van de topafvoer in januari 1993 verbeterd en in december 1993 verslechterd. Dit kan het gevolg zijn van de andere invoer van gebiedsneerslag. Omdat de invoer van het 1-uurmodel gebaseerd is op deze andere invoer is een vergelijking moeilijk te maken. Wanneer de afvoergrafieken van het 6-uurmodel (Bijlage 12) en die van het 1-uurmodel (Bijlage 13) worden vergeleken tijdens de hoogwaterperioden in 1993 en 1995 is er weinig verschil in de berekening van het afvoerverloop te zien. Alleen voor december 1993 is de berekening van de topafvoer door het 1-uurmodel lager dan die van het 6-uurmodel. Het 1-uurmodel dat hier gebruikt wordt heeft geen meerwaarde ten opzichte van het 6-uurmodel.

tabel 16 Berekening van het percentage van de piekafvoer door de modellen met verschillende tijdsintervallen

mnd-jr	uurmeting	dag intervallen		6-uur intervallen		1-uur intervallen	
	m3/s	m3/s	%	%	m3/s	m3/s	%
mrt-79	150	149	99			166	111
dec-79	143	125	88			128	90
jul-80	270	236	88			264	98
feb-84	311	213	68				
jan-88	102	81	79				
feb-88	107	95	88				
jan-93	267	205	77	253	95	268	100
dec-93	428	292	68	300	70	251	59
jan-95	337	327	97	342	101	345	102

11. Discussie

In deze studie komt naar voren dat voor berekeningen van afvoer te Tabreux met het HBV model, een 6-uurmodel gebruikt moet worden om het afvoerproces nauwkeurig te berekenen. Dit model geeft betere resultaten voor modefficiëntie en berekening van topafvoeren dan het dagmodel. De beslissing welk model met welk tijdsinterval gebruikt gaat worden hangt ook af van een aantal andere zaken.

Momenteel zijn tijdens hoogwaterperioden enkel metingen en voorspellingen van neerslag en temperatuur operationeel beschikbaar met intervallen van 6 uur. Het is dus nog niet mogelijk een neerslag-afvoer model daadwerkelijk met gegevens met 1-uurintervallen te vullen. Dit is een praktische reden waarom er voor het 6-uurmodel gekozen zou kunnen worden.

Wanneer voor een hydraulisch model voor berekening van de afvoergolf op de Maas afvoeren van de deelstroomgebieden per uur nodig zijn, kan er toch voor gekozen worden om een 1-uurmodel te gebruiken. Deze neerslag-afvoer modellen zouden dan bijvoorbeeld van verdeelde 6-uurmetingen en 6-uurvoorspellingen als input gebruik kunnen maken. In dit geval wordt elk uur een afvoer berekend die dan weer verder verwerkt kan worden.

Er zijn voor deze studie modellen gemaakt die rekenen met gegevens met verschillende tijdsintervallen. Deze reeksen zijn niet identiek. Verschillen in de meetreeksen kunnen verschillen in de berekeningen veroorzaken waardoor een goede onderlinge vergelijking van de resultaten moeilijker wordt. Een oplossing hiervoor zou een lange meetreeks zijn met uurmetingen. Deze zou dan voor perioden van bijvoorbeeld 6 uren en een dag gemiddeld kunnen worden, om zo de prestatie van dag-, 6-uur- en 1-uurmodellen te testen. Zo ontstaan geen verschillen tussen de invoer voor de modellen. Dit is echter niet haalbaar, aangezien er niet zulke lange perioden aan uurmetingen beschikbaar zijn.

De verschillen tussen bepaalde gebiedswaarden voor neerslag op uurbasis en de 6-uur metingen of dagmetingen op de meetstations zorgden ervoor dat er geen vergelijk kon plaatsvinden tussen 6- en 1-uurmodellen met daadwerkelijk gemeten invoer met deze tijdsintervallen. Er is een 1-uurmodel gebruikt met gedistribueerde 6 uurmetingen. Zo kon alleen de modelprestatie van een 6-uurmodel vergeleken worden met die van een 1-uurmodel met gedistribueerde gegevens.

De automatische calibratie voor de periode 1987-1996 van het dagmodel is gedaan op basis van "indicatieve" parameterwaarden bepaald op basis van de eerdere periode 1968-1988. Vervolgens is het model met de nieuwe parameters gevalideerd in de periode 1968-1988. Dit is niet goed, op deze manier zijn de uiteindelijke parameterwaarden toch afhankelijk van beide perioden. Desalniettemin is ervoor gekozen deze automatische parameterset te handhaven. Nadat er wat aanpassingen op waren gedaan is hieruit de definitieve parameterset voor het dagmodel ontstaan.

Het vergelijken van modelprestaties van dag-, 6-uur- en 1-uurmodellen aan de hand van de topafvoer van uurmetingen te Tabreux is eigenlijk geen eerlijke vergelijking. Modellen die daggemiddelde afvoeren berekenen zullen niet in staat zijn piekafvoeren gemeten met uurintervallen te berekenen. Daarnaast kunnen vraagtekens gezet worden bij de berekening van het debiet te Tabreux bij hoge afvoeren. Is het door de locatie van het meetpunt niet zo dat hoge afvoeren niet goed worden berekend wanneer er een extrapolatie op toe wordt gepast? In hoeverre zijn de absolute topafvoeren tijdens hoogwaterperioden betrouwbaar?

In hoeverre geeft gebruik van het HBV model met bepaald tijdsinterval een verlenging van de zichttijd ten opzichte van het huidige voorspel model? Dit is een vraag die in deze studie niet beantwoord is. Het is ook moeilijk te zeggen zonder modelresultaten van andere deelstroomgebieden of de uiteindelijke waterstand voorspelling een grotere zichttijd heeft dan de huidige.

12. Slotconclusies

In dit hoofdstuk zullen aan de hand van de onderzoeksvragen een aantal slotconclusies worden getrokken. De onderzoeksvragen zijn in het rood nog eens herhaald, eronder zijn de conclusies in het zwart weergegeven. Vervolgens worden nog enkele overige conclusies van het onderzoek weergegeven. Dit zijn bevindingen die apart van de opgestelde onderzoeksvragen zijn gedaan.

Onderzoeksvragen

- Met welk tijdsinterval moet het neerslag-afvoerproces van de Ourthe gemodelleerd worden, waarbij een nauwkeurige voorspelling gedaan wordt en voornamelijk piekafvoeren goed worden berekend? Er moet dus worden nagegaan wat de grootste intervallengte kan zijn waarbij pieken niet in die mate worden uitgemiddeld dat een bepaalde nauwkeurigheid niet meer wordt gehaald.
- Geconcludeerd kan worden dat op basis van berekeningen met gemeten afvoerreeksen van de Ourthe te Tabreux een tijdsinterval van 6 uur voldoet voor een goede weergave van de dynamiek van de afvoer van de Ourthe. Een tijdsinterval van 12 uur geeft voor een deel van de hoogwaterperioden een slechte weergave van het afvoerverloop, waardoor dit interval ongeschikt wordt geacht. Een interval van 24 uur geeft voor alle hoogwaterperioden een slecht beeld. Daarom is dit ook een ongeschikt tijdsinterval.
- Een berekening met het HBV model zelf, ter bepaling van het te gebruiken tijdsinterval, is niet bruikbaar. De modeluitvoer is teveel afhankelijk van de mate waarin vertraging van de afvoer in het systeem wordt aangebracht met behulp van de parameter maxbas. Hierdoor is niet zuiver te bepalen wat de invloed van middelen van model invoer, op de uitvoer is.
- Kan met het HBV model met een gewenste tijdsschaal het stroomgebied van de Ourthe worden gemodelleerd en wat is de modelprestatie?
- Het neerslag-afvoer model HBV kan gebruikt worden om het stroomgebied van de Ourthe met dag intervallen te modelleren. De prestatie tijdens hoogwaterperioden is niet altijd goed. Een dagmodel kan gebruikt worden voor de berekeningen met klimaat scenario's. De modefficiëntie tijdens de validatie periode van 1968 tot 1986 is 0.85 [-].
- Het 6-uurmodel geeft betere resultaten bij het berekenen van de topafvoeren, dan het dagmodel. Dit komt door de betere gegevens met de kleinere 6-uurintervallen. Tevens is de modelprestatie van het 6-uurmodel beter dan die van het dagmodel, met een relatieve fout in de afvoer berekening die niet groot is. De modefficiëntie tijdens de validatie periode van 1990 tot 1993 is 0.91 [-] (zie paragraaf 10.2 en 10.3).
- Wanneer er 1-uurmodellen zoals in deze studie gemaakt zijn gebruikt worden, geeft dit geen meerwaarde wat betreft de modelprestatie tijdens hoogwaterperioden. De vergelijking van een 1-uurmodel met een 6-uurmodel voor de periode van 1990 tot 1995 is echter niet zeer sterk. Dit komt door het feit dat het 1-uurmodel alléén voor de hoogwaterperioden januari 1993, december 1993 en januari 1995 daadwerkelijk uurmetingen voor neerslag bevat.
- Kan met het HBV model het hele stroomgebied van de Maas worden gemodelleerd en zodanig in de toekomst operationeel voor hoogwatervoorspellingen worden gebruikt?
- Het stroomgebied van de Ourthe is een relatief groot deelstroomgebied van het Maasstroomgebied, dat enkele kleinere en sneller op neerslag reagerende deelstroomgebieden bevat. Zoals bijvoorbeeld het stroomgebied van de Vesdre. Het ligt in de verwachting dat wanneer van deze stroomgebieden neerslag-afvoer modellen gemaakt gaan worden, nog kleinere tijdsintervallen nodig zijn voor de berekeningen. Wanneer met deze modellen, met kleinere tijdsintervallen, gewerkt gaat worden is het noodzakelijk om de operationele data beschikbaarheid te verbeteren.

Overige conclusies

- Uit de gevoeligheidsanalyse voor het dagmodel is gebleken dat de meest gevoelige parameters in het HBV model de volgende zijn: c_{max} , FC, beta, I_p , h_q , kh_q en alfa. Bij calibratie van HBV modellen in het algemeen moet vooral aandacht aan de waarden van deze parameters geschonken worden. Voor meer informatie wordt verwezen naar paragraaf 4.3.3 en 7.6.1.
- Parameters met een tijdsdimensie worden door het HBV model omgerekend naar waarden voor een kleiner tijdsinterval dan een dag wanneer het model met deze kleinere tijdsintervallen werkt. Deze parameters die omgerekend worden zijn c_{max} , c_{flux} , k_4 , perc en kh_q en moeten dus in de eenheid per dag worden ingevuld. Er kan voor gekozen worden deze parameters licht bij te stellen na overzetting van een dagmodel naar een model met kleinere tijdsintervallen maar dit is in principe niet nodig. Het is in het geval van het hier gebruikte 6-uurmodel dan ook niet gebeurd. Een uitzondering vormen de parameters h_q [mm/tijdsinterval] en maxbas [dagen], deze moeten door de gebruiker aangepast worden. De parameter maxbas kan in het geval van een dagmodel niet een waarde kleiner dan 1 aannemen. Voor een model met kleinere tijdsintervallen is dit echter wel mogelijk. Daarom moet deze parameter bij overgang naar een kleiner tijdsinterval opnieuw beschouwd worden hoewel de eenheid "dagen" wel in stand blijft.
- De parameters die geen tijdsdimensie hebben dienen bij omzetting van een parameterset van een HBV dagmodel naar een model met een kleiner tijdsinterval niet veranderd te worden. Aanpassingen van deze waarden zijn in eerste instantie minimaal omdat deze parameterwaarden onafhankelijk zijn van het tijdsinterval waarmee het model rekent. Om de modelprestatie vervolgens te optimaliseren zouden kleine aanpassingen van parameterwaarden kunnen worden toegepast.

13. Aanbevelingen

Hieronder zijn een aantal aanbevelingen gedaan die voortkomen uit het onderzoek. Het betreffen aanbevelingen voor het gebruik van het HBV model en aanbevelingen voor verbetering van de modellering van stroomgebieden.

- Gebruik geen waarden voor de parameter alfa groter dan 1.1 [-]. Dit kan leiden tot te sterke niet-lineairiteit van het snelle reservoir en zo bijvoorbeeld uitkomsten van studies naar de invloed van klimaatveranderingen op de afvoer onbetrouwbaar maken.
- Gebruik bij calibratie van stroomgebieden met het HBV model een automatische calibratie procedure. Wanneer eerst met een handmatige calibratie startwaarden voor de automatische calibratie worden bepaald verbeterd dit het calibratie resultaat en dus de prestatie van het model. Er bestaat een automatische calibratie procedure voor het HBV model, het is in gebruik door het SMHI.
- Pas bij de omzetting van een HBV dagmodel naar een HBV 6-uurmodel alleen de waarde van h_q aan. Reken h_q om naar een waarde per tijdsinterval van 6 uur. De parameterset voor een 6-uurmodel hoeft dus niet opnieuw door calibratie bepaald te worden. Een omrekening van de waarde voor h_q bij een model met andere tijdsintervallen gaat volgens dezelfde methode, de waarde voor h_q is een waarde per lengte van het gebruikte tijdsinterval. Daarnaast is een aanpassing van de parameterwaarde van max_{bas} eventueel nodig. Dit kan een verbetering van de topafvoeren in de tijd opleveren.
- Een end-state van een berekening met een dagmodel kan niet gebruikt worden als initiële toestand voor een model met kleinere tijdsintervallen. Er zal dus voor berekeningen genoeg moeten worden genomen met een onstabiele periode aan het begin van berekeningen. Om een berekening te beginnen kan daarom gekozen worden voor een aanloop periode met gedistribueerde invoer met grotere tijdsintervallen (bijvoorbeeld dag intervallen) om zo de start van de berekening met invoer met kleinere tijdsintervallen een stabiel begin te geven.
- Verbeter de databeschikbaarheid van meerdere meteorologische meetstations. Voor het stroomgebied van de Ourthe zijn extra stations nodig om een betere berekening van de gebiedsneerslag te doen. De stations die voor deze studie gebruikt zijn liggen niet in het gebied zelf. Zo kan de berekening van hoogwater afvoer intensiteiten beter worden gedaan en kunnen slechte berekeningen zoals die optreden bij het hoogwater van bijvoorbeeld december 1993 worden verbeterd.
- Het is wellicht interessant om te onderzoeken hoe nauwkeurig de Q-h relaties zijn bij hoge afvoeren voor debiet meetpunten in het Maasstroomgebied. Hoe goed zijn de meetpunten gesitueerd en hoe worden bij hoge waterstanden de debieten berekend?
- Er zou met een 1-uurmodel gerekend kunnen worden met invoer die met langere tijdsintervallen gemeten is. Zo wordt er uitvoer per uur gegenereerd, die als invoer kan dienen voor een flood-routing programma voor de Maas. Onderzoek naar bijvoorbeeld de verschillen tussen uitvoer van een 6-uurmodel met 6-uur invoer en een 1-uurmodel met 6-uur invoer is in dit rapport niet diepgaand aan de orde gekomen. Er zou hier een onderzoek naar kunnen worden gedaan.

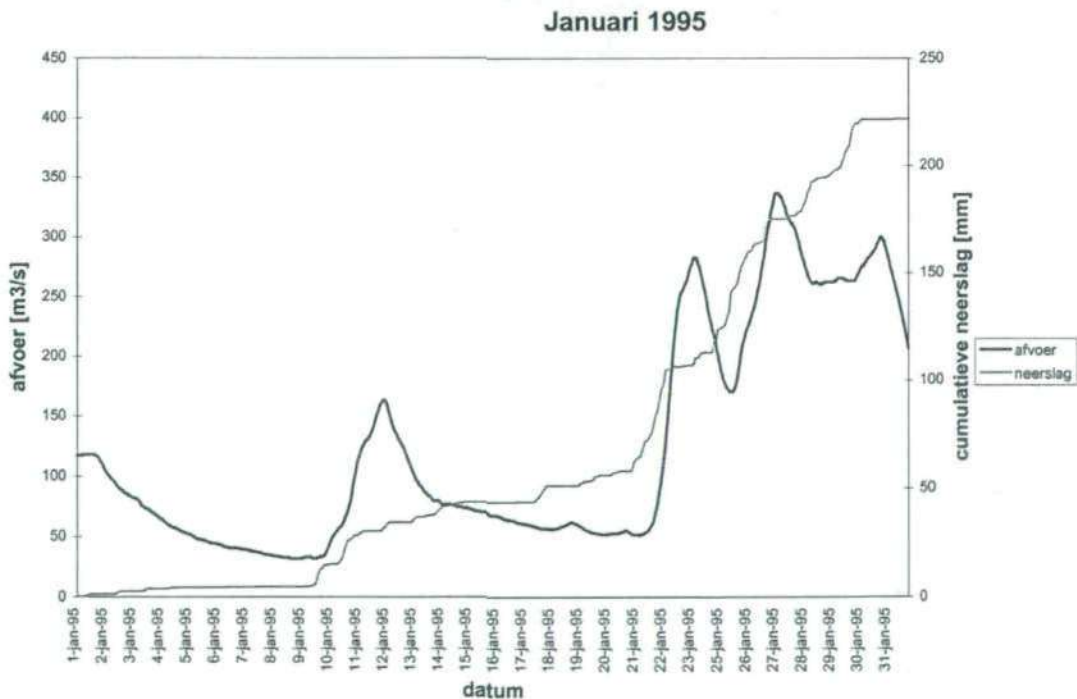
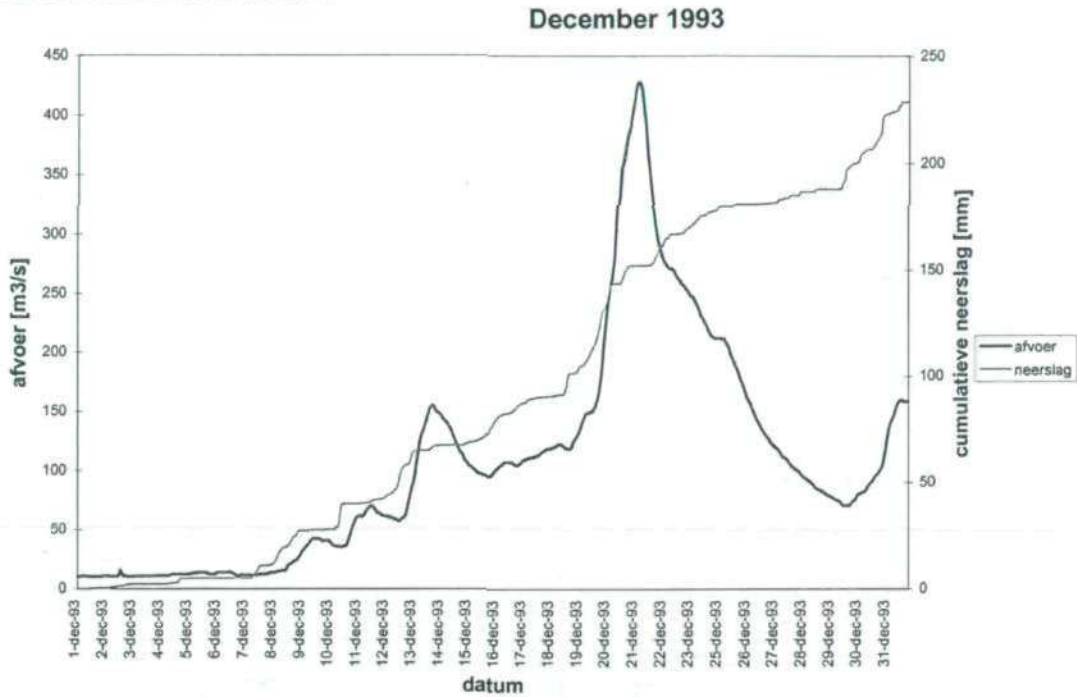
Literatuur

- Berger H.J.E., Mugie A.L.**, 1994: Hydrologische systeembeschrijving Maas. notanr. 94.022. Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat RIZA.
- Bierkens, M.F.P., Finke, P.A., Willigen, P. de**, 2000: Upscaling and downscaling methods for environmental research.
- DIHO** (Dienst Hydrologisch Onderzoek), 1995: Verslag Hoge waterstanden grensmaas dec 93 en jan-feb 95 gerelateerd aan vroegere hoge waterstanden. Ministerie van de Vlaamse gemeenschap departement Leefmilieu en Infrastructuur Administratie Waterwegen en Zeewezen.
- Harlin, J.**, 1992: Modelling the hydrological response of extreme floods in Sweden. In: Nordic Hydrology 23 1992. pag. 227-244.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat**, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA, Middelkoop, H. (red), 1998: Twee rivieren. Rijn en Maas in Nederland. RIZA rapport 98.041 Arnhem: RIZA.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat**, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Limburg, 1994: De Maas slaat toe... verslag hoogwater Maas december 1993.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat**, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Directie Limburg, 1995: De Maas slaat weer toe... verslag hoogwater Maas januari/februari 1995.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat**, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, RIZA, 1999: Werkboek Hoogwatergroep (hoogwater). Bijlage 7.3 Afvoertabel Borgharen. pag. VII-5. Arnhem.
- RIZA**, 1999: Estimating the impact of climate change on peak flows in the River Rhine. Arnhem. RIZA-rapport 99.064.
- Seibert, J.**, 1997: Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. In: Nordic Hydrology 28 (4/5) 1997. Pag. 247-262.
- SMHI**, sa: IHMS Integrated hydrological modelling system. Manual version 4.3. Norrköping. Zweden.
- Tilmont, J., Roeck, M. de, Lambion, J., Debulpaepe, C.**, 1984: Atlas. Wesmael-Charlier. Namen. België.
- Torfs, P.J.J.F.**, 1999: Oplossingstechnieken in de hydrologie. K150-230. Wageningen Universiteit. Wageningen.
- Warmerdam, P.M.M.**, sa: Voorspellen van afvoeren. Vakgroep Waterhuishouding, Landbouwniversiteit Wageningen. Wageningen.
- WHM** (Werkgroep Hoogwater Maas), 1998: Actieplan hoogwater Maas. Francis Hambye. Namur.
- Wilby, R. (editor)**, 1997: Contemporary Hydrology: Towards holistic environmental science. pag. 151-190. John Wiley & Sons Ltd.

