

MEUSEFLOW 2.1
Laagwaterstudies
Maasstroomgebied

RIZA project RI-2988A
Oktober 2000

Willem van Deursen
Carthago Consultancy
Oostzeedijk Beneden 23a
3062 VK Rotterdam
T. 010-2130004
F. 010-2130004
wvandeursen@carthago.nl

Inhoudsopgave

1.	Inleiding	1
2.	MEUSEFLOW model	2
2.1.	Concepten van het MEUSEFLOW model	
2.2.	Gevoeligheidsanalyse gepresenteerde waterbalansmodel	
2.3.	Wijzigingen ten opzichte van MEUSEFLOW-2.0	
2.4.	Implementatie van klimaatveranderingen in het MEUSEFLOW model	
3.	Calibratie van het MEUSEFLOW model	11
3.1.	Gendron (Lesse)	
3.2.	Chaudfontaine (Vesdre)	
3.3.	Matinrive (Ambleve)	
3.4.	Tabreux (Ourthe)	
3.5.	Chooz (Maas)	
3.6.	Moha (Mehaigne)	
3.7.	Analyse van de afvoercoëfficiënt voor de calibratie-stations	
4.	Analyse van de bijdrage van de verschillende substroomgebieden aan de afvoer van de Maas	21
5.	Analyse van de situatie in 1976	26
5.1.	Inleiding	
5.2.	Beschrijving afvoerverloop situatie 1976	
6.	Met MEUSEFLOW-2.1 gesimuleerde veranderingen in afvoer als gevolg van klimaatveranderingen in het Maasstroomgebied	34
6.1.	Inleiding	
6.2.	Relatie met NOP-projecten	
6.3.	De UKHi klimaatscenarios	
6.4.	Klimaatscenarios voor het NOP project 'Effect of Climate Change on the hydrology of the river Meuse'	
6.5.	'Klimaatscenarios' ter bepaling van de gevoeligheid van het Maassysteem	
6.6.	Conclusies naar aanleiding van de gepresenteerde klimaatscenarios	

1. Inleiding

Door het RIZA is in april 1998 aan Carthago Consultancy opdracht verleend voor het bouwen van MEUSEFLOW 2.0. Dit model is een verdere uitbreiding van het MEUSEFLOW 1.0 model, een waterbalansmodel op maandbasis voor het stroomgebied van de Maas. MEUSEFLOW 2.0 is een 10 daags-model, waarmee de gevolgen van klimaatveranderingen op het hydrologisch regime van de Maas geanalyseerd kunnen worden. In December 1999 is MEUSEFLOW 2.0 opgeleverd. Resultaten van dit model zijn gebruikt in een aantal NOP studies (Nationaal Onderzoeksprogramma Klimaatverandering) en voor het project Waterbeheer 21e eeuw. Echter, in de rapportage van MEUSEFLOW 2.0 was al aangegeven dat dit model minder geschikt was voor het bepalen van de gevoeligheid van de laagwatersituaties in het Maasstroomgebied voor klimaatveranderingen. De resultaten die uit MEUSEFLOW 2.0 worden verkregen voor de laagwatersituaties beschrijven het huidige gedrag van de Maas redelijk, maar lijken niet te reageren op klimaatveranderingen.

In Januari 2000 is Carthago Consultancy een RIZA project gestart om met behulp van MEUSEFLOW de gevolgen van klimaatverandering op de laagwatersituaties in Rijn- en Maasstroomgebied nader te onderzoeken. Deel van dit project was de ontwikkeling van een model om de laagwatersituaties in verband met de drinkwatervoorziening nader te bestuderen. In Juni 2000 wordt dit project gewijzigd zodat de nadruk komt te liggen op een algemene beschrijving en modellering van de laagwatersituatie in het Maasstroomgebied. Het project moet leiden tot een verbeterde versie, het MEUSEFLOW 2.1 model. Dit rapport beschrijft de het MEUSEFLOW-2.1 model, alsmede een aantal klimaatruns die met dit model gemaakt zijn.

De vragen die voor dit project relevant zijn:

1. (Dit project) Is het mogelijk om (binnen het kader van de RHINEFLOW en MEUSEFLOW modellen) een betere beschrijving voor de laagwatersituaties in het Maasstroomgebied te krijgen?
2. (Dit project) Hoe reageert de dan aangepaste versie van MEUSEFLOW op de eerder gebruikte en nieuwe klimaatscenario's?
3. (NOP project) In hoeverre kan de aangepaste versie van MEUSEFLOW gebruikt worden om de gevolgen van klimaatveranderingen voor de laagwatersituatie van het Maasstroomgebied in kaart te brengen?

Parallel aan dit project loopt het NOP-project "Effect of Climate Change on the hydrology of the river Meuse". Doel van dit project is een aantal modellen voor het Maasstroomgebied of delen daarvan met elkaar te vergelijken. Dit project wordt uitgevoerd als een samenwerking tussen RIZA, Universiteit Wageningen, WL-Delft Hydraulics, KMI (Koninklijk Meteorologisch Instituut) in België en Carthago Consultancy. In dit NOP-project is gekozen voor het MEUSEFLOW model voor de modellering van het totale stroomgebied. Aangezien er verder geen operationele waterbalansmodellen zijn voor het gehele stroomgebied waarmee een dergelijke studie kan worden verricht, kunnen de resultaten van MEUSEFLOW alleen worden vergeleken met de resultaten van beschikbare modellen voor deelstroomgebieden. Deze gebruikte modellen voor de deelstroomgebieden zijn over het algemeen gedetailleerdere modellen dan MEUSEFLOW (zowel in procesbeschrijving als in tijdstap als in ruimtelijke resolutie). Op basis van deze vergelijking kunnen uitspraken gedaan worden over de toepasbaarheid van het MEUSEFLOW model. Het is bij het schrijven van voorliggend rapport prematuur om op de resultaten van deze vergelijking vooruit te lopen.

Dank is verschuldigd voor discussies en meedenken over deze problematiek aan Piet Warmerdam, Paul Torfs en Marcel de Wit, Universiteit Wageningen; Aleksandra Jaskula-Joustra, Anne Wijbenga, Sander Bastings, Siebolt Folkertsma en Udo Boot, RWS Directie Limburg; Hendrik Buiteveld, RWS RIZA; Hans Middelkoop, UU; Jaap Kwadijk en Marcel Ververs, WL-Delft Hydraulics.

2. Meuseflow model

2.1 Concepten van het Meuseflow model

MEUSEFLOW 2.1 is een waterbalans model voor het Maas stroomgebied. Het betreft hier een verbeterde versie van het MEUSEFLOW 2.0 model. Een soortgelijke model is ontwikkeld voor het Rijnstroomgebied.

De hydrologische kringloop in een stroomgebied kan worden beschreven als een combinatie van reservoirs en stromen. Een waterbalans wordt dan gebruikt voor het beschrijven van de omzetting van neerslag in afvoer in deze kringloop. Het 'water budget' voor elk van de compartimenten in deze waterbalans is te beschrijven als een simpele massabalans:

$$\text{Veranderingen in component} = \text{Instroming} - \text{Uitstroming}.$$

Een uitgebreide beschrijving van de concepten van Meuseflow is te vinden in de literatuur over Rhineflow (Kwadijk, 1993; Van Deursen, 1995, Middelkoop et al., 2000) en de voorbereidende rapporten voor Meuseflow (Van Deursen 1997, 1998, 1999). Voor grotere stroomgebieden en rivieren kan de waterbalans beschreven worden met zeven componenten en variabelen (naamgeving in overeenstemming met de rapporten van RHINEFLOW en MEUSEFLOW, zie figuur 2.1):

- De verdeling van neerslag ('Precipitation') naar locatie en tijdstip. Neerslag is de belangrijkste instroming van water in het stroomgebied. Precipitation wordt als functie van temperatuur verdeeld over 'snowfall' en 'rain'.
- Sneeuw opslag reservoir dat wordt gevoed door de neerslag ('snowfall') en dat water verliest als gevolg van sneeuwsmelt ('snowmelt').
- 'Direct runoff' flux, een deel van de neerslag infiltreert niet in de bodem maar komt direct tot afstroming.
- Bodemvocht reservoir ('Soil') dat wordt gevoed door neerslag en dat water verliest aan verdamping, afvoer en aan het diepe grondwater.
- Actuele evapotranspiratie als functie van potentiële verdamping, landgebruik en beschikbare hoeveelheid bodemvocht.
- 'Excess water' flux beschrijft de neerwaarts gerichte flux voor bijvulling van het grondwater en de snelle afvoercomponent van de baseflow. Deze flux wordt gesplitst in een snelle component en een langzame component onder invloed van de 'separation coefficient'.
- Diep grondwater reservoir ('groundwater'), dat wordt gevoed door het bodemvocht reservoir en dat water afstaat aan de 'sloFlo' component.
- 'kwikFlo', en 'sloFlo' Snelle afvoer en baseflow, als functie van grondwater, bodemvocht en bodemwatercapaciteit en de 'recession coefficient' van het diepe grondwater reservoir. Afvoer 'geproduceerd' op een locatie ('Runoff') volgt het drainage patroon van het stroomgebied naar het uitstroompunt.

De hierboven genoemde processen worden gestuurd door de volgende variabelen.

- De verdeling van temperatuur naar locatie en tijdstip. Temperatuur is de belangrijkste controleparameter voor opslag en smelten van sneeuw en de hoeveelheid potentiële verdamping in het stroomgebied.
- De verdeling van referentieverdamping naar locatie en tijd. De referentieverdamping wordt routinematig bepaald door de meteorologische instituten in het stroomgebied. Referentieverdamping bepaald de 'potentiële verdamping' in het stroomgebied.
- De verdeling van landgebruik in het stroomgebied. Deze bepaalt de relatie tussen referentieverdamping en potentiële verdamping voor het stroomgebied. Tevens heeft landgebruik een relatie met de 'Direct runoff'-coëfficiënt en de 'separation coefficient'.
- De verdeling van bodemsoorten in het stroomgebied. Deze verdeling bepaalt maximale opslagcapaciteit van het bodemvocht reservoir (waterholding capacity: whold), en is daarmee in hoge mate bepalend voor de 'Excess water' flux en de actuele verdamping.
- Geohydrologische beschrijving van het gebied. Deze beschrijving wordt gebruikt voor het vaststellen van de 'separation coefficient' en de 'recession coefficient'.

In het Meuseflow model worden een aantal afgeleide stuurparameters bepaald:

- whold: de 'water holding capacity' van het 'soil reservoir' in mm. Deze waarde geeft de maximaal in de bodem op te slaan hoeveelheid vocht. Fysisch is deze waarde te beschouwen als het verschil tussen veldcapaciteit en verwelkingspunt van de bodem. Voor dikke bodems met een hoog porienvolume heeft deze parameter een hogere waarde dan voor dunne bodems met een relatief laag porienvolume.
- DirectRunoffThreshold en DirectRunoffFraction: twee parameters die bepalen welk deel van de neerslag direct tot afstroming zal komen. De DirectRunoffThreshold bepaalt welke waarde neerslag minimaal moet hebben om 'Direct Runoff' te genereren, de DirectRunoffFraction bepaalt welk deel van de neerslag dan tot directe afstroming komt.
- sep: de 'Separation Coefficient'. Deze coëfficiënt bepaalt de fractie van de excess water die direct tot afvoer leidt (de quickflow component) en welk deel door het grondwaterreservoir wordt geleid.
- rc: de recession coëfficiënt. Het grondwaterreservoir in Meuseflow wordt gerepresenteerd als een lineair reservoir waarvoor geldt dat de uitstroom een constante fractie van het volume in dit reservoir is:
 $SlowFlow = GroundwaterVolume/rc$

De volgende formules (PCRaster formulering) worden gebruikt voor het beschrijven van de bodemwaterbalans:

peCrop	= PE * CropFactor
DirectRunoff	= DirectRunoffFraction * max(Rainfall - DirectRunoffThreshold)
SoilInput	= Rainfall - DirectRunoff
PEff	= SoilInput - peCrop
ST0	= Soilstor
APWL	= max(0, -whold*ln(ST0/whold)
APWL1	= APWL - min(0, PEff)
ST1	= whold*exp(-APWL1/whold)
dST	= ST0 - ST1
AE	= if(PEff > 0, peCrop, SoilInput + dST)
ST2	= ST0 + SoilInput - AE
Excess	= max(0, ST2 - whold)
Shortage	= max(0, whold - ST2)
Upward	= Shortage * UpwardFraction
Soilstor	= ST0 + SoilInput - AE - Excess + Upward
kwikFlo	= sep * Excess
Excess1	= Excess - kwikFlo
gwStor	= gwStor + Excess1 - sloFlo - Upward
sloFlo	= gwStor / rc
Runoff	= DirectRunoff + kwikFlow + sloFlo

De gebruikte parameters worden bepaald als functie van

$rc = f(\text{geohydrologie})$

$sep = f(\text{geohydrologie, bodem})$

$whold = f(\text{bodem})$

Opgemerkt wordt dat de exacte waarde van de sep en rc parameter bepaald wordt door calibratie.

Zoals alle voorgangers van MEUSEFLOW is ook dit model gebouwd in een GIS omgeving (PCRaster). MEUSEFLOW-2.1 is evenals MEUSEFLOW-2.0 een tien-daags waterbalans model, met een geografische resolutie van $1 \times 1 \text{ km}^2$. Vanwege de rekentijd benodigd om een volledige run met MEUSEFLOW-2.1 te maken (ca 3 uur) is een geaggregeerde versie MEUSEFLOW-LIGHT gemaakt. In deze versie worden de berekeningen voor de substroomgebieden geaggregeerd. Dit betekent dat de invoer van MEUSEFLOW-LIGHT geaggregeerde waarden van de ruimtelijk gedistribueerde variabelen en parameters van MEUSEFLOW-2.1 bevat. Met MEUSEFLOW-LIGHT kan nu snel een groot aantal parameterwaarden doorgerekend worden, waarna deze waarden weer toegekend kunnen worden aan de ruimtelijk gedistribueerde variabelen van MEUSEFLOW-2.1. Ook is het, gezien de rekensnelheid van MEUSEFLOW-LIGHT veel gemakkelijker om in deze versie de invloed van veranderde procesformuleringen en toevoegen van processen te analyseren.

2.2. Gevoeligheidsanalyse gepresenteerde waterbalansmodel.

Deze sectie beschrijft de gevoeligheid van het hierboven gepresenteerde model voor verschillende sets van invoervariabelen zoals voor kunnen komen in het stroomgebied van de Maas. De hier gepresenteerde verdeling van invoerparameters wordt alleen gebruikt voor de gevoeligheidsanalyse. Hierbij worden de volgende situaties onderscheiden:

- Verschillen in bodemsoort en bodemdikte
- Verschillen in recessiecoëfficiënt en separation coëfficiënt voor het grondwaterreservoir
- Verschillen in direct runoff parameters

Om de gevoeligheid van het modelconcept in beeld te brengen is gekozen voor een fictieve verdeling van invoergegevens. Invloed van de verschillende parameterwaarden worden gegeven als veranderingen in afvoer zoals geproduceerd door dit model. Als invoer voor de gevoeligheidsanalyse gebruiken we een set van neerslag, temperatuur en gewasverdamping gegevens voor (een deel van) het Maasstroomgebied gedurende twee achtereenvolgende jaren. Zie figuur 2.2.

Er worden een aantal karakteristieke situaties beschreven.

In eerste instantie wordt gekozen voor een matig dikke bodem (whold = 200 mm) op een redelijk goed doorlatende ondergrond (sep = 0.2, rc=90 day⁻¹). Voor dit model geldt: DirectRunoffThreshold=4 mm/day en DirectRunoffCoefficient = 0.1. Het aandeel van de verschillende componenten van de gegenereerde afvoer is gegeven in figuur 2.3. Het bodemvochtvolume, de potentiële en actuele gewasverdamping zijn gegeven in figuur 2.4.

De tweede situatie betreft een relatief dunne bodem. Deze bodem reageert hard op neerslagoverschot, en veel van de excess neerslag zal direct tot afvoer leiden. Dit blijkt uit een lagere waarde voor de DirectRunoffThreshold en een hogere waarde voor de DirectRunoffCoefficient. Tevens is de separation coëfficiënt hoger gekozen, hetgeen betekent dat er relatief veel kwikFlo wordt gegenereerd. De gegenereerde afvoer en het aandeel van de verschillende componenten wordt gegeven in figuur 2.5. Het bodemvochtvolume, de potentiële en actuele gewasverdamping worden gegeven in figuur 2.6.

De derde situatie betreft een relatief dikke bodem. Deze bodem heeft een hoge waarde voor de DirectRunoffThreshold. Separationcoëfficiënt is op 0 gesteld, deze bodem genereert geen kwikFlo, maar alleen maar SlowFlow. De gegenereerde afvoer en het aandeel van de verschillende componenten wordt gegeven in figuur 2.7. Het bodemvochtvolume, de potentiële en actuele gewasverdamping worden gegeven in figuur 2.8.

De vierde situatie betreft dezelfde bodem als in geval 3, alleen wordt de rc-waarde van de ondergrond hoger. Dit representeert een ondergrond met een hogere kD waarde. De gegenereerde afvoer en het aandeel van de verschillende componenten wordt gegeven in figuur 2.9. Het bodemvochtvolume, de potentiële en actuele gewasverdamping worden gegeven in figuur 2.10.

De verschillende situaties zijn samengevat in tabel 2.1.

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
whold	200	50	400	400
DirectRunoffCoefficient	0.1	0.2	0.1	0.1
DirectRunoffThreshold	4	2	6	6
SeparationCoefficient	0.2	0.4	0	0
RC-value	90	90	90	150

Tabel 2.1 Overzicht situaties gevoeligheidsanalyse

De reacties van de hierboven beschreven situaties worden vergeleken in figuur 2.11 t/m 2.13.

Duidelijk is dat in de door MEUSEFLOW-2.1 gebruikte procesbeschrijvingen een groot deel van de afvoer bepaald wordt door de SloFlo component. Naarmate de bodems dikker worden (case 3) is de SloFlo component zelfs allesoverheersend, en worden de andere componenten alleen in perioden van grote neerslagoverschotten van belang. De perioden van lage afvoer (zomersituaties) worden bij alle cases in hoge mate door de SloFlo component bepaald, waarbij incidenteel de andere componenten voor een tijdelijke verhoging van de afvoer zorgen.

2.3. Wijzigingen ten opzichte van Meuseflow 2.0

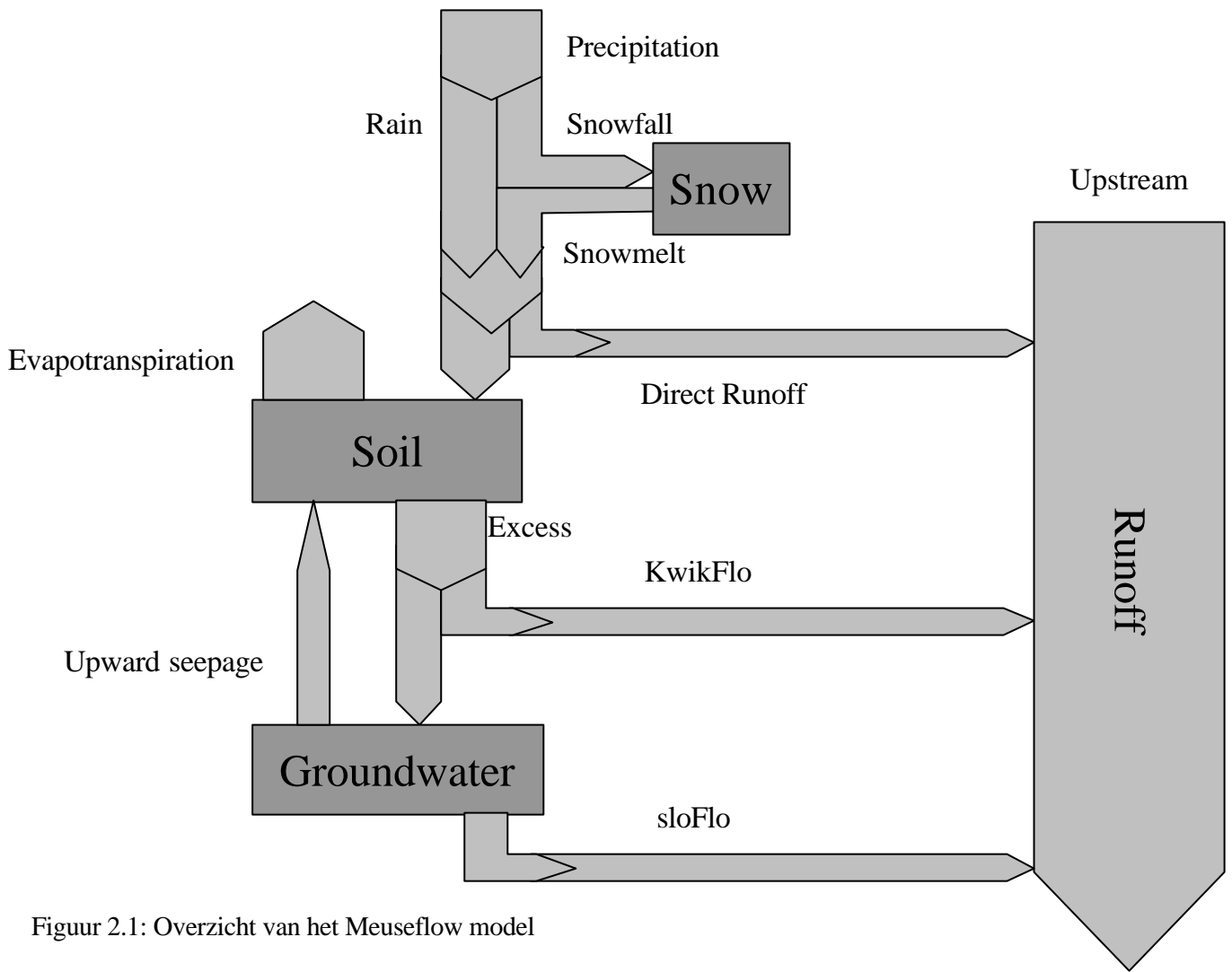
In het MEUSEFLOW 2.0 model zijn een aantal tekortkomingen geconstateerd (Van Deursen, 2000). Als gevolg van de constatering van deze tekortkomingen zijn de volgende wijzigingen aangebracht ten opzichte van MEUSEFLOW 2.0

1. Er is in MEUSEFLOW 2.0 geen terugkoppeling uit het diepere grondwater naar de bodem. Hierdoor was er het model in situaties met een neerslagtekort (potentiële verdamping groter dan neerslag) geen koppeling tussen het diepere grondwater en het bodemcompartiment. Water wat in het model eenmaal in het grondwaterreservoir is kon onder geen enkele omstandigheid bijdragen aan de verdamping. Andere modellen (met name het Wageningen model) hebben een dergelijke koppeling wel, en levert het diepere grondwater 's zomers water na aan de bodem. MEUSEFLOW 2.1 introduceert een upward seepage term.
2. In MEUSEFLOW 2.0 wordt excess neerslag eerst gebruikt om tekorten in het bodemvocht op te vullen. Pas als de bodem vol is kan er afvoer gegenereerd worden. In situaties met een tekort aan bodemvocht (het bodemreservoir is niet volledig gevuld) kan er door deze aanname geen afvoer plaatsvinden anders dan de recessie flow van het diepere grondwater: de baseflow. In werkelijkheid genereren buien in de zomer in situaties waarin neerslag de infiltratiecapaciteit van de bodem benadert en overstijgt een zeer duidelijk signaal in de afvoer. Dit signaal wordt door MEUSEFLOW 2.0 onvoldoende gereproduceerd, doordat in het model deze neerslag eerst gebruikt wordt om het bodemreservoir volledig op te vullen. Om het gedrag van het model meer in overeenstemming te krijgen met de geobserveerde processen is een Direct Runoff component geïntroduceerd.
3. Het toevoegen van nieuwe componenten in het model geeft aanleiding tot een nieuwe calibratie van het model. Daarboven is het noodzakelijk gebleken bij de calibratie meer aandacht aan de laagwatersituaties te besteden. In de rapportage van MEUSEFLOW 2.0 wordt al gewezen op het feit dat afregelen van het model op basis van het Nash-Sutcliff criterium niet altijd zorgt voor een bevredigende afregeling van de laag- en hoogwatersituaties. Gewezen wordt op het feit dat ook de frequentieverdeling van overschrijdingskansen van karakteristieke afvoerwaarden meegenomen dient te worden in de calibratie. Dit is in MEUSEFLOW 2.0 ook inderdaad uitgevoerd, echter met het oog op de hoge afvoeren. Nadere analyse van de resultaten van MEUSEFLOW 2.0 met betrekking tot de laagwatersituatie toonde aan dat de bijbehorende afvoeren niet goed gesimuleerd werden. In MEUSEFLOW 2.1 is dus een volledig hernieuwde calibratie uitgevoerd, waarvan de resultaten zijn beschreven in hoofdstuk 3.
4. Experimenten zijn uitgevoerd met een modelbeschrijving waarin voor de diepere grondwatercomponent een limiet gesteld werd: een maximale hoeveelheid water die zich in het diepere grondwater kan bevinden. Extra water zou direct tot afvoer moeten komen. Hoewel deze procesbeschrijving zeker een fysische onderbouwing heeft, is het met de beschikbare gegevens onmogelijk gebleken uitspraken over de actuele waarden van deze limiet te doen. Ook de modelresultaten werden niet aantoonbaar beter door het toevoegen van deze parameter. Om deze reden is besloten deze (momenteel niet-te-bepalen) term alsnog te laten vallen.