Bijlagen

Bijlage 1 Hoogwaterperioden 1993 en 1995: afvoeren en neerslag

Afvoeren en neerslag voor december 1993 en januari 1995 voor het stroomgebied van de Ourthe bovenstrooms van Tabreux.



Bijlage 2 Parameters in het HBV model

Model

recstep [-]

Number of internal computation step in the response routine during one time step of the model.

Default value is 999 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Aantal interne berekeningen in de afvoer procedure tijdens een tijdsinterval waarmee het model werkt. Wanneer recstep > 998, zal een afdoende hoeveelheid stappen worden berekend door het programma dat afhangt van de afvoer uit de twee reservoirs.

Neerslag

pcorr [-]

General precipitation correction factor.

Default value = 1.0 whether hbv96 is on or off.

Algemene neerslag correctie factor.

Alle neerslag invoer zal vermenigvuldigd worden met deze factor. Deze factor kan gebruikt worden bij het aanpassen van systematisch te hoge of te lage neerslag.

pcalt [1/100m]

Elevation correction factor for precipitation.

Default value is 0.1 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Neerslag correctie factor voor hoogte.

Om een correctie voor de hoogte mogelijk te maken op de neerslag gegevens worden neerslag waarden vermenigvuldigd met de factor $1+h*pcalt$, h is het hoogteverschil tussen de huidige hoogtezone en het neerslagmeetstation. Wanneer pcalt op nul wordt gesteld is er geen correctie op de neerslag voor hoogte.

tcalt [$^{\circ}$ Celsius/100 m]

Temperature lapse.

Default value is 0.6 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Temperatuurscorrectie voor de hoogte. Per 100 m stijging t.o.v. een temperatuurmeetstation wordt de temperatuur tcalt lager. Deze parameter zorgt ervoor dat op hoge delen van het stroomgebied de temperatuur lager wordt waardoor onder andere sneeuw langer blijft liggen.

rfcf [-]

Rain fall correction factor.

Default value = 1.0 whether hbv96 is on or off.

Regen correctie factor.

Regenval waarden zullen worden vermenigvuldigd met $pcorr * rfcf$. Dit kan gebruikt worden om systematisch een verandering in de regenwaarden aan te brengen.

sfcf [-]

Snow fall correction factor.

Default value = 1.0 whether hbv96 is on or off.

Sneeuwval correctie factor.

Sneeuwval waarden zullen worden vermenigvuldigd met $pcorr * sfcf$. Hiermee kan de hoeveelheid sneeuw worden beïnvloed. Een waarde kleiner dan nul verlaagd de hoeveelheid sneeuwval, een waarde groter dan nul verhoogd de sneeuwval.

fosfcf [-]

Forest snow fall correction factor.

Default value = 1.0 whether hbv96 is on or off.

Factor waarmee sfcf vermenigvuldigd wordt voor gebieden met type forest. Zo kan de hoeveelheid sneeuw die in zones met bos valt worden beïnvloed.

tt [⁰Celcius]

Threshold temperature.

Default value = 0 whether hbv96 is on or off.

Drempelwaarde temperatuur.

Deze waarde is het midden van een interval (tti). Bij de laagste waarde van dit interval valt alle neerslag in de vorm van sneeuw. Bij de hoogste waarde valt alle neerslag in de vorm van regen. Er is een lineair verloop van totaal sneeuw naar totaal regen, bij de temperatuur van tt is dus de helft van de neerslag sneeuw en de andere helft regen.

tti [⁰Celcius]

Total length of a temperature interval.

Default value is 2.0 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Totale lengte van het temperatuurinterval rond het midden tt.

Sclass [-]

Number of snow classes.

Default value is 3 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Aantal sneeuw klassen.

Elke zone zal opgedeeld worden in enkele deelzones waarbinnen de sneeuwhoogte wordt gevarieerd volgens de parameters sfdistfo en sfdistfi. Binnen een zone zullen alle deelzones dezelfde oppervlakte hebben.

sfdistfo [-]

Distribution of snow fall in forest zones if the parameter sclass is used.

Default value is 0.2 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Verdeling van sneeuwval in zones met bos (wanneer de parameter sclass wordt gebruikt).

Een waarde van nul zal dezelfde sneeuwophoping geven voor alle sneeuw klassen, terwijl waarden tussen 0 en 1 (maximum) betekenen dat sneeuwval vermenigvuldigd zal worden met een factor die lineair toeneemt van 1-sfdistfo in de eerste klasse tot 1+sfdistfo in de laatste klasse.

sfdistfi [-]

Distribution of snow fall in field zones if the parameter sclass is used.

Default value is 0.5 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Verdeling van sneeuwval in zones zonder bos (wanneer de parameter sclass wordt gebruikt).

Een waarde van nul zal dezelfde sneeuwophoping geven voor alle sneeuw klassen, terwijl waarden tussen 0 en 1 (maximum) betekenen dat sneeuwval vermenigvuldigd zal worden met een factor die lineair toeneemt van 1-sfdistfo in de eerste klasse tot 1+sfdistfo in de laatste klasse.

dtm [⁰Celsius]

Factor to be added to tt to give the threshold temperature for snow melt. It is often zero.

Default value = 0 whether hbv96 is on or off.

Parameter die toegevoegd moet worden aan tt om de drempelwaarde te bepalen voor sneeuwsmelt. De waarde voor dtm is vaak nul.

cfmax [mm/⁰Celsius•dag]

Snow melting factor.

Default value is 3.5 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Sneeuwsmelt factor. Deze geeft de snelheid aan waarmee sneeuw smelt per graad stijging boven tt+dtm ⁰Celsius.

focfmax [-]

Factor that will be multiplied by cfmax for zones of type forest.

Default value is 0.6 if hbv96 is on and 1.0 if hbv96 is off.

Factor die wordt vermenigvuldigd met cfmax voor zones met bos. Wordt gebruikt om sneeuw in zones met bos langzamer te laten smelten.

whc [mm/mm]

Water holding capacity of snow.

Default value is 0.1 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Watergehalte van sneeuw. Het geeft weer hoeveel millimeter water er zich in een millimeter sneeuw bevindt.

cfr [-]

Refreezing factor in the snow routine.

Default value is 0.05 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Herbevriezingsfactor.

Geeft de fractie van het water dat weer befrist nadat het vrijkwam door afsmelten van sneeuw bij een temperatuur tussen (tt+dtm) en 0 °C.

Bodemvocht

FC [mm]

Maximum soil moisture storage.

Default value is 200 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Maximale bodemvocht berging.

Dit is de maximale hoeveelheid water dat in de onverzadigde zone kan worden geborgen. Waarden voor deze parameter liggen tussen de 100 en 350.

beta [-]

Exponent in formula for drainage from soil.

Default value is 2.0 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Exponent in de formule voor de berekening van de afvoer van de onverzadigde zone naar het snelle afvoer reservoir. Waarden liggen tussen de 1 en 4.

lp [-]

Limit for potential evaporation.

Default value is 0.9 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Grens voor potentiële verdamping, gegeven als een fractie van FC (1.0 of minder). Wanneer de bodemvocht hoeveelheid [mm] in de onverzadigde zone een waarde heeft bereikt van $FC \cdot lp$ wordt de verdamping potentieel (maximaal). Voor de actuele verdamping bij bodemvocht hoeveelheden van 0 tot $FC \cdot lp$ wordt een lineair toenemende fractie (0 tot 1) van de potentiële verdamping genomen.

cevpfo [-]

Correction factor for potential evaporation in forest zones.

Default value is 1.15 if hbv96 is on and 1.0 if hbv96 is off.

Correctie factor voor potentiële verdamping in zones met bos. Hiermee kan met een hogere potentiële verdamping in bossen worden gerekend

cflux [mm/dag]

Maximum capillary flow from upper response box to soil moisture zone.

Default value is 1.0 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Maximale capillaire opstijging van het snelle afvoer reservoir naar het bodemvocht in de onverzadigde zone.

Snelle afvoer reservoir

alfa [-]

Parameter in the outflow equation for the upper response box.

Default value is 1.0 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Parameter in de afvoer vergelijking van het snelle afvoer reservoir, vergelijking 4.4, zie verder khq. Alfa is een maat voor de niet-lineairiteit. Voor een alfa gelijk aan 0 is de afvoer van het snelle afvoer reservoir een lineaire functie van de geborgen hoeveelheid water, een groter wordende alfa zorgt voor een toenemende niet-lineairiteit van de relatie tussen inhoud en de afvoer (Q_0) van het snelle afvoer reservoir.

hq [mm/dag]

Discharge when the recession coefficient for the upper response box equals khq.

Default value is 3.0 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

Deze parameter is de afvoer voor het snelle afvoer reservoir waarbij de waarde van de recessie coëfficiënt gelijk aan khq wordt verondersteld. De parameter hq is de afvoer tijdens een hoogwater situatie gedeeld door de oppervlakte van het stroomgebied en vervolgens omgerekend naar millimeters. Hierdoor wordt de eenheid mm/dag.

Wanneer alfa, hq en khq bekend zijn kan voor deze afvoer de waarde van UZ in het snelle afvoer reservoir berekend worden met de formule $hq = khq \cdot UZ_{hq}$. Wanneer UZ_{hq} hierdoor bekend is kan k in **vergelijking 4.4** berekend worden bij hq.

khq [dag⁻¹]

Recession coefficient for the upper response box when water discharge equals hq.

Default value is 0.17 if hbv96 is on and 0 if hbv96 is off.

De afvoer van het snelle afvoer reservoir is berekend volgens vergelijking 4.4. De factor k is berekend met behulp van khq zoals hierboven beschreven. De khq kan in eerste instantie berekend worden door de helling van het uitputtingsverloop bij een afvoer gelijk aan hq.

Langzame afvoer reservoir

perc [mm/dag]

*Percolation from upper to lower response box.
Default value = 0 whether hbv96 is on or off.*

Percolatie van het snelle afvoer reservoir naar het langzame afvoer reservoir. Wanneer er genoeg water aanwezig is in het snelle afvoer reservoir zal er per dag een hoeveelheid water gelijk aan perc van het snelle afvoer reservoir naar het langzame afvoer reservoir gaan.

k₄ [dag⁻¹]

*Recession coefficient for lower response box.
Default value = 0 whether hbv96 is on or off.*

Recessie coëfficiënt voor het langzame afvoer reservoir, de waarde van deze parameter is groter dan 0 en kleiner of gelijk aan 1. Wanneer de waarde van k₄ 1 is, zal de inhoud van het langzame afvoer reservoir in één dag tot afvoer komen. Deze parameter komt voor in vergelijking 4.8.

Transformatie functie

maxbas [dagen]

*Number of days in transformation routine.
Default value = 0 whether hbv96 is on or off.*

Aantal dagen in de transformatie functie om een getransformeerd afvoerverloop te krijgen. Het programma zorgt er automatisch voor dat maxbas niet korter is dan de gekozen tijdsinterval voor het model.

Bijlage 3 Aanwezige gegevens

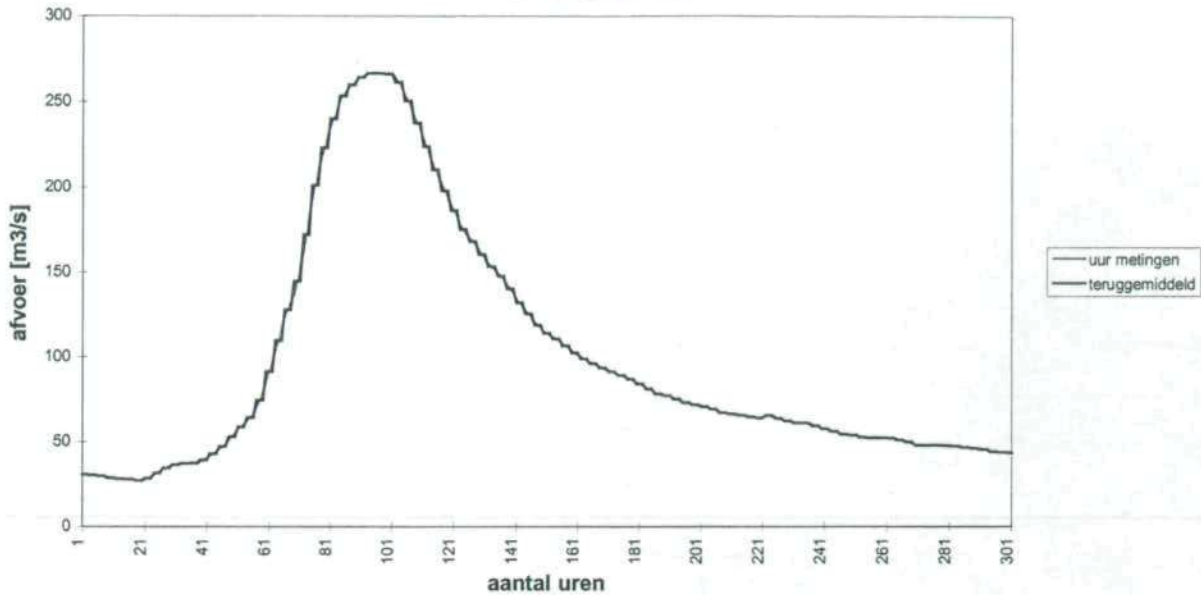
tabel 17 Overzicht van aanwezige gegevens plus tijdsperiode

P	neerslag	[mm/tijdseenheid]
T	temperatuur	[°C]
E	evapotranspiratie	[mm/tijdseenheid]
Q	afvoer	[m³/s]
P, T en E (dagwaarden) meetstations:		
station	begin	eind
St-Hubert	1 januari 1967	31 december 1996
Spa	1 januari 1967	31 december 1986
Spa	1 januari 1990	31 december 1996
Bierset	1 januari 1967	31 december 1996
Q Ourthe (dagwaarden) te Tabreux:		
station	begin	eind
Tabreux	1 januari 1968	31 december 1998
P (6 uurwaarden) en T (12 uurwaarden) meetstations:		
station	begin	eind
St-Hubert	8 september 1990	12 oktober 1995
Spa	8 september 1990	12 oktober 1995
Bierset	8 september 1990	12 oktober 1995
Q Ourthe (uurwaarden) te Tabreux:		
	begin	eind
	1 maart 1979	31 maart 1979
	1 december 1979	31 december 1979
	1 juli 1980	31 juli 1980
	1 februari 1984	28 februari 1984
	1 januari 1988	31 januari 1988
	1 februari 1988	28 februari 1988
	1 januari 1993	28 februari 1993
	1 december 1993	31 januari 1994
	1 januari 1995	28 februari 1995
	1 oktober 1998	30 november 1998
P (uurwaarden) Gebiedswaarden bovenstrooms Tabreux:		
	begin	eind
	1 maart 1979	31 maart 1979
	1 december 1979	31 december 1979
	1 juli 1980	31 juli 1980
	1 februari 1984	28 februari 1984
	1 januari 1988	31 januari 1988
	1 februari 1988	28 februari 1988
	1 december 1993	31 december 1993
	1 januari 1995	31 januari 1995

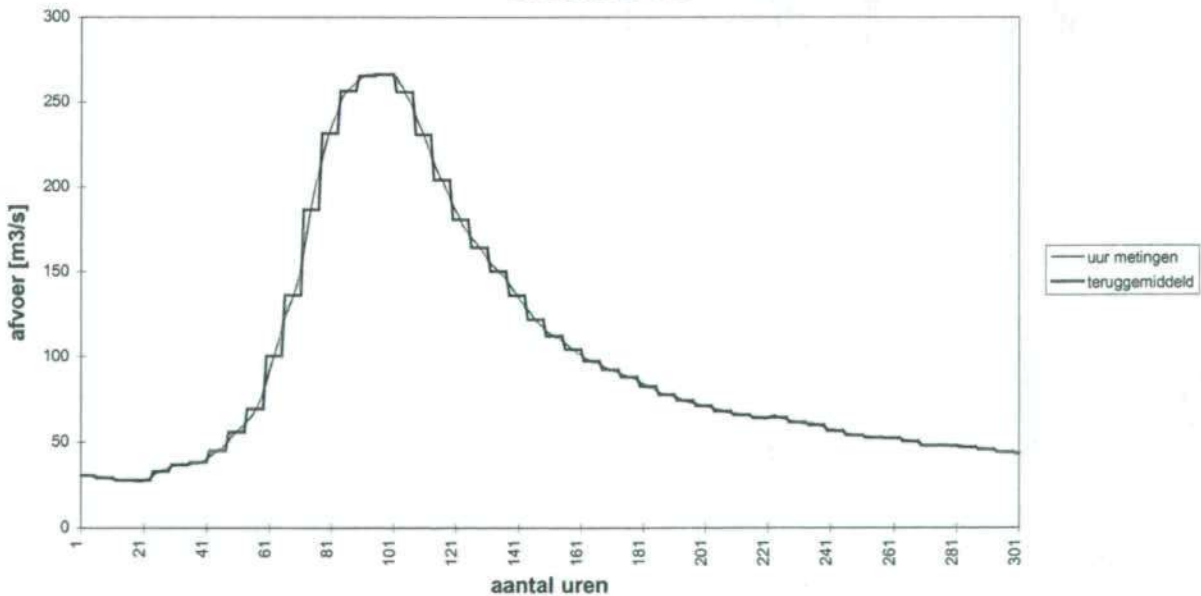
Bijlage 4 *Schaal onderzoek hoogwaterperiode januari 1993*

Het afvoerverloop van de Ourthe te Tabreux tijdens de hoogwaterperiode januari 1993. Weergegeven zijn uurmetingen tezamen uitgezet met gemiddelde afvoeren voor perioden van 3, 6, 12 en 24 uur.

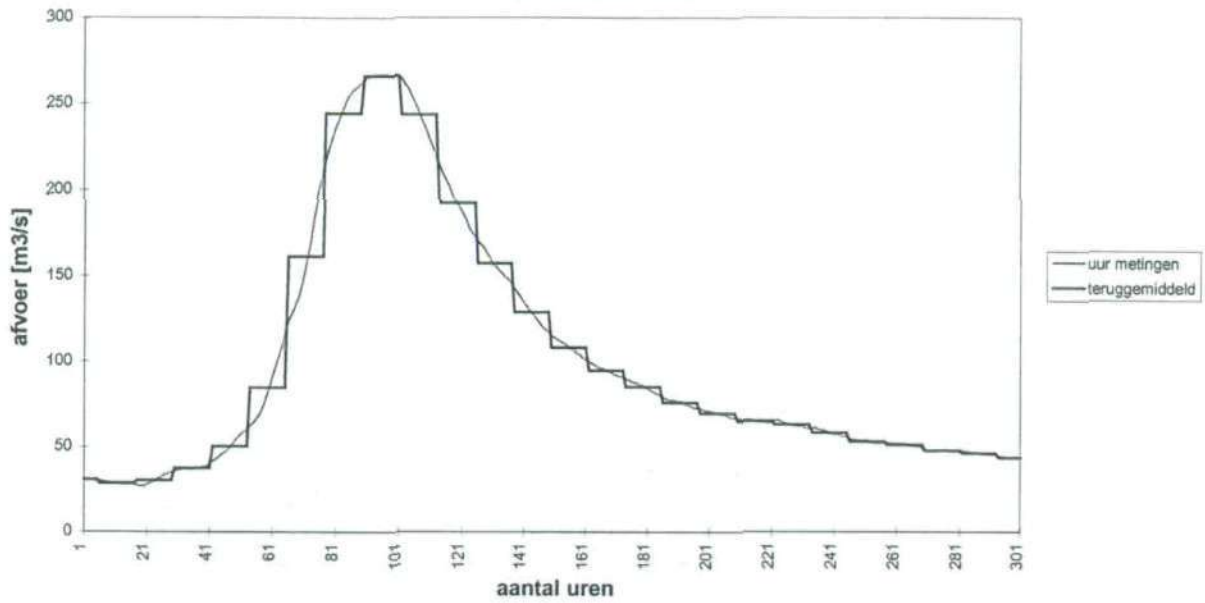
**Figuur A: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 3 uur 1993
9-1-93 tot 21-1-93**



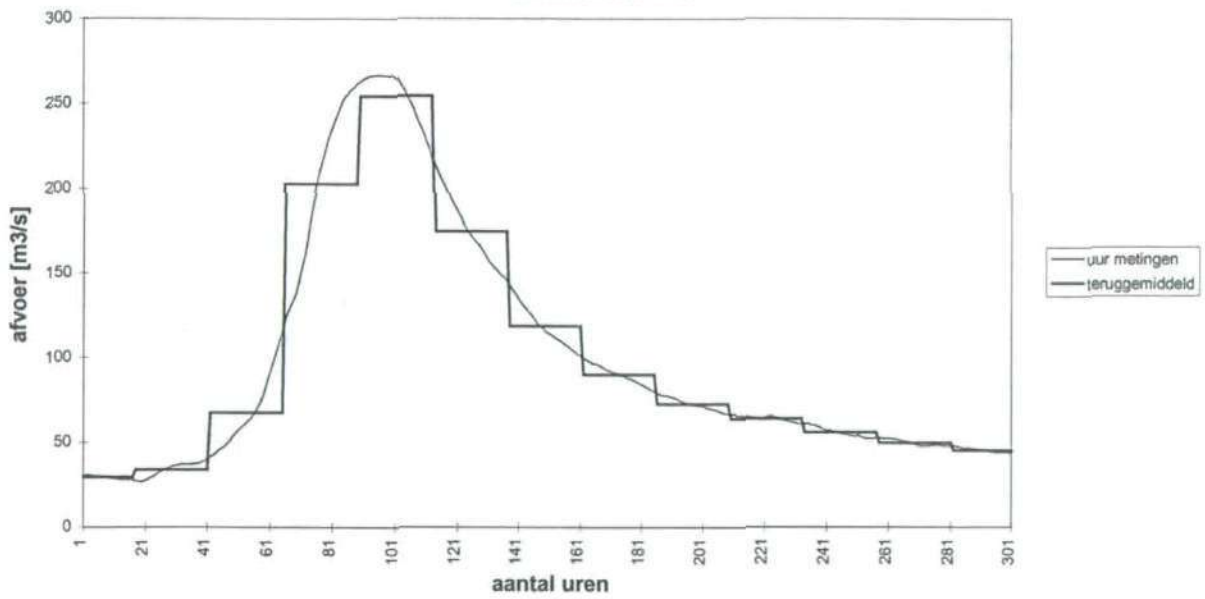
**Figuur B: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 6 uur 1993
9-1-93 tot 21-1-93**



**Figuur C: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdspan van 12 uur 1993
9-1-93 tot 21-1-93**



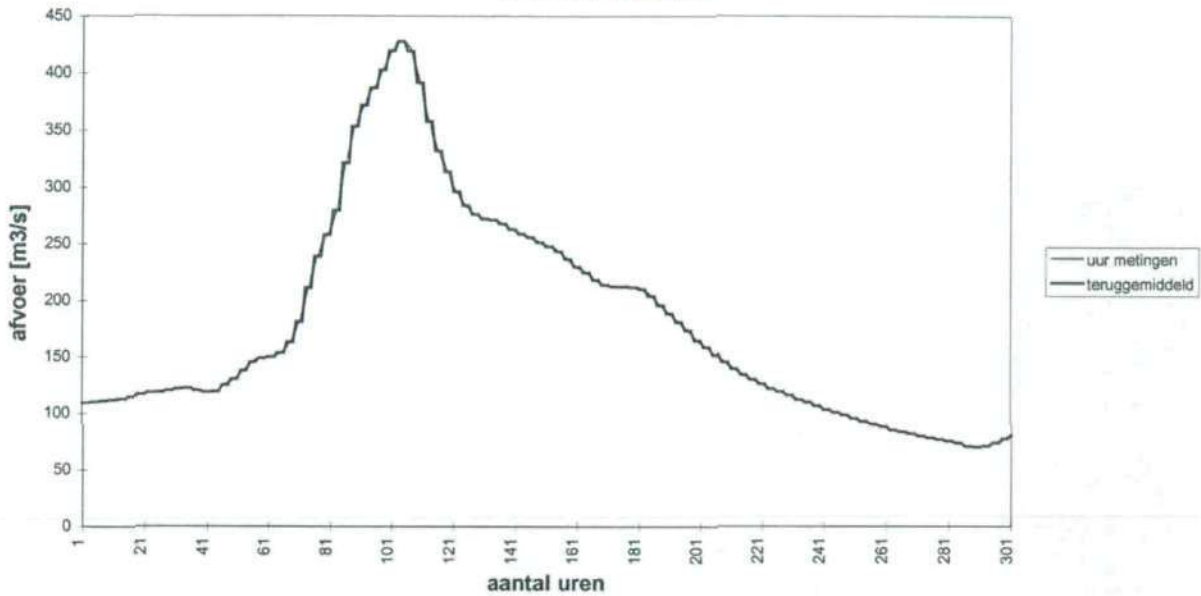
**Figuur D: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdspan van 24 uur 1993
9-1-93 tot 21-1-93**



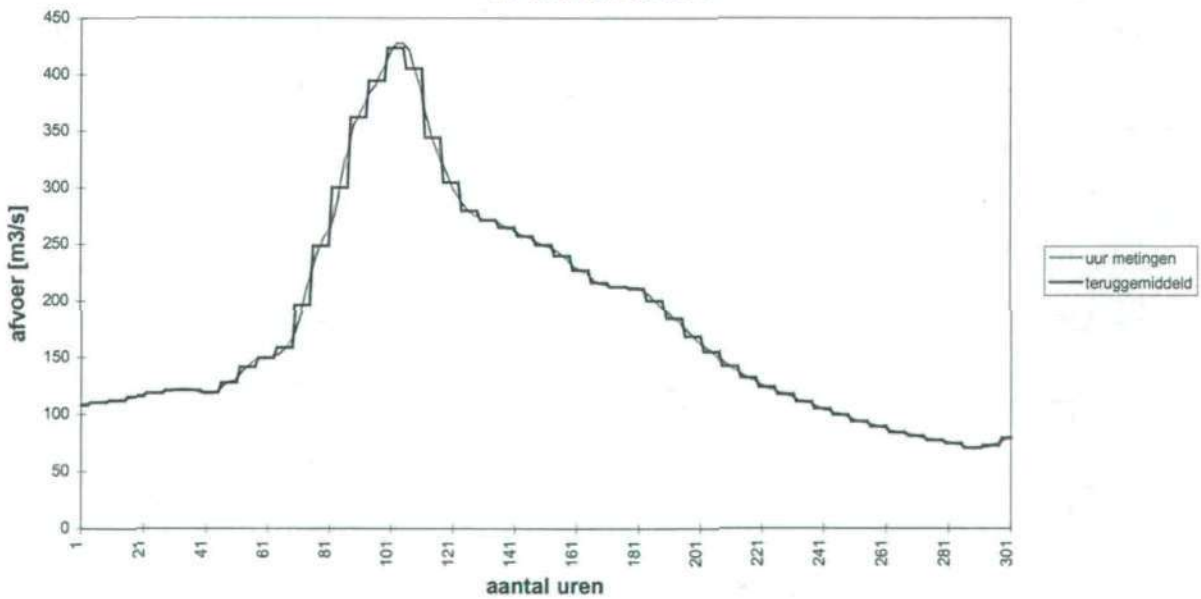
Bijlage 5 *Schaal onderzoek hoogwaterperiode december 1993*

Het afvoerverloop van de Ourthe te Tabreux tijdens de hoogwaterperiode december 1993. Weergegeven zijn uurmetingen tezamen uitgezet met gemiddelde afvoeren voor perioden van 3, 6, 12 en 24 uur.

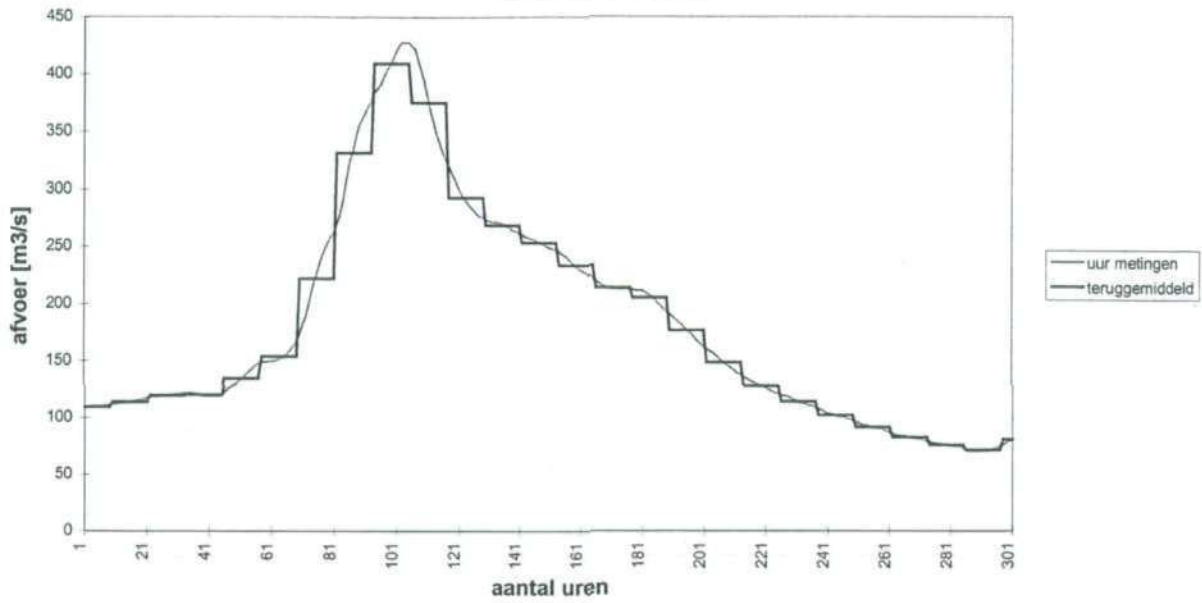
**Figuur A: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 3 uur 1993
17-12-93 tot 30-12-93**



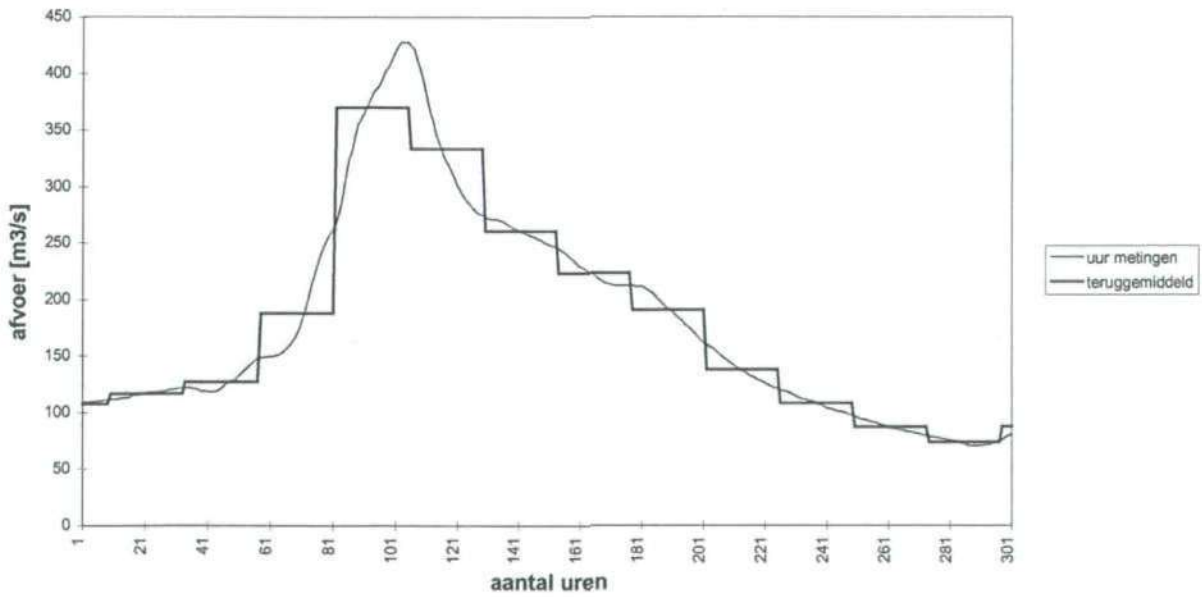
**Figuur B: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 6 uur 1993
17-12-93 tot 30-12-93**



Figuur C: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdspan van 12 uur 1993
17-12-93 tot 30-12-93



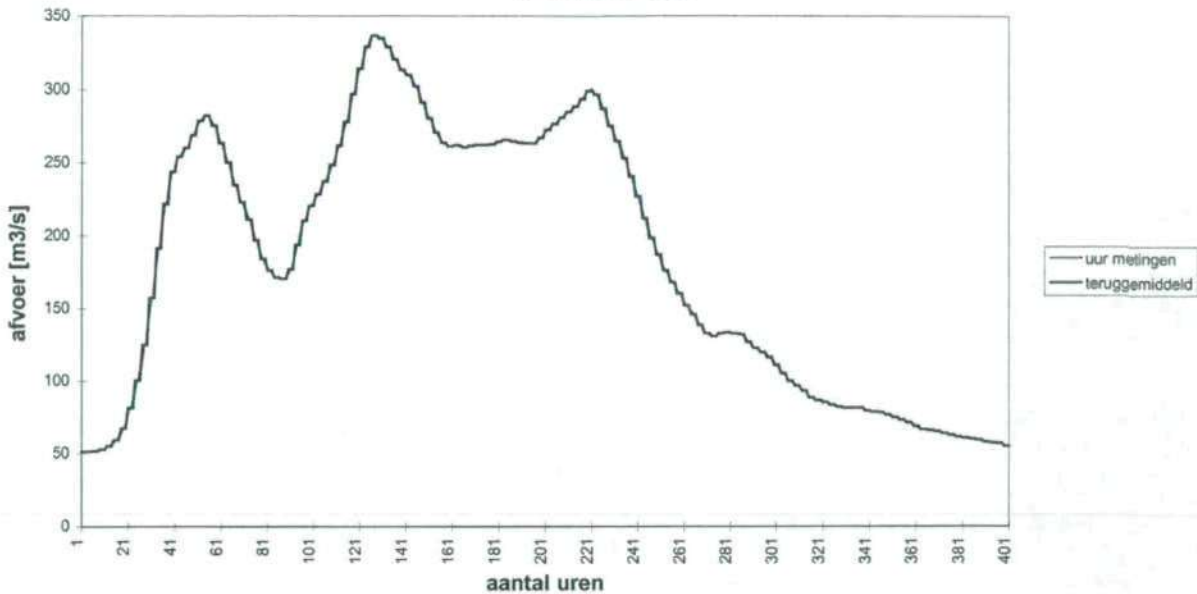
Figuur D: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdspan van 24 uur 1993
17-12-93 tot 30-12-93



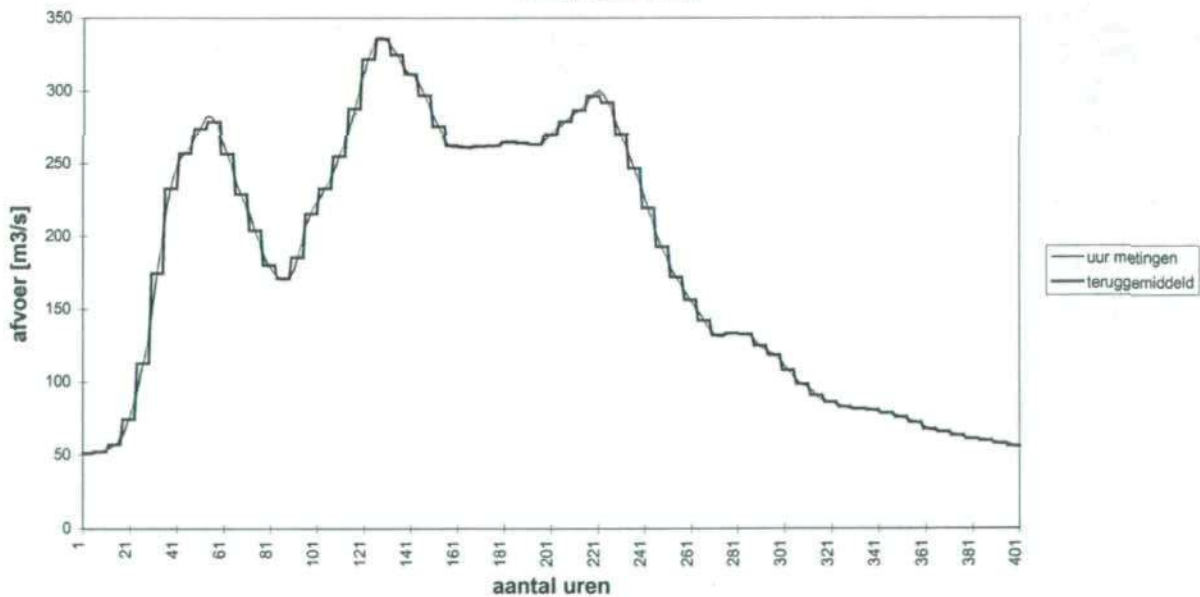
Bijlage 6 *Schaal onderzoek hoogwaterperiode januari 1995*

Het afvoerverloop van de Ourthe te Tabreux tijdens de hoogwaterperiode januari 1995. Weergegeven zijn uurmetingen tezamen uitgezet met gemiddelde afvoeren voor perioden van 3, 6, 12 en 24 uur.