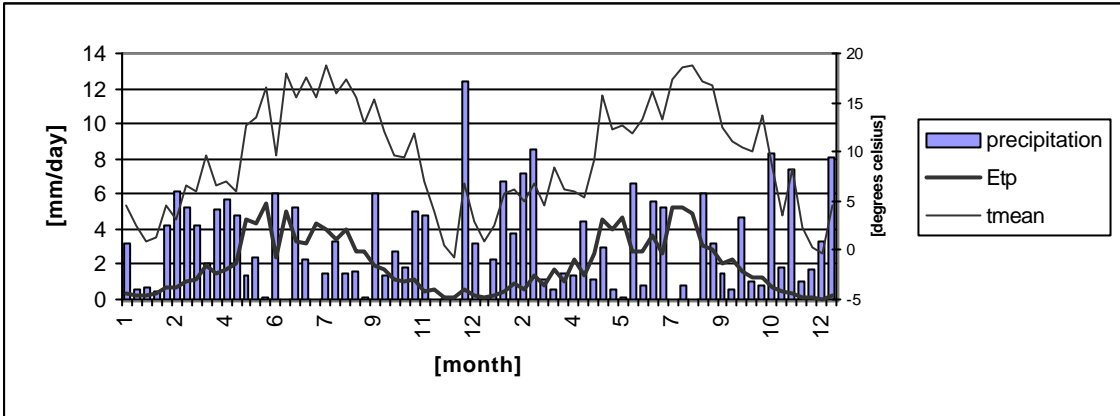
Hoewel bij de ontwikkeling van MEUSEFLOW-2.0 de tijdstap van 1 maand is teruggebracht tot 10 dagen, blijft de gekozen tijdstap groot ten opzichte van een aantal belangrijke processen in waterbalansmodellen. Zoals ook in de rapportages rondom RHINEFLOW en MEUSEFLOW-2.0 is aangegeven is het bij deze tijdstap niet mogelijk en niet nodig om looptijden in het rivierenstelsel te analyseren. De reden hiervoor is dat aangenomen wordt dat water wat in het rivierstelsel terechtkomt binnen de tijdstap ook bij het afvoerpunt terechtkomt. Alle looptijden worden dus verondersteld korter dan 10 dagen te zijn. Hoewel hiervoor geen gedetailleerde studie is gedaan, lijkt dit uitgangspunt op basis van de analyses van Berger (1992) aannemelijk: de looptijden worden eerder in uren dan in dagen gerekend. Tevens is het van belang te vermelden dat deze modelaanpak nog geen nauwkeurige analyse van infiltratie en de relatie tussen neerslag en verdamping toelaat. Voor de hier gegeven formuleringen van direct runoff en effectieve neerslag geldt dat zij in een aantal gevallen (met name in geval van korte intensieve buien) een afwijking zullen vertonen. Deze problemen kunnen worden opgelost door een kleinere tijdstap te kiezen, echter stelt dit dan erg grote eisen aan de database en procesformuleringen. Duidelijk is dat het vergelijk met de gedetailleerdere modellen op moet leveren hoe ernstig deze tekortkomingen zijn voor het beoogde doel.

2.4. Implementatie van klimaatveranderingen in Meuseflow model

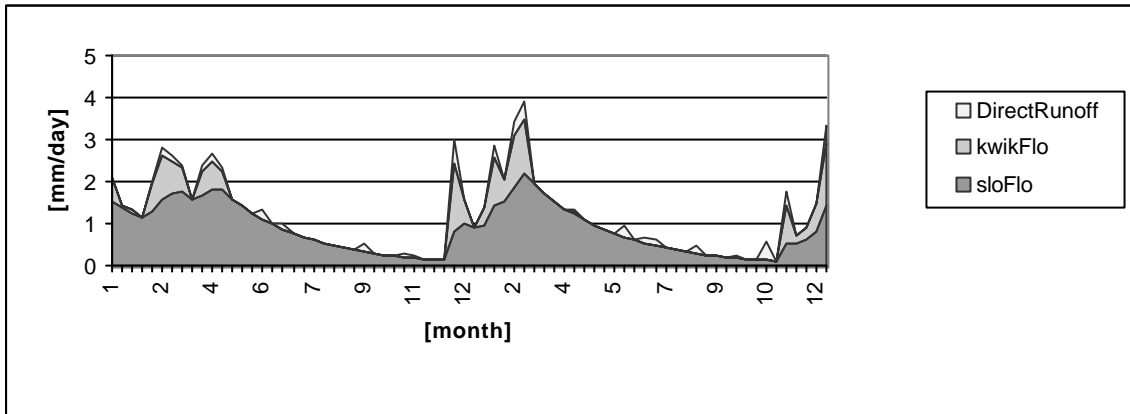
De problematiek rondom het implementeren van klimaatveranderingen in het Meuseflow model is beschreven in de eerdere rapporten voor dit project (Van Deursen, 1999).



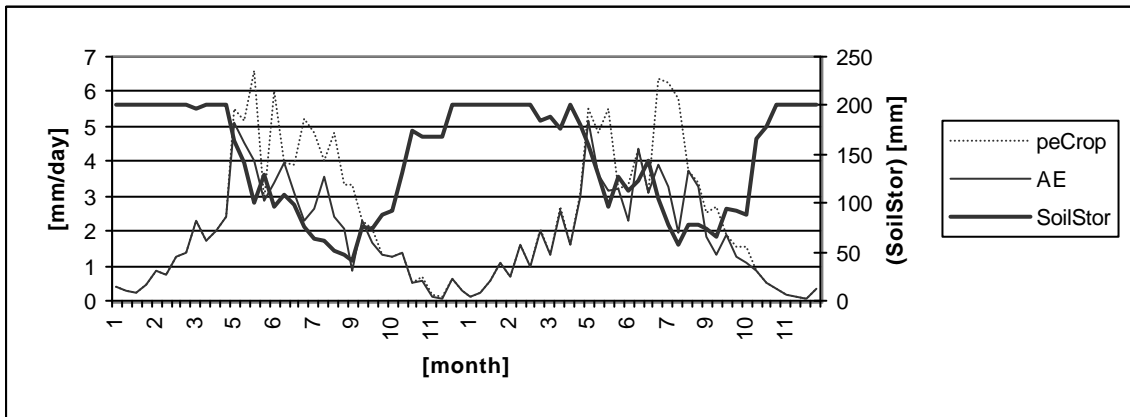
Figuur 2.1: Overzicht van het Meuseflow model



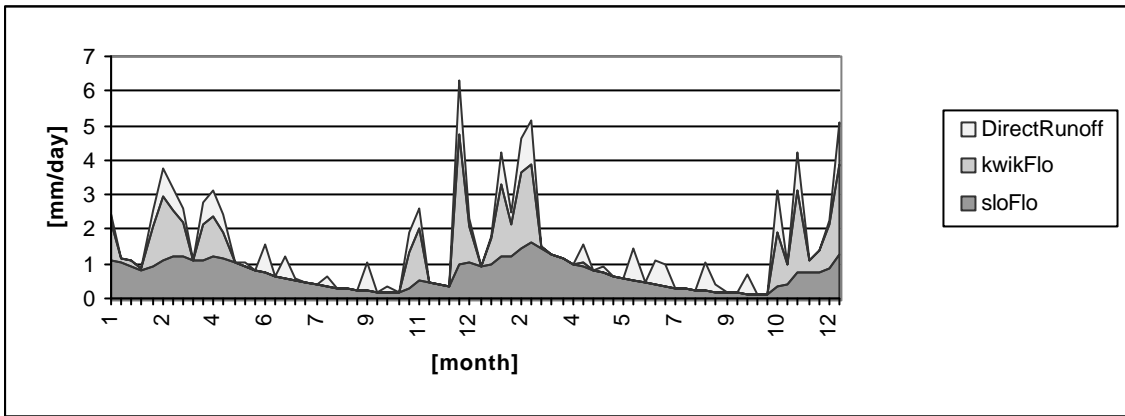
Figuur 2.2 Overzicht invoervariabelen gevoeligheidsanalyse



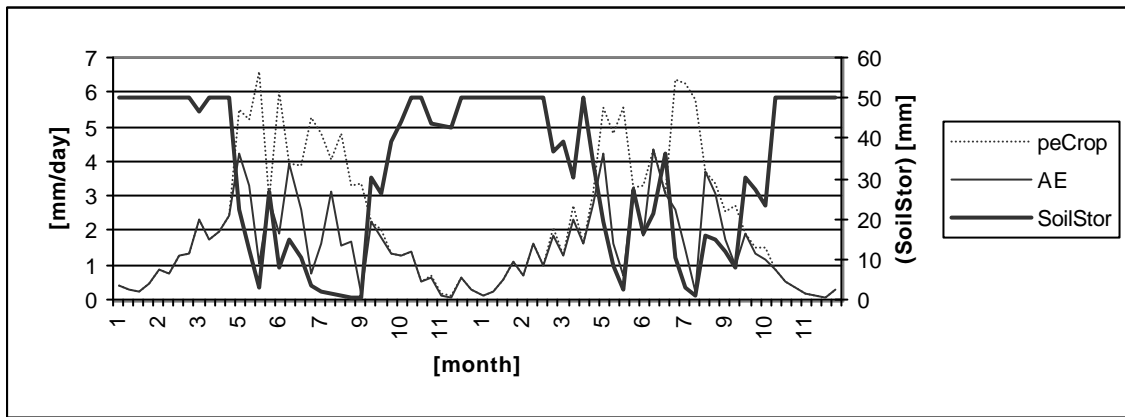
Figuur 2.3 Aandeel verschillende afvoer componenten (Case 1)



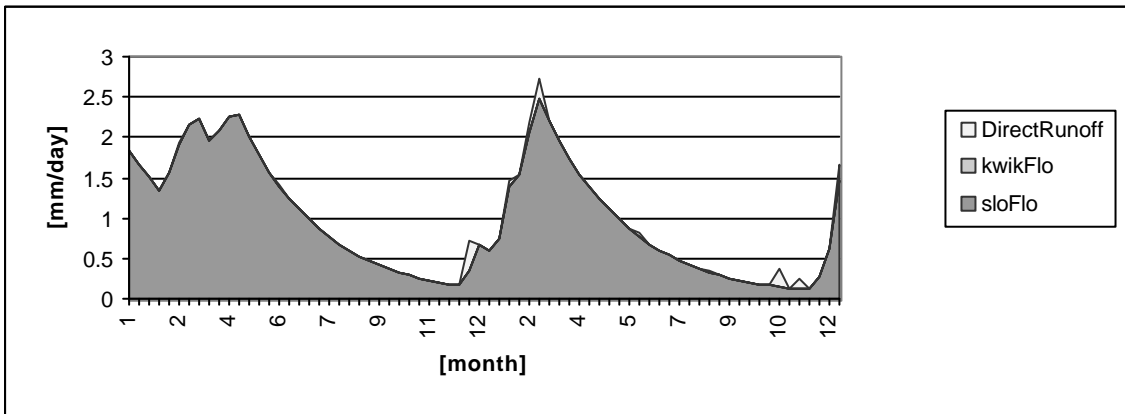
Figuur 2.4 Waterbalans, potentiële en actuele evapotranspiratie (Case 1)



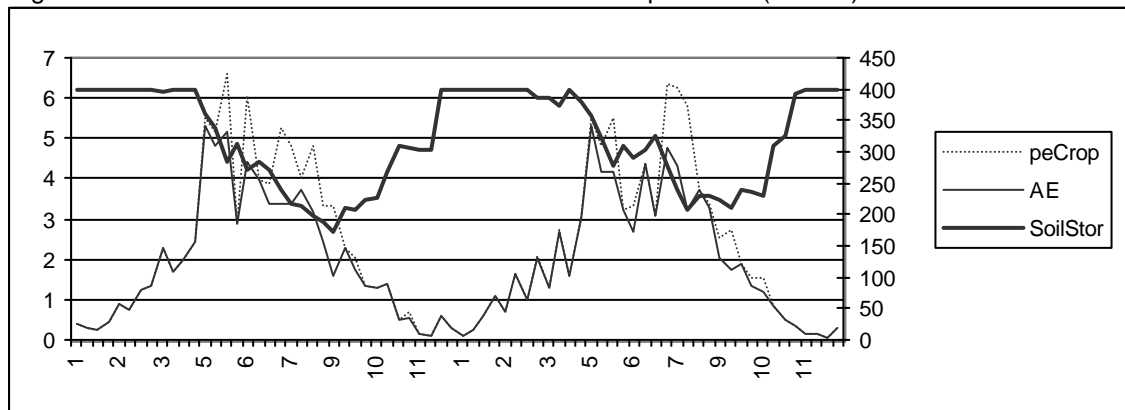
Figuur 2.5 Aandeel verschillende afvoer componenten (Case 2)



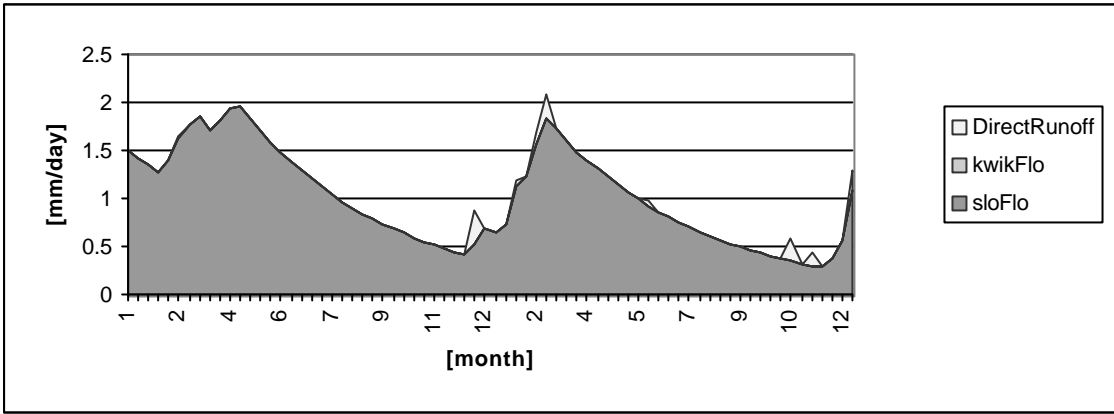
Figuur 2.6 Waterbalans, potentiële en actuele evapotranspiratie (Case 2)



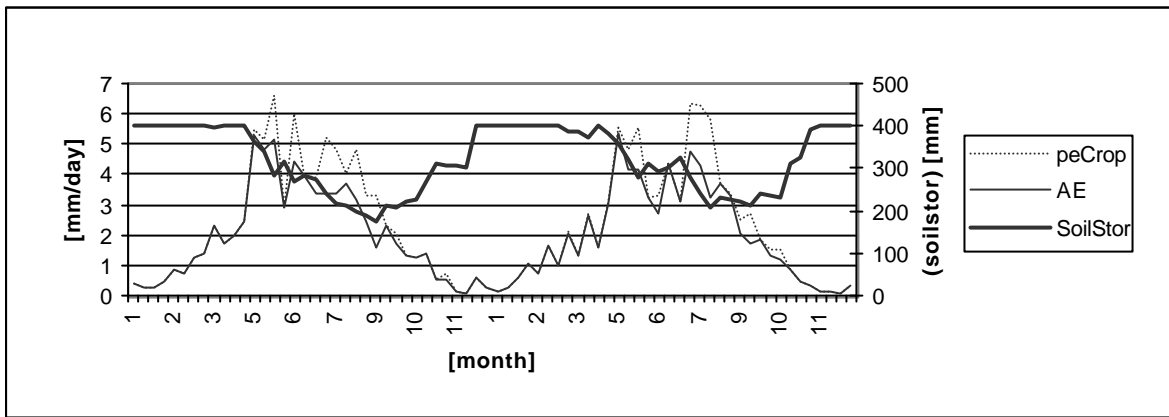
Figuur 2.7 Aandeel verschillende afvoer componenten (Case 3)



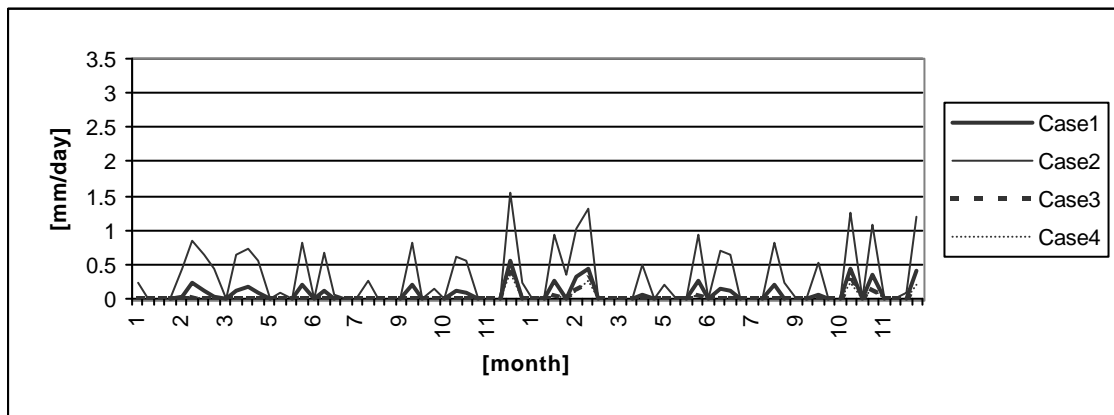
Figuur 2.8 Waterbalans, potentiële en actuele evapotranspiratie (Case 3)



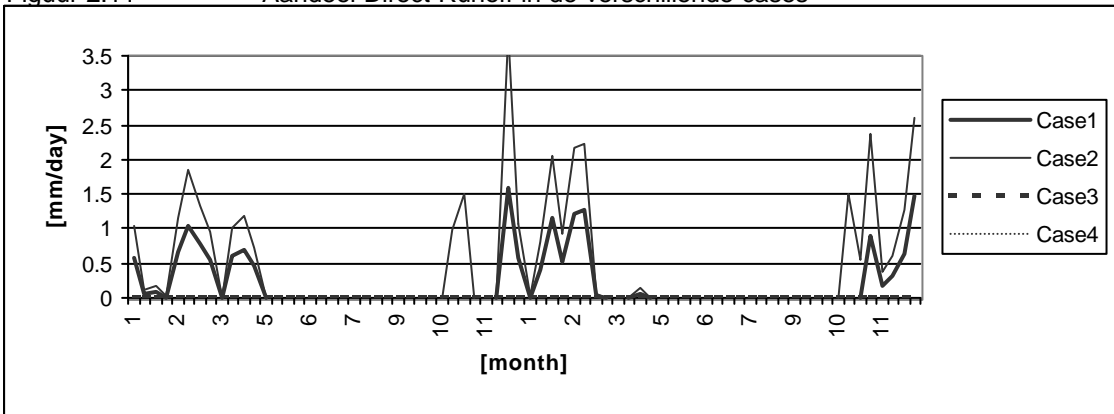
Figuur 2.9 Aandeel verschillende afvoer componenten (Case 4)



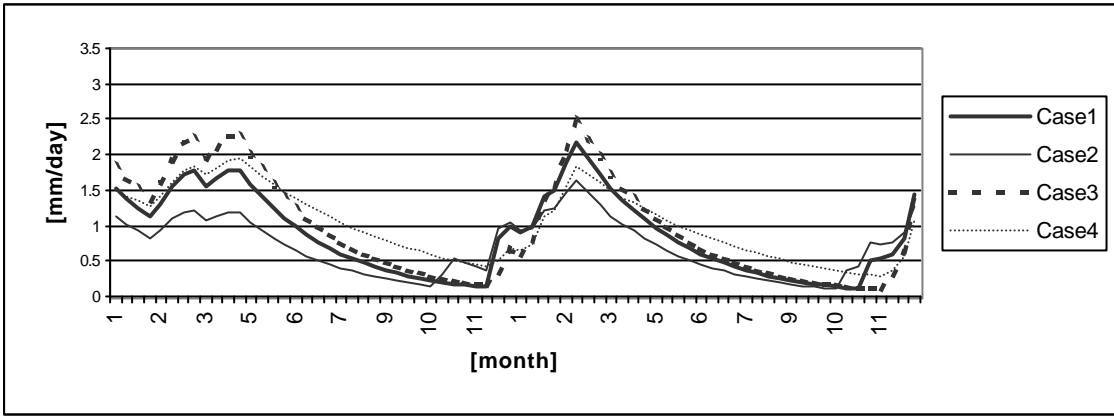
Figuur 2.10 Waterbalans, potentiële en actuele evapotranspiratie (Case 4)



Figuur 2.11 Aandeel Direct Runoff in de verschillende cases



Figuur 2.12 Aandeel KwikFlo in de verschillende cases



Figuur 2.13 Aandeel SloFlo in de verschillende cases

3. Calibratie van het Meuseflow model

Voor de Maas zijn voor de volgende stations afvoerreeksen gebruikt voor calibratie.

- Gendron (Lesse)
- Chaudfontaine (Vesdre)
- Martinrive (Ambleve)
- Tabreux (Ourthe)
- Chooz (Maas)
- Moha (Mehaigne)

Een korte karakterisering van deze stations is gegeven in tabel 3.1. De locaties van de afvoerstations is gegeven in figuur 3.25.