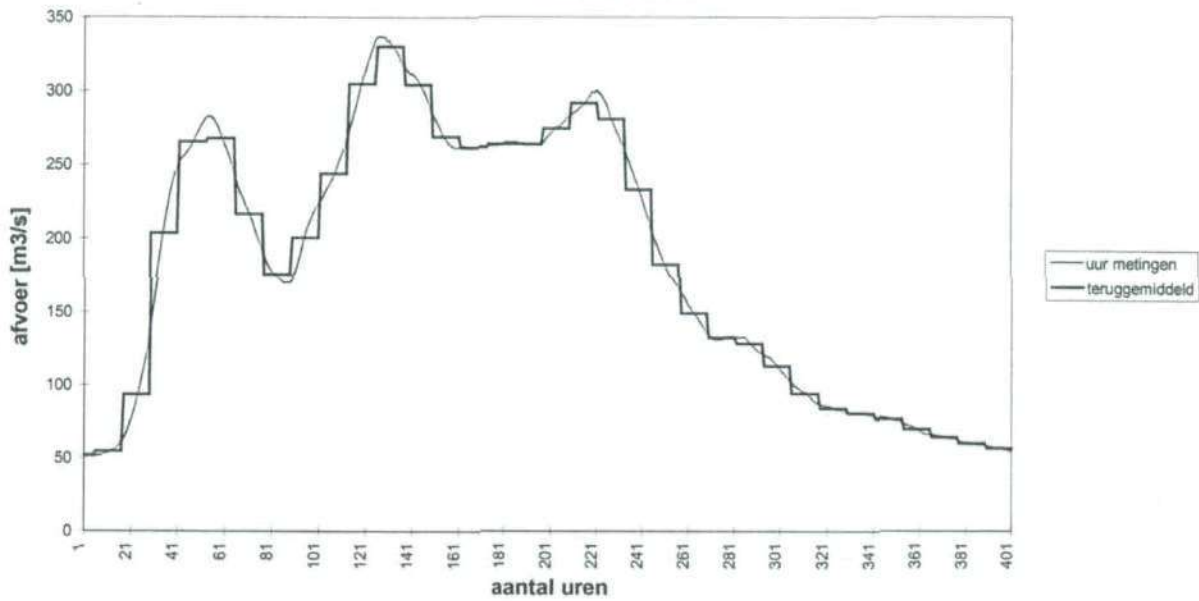
**Figuur A: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 3 uur 1995
17-1-95 tot 7-2-95**



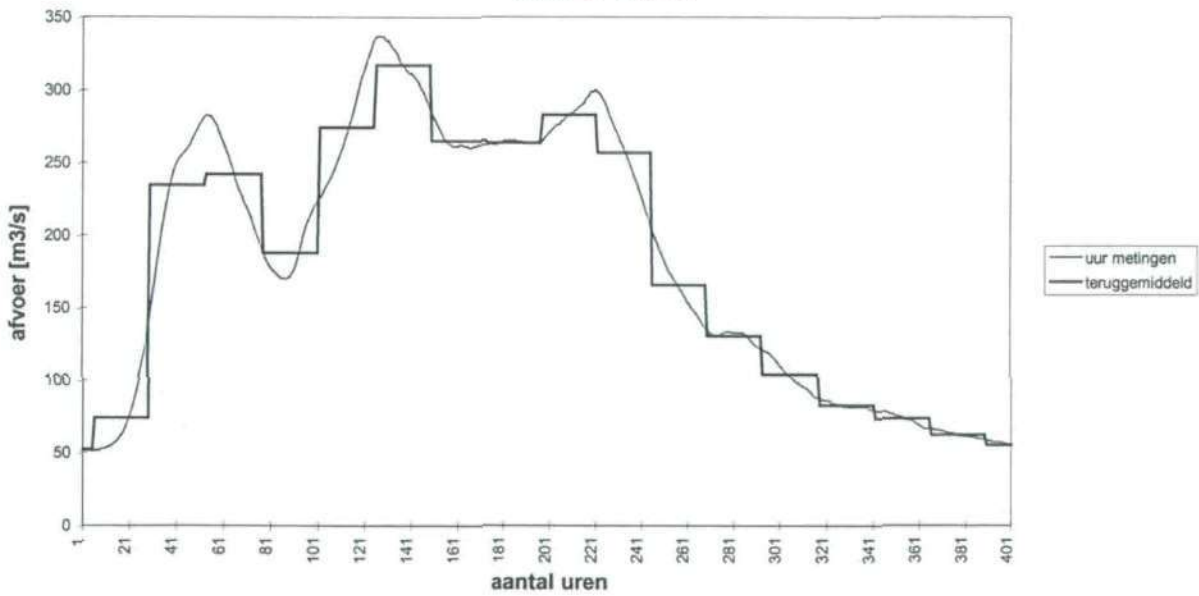
**Figuur B: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 6 uur 1995
17-1-95 tot 7-2-95**



**Figuur C: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 12 uur 1995
17-1-95 tot 7-2-95**



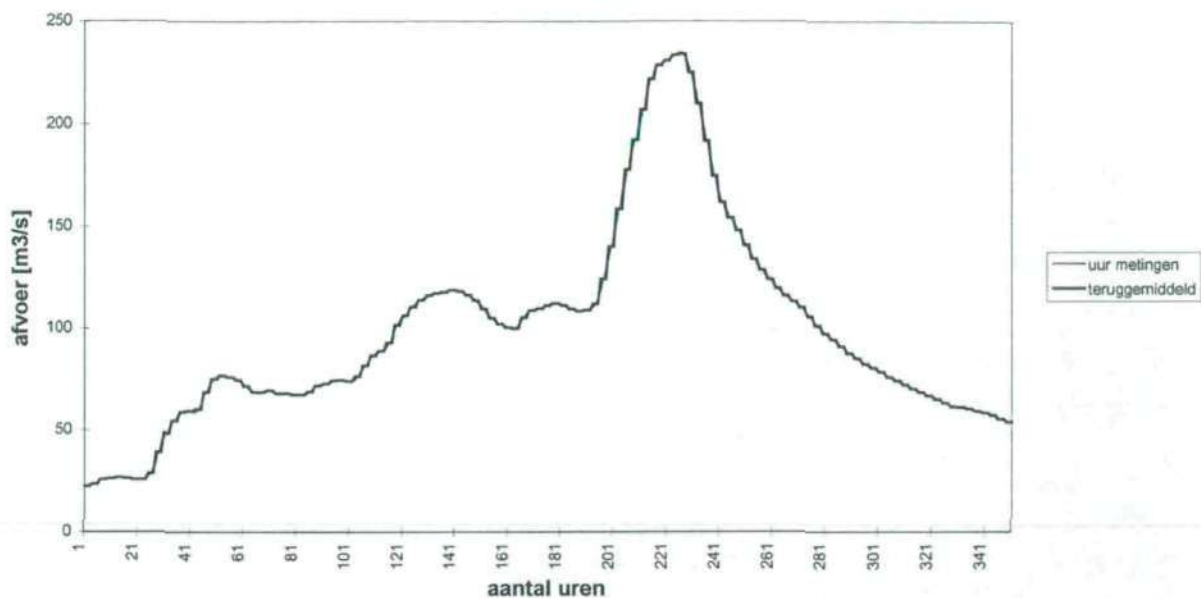
**Figuur D: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 24 uur 1995
17-1-95 tot 7-2-95**



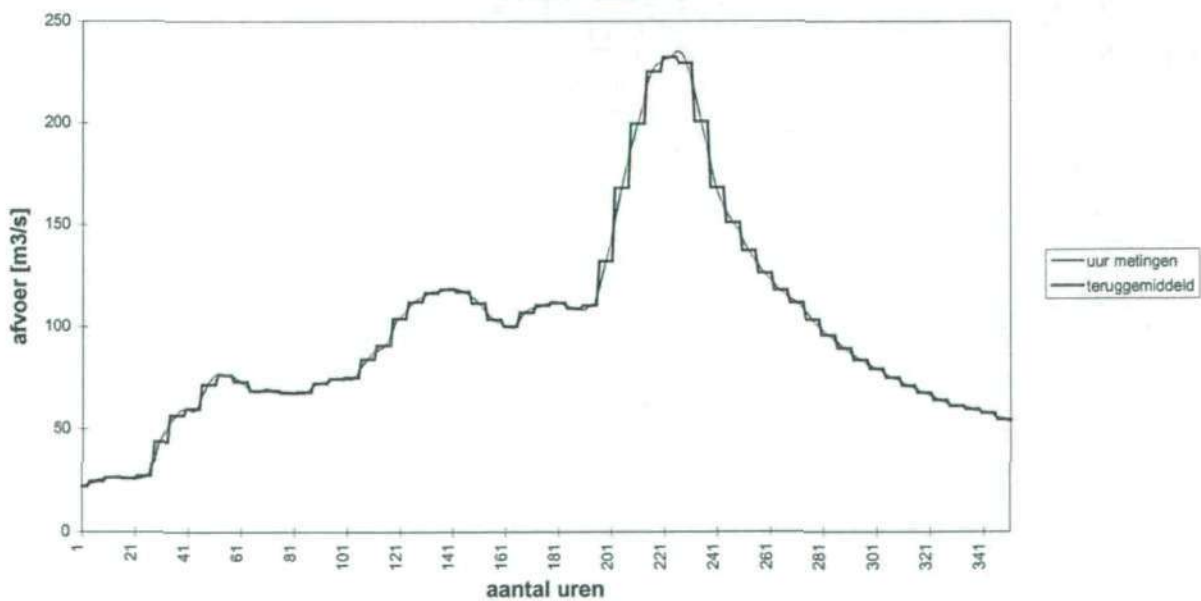
Bijlage 7 Schaal onderzoek hoogwaterperiode november 1998

Het afvoerverloop van de Ourthe te Tabreux tijdens de hoogwaterperiode november 1998. Weergegeven zijn uurmetingen tezamen uitgezet met gemiddelde afvoeren voor perioden van 3, 6, 12 en 24 uur.

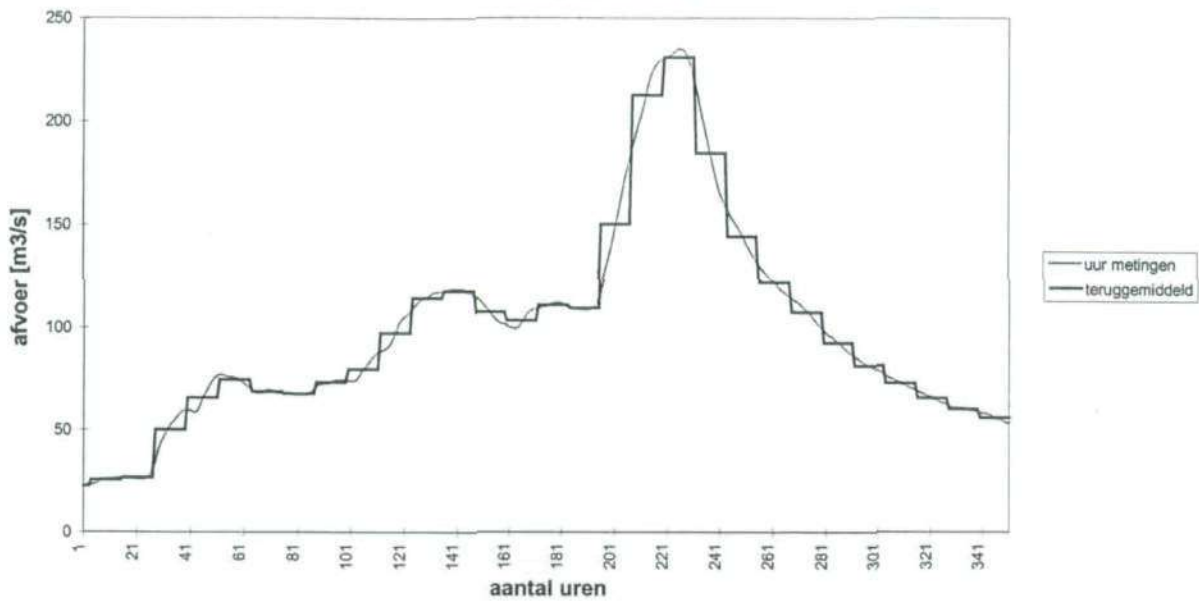
Figuur A: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 3 uur 1998
23-10-98 tot 7-11-98



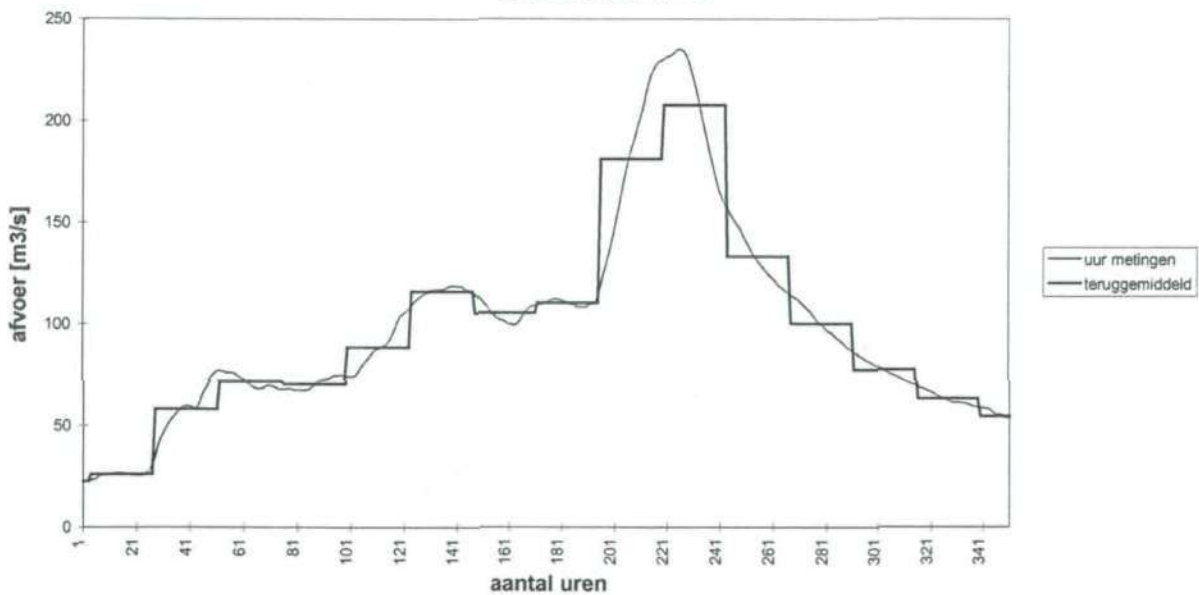
Figuur B: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 6 uur 1998
23-10-98 tot 7-11-98



Figuur C: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 12 uur 1998
23-10-98 tot 7-11-98



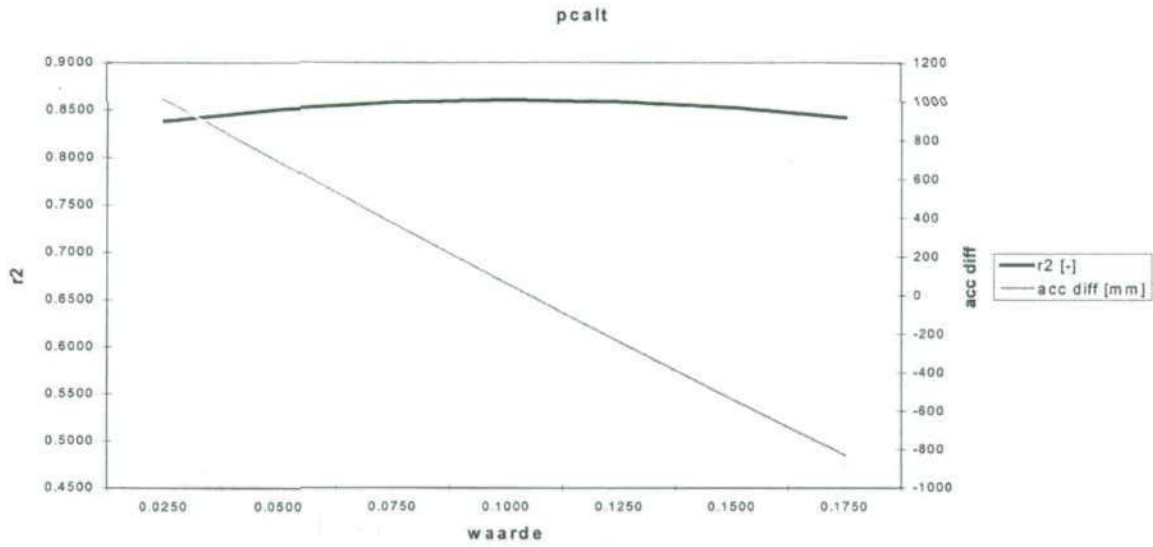
Figuur D: Afvoer van de Ourthe te Tabreux voor de tijdstap van 24 uur 1998
23-10-98 tot 7-11-98



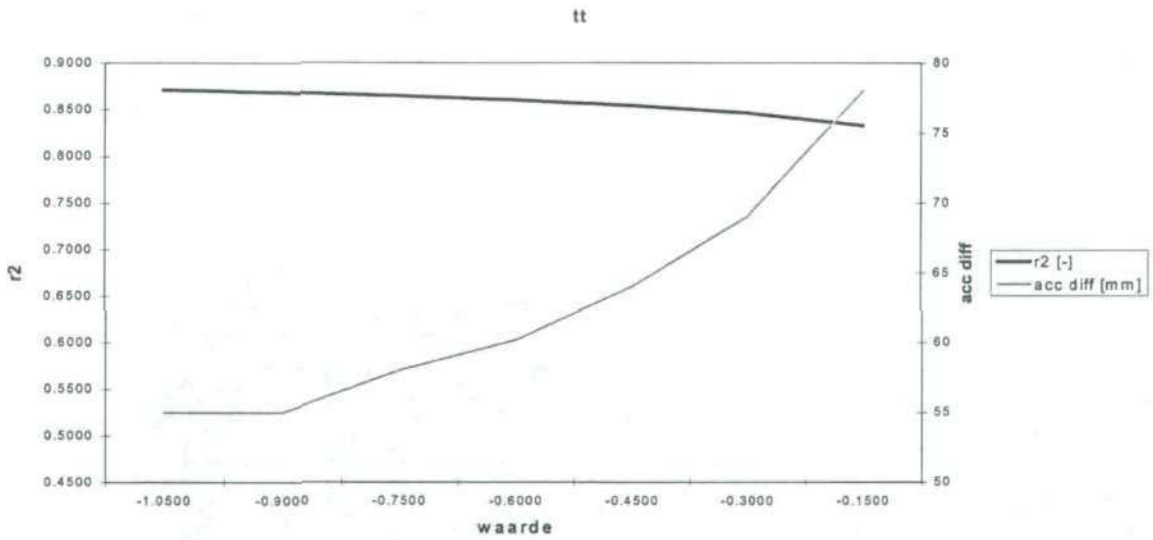
Bijlage 8 Tabel met uitkomsten van de gevoeligheidsanalyse

Percentuele verandering van de parameters							
Parameters	-75%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	+75%
Pcalt	0.0250	0.0500	0.0750	0.1000	0.1250	0.1500	0.1750
R ² [-]	0.8380	0.8503	0.8576	0.8602	0.8584	0.8523	0.8420
acc diff [mm]	1007	686	369	60	-244	-540	-829
Tt	-1.0500	-0.9000	-0.7500	-0.6000	-0.4500	-0.3000	-0.1500
R ² [-]	0.8711	0.8685	0.8646	0.8602	0.8544	0.8463	0.8328
acc diff [mm]	55	55	58	60	64	69	78
Tti	0.2500	0.5000	0.7500	1.0000	1.2500	1.5000	1.7500
R ² [-]	0.8690	0.8661	0.8634	0.8602	0.8562	0.8515	0.8424
acc diff [mm]	88	80	71	60	47	36	24
Cfmax	0.7500	1.5000	2.2500	3.0000	3.7500	4.5000	5.2500
R ² [-]	0.7625	0.8249	0.8495	0.8602	0.8650	0.8672	0.8681
acc diff [mm]	338	148	90	60	43	31	22
Focfmax	0.2000	0.4000	0.6000	0.8000	1.0000	1.2000	1.4000
R ² [-]	0.8341	0.8490	0.8564	0.8602	0.8624	0.8638	0.8649
acc diff [mm]	195	103	74	60	51	46	41
FC	40.0000	80.0000	120.0000	160.0000	200.0000	240.0000	280.0000
R ² [-]	0.7020	0.8011	0.8450	0.8602	0.8560	0.8390	0.8138
acc diff [mm]	1519	799	380	60	-227	-498	-741
beta	0.5000	1.0000	1.5000	2.0000	2.5000	3.0000	3.5000
R ² [-]	0.7288	0.8372	0.8585	0.8602	0.8565	0.8519	0.8472
acc diff [mm]	2140	997	418	60	-175	-339	-459
lp	0.1650	0.3300	0.4950	0.6600	0.8250	0.9900	0.9999
R ² [-]	0.8072	0.8284	0.8482	0.8602	0.8519	0.8171	0.8142
acc diff [mm]	-1261	-958	-528	60	781	1600	1651
cflux	0.2500	0.5000	0.7500	1.0000	1.2500	1.5000	1.7500
R ² [-]	0.8554	0.8582	0.8596	0.8602	0.8603	0.8598	0.8591
acc diff [mm]	557	357	195	60	-53	-150	-235
k ₄	0.0025	0.0050	0.0075	0.0100	0.0125	0.0150	0.0175
R ² [-]	0.8549	0.8584	0.8598	0.8602	0.8602	0.8600	0.8596
acc diff [mm]	-72	15	46	60	69	74	78
perc	0.1200	0.2400	0.3600	0.4800	0.6000	0.7200	0.8400
R ² [-]	0.8487	0.8556	0.8594	0.8602	0.8583	0.8530	0.8450
acc diff [mm]	-60	-19	22	60	96	127	155
hq	0.5500	1.1000	1.6500	2.2000	2.7500	3.3000	3.8500
R ² [-]	0.6152	0.8039	0.8515	0.8602	0.8548	0.8437	0.8299
acc diff [mm]	167	118	86	60	39	21	5
khq	0.0150	0.0300	0.0450	0.0600	0.0750	0.0900	0.1050
R ² [-]	0.4871	0.7348	0.8348	0.8602	0.8432	0.7997	0.7401
acc diff [mm]	-244	-74	10	60	95	120	141
alfa	0.3250	0.6500	0.9750	1.3000	1.6250	1.9500	2.2750
R ² [-]	0.7895	0.8313	0.8543	0.8602	0.8516	0.8309	0.8006
acc diff [mm]	124	97	77	60	47	36	27

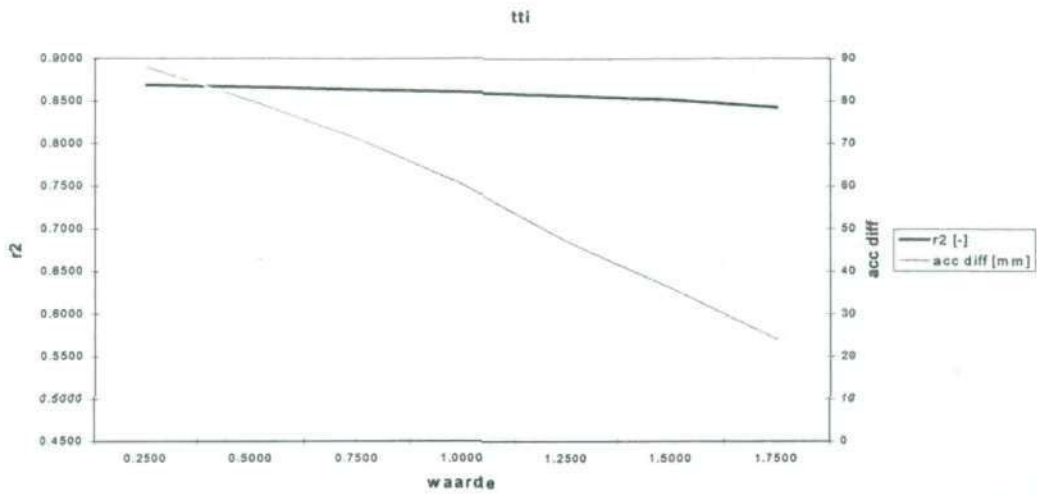
Bijlage 9 Grafieken van de gevoeligheidsanalyse



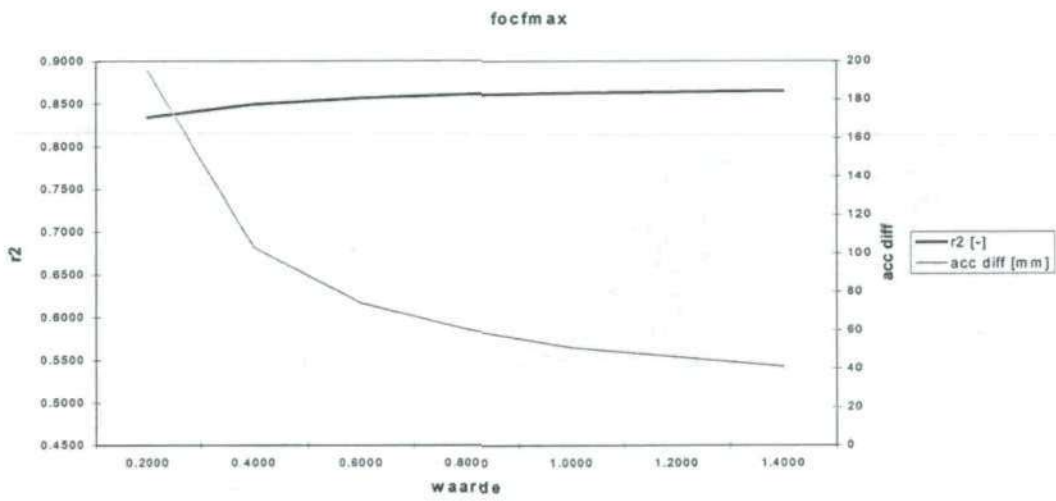
figuur 63 Gevoeligheidsanalyse pcalt



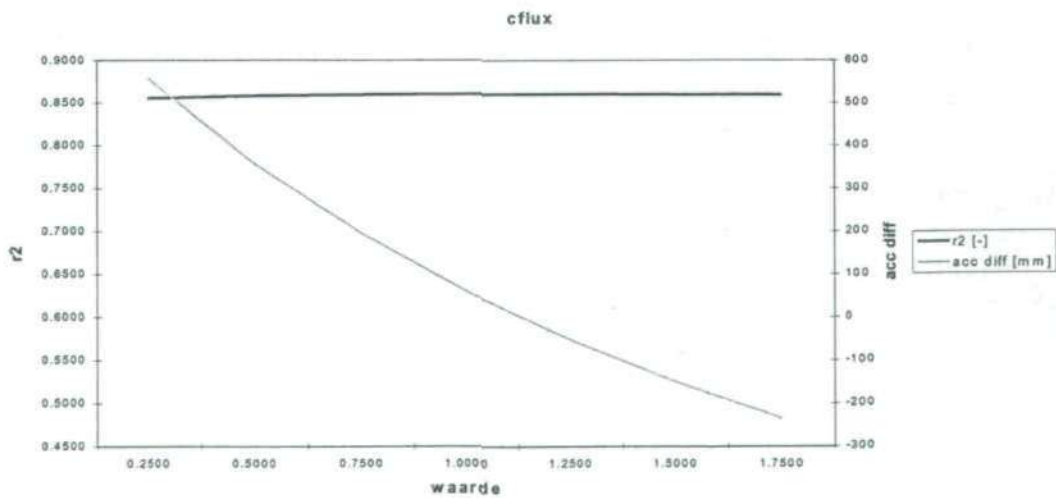
figuur 64 Gevoeligheidsanalyse tt



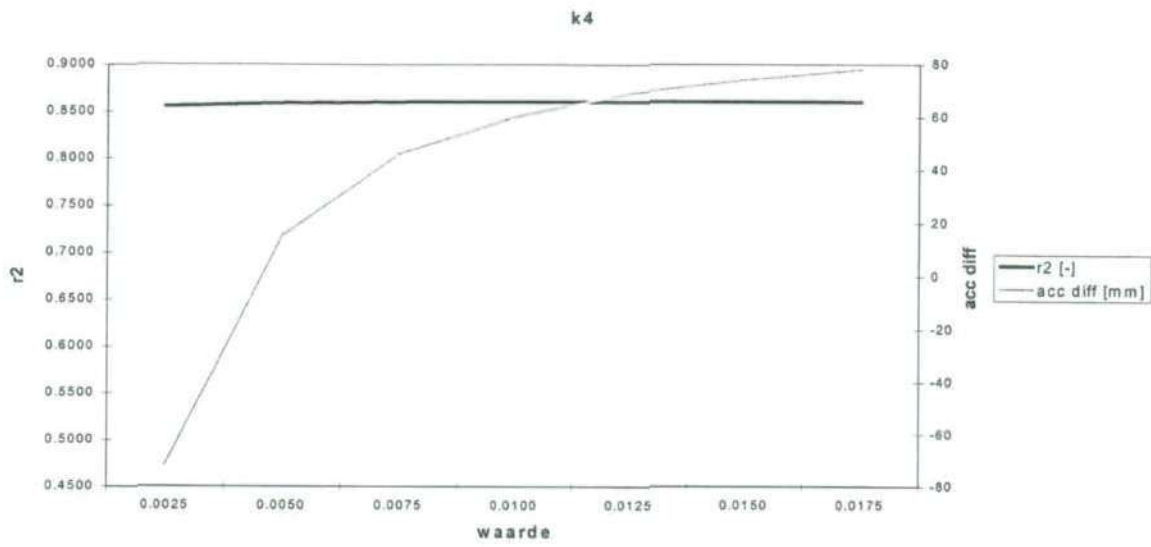
figuur 65 Gevoeligheidsanalyse tti



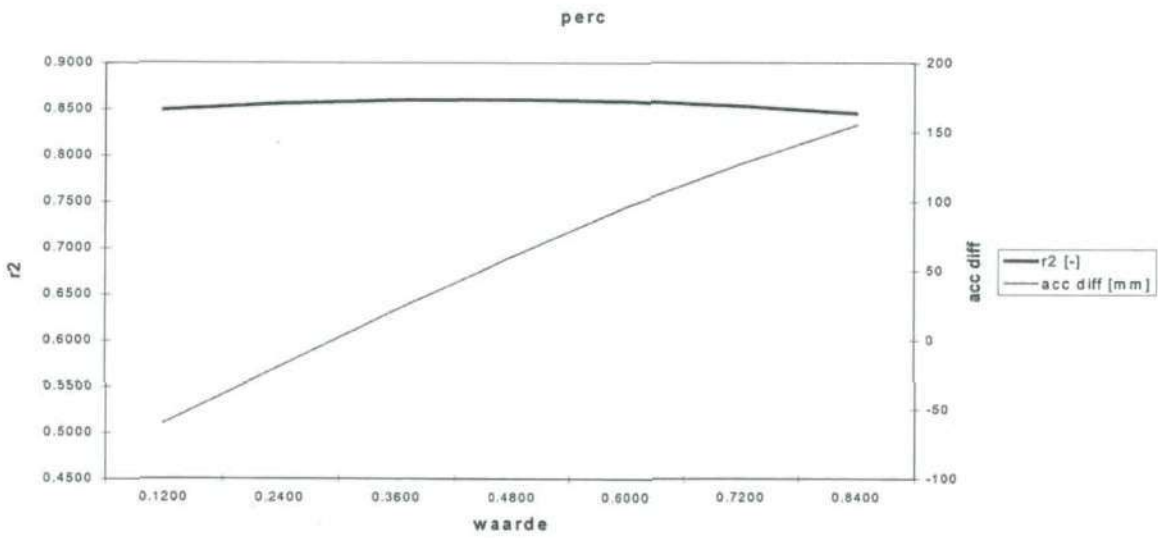
figuur 66 Gevoeligheidsanalyse focfmax



figuur 67 Gevoeligheidsanalyse cflux

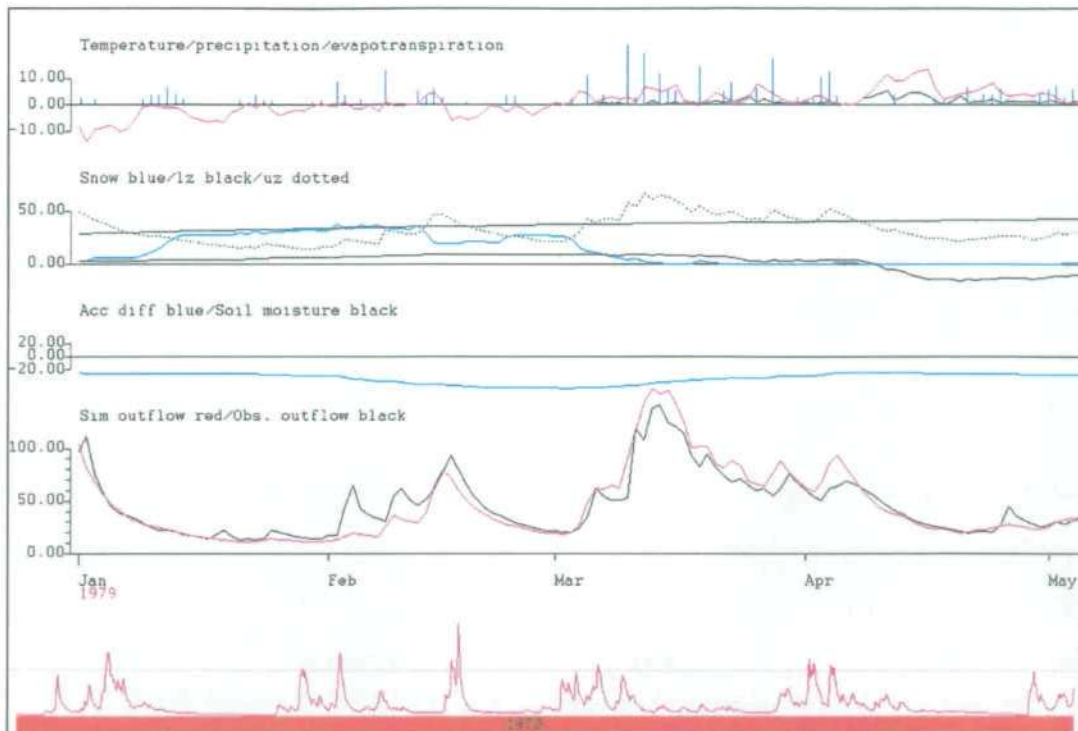


figuur 68 Gevoeligheidsanalyse k₄

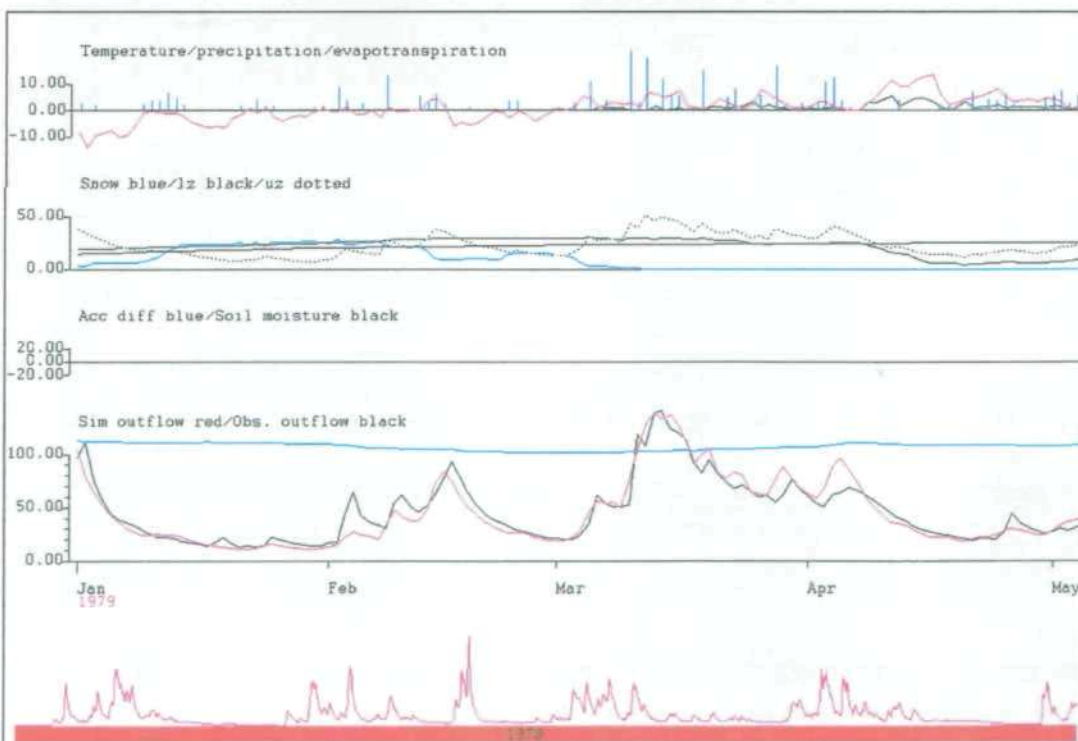


figuur 69 Gevoeligheidsanalyse perc

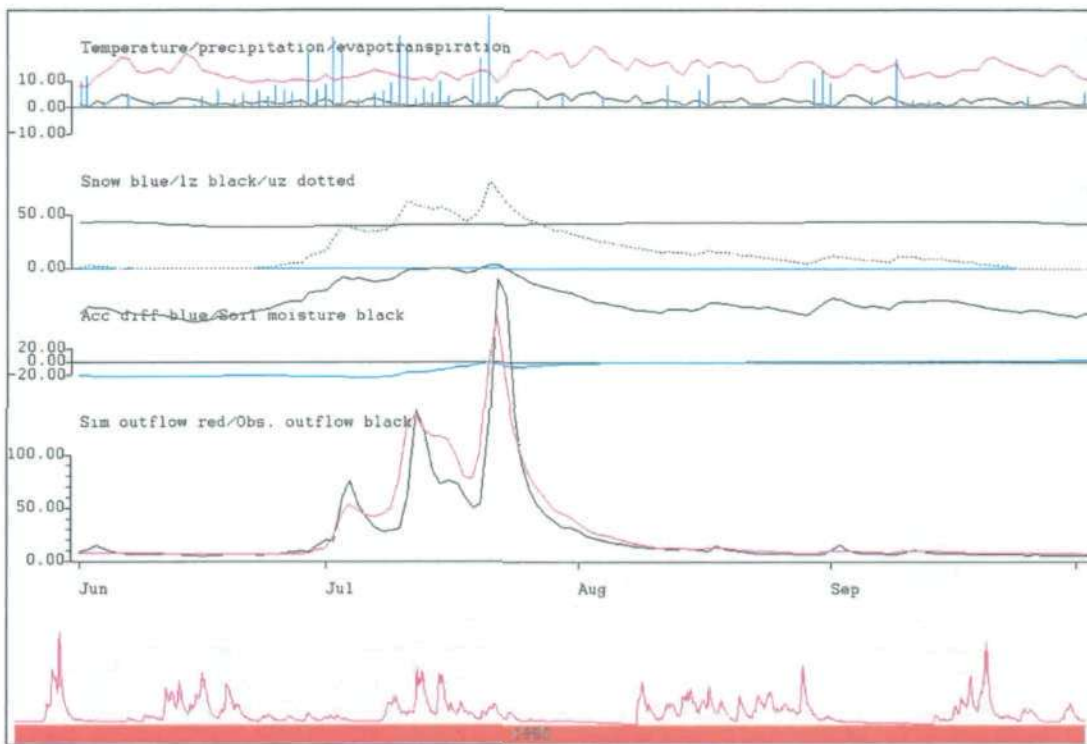
Bijlage 10 Afvoergolven dagmodel tussentijdse parametersets



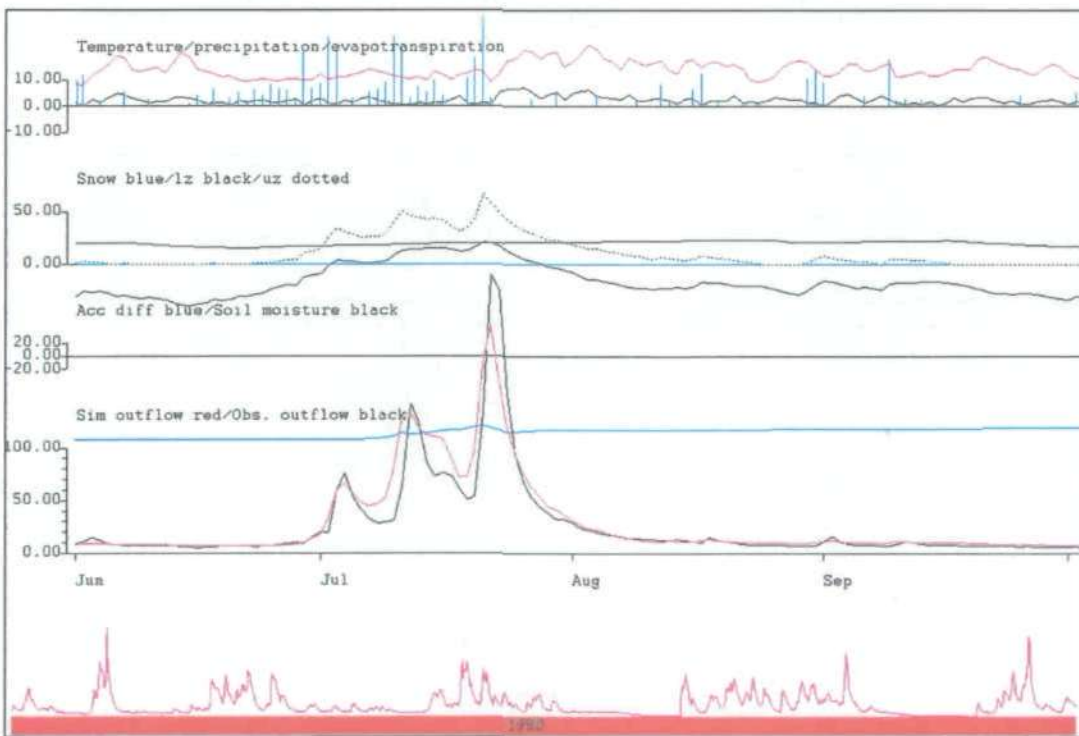
Afvoergolf maart 1979 voor de parameterset van de handmatige calibratie