Opgemerkt wordt dat de linkeroever van de Maas (het westelijke deel van het stroomgebied) niet goed vertegenwoordigd is in deze verzameling afvoerstations. Alleen het station Moha bevindt zich in dit gedeelte. Duidelijk is dat de twee delen van karakter verschillen: de Ardennen bevinden zich op de oostelijke oever, terwijl de westelijke oever minder steil is. Echter, hoewel er wel een aantal meetstations aanwezig zijn in de Sambre (rivier op de linker oever), zijn de meetwaarden van deze stations binnen dit project niet beschikbaar gekomen. Een deel van de problemen wordt geweten aan het feit dat het hier metingen van het waterniveau betreft, wat in de Sambre in hoge mate beïnvloed wordt door hoge afvoeren op de Maas. De afvoerschattingen die hieruit afgeleid zouden moeten worden, worden hierdoor als onbetrouwbaar betiteld. Indien betrouwbare gegevens voor de Sambre beschikbaar komen zal het model voor dit gebied alsnog gecalibreerd moeten worden.

Station	Rivier	Oppervlakte bovenstrooms van meetstation	Aandeel oppervlakte bovenstrooms van Borgharen	Meetreeks
Gendron	Lesse	1314 km ²	0.062	1968-1995
Chaudfontaine	Vesdre	677 km ²	0.032	1968-1995
Martinrive	Ambleve	1044 km ²	0.049	1968-1995
Tabreux	Ourthe	1597 km ²	0.075	1968-1995
Chooz	Maas	10120 km ²	0.476	1967-1995
Moha	Mehaigne	343 km ²	0.016	1969-1995

Tabel 3.1 Meetstations gebruikt voor calibratie (Oppervlakte naar Berger, 1992)

3.1. Gendron (Lesse)

De oppervlakte van het stroomgebied bovenstrooms van dit meetpunt is 1314 km². Berger (1992) karakteriseert de Lesse as een typische Ardennenrivier. De bron ligt op 403 m +NAP, de monding in de Maas op 89 m +NAP. De totale lengte van de rivier is 83 km. Geologisch betreft het afzettingen uit Devoon en Carboon, die plaatselijk kalkrijk zijn en karstverschijnselen vertonen. Circa 40% van de oppervlakte is bedekt met bos. De (gemeten) jaarafvoeren en het verloop van de gemiddelde maandelijkse (gemeten) afvoer van het stroomgebied van de Lesse zijn gegeven in de figuren 3.1 en 3.2. De calibratie voor het station Gendron voor de jaren 1988-1992 is gegeven in figuur 3.3. Figuur 3.4 toont de gemeten en berekende verdeling over de verschillende afvoerclassen.

3.2. Chaudfontaine (Vesdre)

De Vesdre is een zijrivier van de Ourthe. De oppervlakte van het stroomgebied bovenstrooms van dit meetpunt is 677 km². Een deel van het Vesdre stroomgebied bestaat uit de Hautes Fagnes (Hoge Venen), een relatief vlak gebied op 600 meter hoogte. De Haute Fagnes is een veengebied met een relatief hoog bodemvochtgehalte. De Hoge Venen reageren relatief langzaam op neerslag. Het gedeelte van de Vesdre dat niet in de Haute Fagnes ligt heeft steilere hellingen, en geeft aanleiding tot snellere reactie op neerslag. Een consequentie van deze snelle reactie is een water tekort gedurende de zomer. Het gebied is voor ca 44% bedekt met bos (Berger, 1992). Het overzicht voor de afvoeren van Chaudfontaine is gegeven in figuren 3.5 en 3.6. De calibratie voor het station Chaudfontaine voor de jaren 1988-1992 is gegeven in figuren 3.7 en 3.8.

3.3. Martinrive (Ambleve)

De Ambleve is een zijrivier van de Ourthe. De oppervlakte van het stroomgebied bovenstrooms van dit meetpunt is 1044 km². De Ambleve ontspringt in de buurt van Rivage op 584 m +NAP. De Ambleve reageert snel op neerslag. 38 % van het stroomgebied is bedekt met bos. Het overzicht van de afvoeren van Martinrive is gegeven in figuren 3.9 en 3.10. De calibratie voor het station Martinrive voor de jaren 1988-1992 is gegeven in figuren 3.11 en 3.12.

3.4. Tabreux (Ourthe)

De oppervlakte van het stroomgebied bovenstrooms van dit meetpunt is 1597 km². Boven Tabreux wordt de Ourthe gevormd door twee takken, de Ourthe Occidentale en de Ourthe Orientale. De reio heeft een bergachtig karakter, en een relatief grote gradient in de rivier. Plaatselijk wordt het stroomgebied gekenmerkt door slecht doorlatende gronden. Het overzicht van de afvoeren van Tabreux is gegeven in figuren 3.13 en 3.14. De calibratie voor het station Tabreux voor de jaren 1988-1992 is gegeven in figuren 3.15 en 3.16.

3.5. Chooz (Maas)

De oppervlakte van het stroomgebied bovenstrooms van dit meetpunt is 10120 km². Dit gebied bestaat uit het bovenstroomse (grotendeels Franse) deel van de Maas. De belangrijkste zijrivier in dit gebied zijn de Chiers (Fr) en de Semois (B). Het gedeelte van de Maas boven Chiers is bekend onder de naam Meuse Lorraine. Berger (1992) karakteriseert het stroomgebied van de Meuse Lorraine als smal en langgerekt, met een lage gradient, een smal winterbed en brede overstromingsvlakten. De sedimenten in dit gedeelte zijn relatief goed doorlatend. Beneden Chiers neemt de gradient sterk toe, en de rivier snijdt zich door relatief slecht doorlatende gesteenten, en ook delen van het Semois stroomgebied bevinden zich in deze ondoorlatende gesteenten. Het overzicht van de afvoeren van Chooz is gegeven in figuren 3.17 en 3.18. De calibratie voor het station Chooz voor de jaren 1988-1992 is gegeven in figuren 3.19 en 3.20.

3.6. Moha (Mehaigne)

Het overzicht van de afvoeren van Moha is gegeven in figuren 3.21 en 3.22. De calibratie voor het station Moha voor de jaren 1988-1992 is gegeven in figuren 3.23 en 3.24.

3.7. Analyse van de afvoercoëfficiënt voor de calibratie-stations

In tabel 3.2, tabel 3.3 en tabel 3.4 wordt een overzicht gegeven van de gemeten en gemodelleerde afvoercoëfficiënten van de verschillende stations. De afvoercoëfficiënt is hierbij gedefinieerd als de ratio van afvoer en neerslag. In alle gevallen geldt dat de gemeten neerslag is gebruikt. Opgemerkt wordt dat de afvoercoëfficiënt niet als invoer door het MEUSEFLOW-2.1 model gebruikt wordt. Na simulatie met het MEUSEFLOW-2.1 model is het wel mogelijk de resulterende afvoercoëfficiënt te berekenen. De hier gepresenteerde afvoercoëfficiënten hebben dus betrekking op gemeten afvoerreeksen of door MEUSEFLOW-2.1 gesimuleerde afvoerreeksen.

Tabel 3.2 bevat de afvoercoëfficiënten voor de periode 1988-1992. Kolom A bevat de neerslag voor de periode 1988-1992 zoals verkregen uit de database van MEUSEFLOW; geïnterpoleerde gebiedsneerslagen voor puntwaarnemingen van het KMI. Kolom B bevat de gegevens van de gemeten afvoerreeksen voor deze periode. Kolom C bevat de door MEUSEFLOW-2.1 gesimuleerde afvoeren. Kolom D bevat de afvoercoëfficiënt voor de periode 1988-1992 zoals bepaald met behulp van de gemeten neerslagen (kolom A) en de gemeten afvoerreeksen (Kolom B). Kolom E bevat de afvoercoëfficiënt zoals bepaald met behulp van de gemeten neerslagen (kolom A) en de door MEUSEFLOW gesimuleerde afvoeren (Kolom C).

Tabel 3.3 bevat de afvoercoëfficiënten voor de periode 1967–1995. Tabel 3.4 bevat de gegevens zoals verkregen uit het rapport van Berger (1992).

Opvallend is dat de in de MEUSEFLOW database opgenomen neerslagen en gemeten afvoeren niet overeenkomen met de door Berger gevonden waarden. Hieraan ligt waarschijnlijk de periode van analyse ten grondslag, alsmede de gevolgde methoden van interpolatie. Verder blijkt dat de waarde voor de afvoercoëfficiënt (zowel uit de gemeten reeksen als uit de gesimuleerde reeksen) afhankelijk is van de gekozen periode. De afwijkingen tussen afvoercoëfficiënten zoals bepaald uit de gemeten afvoer en de gesimuleerde afvoeren is in alle gevallen klein, behalve in het geval van Moha. Opvallend hierbij is echter dat in de periode 1988-1992 een lagere afvoercoëfficiënt wordt gesimuleerd dan gemeten, terwijl voor de periode 1967-1995 geldt dat een hogere afvoercoëfficiënt wordt gesimuleerd dan gemeten.

Station	A	B	C	D	E
	neerslag	afvoer	afvoer	coëfficiënt	coëfficiënt
Periode	1988-1992	1988-1992	1988-1992	1988-1992	1988-1992
Bron	gemeten	gemeten	MF	gemeten	MF
Eenheid	mm/jaar	m3/sec	m3/sec	-	-
Gendron	993	17.0	16.9	0.41	0.41
Chaudfontaine	1196	9.9	9.4	0.39	0.37
Martinrive	1216	18.1	18.0	0.45	0.45
Tabreux	1038	22.2	22.0	0.42	0.42
Moha	792	2.3	2.0	0.27	0.23
Chooz	1107	135.1	141.6	0.38	0.40

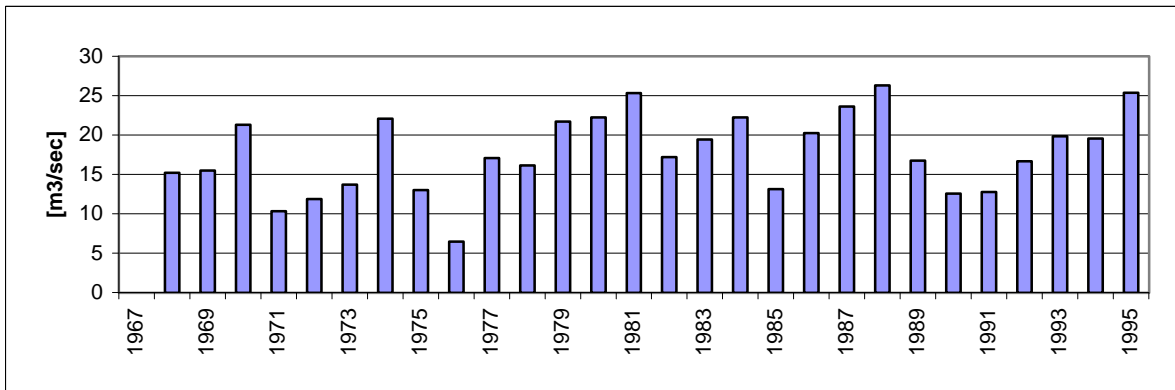
Tabel 3.2 Afvoercoëfficiënten voor de periode 1988-1992

Station	A	B	C	D	E
	neerslag	afvoer	afvoer	coëfficiënt	coëfficiënt
Periode	1967-1995	1967-1995	1967-1995	1967-1995	1967-1995
Bron	gemeten	gemeten	MF	gemeten	MF
Eenheid	mm/jaar	m3/sec	m3/sec	-	-
Gendron	987	17.8	18.4	0.43	0.45
Chaudfontaine	1146	10.4	10.0	0.42	0.40
Martinrive	1156	18.7	18.6	0.49	0.49
Tabreux	1012	22.5	22.7	0.44	0.44
Moha	889	2.5	3.2	0.25	0.33
Chooz	1102	147.3	151.2	0.41	0.43

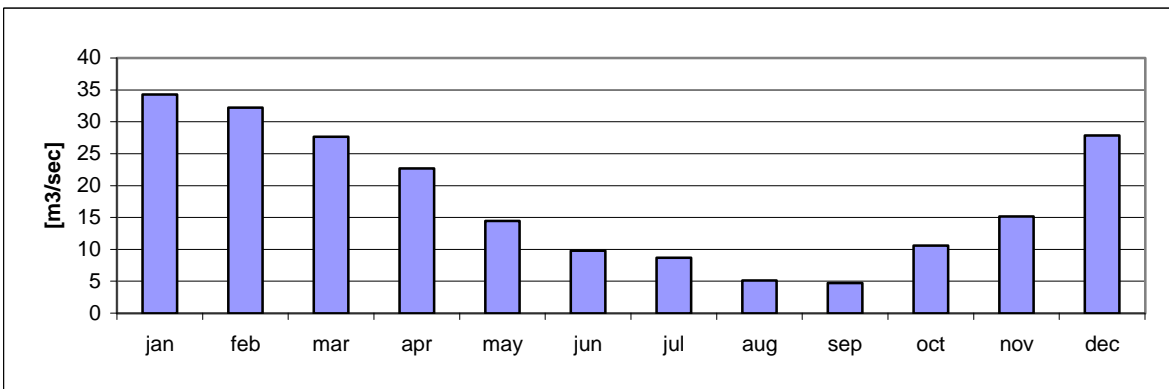
Tabel 3.3 Afvoercoëfficiënten voor de periode 1967-1995

Station	A	B	D
	neerslag	afvoer	coëfficiënt
Periode	-	-	-
Bron	Berger	Berger	Berger
Eenheid	mm/jaar	m3/sec	-
Gendron	954	16.3	0.41
Chaudfontaine	1104	9.4	0.40
Martinrive	1104	19.4	0.53
Tabreux	968	23.3	0.48
Moha	-	-	-
Chooz	946	135	0.45

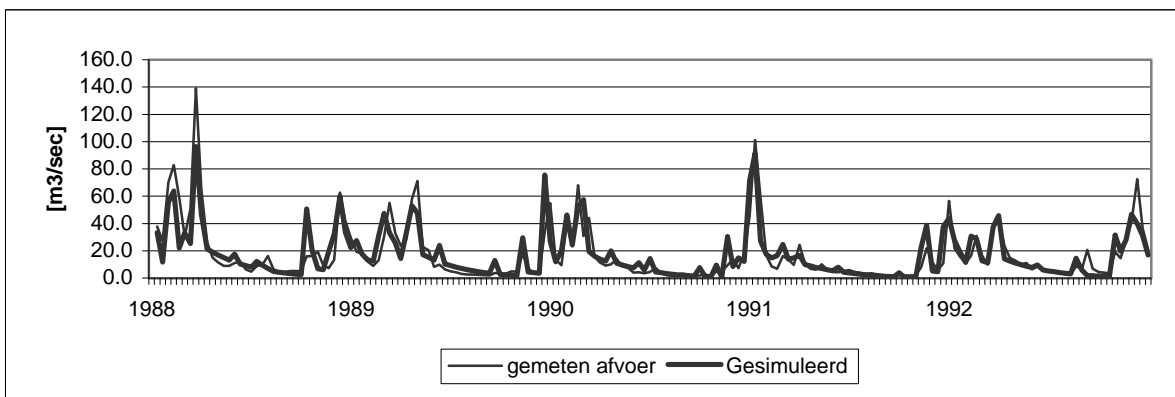
Tabel 3.4 Afvoercoëfficiënten volgens Berger (1992)



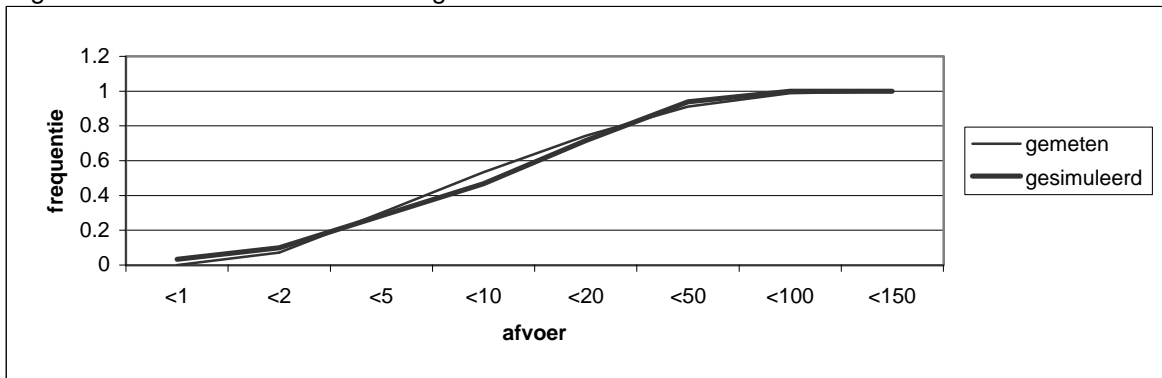
figuur 3.1 Gemiddelde jaarafvoeren Gendron



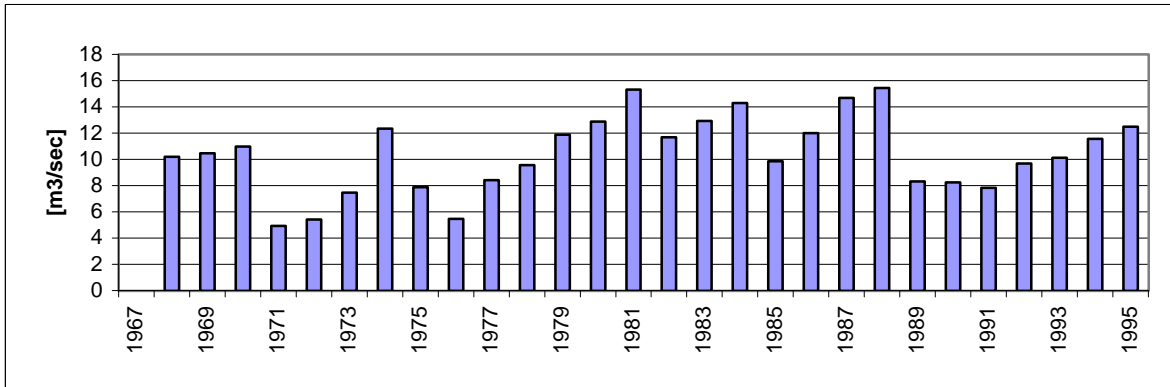
Figuur 3.2 Gemiddelde maandafvoeren Gendron



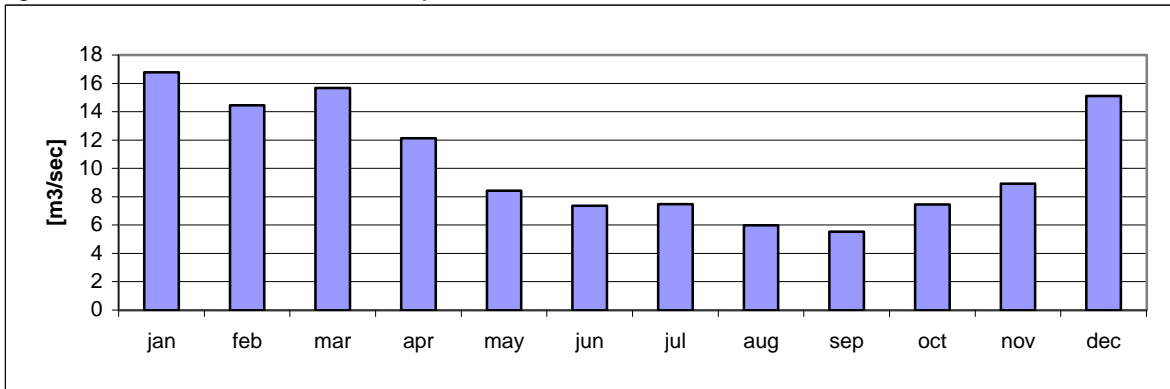
Figuur 3.3 Gemeten en gesimuleerde afvoer Gendron



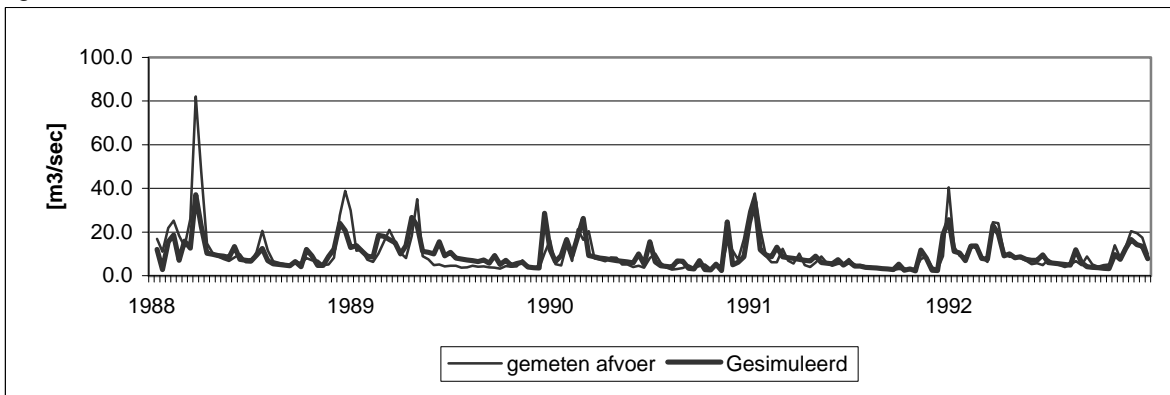
Figuur 3.4 Frequentieverdeling afvoeren Gendron



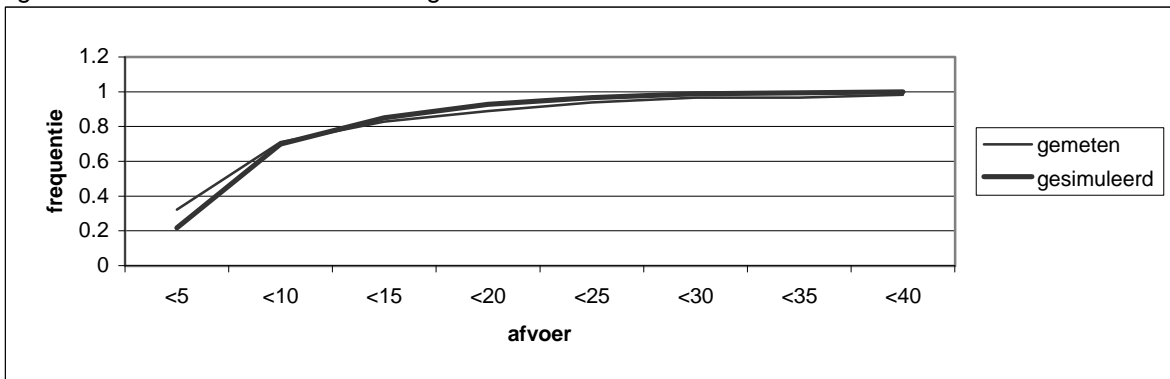
figuur 3.5 Gemiddelde jaarafvoeren Chaudfontaine