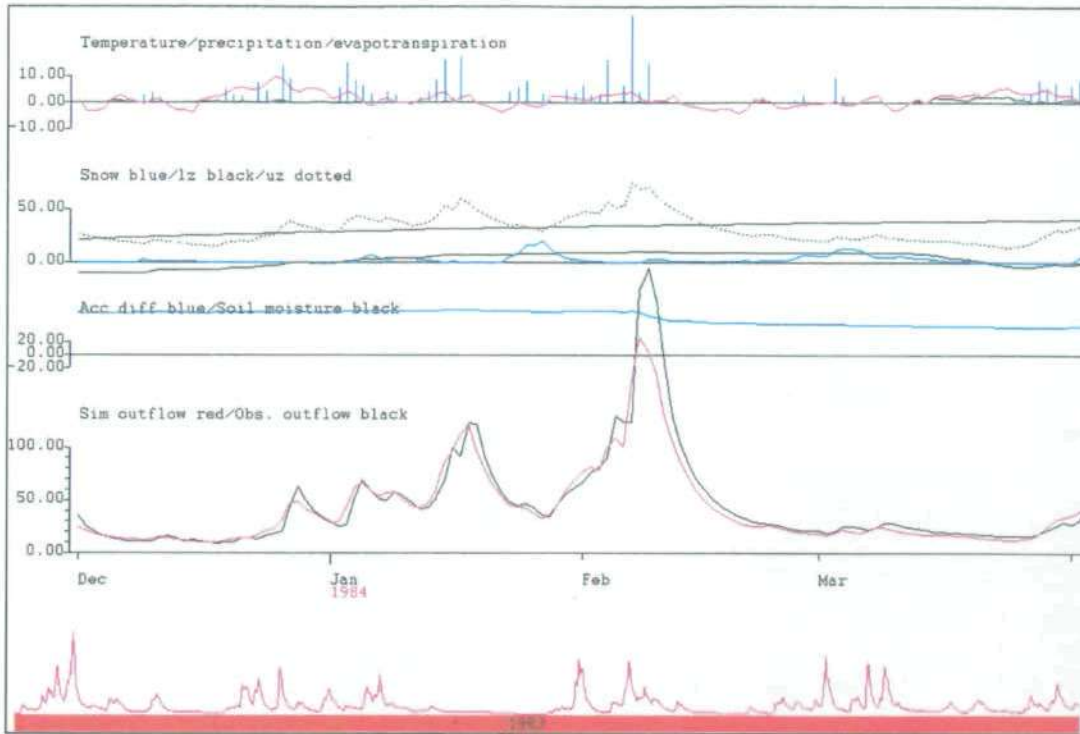
Afvoergolf maart 1979 voor de parameterset van de automatische calibratie



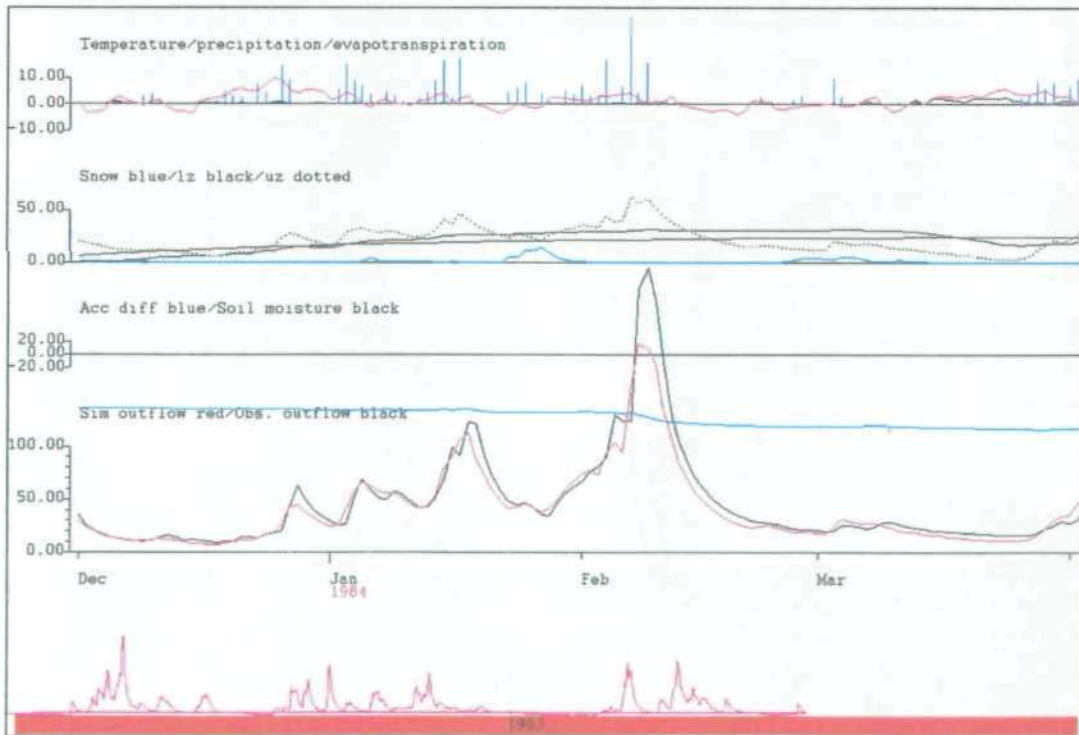
Afvoergolf juli 1980 voor de parameterset van de handmatige calibratie



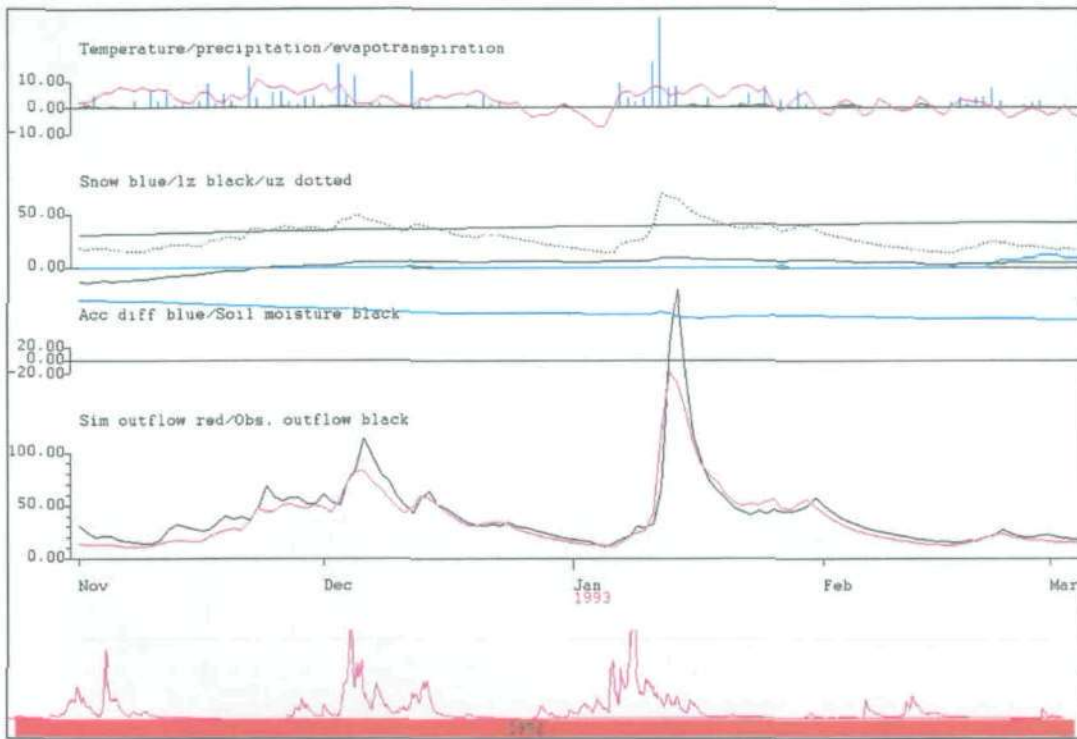
Afvoergolf juli 1980 voor de parameterset van de automatische calibratie



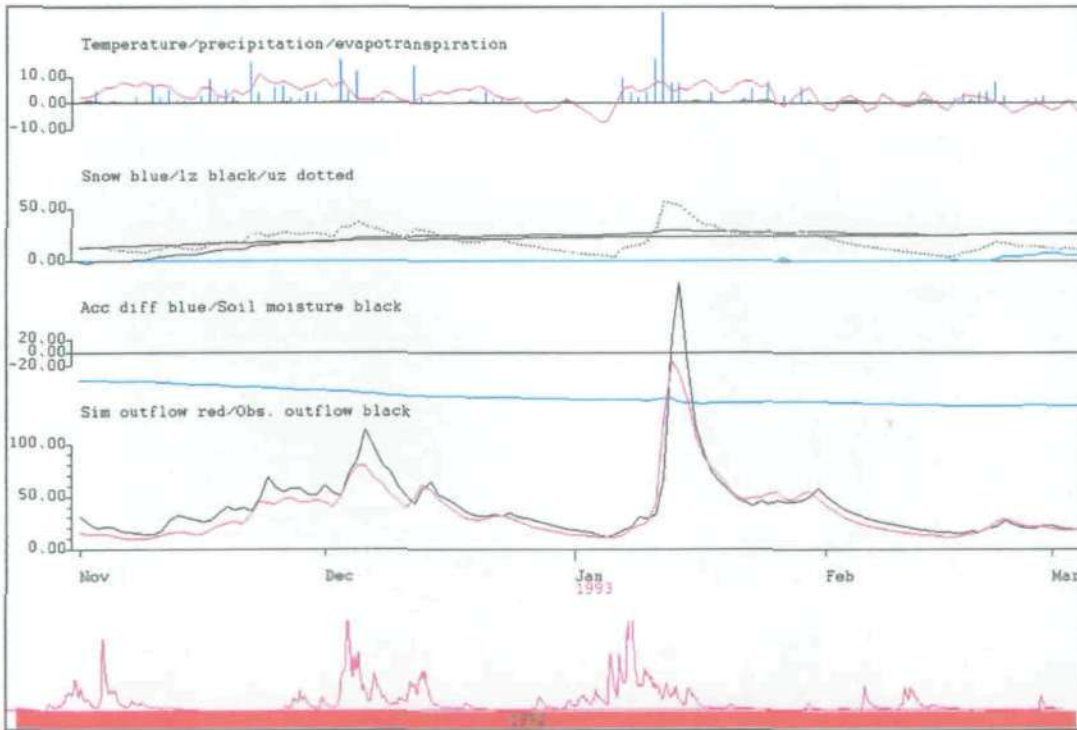
Afvoergolf februari 1984 voor de parameterset van de handmatige calibratie



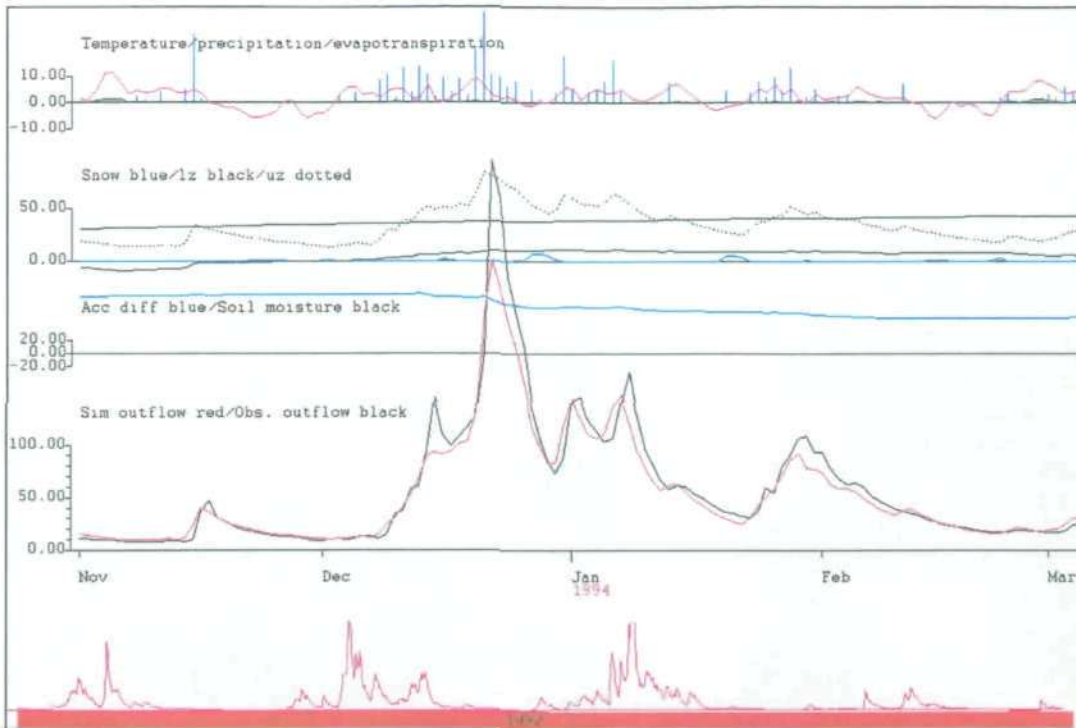
Afvoergolf februari 1984 voor de parameterset van de automatische calibratie



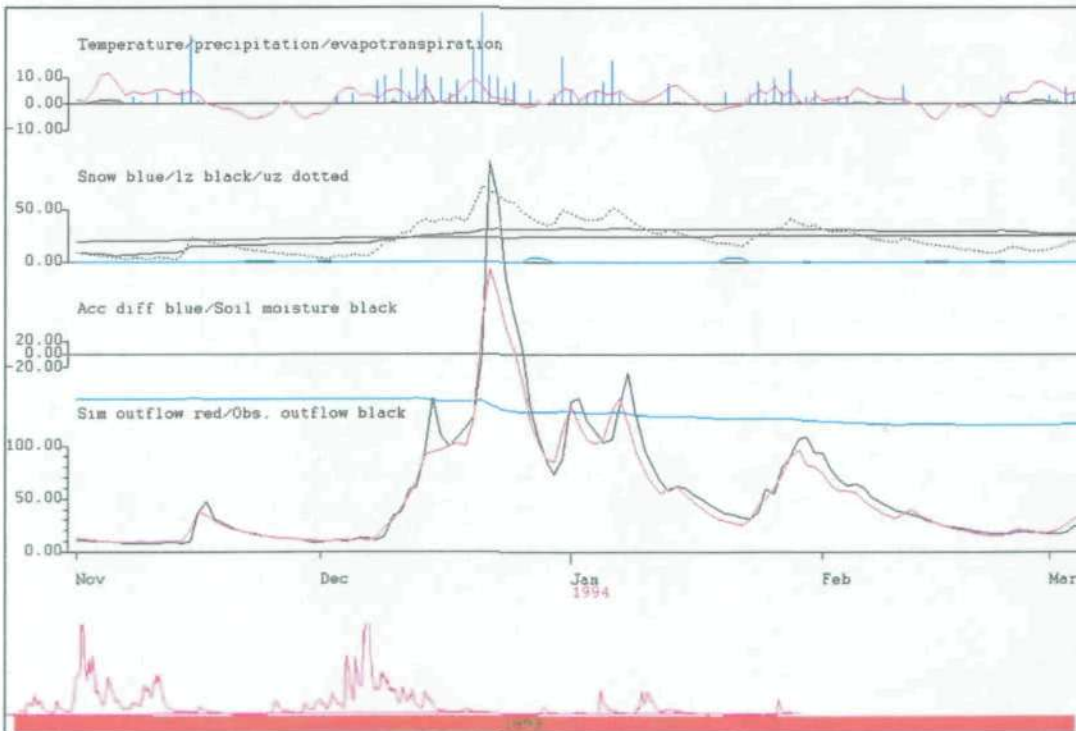
Afvoergolf januari 1993 voor de parameterset van de handmatige calibratie



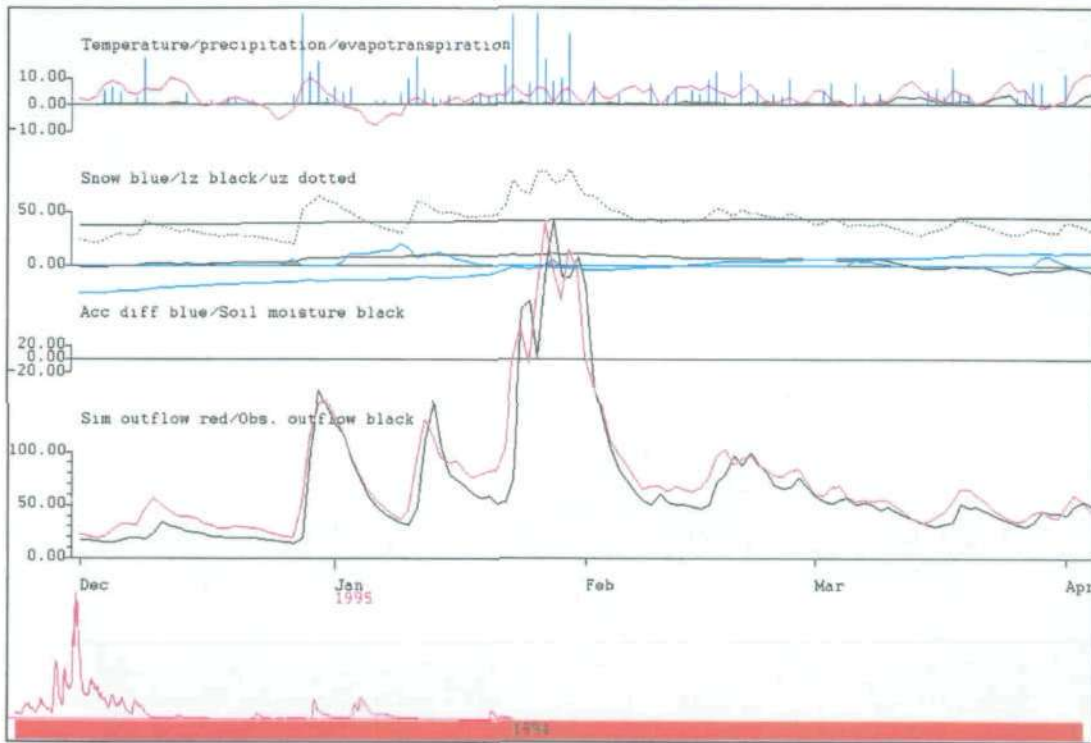
Afvoergolf januari 1993 voor de parameterset van de automatische calibratie