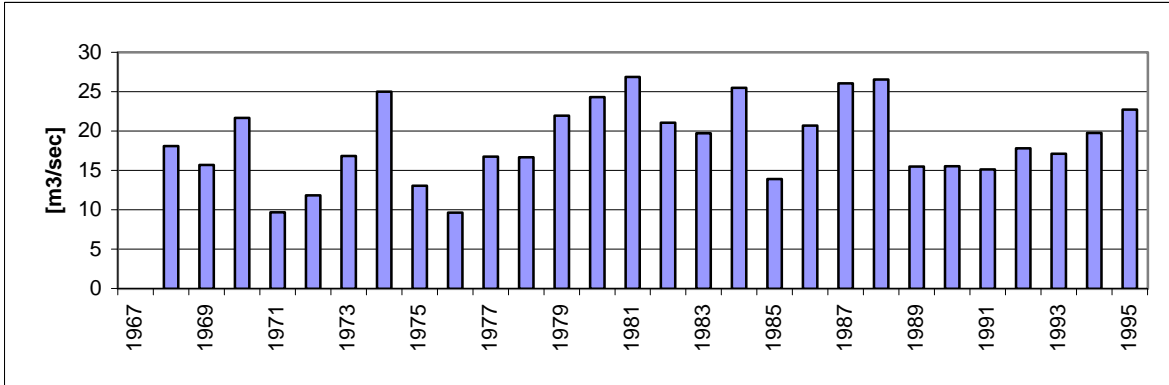
figuur 3.6 Gemiddelde maandaafvoeren Chaudfontaine



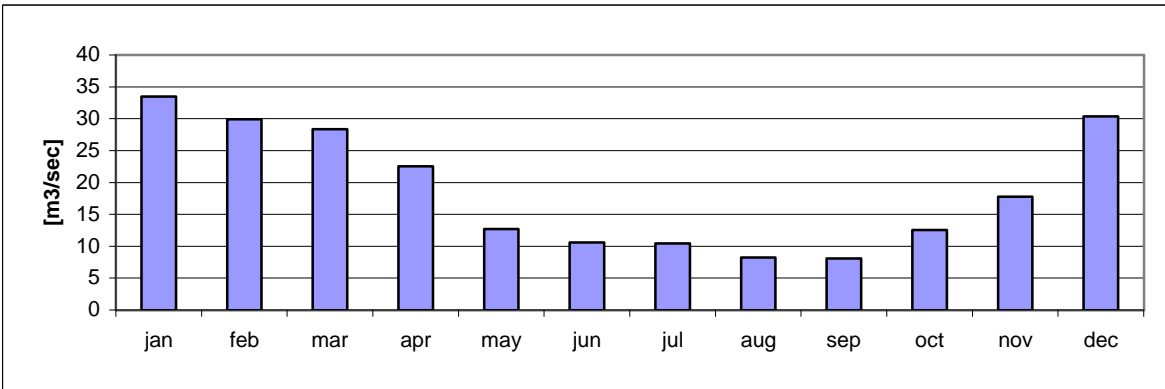
figuur 3.7 Gemeten en gesimuleerde afvoer Chaudfontaine



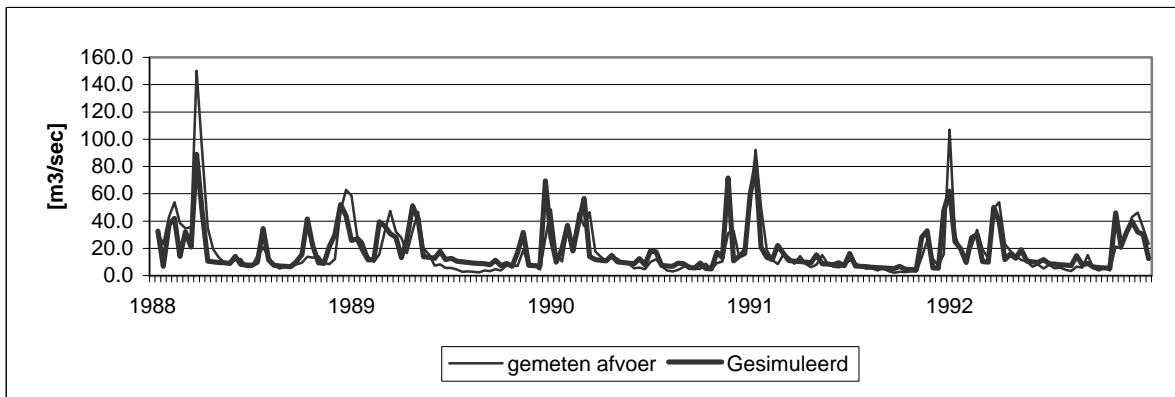
figuur 3.8 Frequentieverdeling afvoeren Chaudfontaine



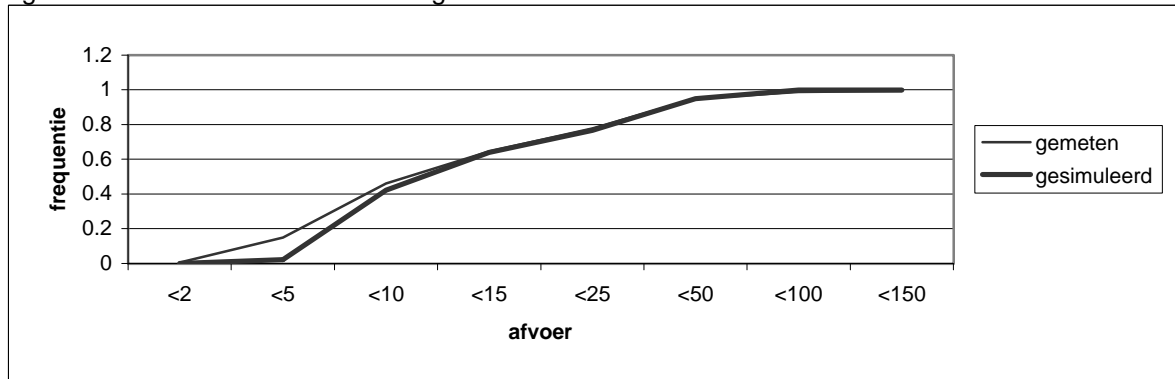
figuur 3.9 Gemiddelde jaarafvoeren Martinrive



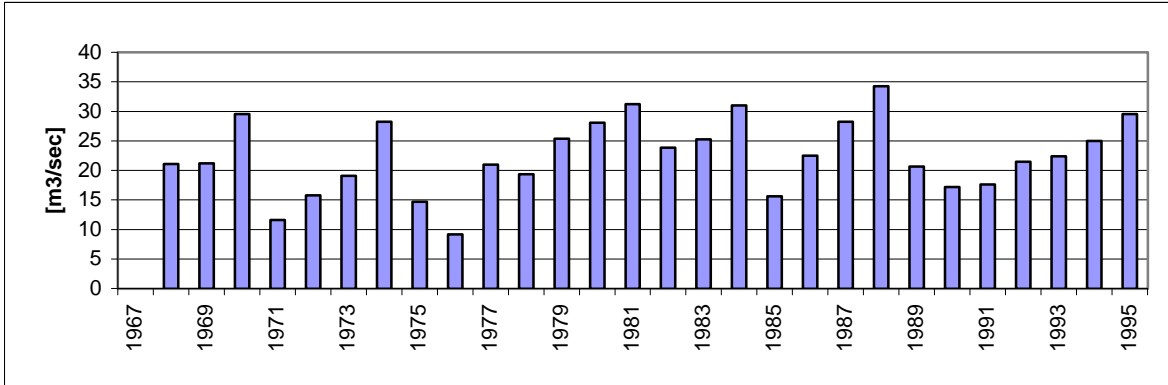
figuur 3.10 Gemiddelde maandafvoeren Martinrive



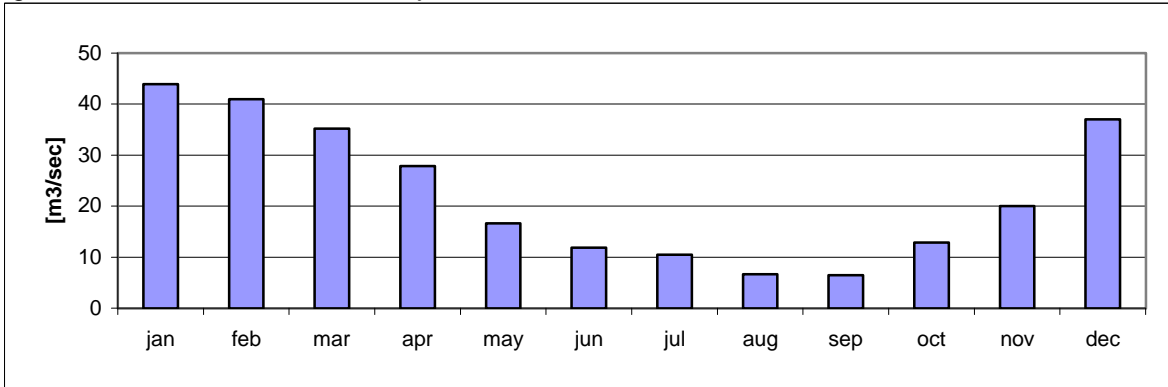
figuur 3.11 Gemeten en gesimuleerde afvoer Martinrive



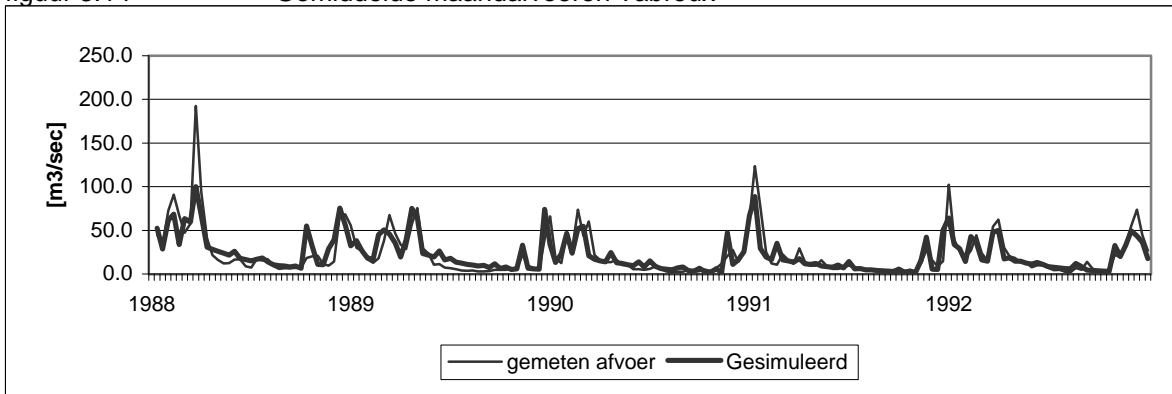
figuur 3.12 Frequentieverdeling afvoeren Martinrive



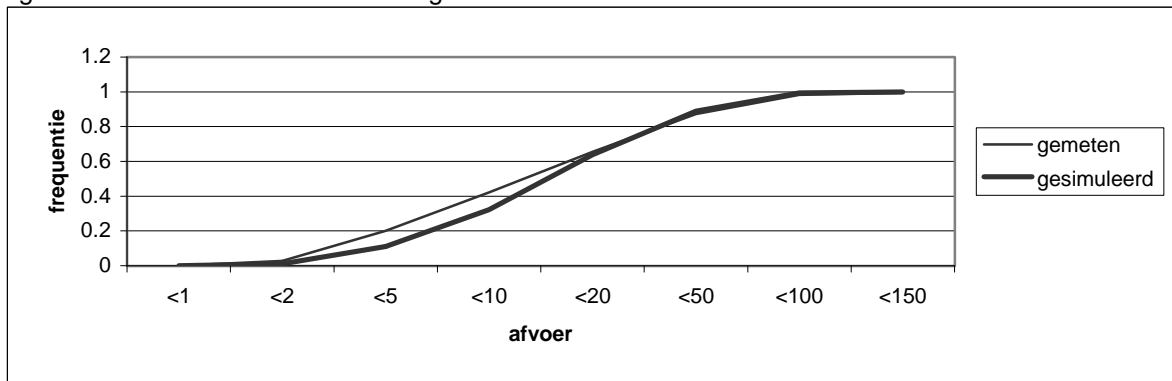
figuur 3.13 Gemiddelde jaarafvoeren Tabreux



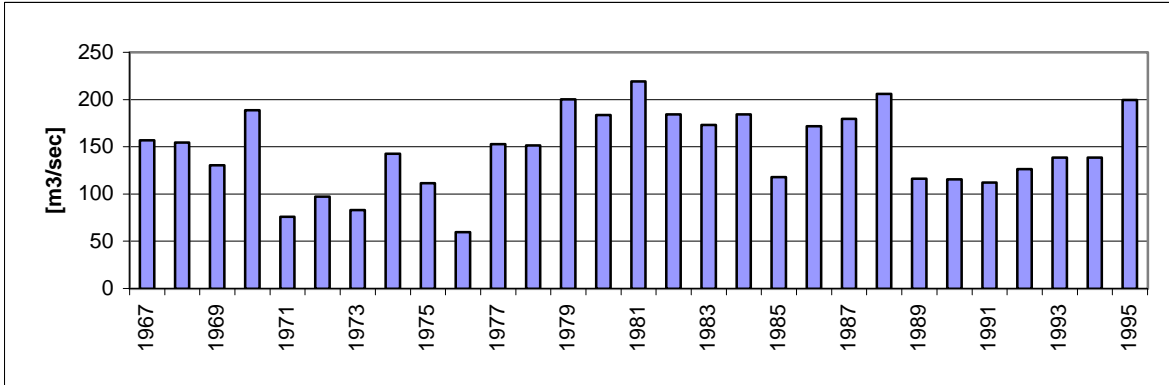
figuur 3.14 Gemiddelde maandaafvoeren Tabreux



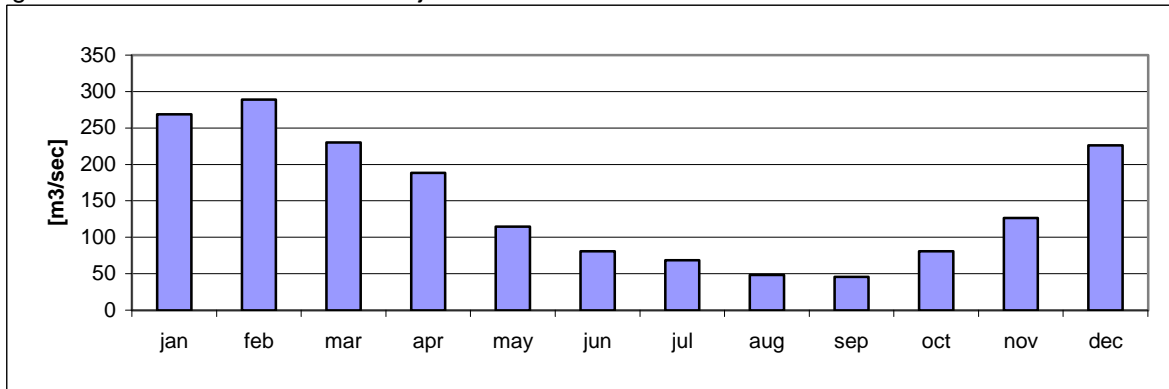
figuur 3.15 Gemeten en gesimuleerde afvoer Tabreux



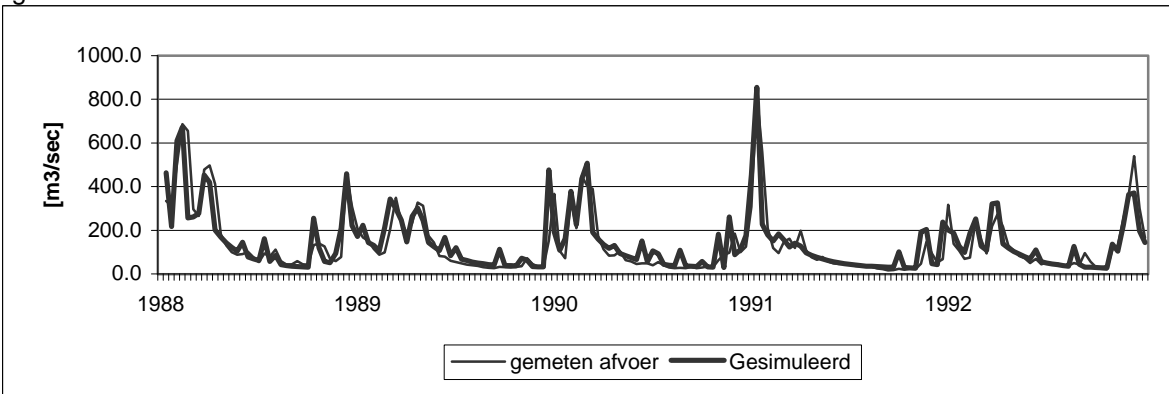
figuur 3.16 Frequentieverdeling afvoeren Tabreux



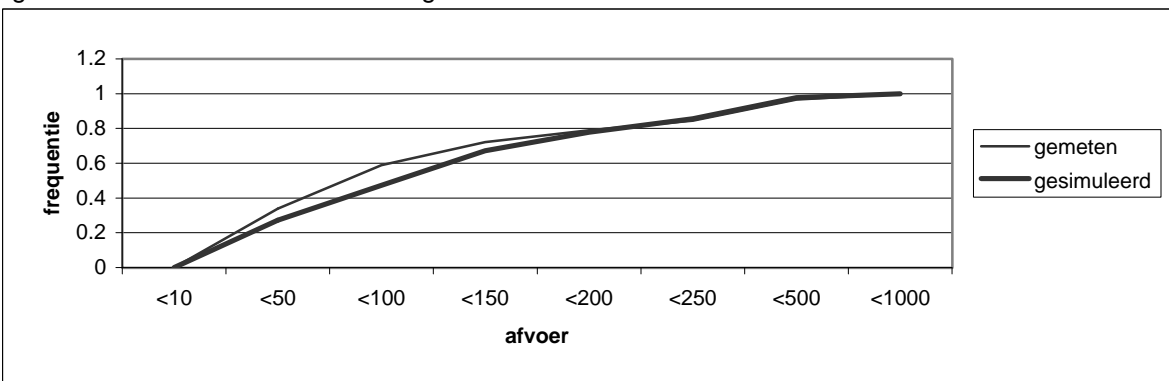
figuur 3.17 Gemiddelde jaarafvoeren Chooz



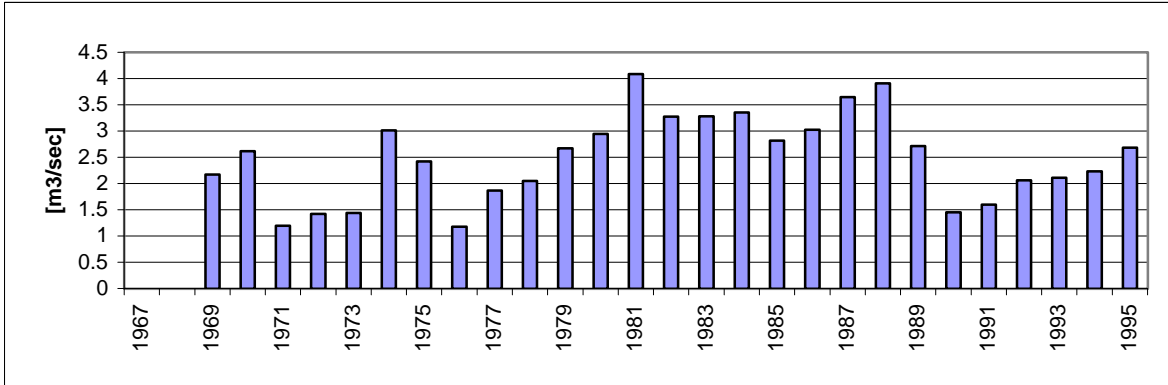
figuur 3.18 Gemiddelde maandafvoeren Chooz



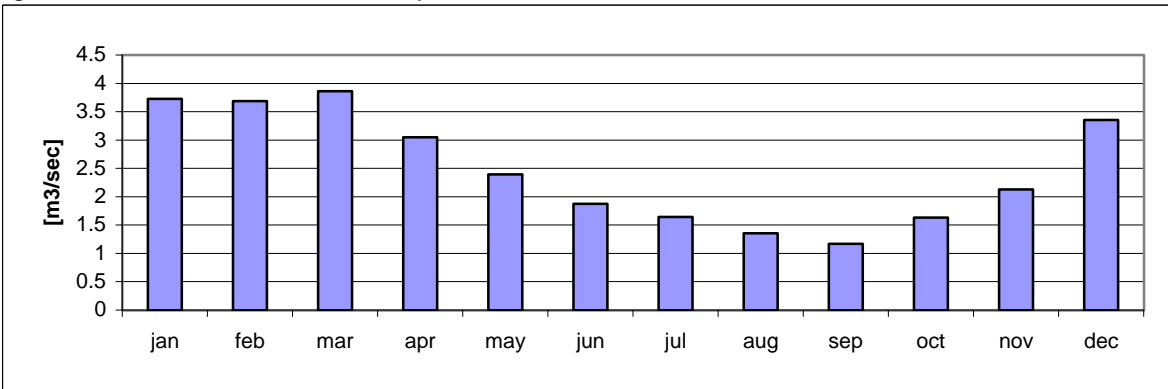
figuur 3.19 Gemeten en gesimuleerde afvoer Chooz



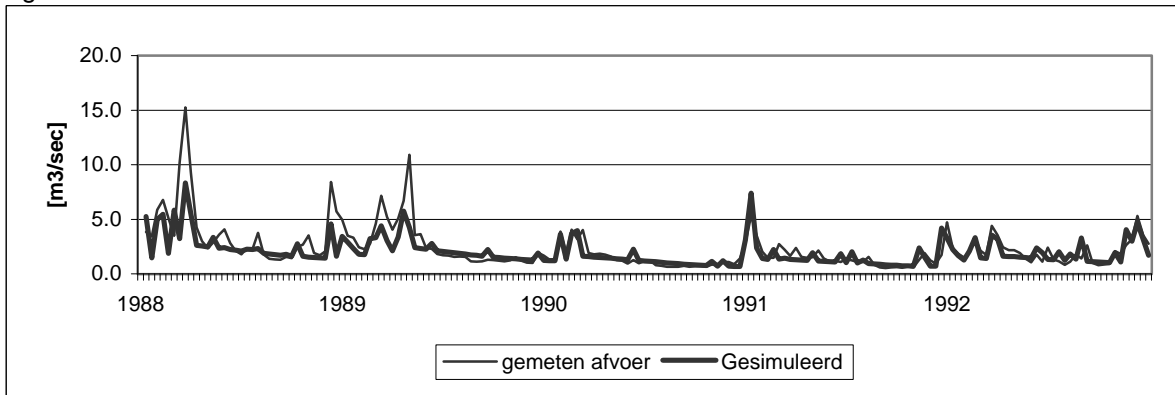
figuur 3.20 Frequentieverdeling afvoeren Chooz



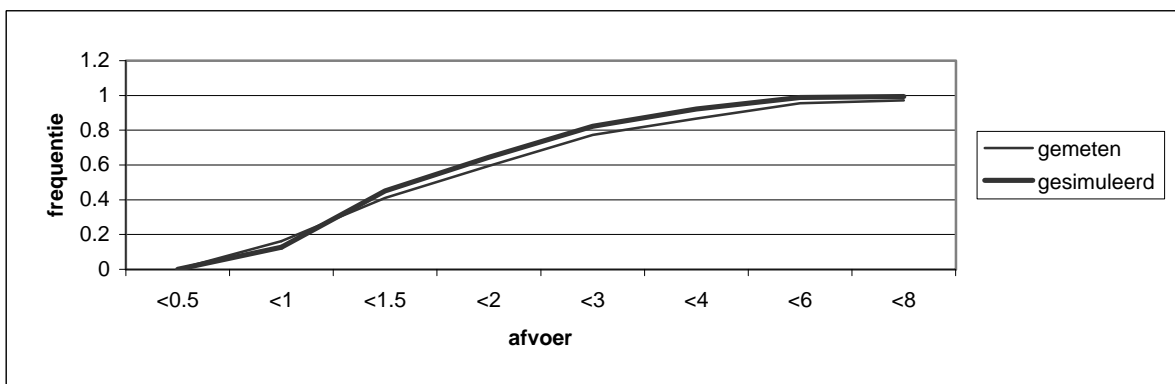
figuur 3.21 Gemiddelde jaarafvoeren Moha



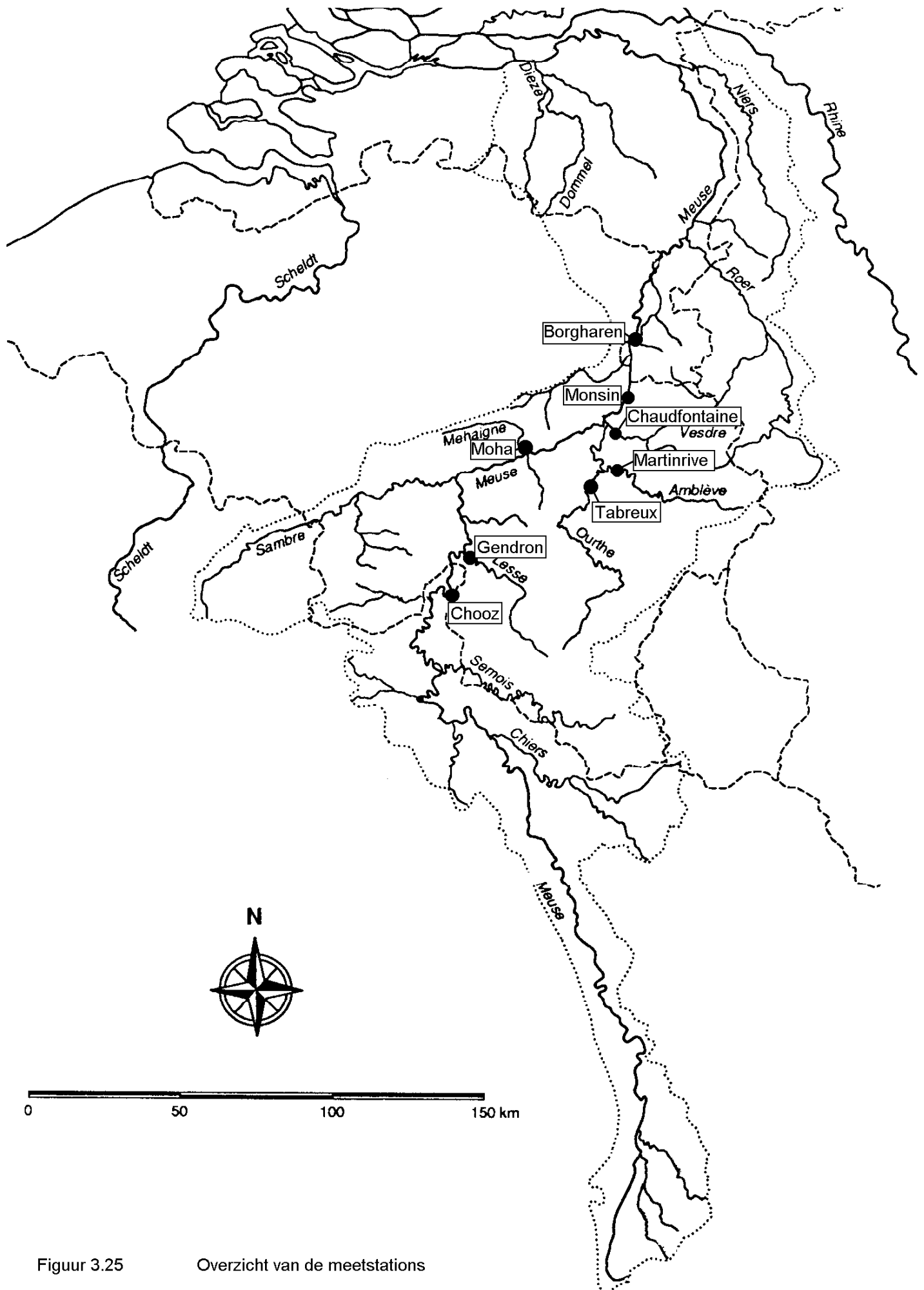
figuur 3.22 Gemiddelde maandafvoeren Moha



figuur 3.23 Gemeten en gesimuleerde afvoer Moha



figuur 3.24 Frequentieverdeling afvoeren Moha



Figuur 3.25 Overzicht van de meetstations

4. Analyse van de bijdrage van de verschillende substroomgebieden aan de afvoer van de Maas

Dit hoofdstuk beschrijft de analyse van de bijdrage van de verschillende substroomgebieden aan de afvoeren van de Maas. In dit hoofdstuk worden vragen beantwoord als:

- Is er een structurele verdeling aan te geven van bijdragen van de substroomgebieden aan de totale afvoer van de Maas?
- Is er in laagwatersituaties een verdeling van de bijdragen van de Maas die afwijkt van deze structurele verdeling?
- Verandert deze structurele verdeling door het jaar?

Antwoord op deze vragen moet helpen het inzicht in het afvoerproces van de Maas te vergroten. Tevens wordt hiermee antwoord gekregen op de vraag of in geval van laagwatersituaties de Maas nog slechts gevoed wordt door een klein deel van zijn stroomgebied. Hoewel ook de bijdrage van de substroomgebieden aan de hoogwatersituaties geanalyseerd kan worden (welke substroomgebieden dragen aanzienlijk bij aan de hoogwaterproblematiek in de Maas) is in deze studie vooral gekeken naar de laagwatersituaties.

Uitgangspunt voor de analyse vormen de gemeten afvoerreeksen met dagelijkse afvoeren voor de stations Tabreux, Chaudfontaine, Martinrive, Gendron, Chooz en Mehaigne (zie tabel 4.1). Totaal vertegenwoordigen deze stations een oppervlakte van 15097 km², hetgeen gelijk is aan 71 % van het oppervlakte boven Borgharen (21260 km²)

Hoewel ook een reeks voor Borgharen aanwezig is, is deze niet in de analyse gebruikt. De reden hiervoor is dat vooral in situaties van laagwater de reeks van Borgharen door de onttrekkingen van minimaal 39 m³/sec (voor de watervoorziening van Vlaanderen en aftappingen voor het Albertkanaal en de Zuid-Willemsvaart) een slechte afspiegeling is van het gedrag van het stroomgebied. Voor de wel aanwezige stations is bepaald hoe groot hun bijdrage aan de gesommeerde afvoer is, en hoe deze relatieve bijdrage verandert. Opmerkelijk hierbij is dat de som van de bijdragen van de verschillende substroomgebieden in een aantal gevallen aanmerkelijk hoger ligt dan de gemeten waarden bij Borgharen.

Station	Rivier	Oppervlakte bovenstrooms	Aandeel gesommeerde oppervlakte	Aandeel gesommeerde afvoer
Tabreux	Ourthe	1597 km ²	10.5 %	9,9 %
Chaudfontaine	Vesdre	677 km ²	4.5 %	4.7 %
Martinrive	Ambleve	1044 km ²	6.9 %	8.3 %
Gendron	Lesse	1314 km ²	8.7 %	7.9 %
Chooz	Maas	10120 km ²	67.0 %	68.0 %
Moha	Mehaigne	345 km ²	2.2 %	1.1 %

Tabel 4.1 Relatief aandeel van de verschillende substroomgebieden aan de geconstrueerde afvoerreeks

De analyse of de afvoerverdeling afhankelijk is van de grootte van de gemeten afvoer wordt geïllustreerd in de figuren 4.1 tot 4.5 en tabellen 2 en 3. Figuur 4.1 geeft een illustratie van het afvoerproces van de verschillende stations gedurende twee (willekeurig gekozen) jaren. Figuur 4.2 geeft het verloop van het relatieve aandeel van de stations aan deze afvoeren. Hierna is gepoogd om de veranderingen in relatieve bijdrage te relateren aan totale afvoer (tabel 4.2 en figuur 4.4) en tijd van het jaar (tabel 4.3 en figuur 4.5). Hiervoor zijn de afvoeren van de jaren 1978 – 1996 geanalyseerd. Figuur 4.3 geeft de relatieve bijdrage van Chooz ten opzichte van de gesommeerde afvoer van alle geanalyseerde stations. In tabel 4.2 en figuur 4.4 is de bijdrage van de individuele stations als functie van de gesommeerde afvoer gegeven. Vooral de bijdrage van Chooz lijkt in geval van lage afvoeren iets achter te blijven: het relatieve aandeel van Chooz voor lage afvoeren is iets geringer dan de gemiddelde bijdrage van dit station. Ook de bijdrage van de individuele substroomgebieden als functie van de maand (tabel 4.3 en figuur 4.5) vertoont eenzelfde beeld: gedurende de zomermaanden (de droge periode) neemt de bijdrage van het stroomgebied boven Chooz iets af, terwijl die bijdrage voor de nattere maanden (wintermaanden) iets prominenter is.

Hoewel de hierboven beschreven analyse geheel gebaseerd is op gemeten waarden, en dus geen simulatie met het MEUSEFLOW-2.1 model betreft, is de uitkomst niet geheel in overeenstemming met het algemene beeld

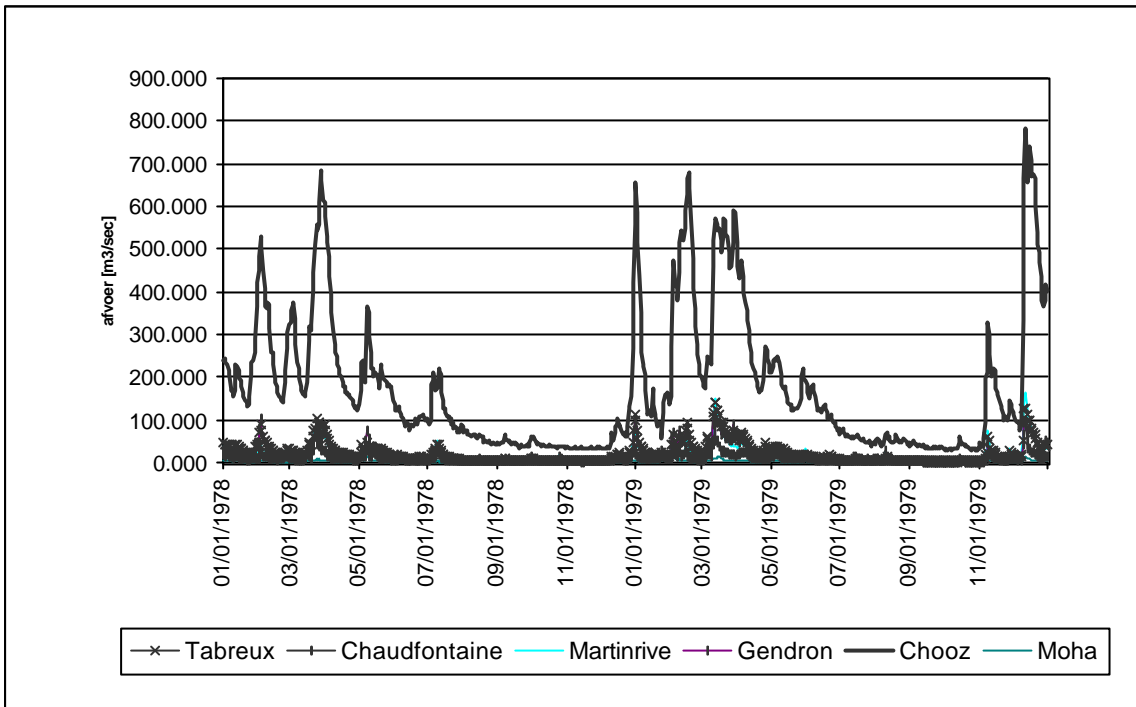
over de opbouw van het Maasstroomgebied. De algemene indruk, dat de bodems in Noord Frankrijk van een dusdanige samenstelling zijn dat zij in de droge perioden water naleveren wordt door deze analyses niet bevestigd. Zie wat dit betreft ook hoofdstuk 5. Een nadere analyse van de verschillende laagwaterperiodes en de bijbehorende verdeling van oorsprong van het water wordt aangeraden.

Σ afvoer	Tabreux	Chaufontaine	Martinrive	Gendron	Chooz	Mehaigne
<21	9.2%	14.4%	8.6%	7.1%	58.2%	2.5%
<25	6.4%	11.9%	8.6%	6.4%	64.4%	2.3%
<30	6.0%	11.3%	9.1%	5.9%	65.5%	2.2%
<35	6.2%	10.5%	9.6%	5.9%	65.7%	2.1%
<50	6.7%	8.5%	9.3%	5.4%	68.1%	2.0%
<75	7.3%	7.5%	9.1%	5.5%	68.7%	1.9%
<100	7.9%	7.1%	9.1%	5.9%	68.1%	1.8%
<150	8.7%	6.6%	9.2%	6.5%	67.4%	1.7%
<200	9.0%	6.1%	9.1%	6.8%	67.4%	1.6%
<250	9.1%	5.8%	8.9%	7.0%	67.7%	1.5%
<500	9.4%	5.1%	8.5%	7.4%	68.4%	1.3%
<1000	9.7%	4.8%	8.3%	7.8%	68.3%	1.1%
<1500	9.8%	4.7%	8.3%	7.9%	68.1%	1.1%
<2000	9.9%	4.7%	8.3%	7.9%	68.0%	1.1%

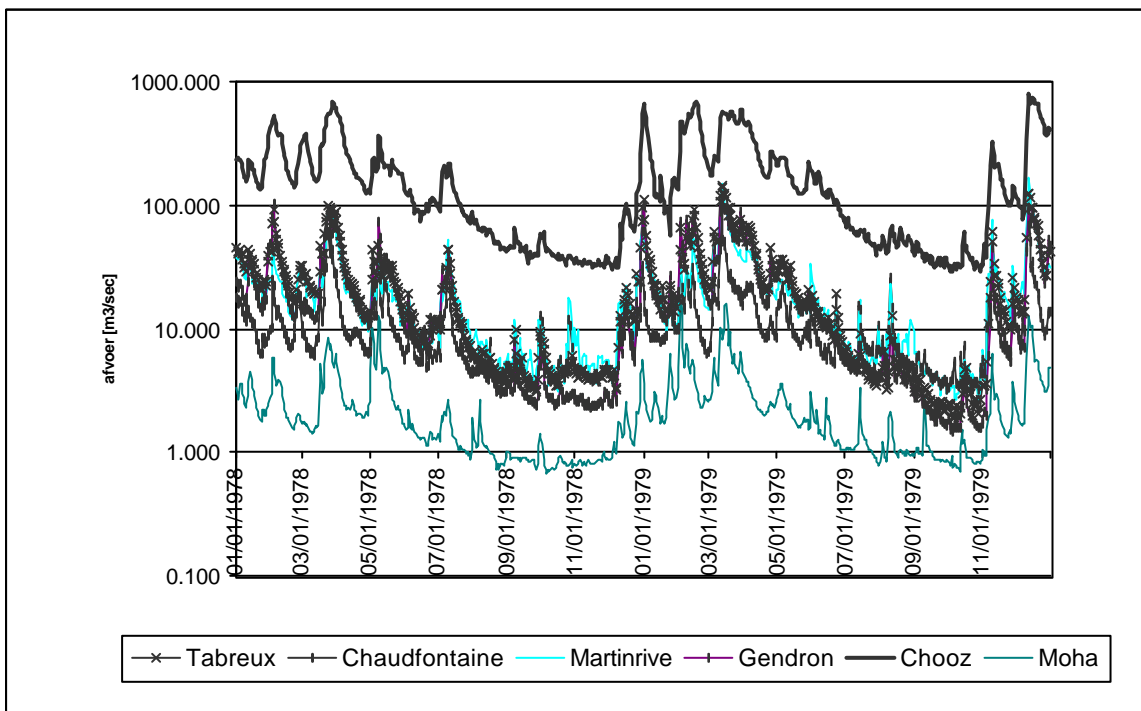
Tabel 4.2. Relatief aandeel per substroomgebied aan de gesommeerde afvoer als functie van de totale afvoer.

Maand	Tabreux	Chaufontaine	Martinrive	Gendron	Chooz	Mehaigne
januari	10.3%	4.0%	7.7%	8.2%	68.9%	0.9%
februari	9.4%	3.4%	7.1%	7.5%	71.6%	0.9%
maart	10.5%	4.7%	8.5%	8.2%	67.0%	1.2%
april	9.4%	4.0%	7.5%	7.7%	70.2%	1.1%
mei	9.5%	5.2%	7.6%	8.0%	68.2%	1.5%
juni	9.3%	6.2%	8.6%	7.6%	66.9%	1.5%
juli	9.9%	7.2%	10.1%	8.2%	63.0%	1.5%
augustus	8.2%	7.3%	9.3%	6.6%	66.8%	1.8%
september	8.8%	7.9%	10.9%	6.6%	64.1%	1.7%
oktober	9.6%	5.5%	9.3%	8.2%	66.2%	1.3%
november	10.4%	4.7%	9.4%	8.1%	66.4%	1.1%
december	10.7%	4.5%	8.8%	8.3%	66.8%	0.9%

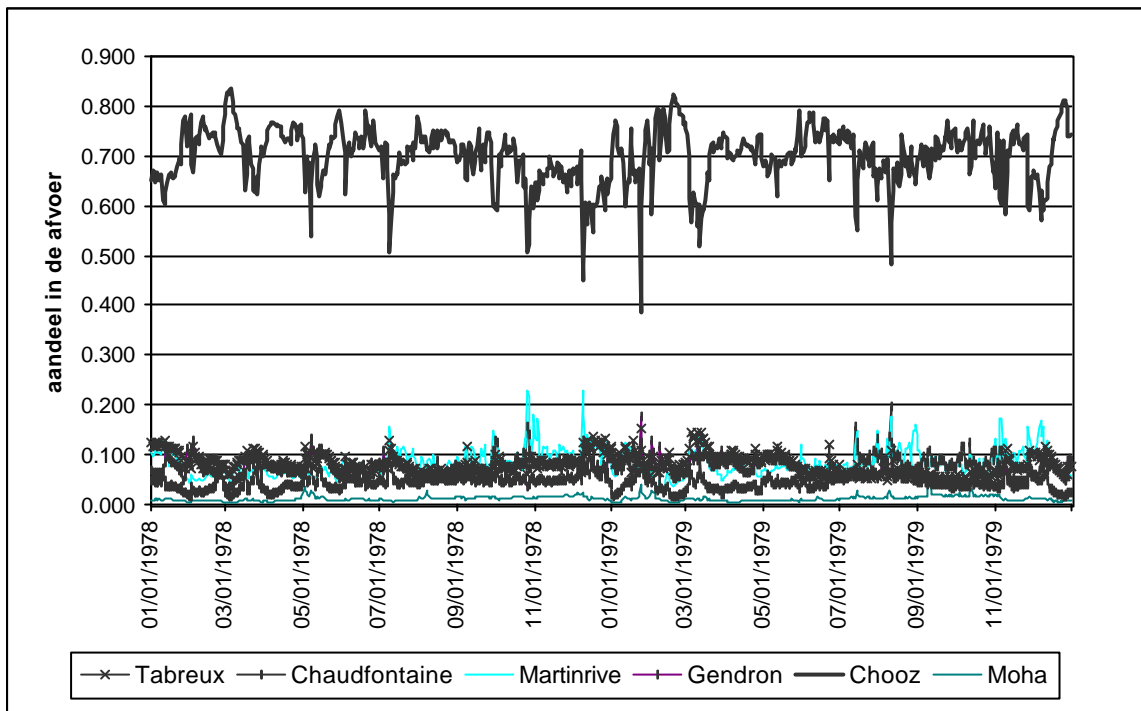
Tabel 4.3. Relatief aandeel per substroomgebied aan de gesommeerde afvoer als functie van de maand.