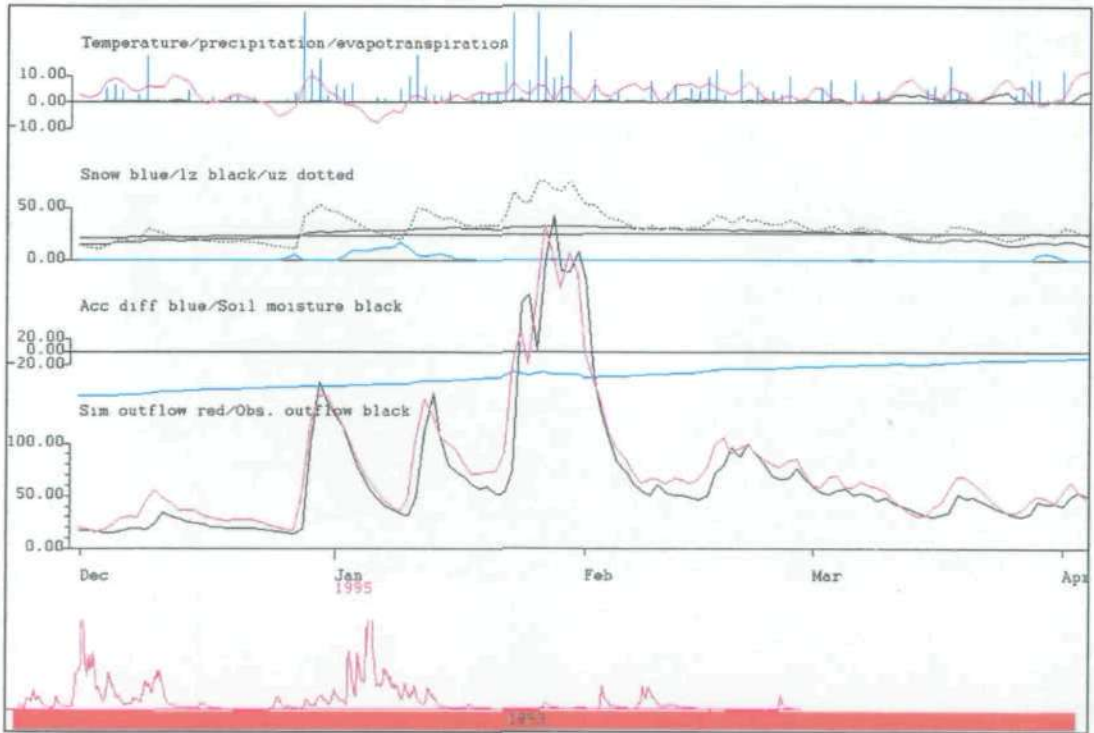
Afvoergolf december 1993 voor de parameterset van de handmatige calibratie



Afvoergolf december 1993 voor de parameterset van de automatische calibratie

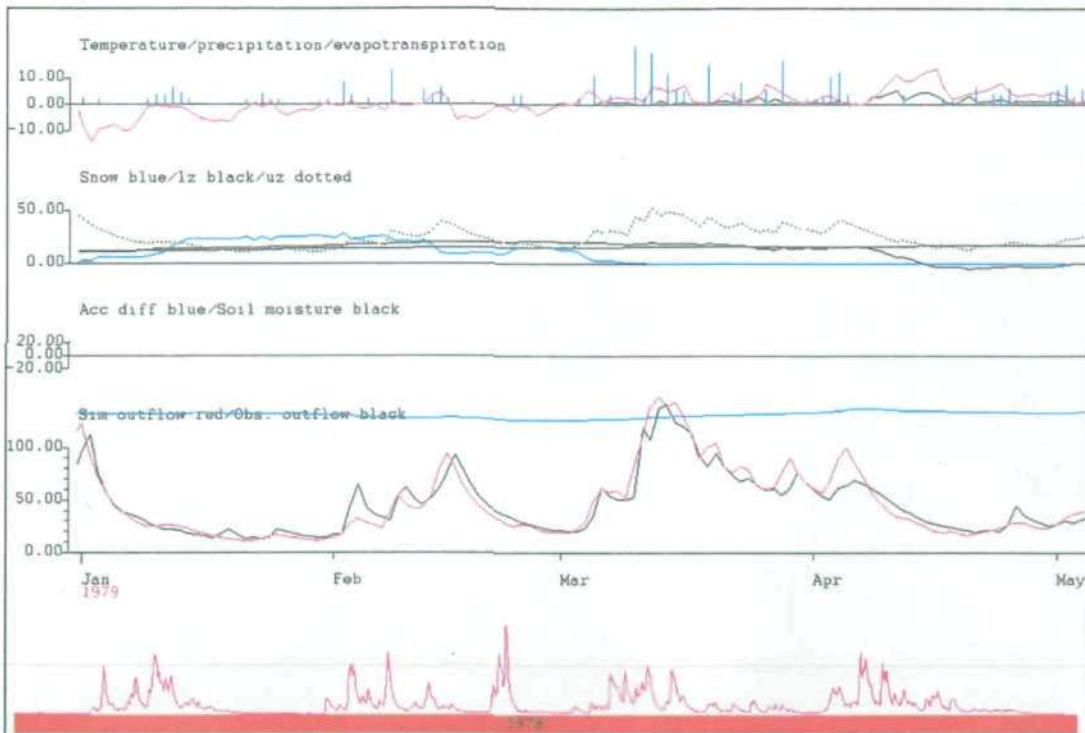


Afvoergolf januari 1995 voor de parameterset van de handmatige calibratie

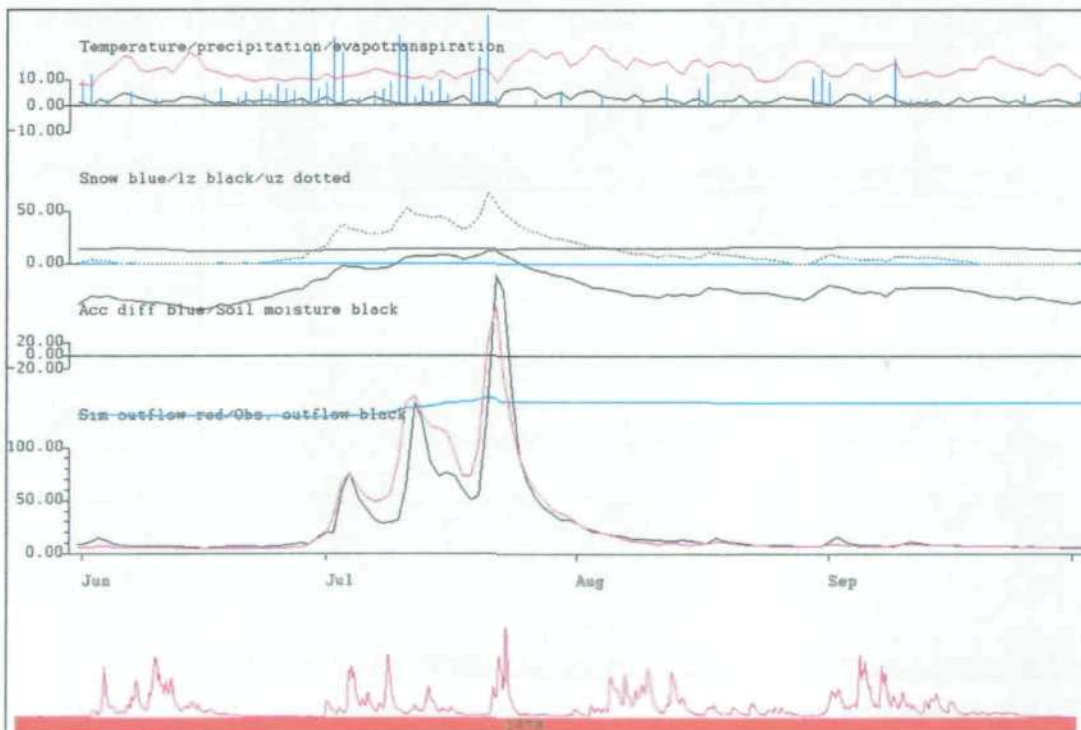


Afvoergolf januari 1995 voor de parameterset van de automatische calibratie

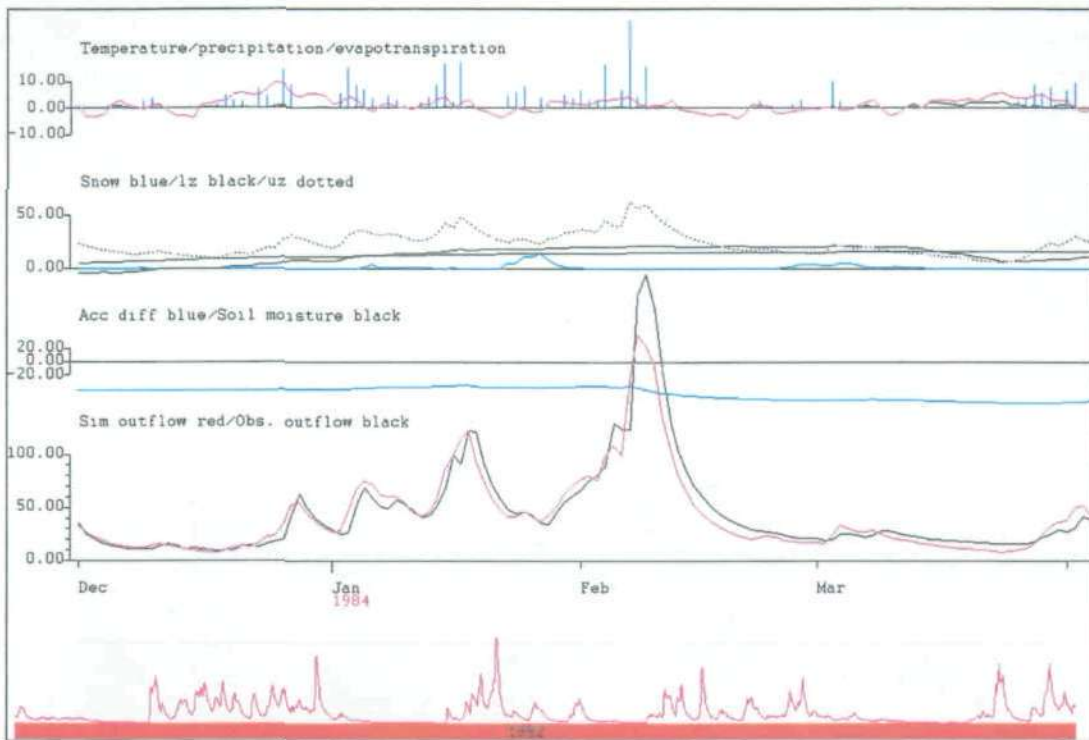
Bijlage 11 Afvoergolven dagmodel definitieve parameterset



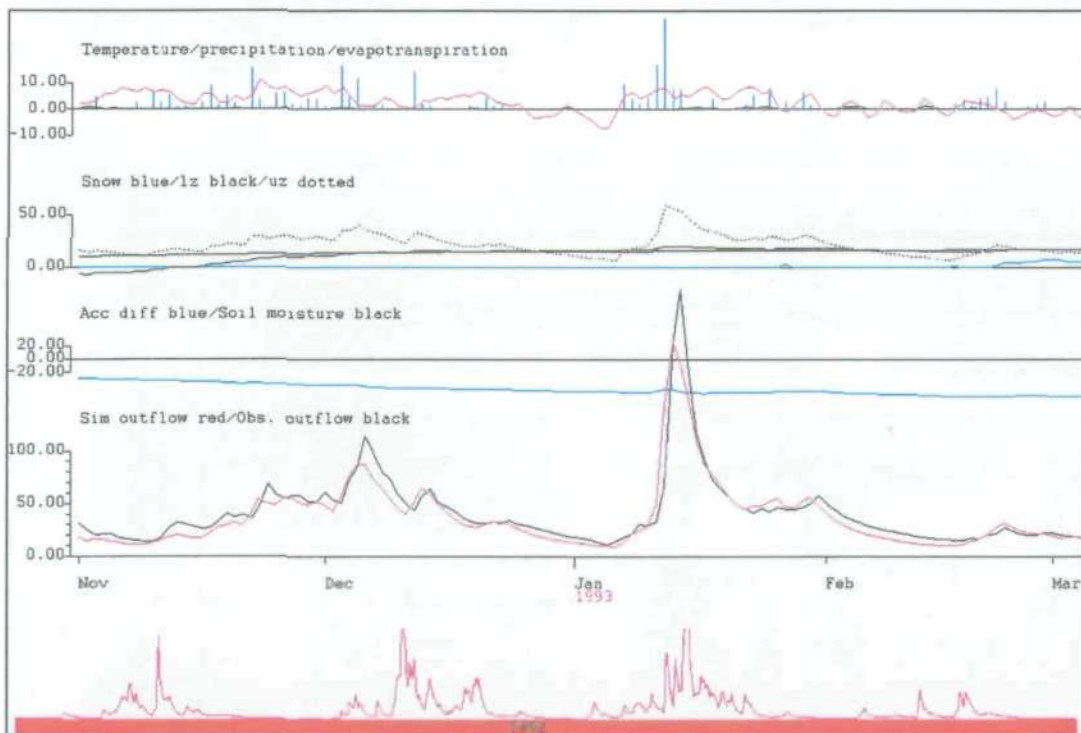
Afvoergolf maart 1979 voor de definitieve parameterset



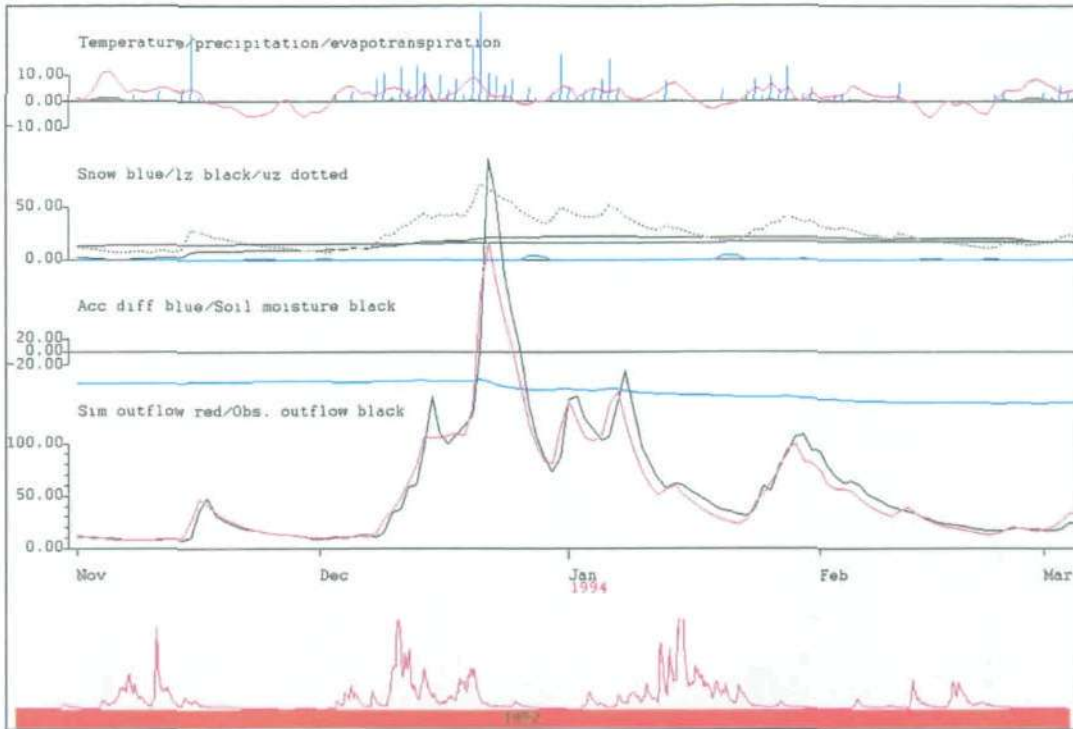
Afvoergolf juli 1980 voor de definitieve parameterset



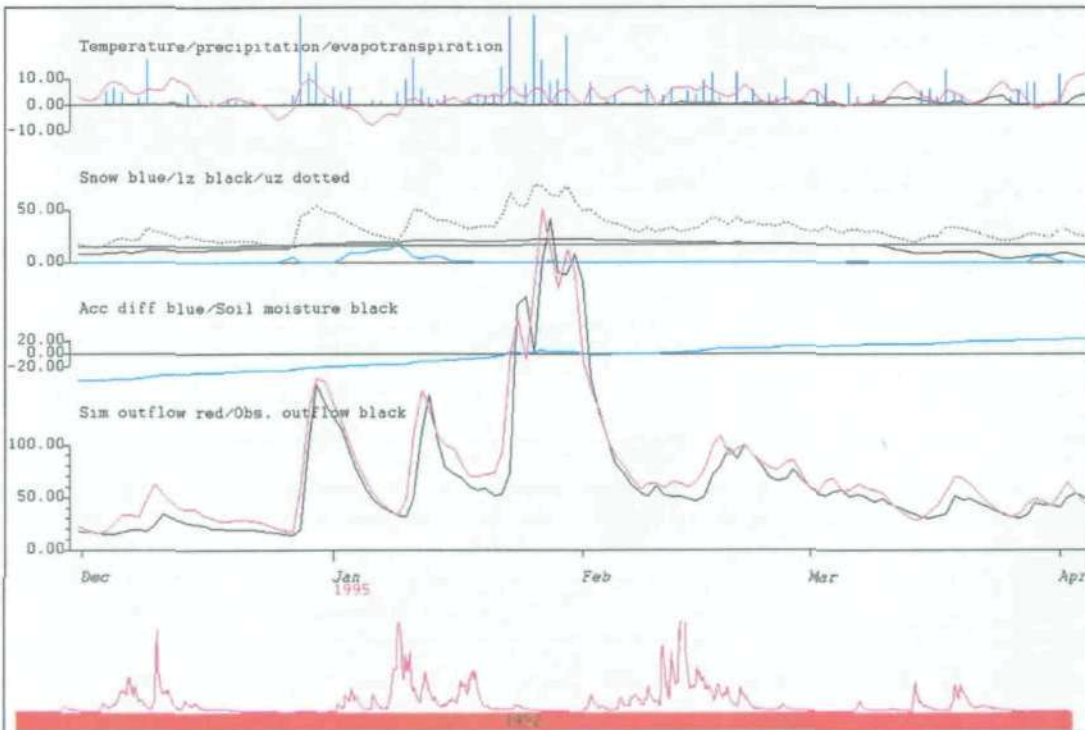
Afvoergolf februari 1984 voor de definitieve parameterset