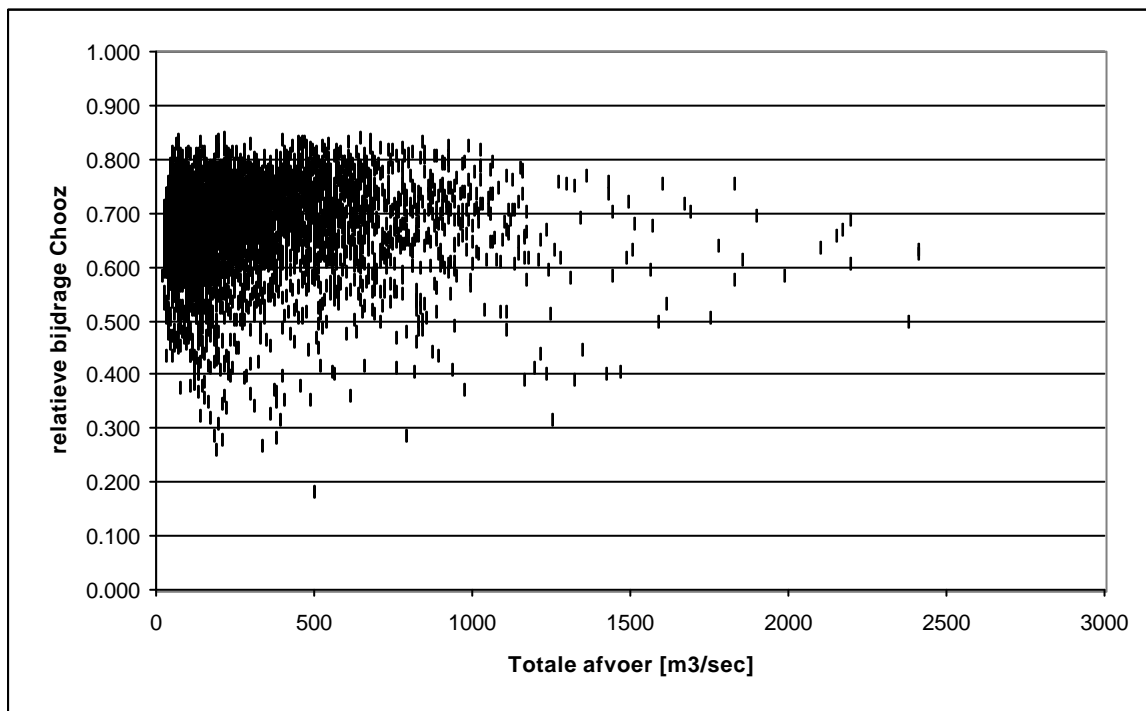
figuur 4.1a Gemeten afvoeren substroomgebieden 1978-1979



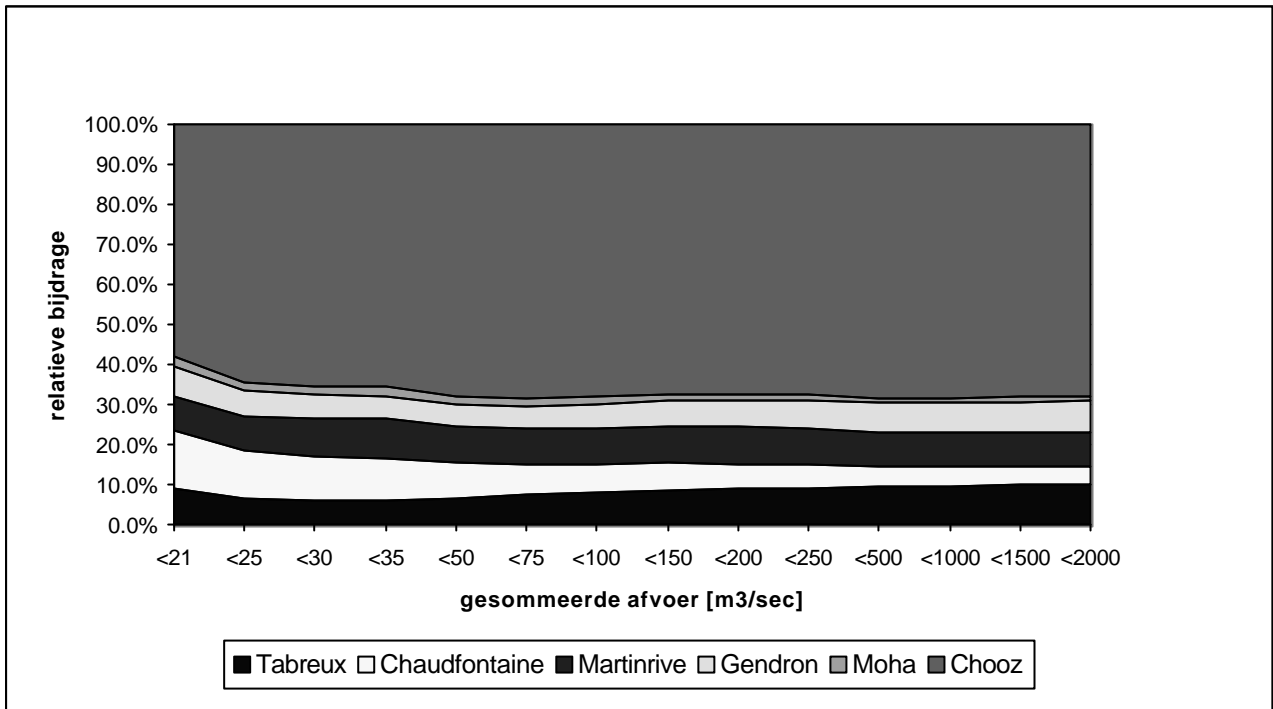
figuur 4.1b Gemeten afvoeren 1978-1979 logaritmische schaal



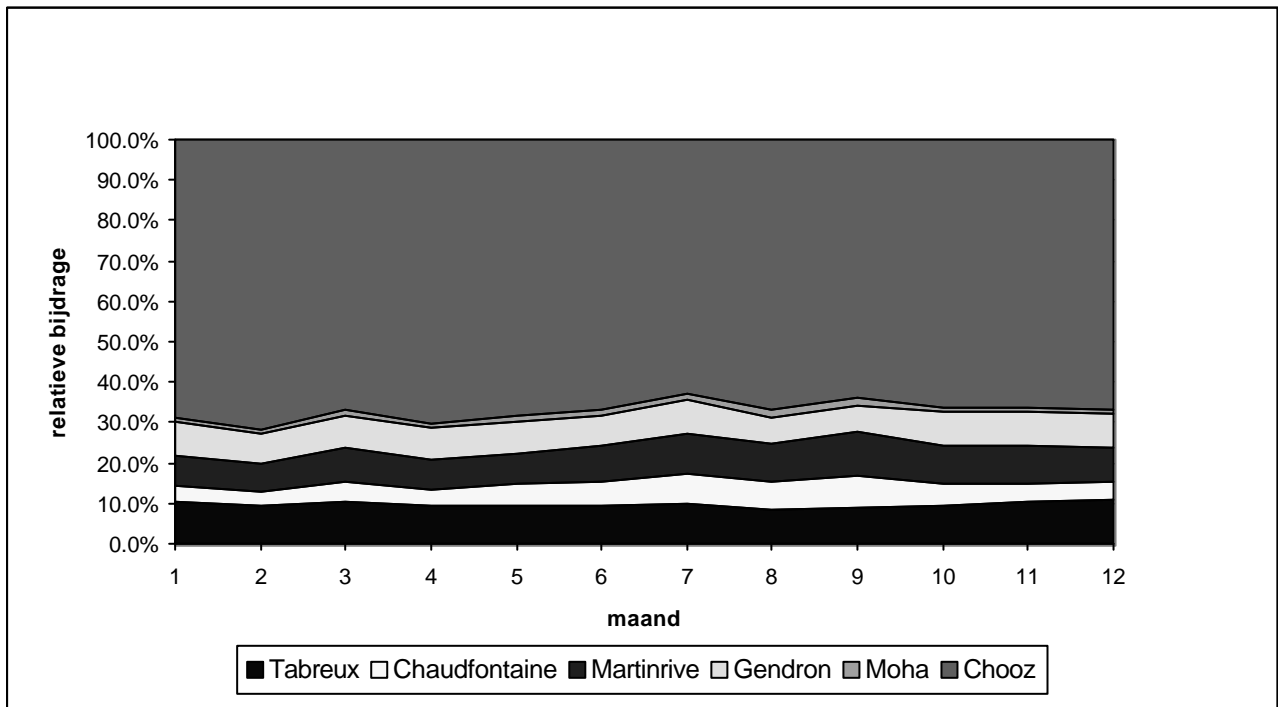
figuur 4.2 Relatief aandeel substroomgebieden (gemeten afvoeren)



figuur 4.3 Relatief aandeel Chooz aan totale afvoer (gemeten afvoeren)



figuur 4.4 Relative bijdrage substroomgebieden als functie van de gesommeerde afvoer



figuur 4.5 Relative bijdrage substroomgebieden als functie van de maand

5. Analyse van de situatie in 1976.

5.1. Inleiding

Het jaar 1976 wordt algemeen beschouwd als een erg droog jaar, waarin een aantal problemen met de watervoorziening duidelijk werden. Deze sectie analyseert de situatie van 1976 en beschrijft de resultaten van het MEUSEFLOW-2.1 model voor het jaar 1976.

Om aan te geven dat 1976 inderdaad een uitzonderlijke situatie betrof, is de verhouding tussen de gemeten jaarlijkse afvoer en de gemiddelde afvoer over 29 jaar (1967-1995) voor verschillende meetstations in het Maasstroomgebied is gegeven in tabel 5.1. De rangorde van deze waarden, waarbij opgemerkt dat een waarde van 1 het natste jaar uit de serie representeert is gegeven in tabel 5.2. 1976 scoort in bijna alle gevallen als droogste situatie, behalve voor Chaudfontaine, waarvoor geldt dat 1971 en 1972 nog droger waren.

	Borgharen	Chooz	Tabreux	Martinrive	Chauf.	Gendron	Moha
1967	105%	107%	-	-	-	-	-
1968	102%	105%	97%	100%	101%	89%	-
1969	84%	89%	97%	87%	104%	90%	94%
1970	124%	128%	136%	120%	109%	124%	113%
1971	45%	52%	53%	53%	49%	60%	51%
1972	58%	66%	73%	65%	54%	69%	61%
1973	55%	56%	88%	93%	74%	80%	62%
1974	104%	97%	130%	138%	122%	129%	130%
1975	74%	76%	68%	72%	78%	76%	104%
1976	32%	41%	42%	53%	54%	38%	51%
1977	89%	104%	97%	92%	83%	99%	81%
1978	91%	103%	89%	92%	95%	94%	88%
1979	125%	136%	117%	121%	118%	126%	115%
1980	123%	125%	129%	134%	128%	130%	127%
1981	146%	149%	144%	148%	152%	148%	176%
1982	119%	125%	110%	116%	116%	100%	141%
1983	125%	117%	116%	109%	128%	113%	141%
1984	136%	125%	143%	141%	142%	130%	145%
1985	79%	80%	72%	77%	98%	76%	122%
1986	116%	117%	104%	114%	119%	118%	131%
1987	136%	122%	130%	144%	146%	138%	157%
1988	156%	140%	158%	147%	153%	153%	169%
1989	88%	79%	95%	86%	82%	98%	117%
1990	75%	78%	79%	86%	82%	73%	63%
1991	73%	76%	81%	83%	78%	74%	69%
1992	89%	86%	99%	98%	96%	97%	89%
1993	96%	94%	103%	94%	100%	116%	91%
1994	115%	94%	115%	109%	115%	114%	96%
1995	139%	135%	136%	126%	124%	148%	116%

Tabel 5.1 Jaarlijkse afvoer ten opzichte van gemiddelde afvoer

	Borgharen	Chooz	Tabreux	Martinrive	Chaudf.	Gendron	Moha
1967	13	12	-	-	-	-	-
1968	15	13	17	14	15	20	-
1969	21	19	16	20	14	19	17
1970	8	5	5	9	13	9	14
1971	28	28	27	27	28	27	26
1972	26	26	24	26	27	26	25
1973	27	27	21	17	25	21	24
1974	14	16	7	5	8	7	8
1975	24	25	26	25	23	23	15
1976	29	29	28	28	26	28	27
1977	19	14	18	18	20	15	21
1978	17	15	20	19	19	18	20
1979	6	3	9	8	10	8	13
1980	9	8	8	6	6	6	9
1981	2	1	2	1	2	3	1
1982	10	7	12	10	11	14	6
1983	7	10	10	13	5	13	5
1984	5	6	3	4	4	5	4
1985	22	21	25	24	17	22	10
1986	11	11	13	11	9	10	7
1987	4	9	6	3	3	4	3
1988	1	2	1	2	1	1	2
1989	20	22	19	22	21	16	11
1990	23	23	23	21	22	25	23
1991	25	24	22	23	24	24	22
1992	18	20	15	15	18	17	19
1993	16	18	14	16	16	11	18
1994	12	17	11	12	12	12	16
1995	3	4	4	7	7	2	12

Tabel 5.2 Rangorde van jaarlijkse afvoeren per station (1=hoogste afvoer, 29=laagste afvoer)

5.2. Beschrijving afvoerverloop situatie 1976

Voor het Maasstroomgebied zijn een aantal meetstations beschikbaar. Deze meetstations zijn representatief voor een aantal deelstroomgebieden, of representeren het gehele stroomgebied (Borgharen). De stations voor de deelstroomgebieden (Chooz, Gendron, Tabreux, Martinrive, Chaudfontaine, Moha) beslaan in totaal 71 % van het totale stroomgebied boven Borgharen. Hoewel een meetreeks voor Borgharen beschikbaar is, is voor de analyses in dit hoofdstuk geen gebruik gemaakt van deze meetreeks. De reden hiervoor is dat deze reeks beïnvloed wordt door onttrekkingen en afleidingen. Dit blijkt onder andere uit het feit dat in een aantal gevallen de som van meetwaarden voor de bovengenoemde 6 deelstroomgebieden boven de gemeten waarde van Borgharen uitkomt. In plaats van de meetreeks Borgharen wordt gewerkt met een samengestelde afvoerreeks, geconstrueerd als de som van de waarden in de deelstroomgebieden (som genaamd). Zie ook hoofdstuk 4.

Figuur 5.1 geeft de afvoer van de jaren 1975-1977 (de droge situatie) in vergelijking met de situatie 1988-1990. De situatie 1988-1990 is als referentie gekozen omdat (1) de periode gebruikt is binnen het NOP-project "Effect of Climate Change on the hydrology of the river Meuse", wat parallel aan dit project wordt uitgevoerd, en (2) deze periode begint met een relatief nat jaar.

Het relatieve aandeel voor de samengestelde afvoerreeks voor de periode 1975-1977 is gegeven in figuur 5.2. Ter referentie is het relatieve aandeel de samengestelde afvoerreeks gedurende 1988-1990 gegeven in figuur 5.3. Een nadere detaillering voor de situatie van 1976 is gegeven in figuur 5.4. Hoewel in het jaarlijkse verloop van de afvoerbijdragen van de verschillende stroomgebieden nauwelijks enige trend is te ontdekken (hoofdstuk 4) lijkt het er op dat in 1976 Chooz uiteindelijk de grootste relatieve bijdrage aan de afvoer levert. Dit is vooral te zien in 5.5 en 5.6, waarin duidelijk wordt dat in oktober 1976 de bijdrage van Chooz sterk aan het stijgen is. In November, als de afvoer weer toeneemt, wordt het relatieve aandeel van de overige stroomgebieden ook weer

groter. Deze constatering is in overeenstemming met het idee dat Chooz langer water blijft leveren. Dit beeld wordt ook bevestigd door tabel 5.3.

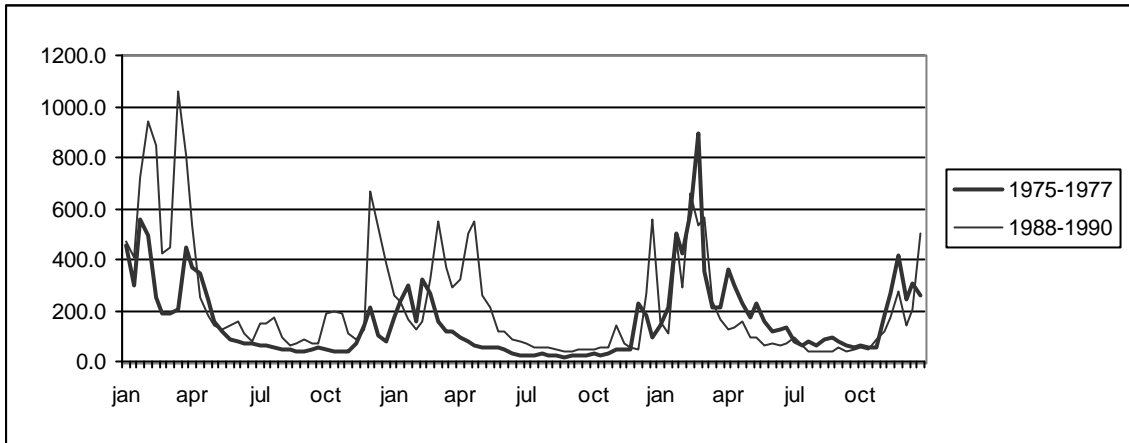
Decade	1976	1976	1976	Normaal	Normaal	Normaal
	Afvoersom (m ³ /sec)	Aandeel Chooz	Aandeel rest	Afvoersom (m ³ /sec)	Aandeel Chooz	Aandeel rest
1	171	62%	38%	373	66%	34%
2	238	48%	52%	353	66%	34%
3	299	53%	47%	431	69%	31%
4	158	61%	39%	462	69%	31%
5	322	65%	35%	414	73%	27%
6	267	67%	33%	359	69%	31%
7	154	67%	33%	312	69%	31%
8	118	67%	33%	334	66%	34%
9	115	65%	35%	381	68%	32%
10	97	65%	35%	341	69%	31%
11	81	68%	32%	276	68%	32%
12	65	68%	32%	233	68%	32%
13	58	68%	32%	196	68%	32%
14	52	67%	33%	171	69%	31%
15	53	67%	33%	146	65%	35%
16	50	65%	35%	141	65%	35%
17	32	68%	32%	115	67%	33%
18	27	67%	33%	118	67%	33%
19	23	67%	33%	119	65%	35%
20	27	64%	36%	105	63%	37%
21	31	58%	42%	105	65%	35%
22	22	62%	38%	81	66%	34%
23	21	63%	37%	75	64%	36%
24	19	59%	41%	69	62%	38%
25	22	61%	39%	67	64%	36%
26	26	69%	31%	67	63%	37%
27	23	61%	39%	67	64%	36%
28	29	68%	32%	90	61%	39%
29	27	71%	29%	124	67%	33%
30	29	73%	27%	148	64%	36%
31	44	75%	25%	137	65%	35%
32	45	73%	27%	176	66%	34%
33	48	59%	41%	254	65%	35%
34	230	77%	23%	272	65%	35%
35	177	82%	18%	351	66%	34%
36	97	77%	23%	412	67%	33%

Tabel 5.3 Aandeel van de substroomgebieden op de gesommeerde afvoer

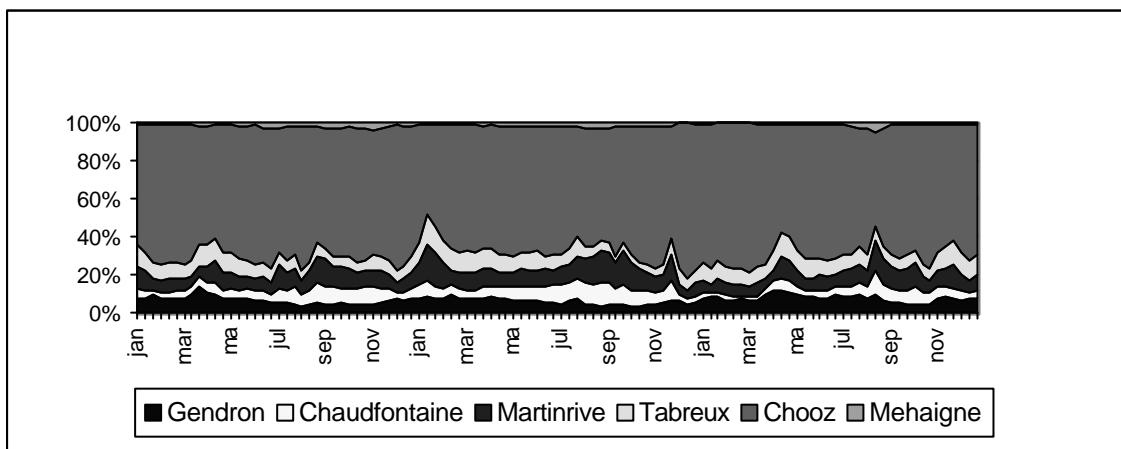
Voor een nadere analyse beschouwen we het stroomgebied van de Lesse als voorbeeld van de reactie van de waterbalans. In figuur 5.7 wordt de gesommeerde neerslag (gemeten) voor de perioden 1975-1977 en 1988-1992 gegeven. Duidelijk te zien is dat de neerslag voor de periode 1975-1977 al vanaf begin 1975 achterblijft, en dit verschil gedurende 1975 en 1976 alleen maar groter wordt. In figuur 5.8 en figuur 5.9 zijn de 'temperatuursom' en de gesommeerde ETP (potentiele verdamping) gegeven. In deze figuren is veel minder duidelijk een onderscheid te maken tussen de periode 1975-1977 en 1988-1992. De gesommeerde effectieve neerslag (Peff, de neerslag minus depotentiele verdamping) is gegeven in figuur 5.10. Ook hierin is duidelijk te zien dat de periode 1975-1977 erg achterblijft bij de periode 1988-1992. Eind 1976 is de gesommeerde effectieve neerslag zelfs negatief, hetgeen betekent dat er sinds begin 1976 minder neerslag is gevallen dan er door depotentiele verdamping werd gevraagd.

Deze omstandigheden hebben natuurlijk hun weerslag op de gesommeerde gemeten afvoer, de gesimuleerde 'soilstorsom' en de gesimuleerde 'gwStorsom', zoals gegeven in figuur 5.11, 5.12 en 5.13.

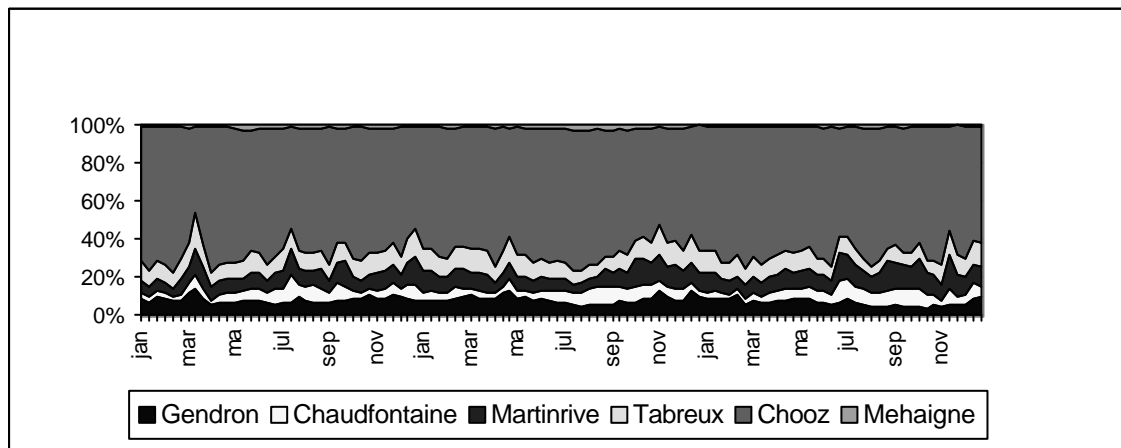
De conclusie uit deze figuren lijkt dat de situatie in 1976 niet zozeer te wijten is aan hoge zomertemperaturen en bijbehorende hoge verdampingscijfers voor de zomer van 1976, maar veel meer aan het achterblijven van neerslag sinds het begin van 1975. Hierdoor is de berging in het gebied sterk afgenomen, en deze herstelt zich pas weer in november 1976.