Afvoergolf januari 1993 voor de definitieve parameterset

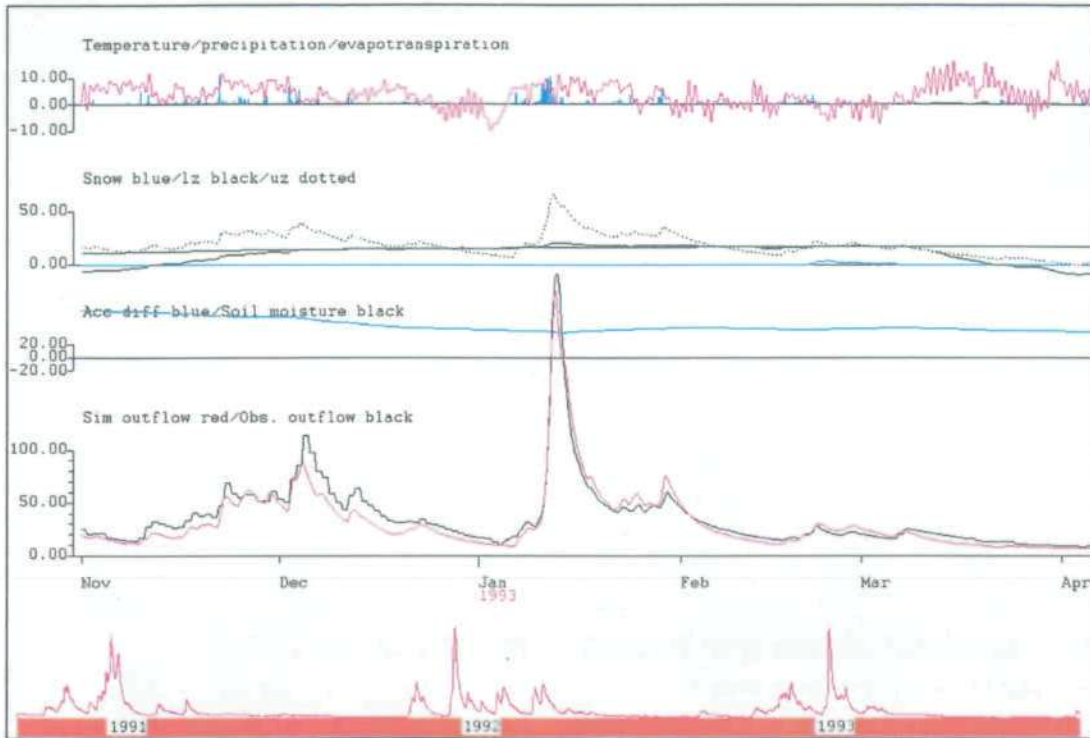


Afvoergolf december 1993 voor de definitieve parameterset

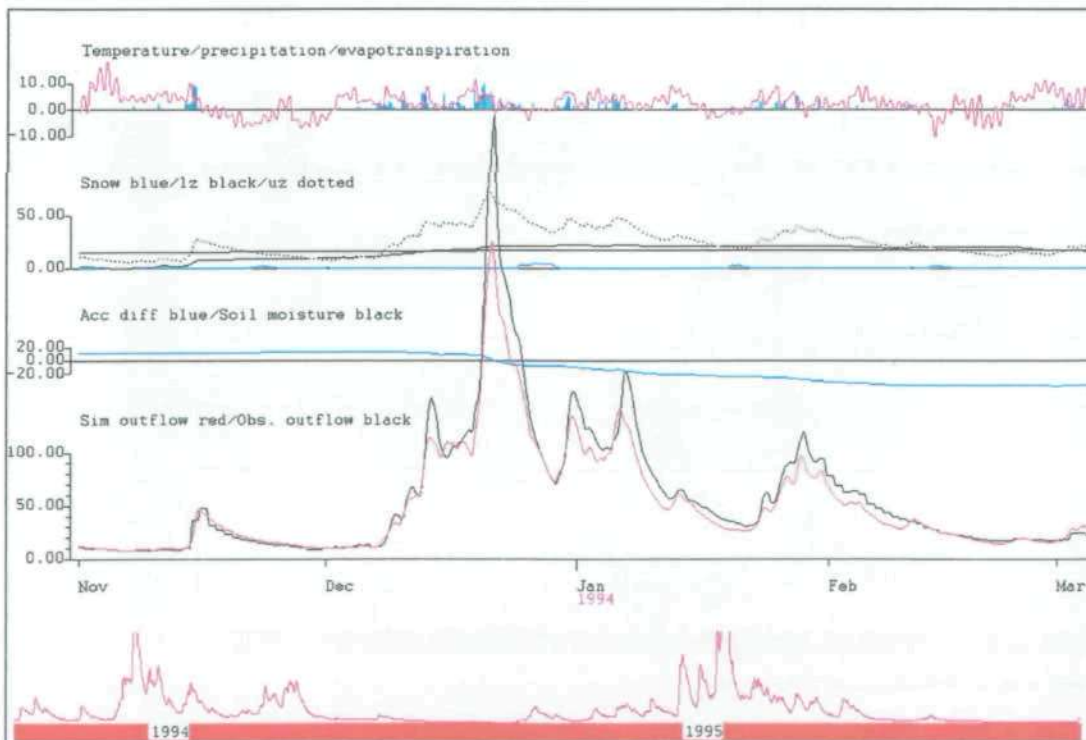


Afvoergolf januari 1995 voor de definitieve parameterset

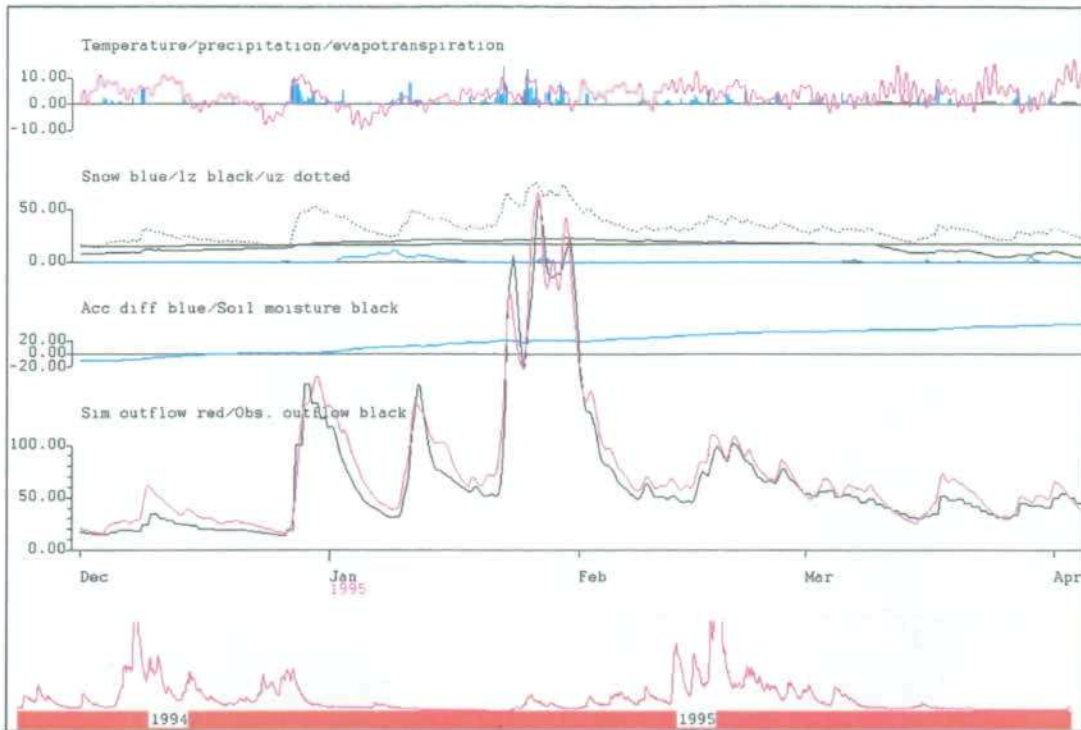
Bijlage 12 Afvoergolven 6-uurmodel definitieve parameterset



Afvoergolf januari 1993 voor de definitieve parameterset

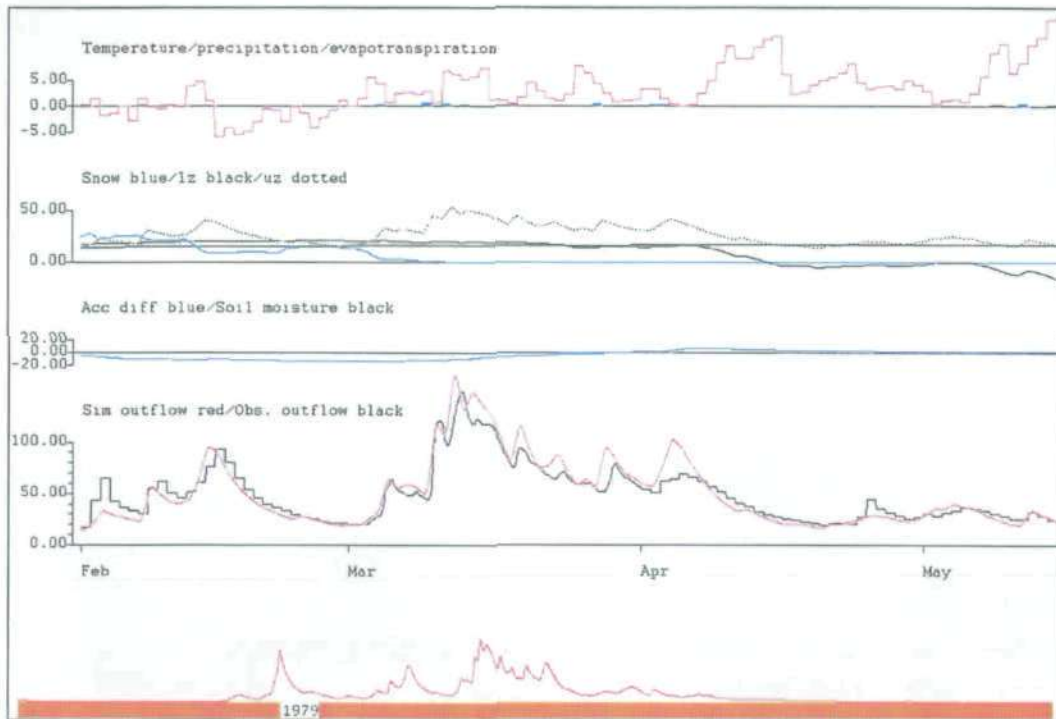


Afvoergolf december 1993 voor de definitieve parameterset

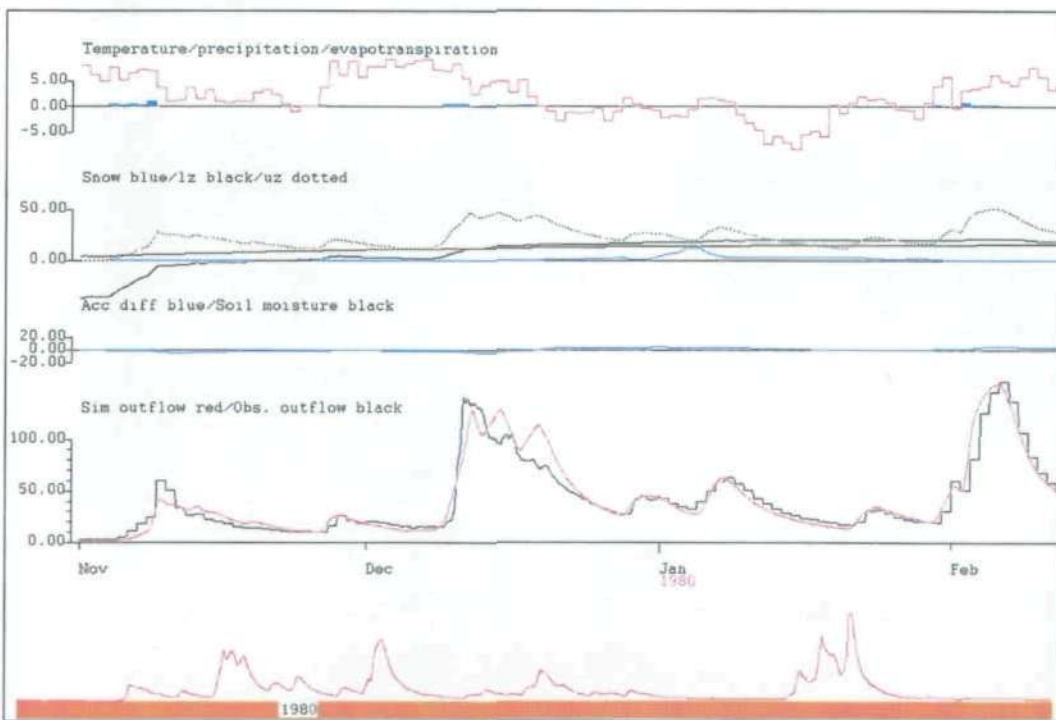


Afvoergolf januari 1995 voor de definitieve parameterset

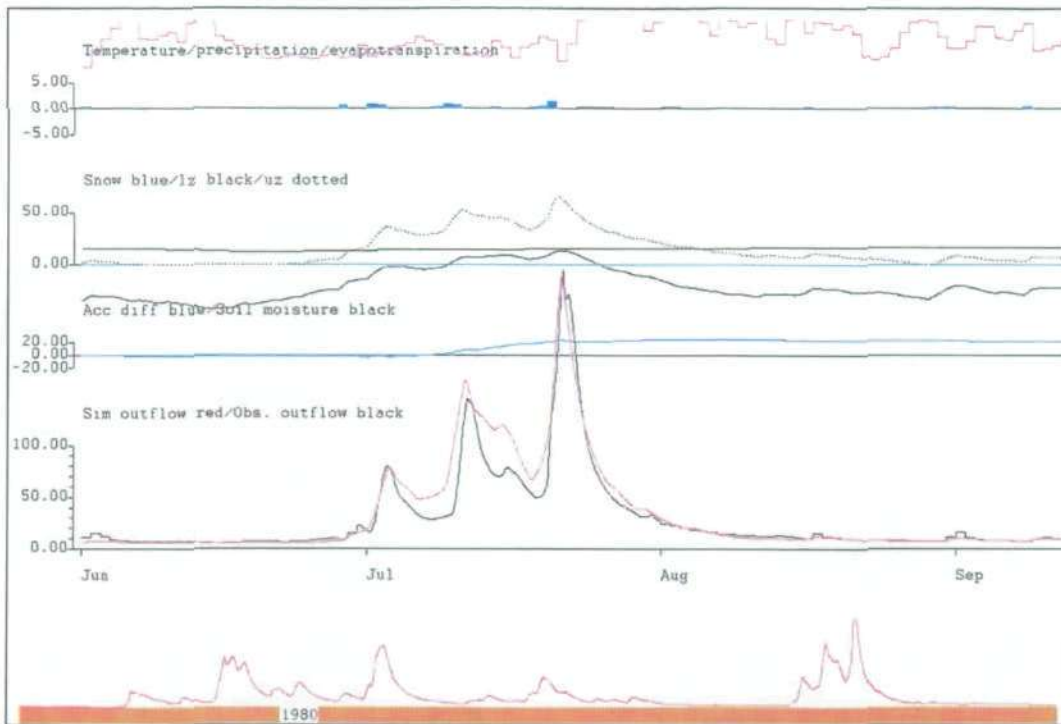
Bijlage 13 Afvoergolven 1-uurmodel definitieve parameterset



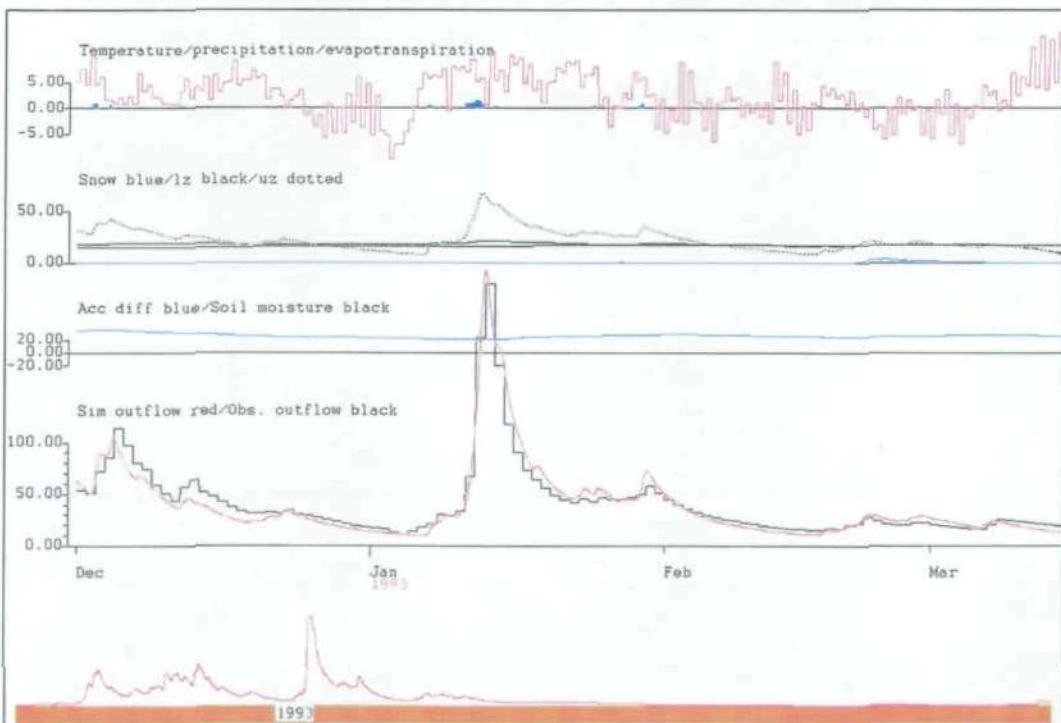
Afvoergolf maar 1979 voor de definitieve parameterset



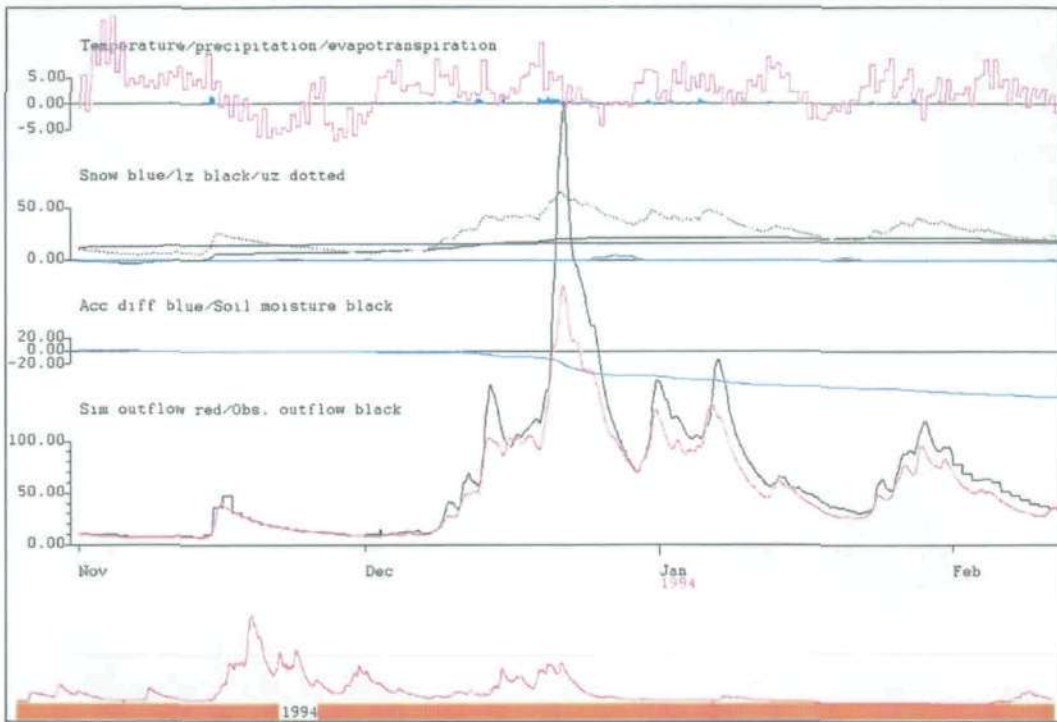
Afvoergolf december 1979 voor de definitieve parameterset



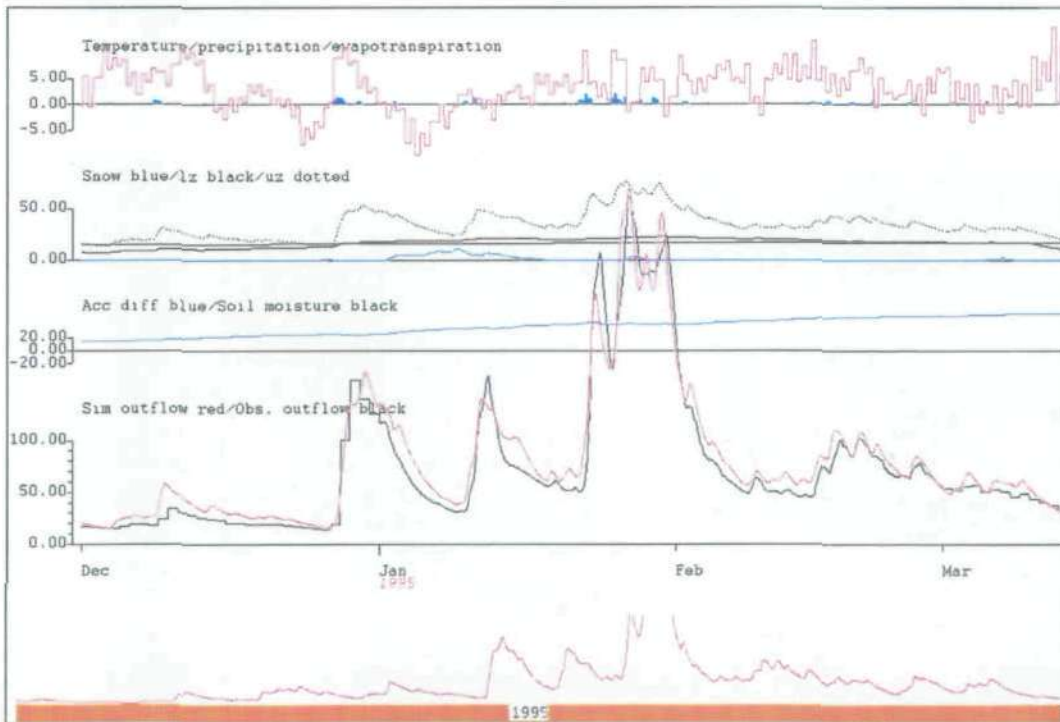
Afvoergolf juli 1980 voor de definitieve parameterset



Afvoergolf januari 1993 voor de definitieve parameterset



Afvoergolf december 1993 voor de definitieve parameterset



Afvoergolf januari 1995 voor de definitieve parameterset