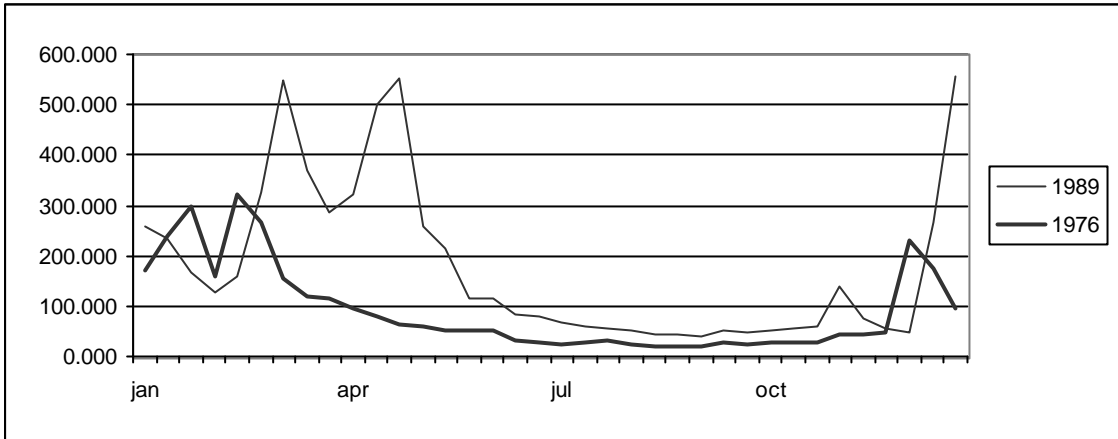
Figuur 5.1 Afvoeroverloop samengestelde afvoerreksen 1975-1977 en 1988-1990



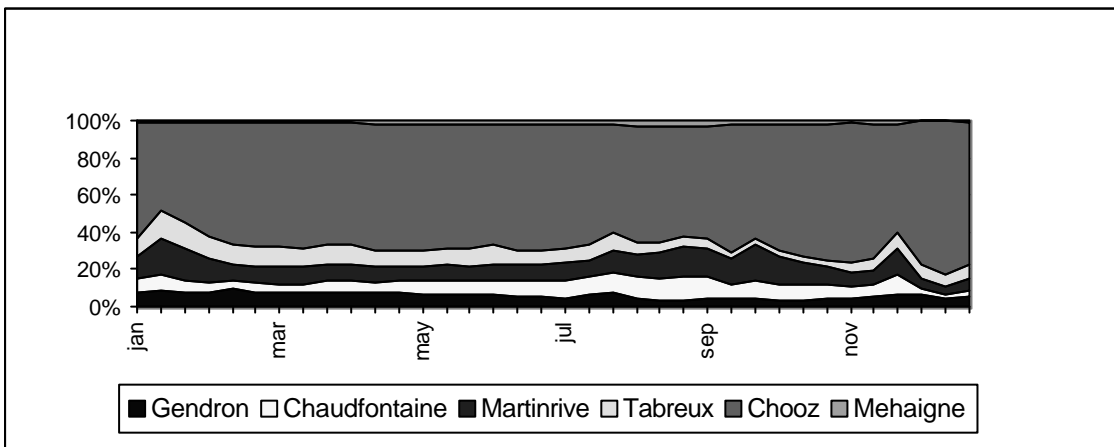
Figuur 5.2 Verloop van het relatieve aandeel meetstations 1975-1977



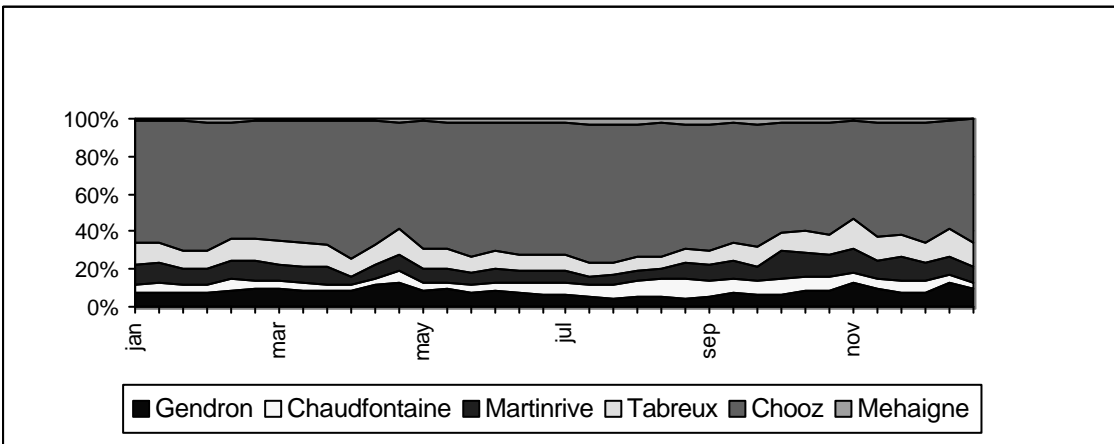
Figuur 5.3 Verloop van het relatieve aandeel meetstations 1988-1990



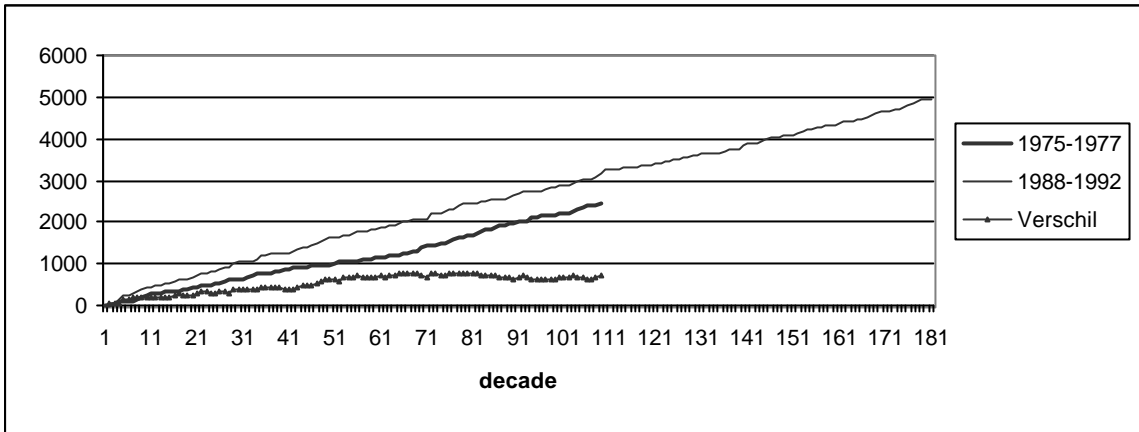
Figuur 5.4 Afvoer verloop samengestelde afvoerreeksen 1976 en 1989



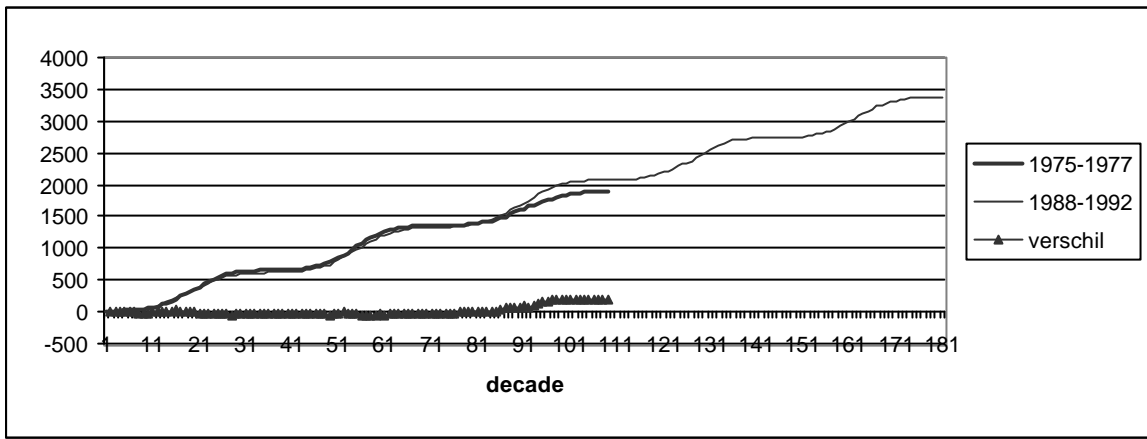
Figuur 5.5 Verloop van het relatieve aandeel meetstations 1976



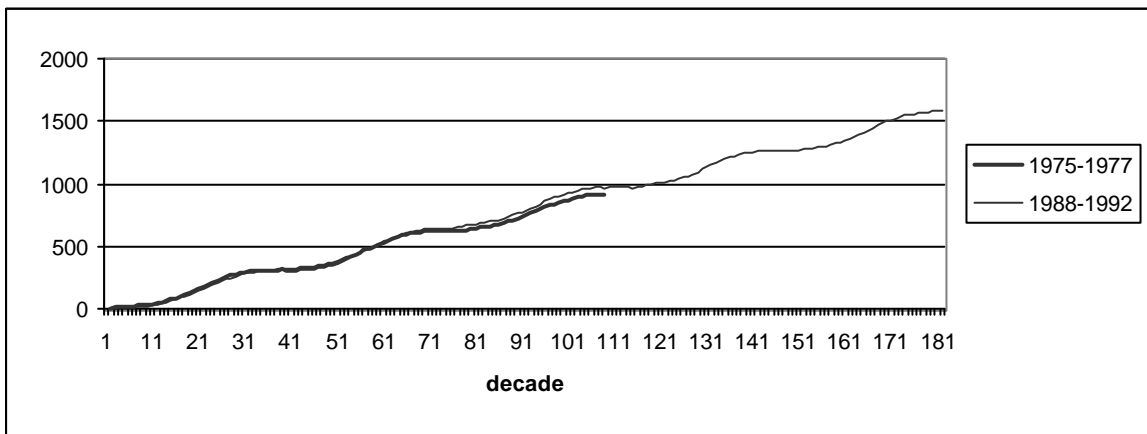
Figuur 5.6 Verloop van het relatieve aandeel meetstations 1989



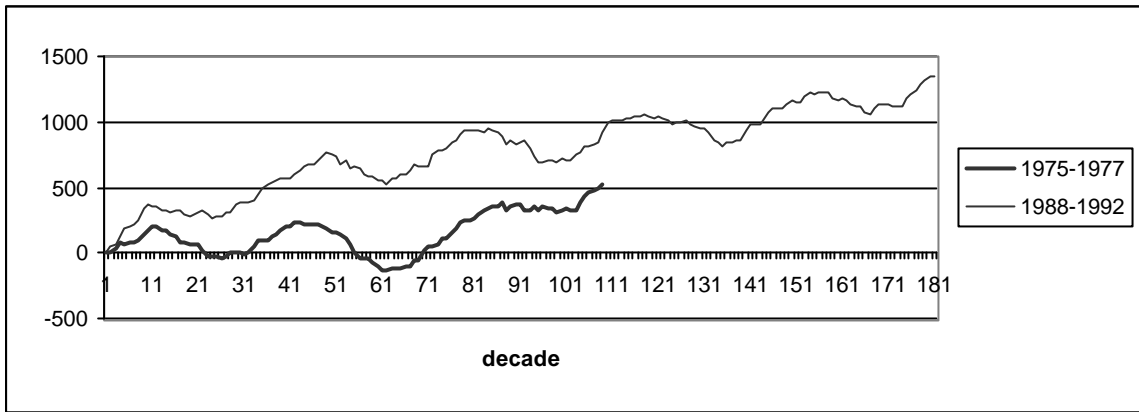
Figuur 5.7 Gesommeerde neerslag



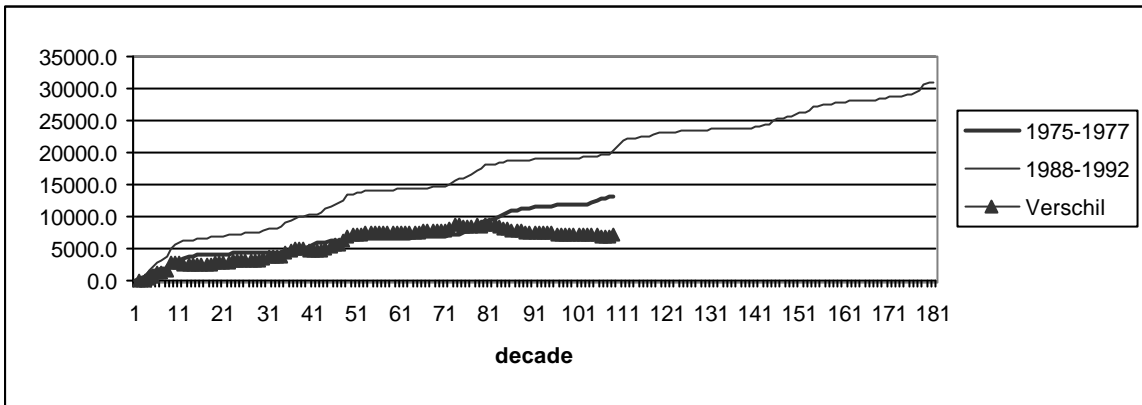
Figuur 5.8 Gesommeerde ETP



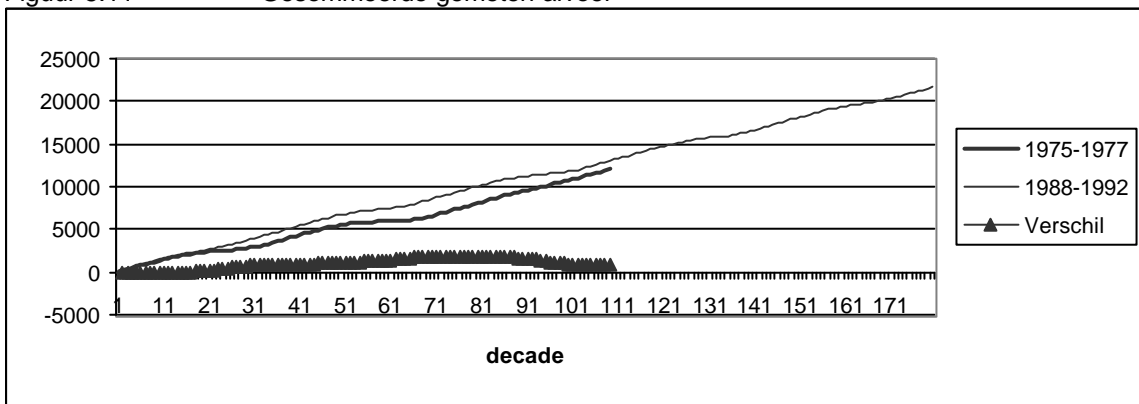
Figuur 5.9 'Temperatuursom'



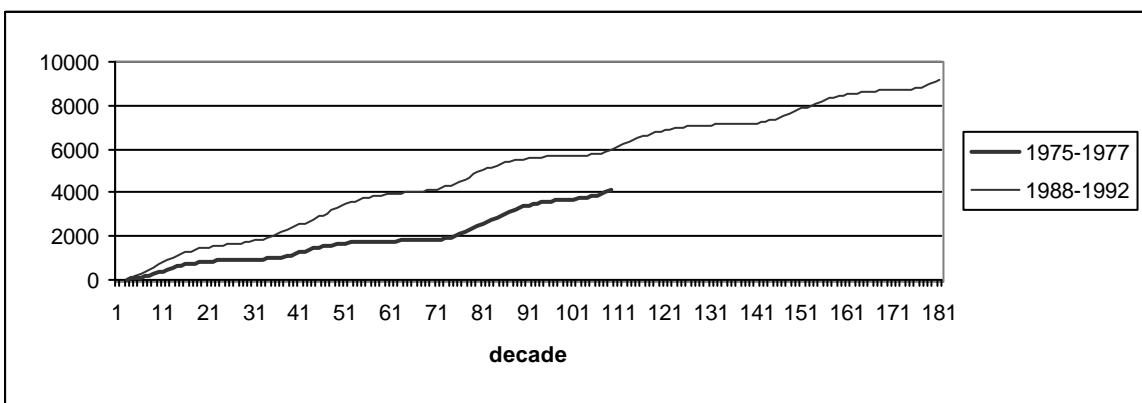
Figuur 5.10 Gesommeerde Peff



Figuur 5.11 Gesommeerde gemeten afvoer



Figuur 5.12 'Soilstorsom'



Figuur 5.13 'gwStorsom'

6. Met MEUSEFLOW-2.1 gesimuleerde veranderingen in afvoer als gevolg van klimaatveranderingen in het Maasstroomgebied

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van een aantal runs met MEUSEFLOW-2.1 beschreven. De effecten van een aantal klimaatscenarios wordt gepresenteerd. De klimaatscenarios die hier gebruikt worden zijn de scenarios die in parallelle onderzoeken ook gebruikt worden (sectie 6.3 en 6.4) of speciaal zijn geconstrueerd om de gevoeligheid van het Maassysteem in beeld te brengen (sectie 6.5). Nadrukkelijk wordt vermeldt dat het scenariostudies betreft: deze studies geven slechts de reactie van het MEUSEFLOW-2.1 model onder een gegeven klimaatverandering. Deze studies doen dus geen uitspraak over de waarschijnlijkheid van de klimaatscenarios.

In alle drie de hier gepresenteerde gevallen betreft het scenarios voor veranderingen in neerslag en temperatuur. Dat wil zeggen dat in de drie besproken gevallen uitgegaan wordt van een gemeten reeks neerslag en temperatuur, waarop deze veranderingen worden gesuperponeerd. De resultaten van de MEUSEFLOW-2.1 runs kunnen dus geïnterpreteerd worden als veranderingen in gesimuleerde afvoer als de gedefinieerde klimaatveranderingen inderdaad plaatsvinden.

Opgemerkt moet worden dat de scenarios zelf weinig variatie bevatten. De klimaatveranderingen volgens de UKHi scenarios, zoals beschreven in paragraaf 6.3, betreffen gesuperponeerde veranderingen die elke maand dezelfde waarde aannemen. Elke januari krijgt dus dezelfde klimaatverandering opgelegd als de voorgaande en opvolgende januari. Dit betekent dat de opgelegde klimaatscenarios een erg duidelijke trend vertegenwoordigen: ELKE winter wordt natter en warmer, ELKE zomer wordt droger en warmer. Deze UKHi scenarios zijn gebruikt in het NOP-project 'The impact of climatic change on the River Rhine and the implications for water management in the Netherlands'.

Het klimaatscenario van paragraaf 6.4 betreft een tweetal specifieke klimaatveranderingsscenarios voor vijf jaar, gesuperponeerd op een neerslag-afvoerreeks van vijf jaar. Hoewel in dit geval niet een repeterende verandering wordt opgelegd, is de trend nog steeds duidelijk: drogere zomers en nattere winters. Deze scenarios worden gebruikt binnen het project 'Effect of Climate Change on the hydrology of the river Meuse'.

Voor paragraaf 6.5 zijn twee additionele veranderingen gedefinieerd. Deze scenarios niet bedoeld zijn om reëel mogelijke klimaatsveranderingen weer te geven, maar zijn bedoeld om de effecten van veranderingen in temperatuur en veranderingen in neerslag van elkaar te scheiden. Dit zijn fysisch inconsistente klimaatsveranderingen zijn (temperatuurstijging zonder daaraan gekoppelde neerslagveranderingen), bedoeld om de gevoeligheden ten opzichte van temperatuurveranderingen en neerslagverandering te analyseren.

Enige opmerkingen en conclusies ten aanzien van de gepresenteerde resultaten zijn te vinden in paragraaf 6.6.

6.2 Relatie met NOP-projecten

Het NOP is het Nederlandse Nationaal Onderzoek Programma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering. Het NOP is een programma ter stimulering en financiering van klimaatonderzoek in Nederland. De doelstellingen van het NOP zijn:

- het versterken en ondersteunen van het Nederlandse klimaatbeleid, in nationale en internationale context;
- het bevorderen van de actieve communicatie tussen wetenschap, beleid en samenleving over klimaatverandering;
- het versterken van de Nederlandse onderzoeksstructuur ten aanzien van klimaatverandering.

Het NOP is een strategisch beleidsondersteunend wetenschappelijk programma waarbinnen beleidsvragen vertaald worden naar onderzoek en onderzoeksresultaten vertaald worden ten behoeve van beleidsontwikkeling. Op deze wijze voorziet het NOP beleidsmakers van beleidsrelevante informatie om zowel nationaal als internationaal klimaatbeleid te kunnen ontwikkelen.

Een viertal NOP-projecten dient hier genoemd te worden:

- 'Impact of climate change on the discharge of the river Rhine'. Dit is het NOP-1 project betreffende de ontwikkeling en toepassing van RHINEFLOW-1.0. Voor verdere informatie wordt verwezen naar Kwadijk, 1993.
- 'The impact of climatic change on the River Rhine and the implications for water management in the Netherlands'. Dit is het NOP-2 project, waarbinnen RHINEFLOW-2.0 en MEUSEFLOW-2.0 zijn ontwikkeld. Tevens is in dit project een beschrijving gegeven van de reacties van het IJsselmeersysteem en de landelijke gebieden op klimaatveranderingen. Voor meer informatie wordt verwezen naar Middelkoop et al., 2000.
- 'Vulnerability water supply of the Netherlands through the river Meuse'. Dit betreft de programmeringsstudie voor het Maasstroomgebied. Voor meer informatie wordt verwezen naar Van Deursen, 1998.
- 'Effect of Climate Change on the hydrology of the river Meuse'. Dit project loopt parallel aan het project zoals beschreven in dit rapport. Resultaten van MEUSEFLOW-2.1 vormen een belangrijk onderdeel van dit project.
- 'Integrated water management strategies for the Rhine and Meuse basins in a changing environment'. Ook dit project loopt parallel met het in dit rapport beschreven project. Hoewel voor dit project MEUSEFLOW-2.1 berekeningen gebruikt zullen worden, is de reikwijdte van het hiergenoemde NOP-project veel breder dan de Maas. MEUSEFLOW-2.1 berekeningen zullen slechts een gering aandeel vormen van dit project.

Voor meer informatie over NOP en de daarin gedefinieerde projecten wordt verwezen naar www.nop.nl.

6.3 De UKHi klimaatscenarios

Het betreft hier de UKHi scenarios voor 2050 en 2100 zoals toegepast in het NOP-2 project, de RHINEFLOW en MEUSEFLOW-1.0 studies. De onderbouwing van deze scenarios en de toepassing op het Rijnstroomgebied wordt uitgebreid beschreven in Middelkoop et al. (2000). Van dit scenario zijn twee varianten: UKHi2050 als scenario voor het jaar 2050 en UKHi2100 voor het jaar 2100. De verandering in neerslag en temperatuur volgens deze scenarios zijn gegeven in figuur 6.1 en 6.2. Dit scenario is toegepast op de neerslag en temperatuursreeksen van 1967-1995, waarna gemiddelde decadeafvoeren van de gesimuleerde reeksen zijn bepaald. De resultaten voor Monsin worden weergegeven in figuur 6.3.

6.4 Klimaatscenarios voor het NOP project 'Effect of Climate Change on the hydrology of the river Meuse'

In het NOP-project 'Effect of Climate Change on the hydrology of the river Meuse' zijn twee scenarios voor klimaatverandering gedefinieerd. Het betreft hier een scenariostudie voor de jaren 1988-1992. Op de situatie van 1988-1992 worden twee klimaatveranderingen gesuperponeerd zoals gegeven in figuur 6.4 en 6.5.

Scenario 1 (CC1) is gebaseerd op de resultaten van de HADCM2GSa1 run. Dit scenario werd vroeger aangeduid als het HADCM2SUL en is door NOP gekozen als referentiescenario voor alle projecten. GSa1 staat voor 'Greenhouse and Sulphate 1% forcing Member1'. Meer informatie over dit scenario kan gevonden worden op: www.cru.uea.ac.uk/link/experiments/4_experi_details.html

De 'change in temperature' en 'change in precipitation' waarden zijn gebaseerd op het verschil tussen de gemiddelde waarden van de 2070-2099 en 1960-1990 resultaten van bovengenoemde runs.

Voor scenario 2 (CC2) is gebruik gemaakt van data van vijf verschillende GCM's: de HADCM2GSa1 run, de HADCM2GGa1 run, de HADCM2GGa4 run, de CGCM1 run, en de ECHAM4 run. Meer informatie betreffende deze GCM's kan gevonden worden op: ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/dkrz/dkrz_index.html

De veranderingen zoals bepaald met deze vijf runs (gemiddelde waarden voor de periode 2070-2099 ten opzichte van de gemiddelde waarden van de 1960-1990 runs) zijn in random volgorde achter elkaar gezet om een vijfjarige reeks te krijgen.

Deze klimaatveranderingsscenarios zijn dusdanig geconstrueerd dat de exacte herhaling zoals die voorkomt in de UKHi studies voorkomen wordt. Gesimuleerde afvoeren voor Monsin onder het huidige klimaat worden gegeven in figuur 6.6 en verschillen als gevolg van de gedefinieerde klimaatveranderingen in figuur 6.7.

6.5 'Klimaatscenario's' ter bepaling van de gevoeligheid van het Maassysteem

Omdat beide gebruikte scenario's uitgaan van een verhoogde neerslag in de winter, gepaard gaande met een verminderde neerslag in de zomer en een verhoogde temperatuur in de zomer spelen in de resultaten van deze studies twee effecten door elkaar. Om de invloed van alleen een stijgende temperatuur weer te geven zijn twee additionele experimenten gedaan: een waarbij de temperatuurveranderingen volgens het UKHi 2100 waarbij de neerslagveranderingen op nul zijn gesteld (UKHi-A) of waarbij alleen de winterse neerslagstijgingen op 0 zijn gesteld (UKHi-B), waarbij dus de neerslagdaling in de zomer wel meegerekend wordt. De toegepaste klimaatveranderingen zijn gegeven in figuur 6.8 en 6.9, terwijl de resultaten voor Monsin zijn gegeven in figuur 6.10.

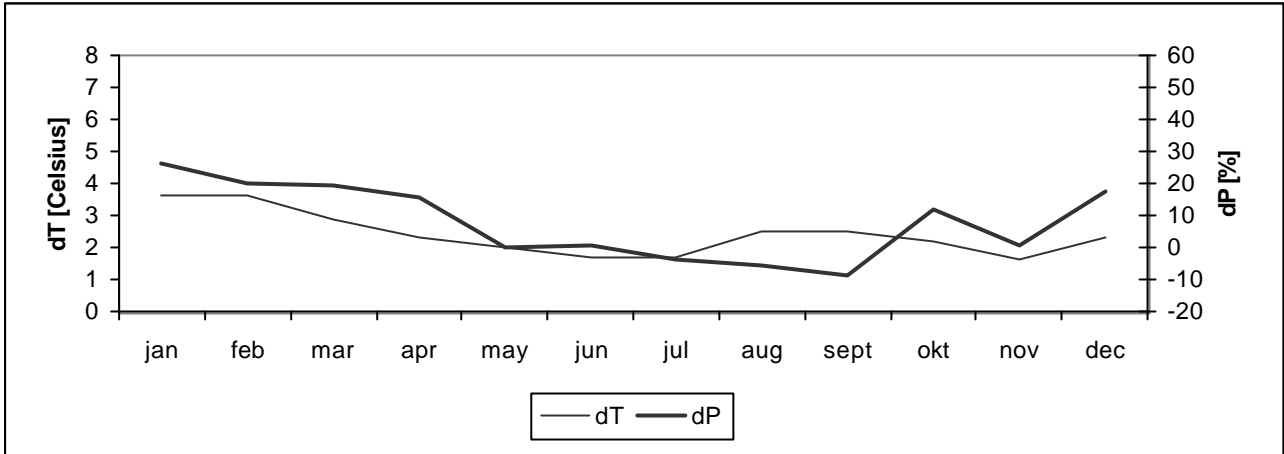
Analyse van deze resultaten geeft aan dat de gemiddelde afvoer als gevolg van temperatuursveranderingen volgens het UKHi-A en UKHi-B scenario inderdaad lager worden. Uit de volledige runs zoals beschreven in sectie 6.3 blijkt dat dit gedrag vrijwel geheel teniet gedaan wordt door de verhoogde neerslagen die ook bij dit scenario horen.

6.6 Conclusies naar aanleiding van de gepresenteerde klimaatscenario's

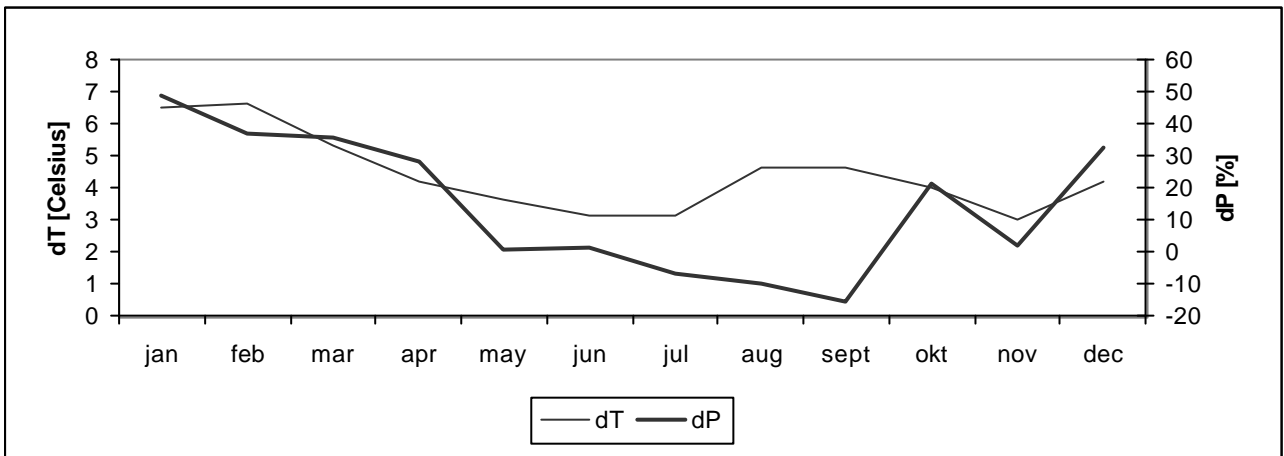
De hier gepresenteerde klimaatveranderingsstudies zijn de resultaten van het MEUSEFLOW-2.1 model. In hoeverre dit model in staat is de klimaatveranderingen voor het Maasstroomgebied juist te simuleren moet blijken uit een vergelijk van deze resultaten met de gedetailleerdere modellen. Dit vergelijk is onderdeel van het project 'Effect of Climate Change on the hydrology of the river Meuse'.

In het kader van laagwatersituaties dient men zich hier te realiseren dat, volgens de methodologie van MEUSEFLOW 2.1, een toename van de problematiek van laagwaters ontstaat in situaties waarin de winterneerslag verminderd of gelijk blijft, en de zomertemperatuur verhoogd wordt. Aangezien alle hier gebruikte scenario's uitgaan van verhoging van de winterneerslag, kan geen inzicht verkregen in situaties waarin de winterneerslag verminderd, gevolgd door een zomer met de voorspelde hogere temperaturen. Dit is echter wel juist de situatie die in 1975-1976 tot droogte leidde.

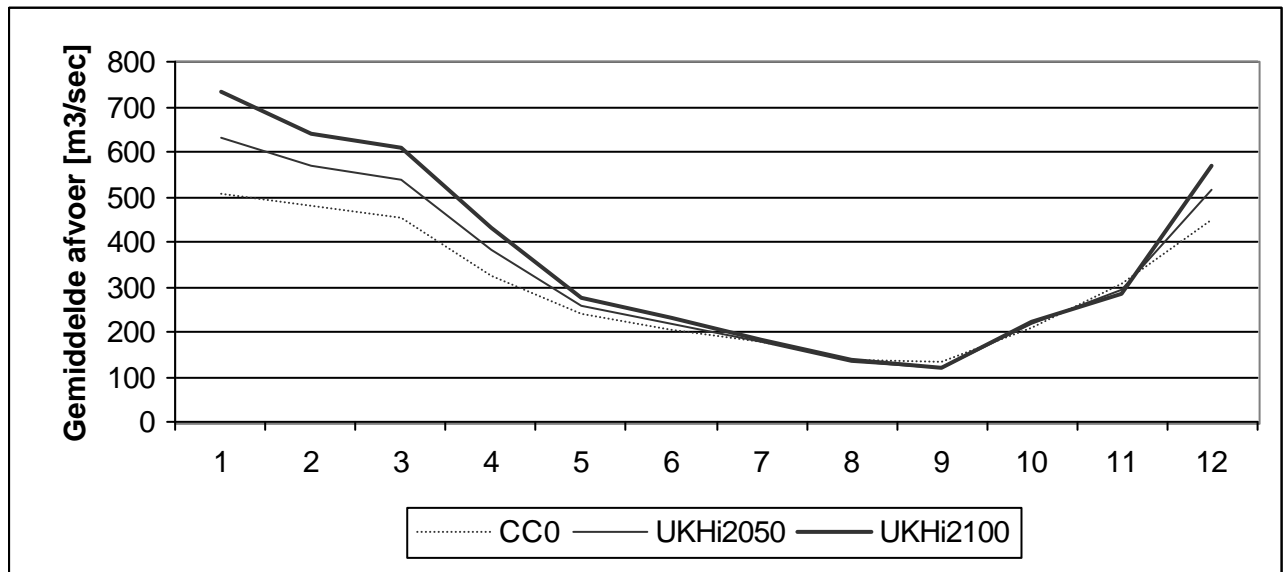
Interessant zou het zijn om de relatie tussen het ontstaan van de situatie zoals die van 1976 (zie ook hoofdstuk 5) en klimaatveranderingen nader te onderzoeken. Onder de hier gebruikte klimaatveranderingsscenario's neemt de neerslag in winter voorafgaand aan de droge zomer toe, en zal het effect van klimaatverandering dus zijn dat de zomerafvoeren toe zullen nemen. Echter, de uitspraak dat de winterneerslagen ALTIJD zullen toenemen, en er dus geen situaties zoals in de winter 1975/1976 zullen optreden, is misschien niet terecht. Een nadere beschouwing van de gebruikte scenario's ten aanzien van deze problematiek wordt aanbevolen.



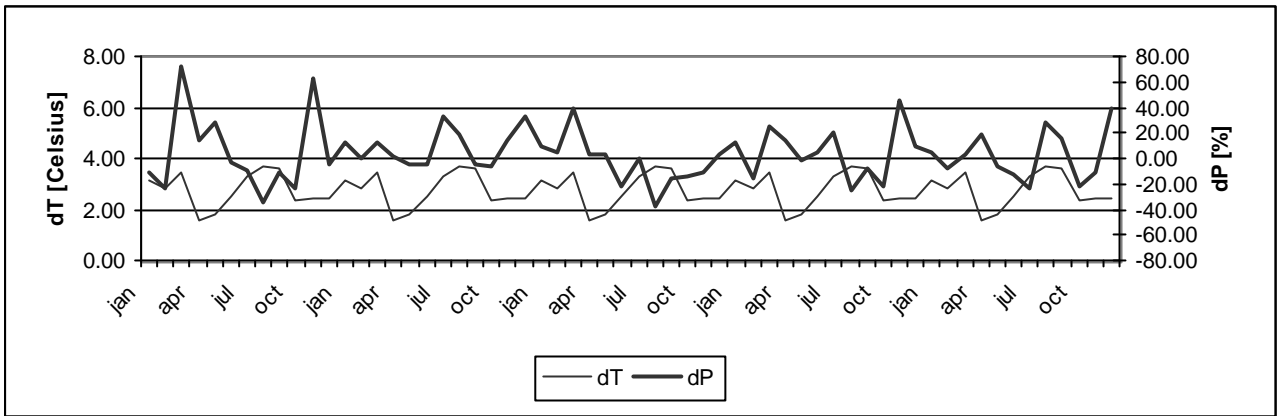
Figuur 6.1 Definitie van het UKHi 2050 scenario



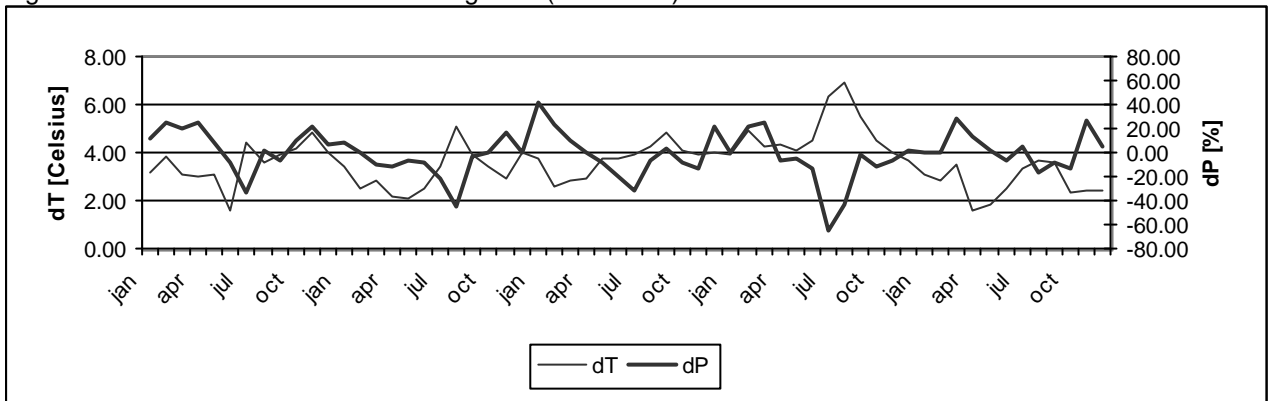
Figuur 6.2 Definitie van het UKHi 2100 scenario



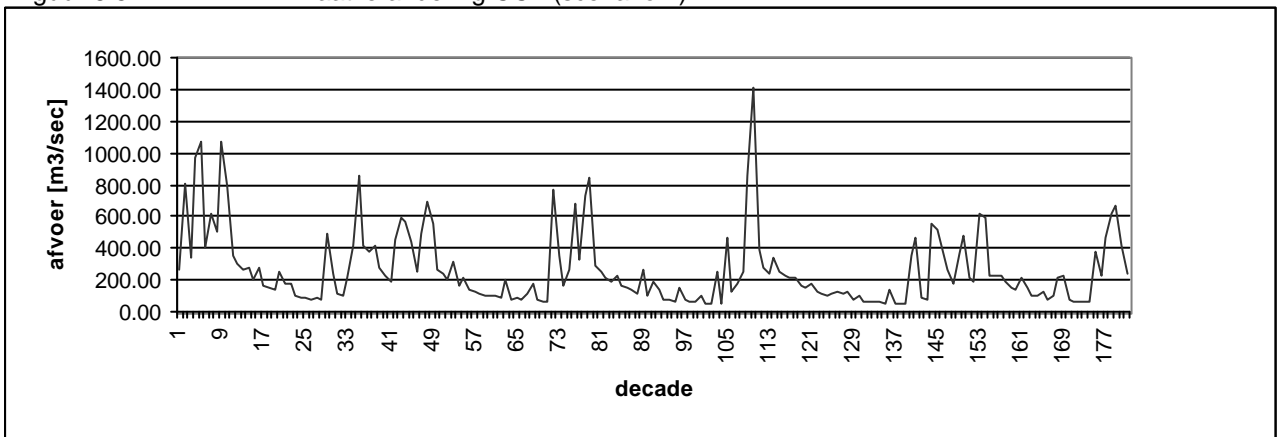
Figuur 6.3 Gemiddelde afvoeren onder gedefinieerde klimaatscenario's



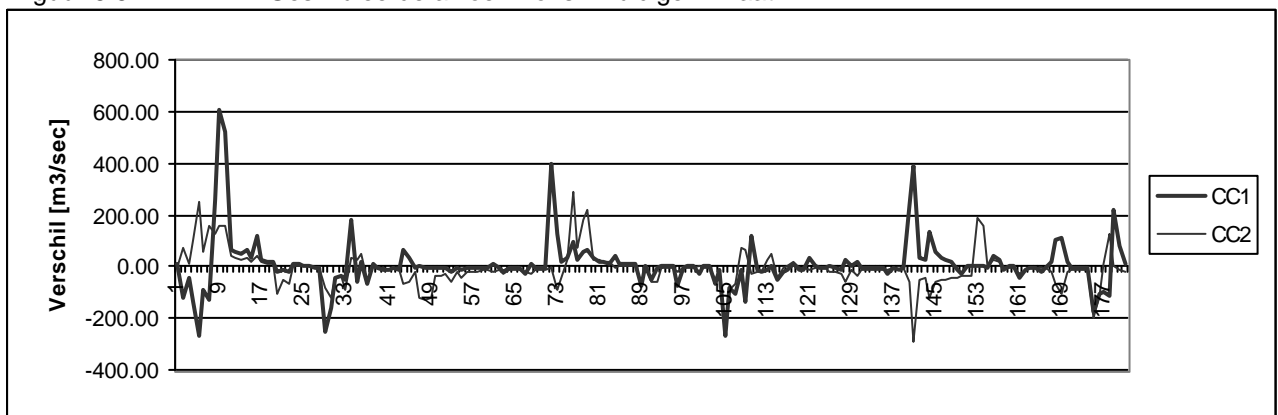
Figuur 6.4 Klimaatverandering CC1 (scenario 1)



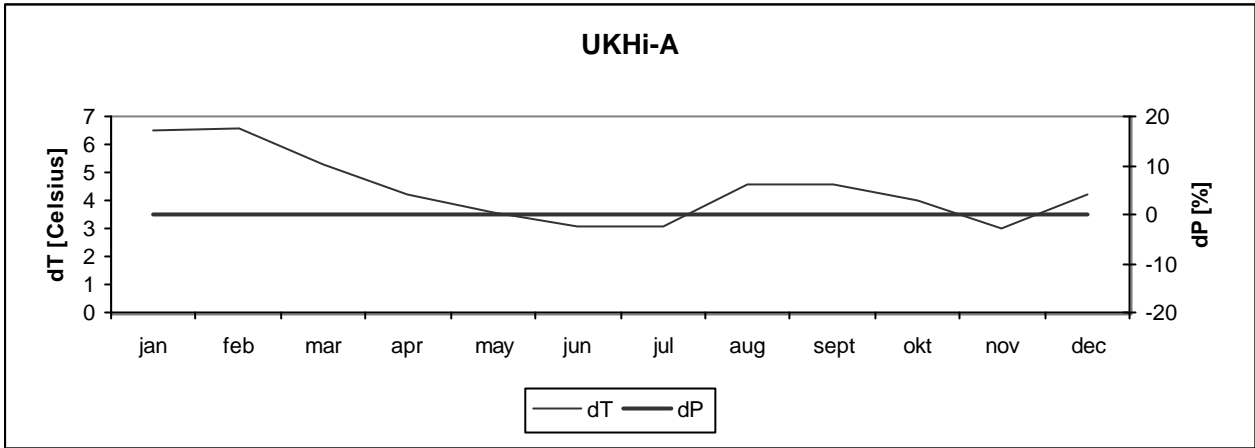
Figuur 6.5 Klimaatverandering CC2 (scenario 2)



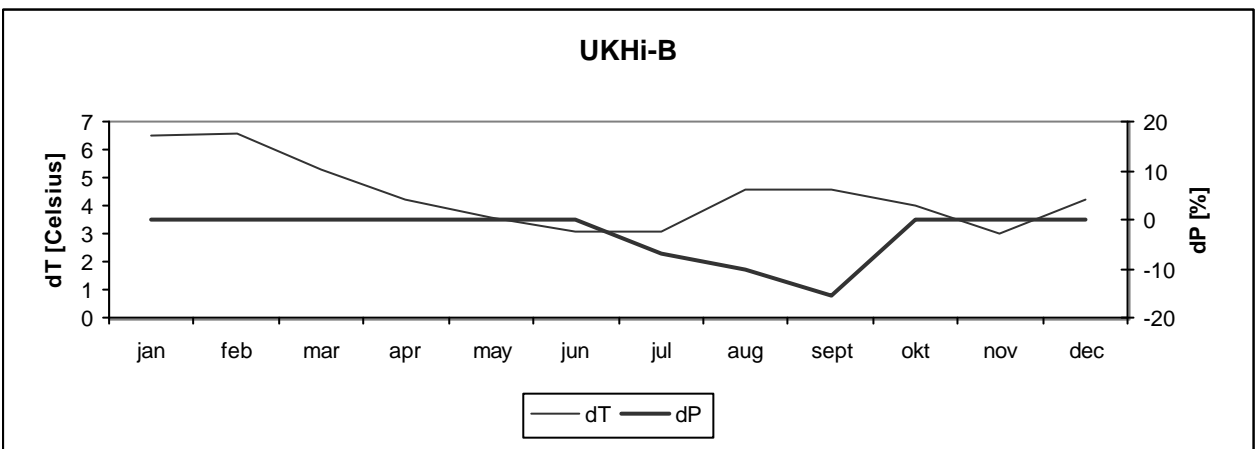
Figuur 6.6 Gesimuleerde afvoer Monsin huidige klimaat



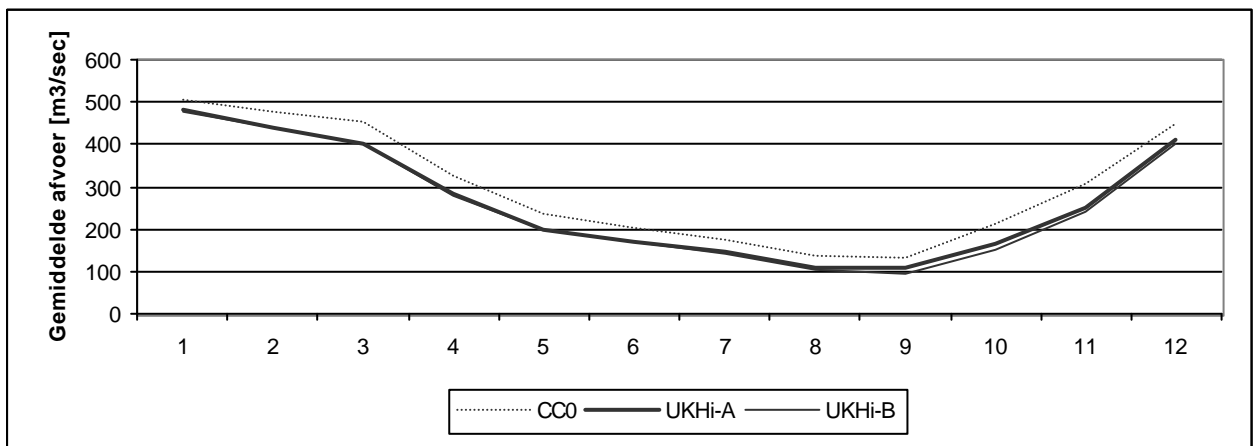
Figuur 6.7 Verschillen in afvoer onder de gedefinieerde klimaatscenario's



Figuur 6.8 Klimaatverandering volgens het UKHi-A scenario



Figuur 6.9 Klimaatverandering volgens het UKHi-B scenario



Figuur 6.10 Gesimuleerde afvoer voor Monsin voor UKHi-A en UKHi-B

Literatuur

Berger, H.E.J., 1992. Flow Forecasting for the River Meuse. Proefschrift Technische Universiteit Delft, Vakgroep Civiele Techniek

Kwadijk, J.C.J., 1993. The impact of climate change on the discharge of the river Rhine. PhD-thesis Utrecht University, department of Physical Geography, The Netherlands. KNAG/NGS publication 171.

Van Deursen, W.P.A., 1995. Geographical Information Systems and Dynamic Models. Development and application of a prototype spatial modelling language. PhD-thesis Utrecht University, department of Physical Geography, The Netherlands. KNAG/NGS publication 190.

Van Deursen, W.P.A., 1997. Voorbereidingen MEUSEFLOW 2, Verdamping en meteostations, Rapportage aan RIZA, November 1997.

Van Deursen, W.P.A., 1998a. Tussenrapportage Meuseflow 2, rapportage fase 1. Rapportage aan RIZA, November 1998.

Van Deursen, W.P.A., 1998b. Design of the Rhineflow-2 model. Report of the NRP project 952210. Rapportage voor NOP.

Van Deursen, W.P.A., 1998c. Vulnerability water supply of the Netherlands through the river Meuse. Programming study. Report of the NRP project 952251. Rapportage voor NOP.

Van Deursen, W.P.A., 1999. Rapportage Meuseflow 2.0, eindrapportage ontwikkeling MEUSEFLOW 2.0. Rapportage aan RIZA, December 1999.

Van Deursen, W.P.A., 2000. Tussenrapportage Meuseflow 2.1, rapportage fase 1 ontwikkeling MEUSEFLOW 2.1. Rapportage aan RIZA, Augustus 2000.

Middelkoop, H. (editor) 2000. The impact of climate change on the river Rhine and the implications for water management in the Netherlands, NRP-project 952210, RIZA Report 2000.010. June 2000.