

**Kalibratie en aanpassingen
HBV model voor de Rijn voor
laagwater**



Kalibratie en aanpassingen HBV model voor de Rijn voor laagwater

Femke Davids; Corine ten Velden; Dirk Eilander; Willem van
Verseveld

1220065-000

Titel

Kalibratie en aanpassingen HBV model voor de Rijn voor laagwater

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat WMCN

Project

1220065-000

Kenmerk

1220065-000-ZWS-0015

Pagina's

94

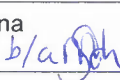
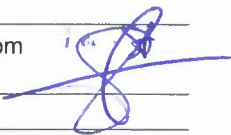
Trefwoorden

HBV; Rijn; RWsOS Rivieren; GRADE; Deltabeslissing Zoetwater

Samenvatting

Het doel van deze exercitie is om een verbeterd modelinstrumentarium op te leveren om betere afvoerverwachtingen te genereren voor de zoetwatervoorziening in Nederland tijdens het droogtseizoen. Dit rapport bevat de resultaten van de kalibratie op het aangepaste hydrologische model HBV voor RWsOS Rivieren en GRADE. Het model is aangepast in Zwitserland waar het model is uitgebreid met vier meren. Het nieuwe HBV model presteert behoorlijk tot goed en is significant verbeterd voor de meeste locaties en substroomgebieden in de Rijn. Voor Lobith zijn de afvoerresultaten echter vergelijkbaar gebleven.

Daarnaast is een hindcast uitgevoerd van 90 ECMWF-DET voorspellingen met het huidige HBV model (met en zonder externe voorspelling voor Maxau (Q.fx)) en het nieuwe HBV model, over de periode april tot en met juni 2011, voor Maxau en Lobith. ECMWF-DET voorspellingen met het nieuwe HBV model presteren beter dan ECMWF-DET voorspellingen met het huidige HBV model voor Lobith en Maxau, echter het nieuwe HBV model presteert niet beter dan de externe afvoer voorspelling (Q.fx) voor Maxau. Het nieuwe HBV model in combinatie met het Sobek model geeft voor Lobith geen verbetering ten opzichte van het huidige HBV model (met en zonder externe voorspelling voor Maxau).

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	aug. 2015	Femke Davids		Frederiek Sperna Weiland		Simone van Schijndel	
1.1	4-9-2015	Femke Davids		Frederiek Sperna Weiland		Gerard Blom	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Eerdere onderzoeken	1
1.2 Doelstellingen	2
2 Eerste analyse toevoeging meren aan Zwitsers deel van HBV	5
3 Voorbereiding kalibratie HBV model voor laag water	9
3.1 Data en FEWS configuratie	9
3.1.1 Meteorologische data	9
3.1.2 Hydrologische data voor kalibratie	11
3.1.3 Modelperiodes	16
3.1.4 FEWS configuratie	16
3.2 HBV Model	17
3.3 Opzet kalibratie	18
3.3.1 Monte-Carlo analyse voor het Rijn stroomgebied	18
3.3.2 Technische opzet kalibratie	19
3.3.3 Behandeling van de parameters	20
3.3.4 Performance-indicatoren	22
3.3.5 Aanbevelingen voor aanpassingen in HBV en FEWS	23
4 Kalibratie HBV model Rijn voor laagwater	25
4.1 Resultaten per stroomgebied Rijn	25
4.1.1 Zwitserse en bovenstroomse Rijn tot Maxau	25
4.1.2 Moezel	28
4.1.3 Neckar	29
4.1.4 Kleine Duitse substroomgebieden	30
4.1.5 Lobith	31
4.2 Samenvatting performance HBV model	32
4.3 Conclusies en aanbevelingen	34
5 Performance HBV Rijnmodel voor laag water met dagelijkse tijdstap	35
5.1 Data	35
5.2 Aanpassingen model voor dagtijdstap	35
5.3 Resultaten	35
5.4 Conclusies	38
6 Validatie HBV model met ECMWF-DET voorspellingen	39
6.1 Data, model en configuratie	39
6.2 Resultaten	40
6.3 Conclusies	42
7 Conclusies en aanbevelingen	43
7.1 Uur model	43
7.2 Dag model	44
7.3 Aanbevelingen	44
8 Literatuur	45

Bijlage(n)

A Resultaten uurmodel	47
A.1 Zwitserse en bovenstroomse Rijn tot Maxau	47
A.1.1 Thur-Andelfingen	47
A.1.2 Reuss-Mellingen/ Limmat-Baden	49
A.1.3 Aare-Brügg	50
A.1.4 Aare-Hagneck	52
A.1.5 Aare-Untersiggenthal	53
A.1.6 Birs-Münchenstein	55
A.1.7 Reuss-Luzern	56
A.1.8 Emme-Wiler/ Werkkanal	58
A.1.9 Rhein-Neuhausen	59
A.1.10 Rhein-Basel	61
A.1.11 Rhein-Diepoldsau	62
A.1.12 Rhein-Domat/ Ems	64
A.1.13 Maxau	65
A.2 Moezel	67
A.2.1 Bollendorf	67
A.2.2 Trier	68
A.2.3 Cochem	70
A.3 Neckar	71
A.3.1 Rockenau-SKA	71
A.4 Kleine Duitse stroomgebieden	73
A.4.1 Nahe	73
A.4.2 Lahn	75
A.4.3 Midden-Rijn	76
A.4.4 Sieg	79
A.4.5 Erft	81
A.4.6 Ruhr	82
A.4.7 Beneden-Rijn	84
A.4.8 Lippe	85
A.5 Lobith	87
B Resultaten dagmodel Maxau en Lobith	89
B.1 Maxau	89
<i>Modelresultaten 1965-2000</i>	89
B.2 Lobith	91
<i>Modelresultaten 1965-2000</i>	91

1 Inleiding

Het deelprogramma Zoetwater heeft de afgelopen jaren de Deltabeslissing Zoetwater voorbereid. De komende tijd ligt het accent in het deelprogramma op de invoering van de voorzieningenniveaus en de uitwerking van de maatregelen. Als randvoorwaarde bij deze uitwerkingen wordt gebruik gemaakt van de Deltascenario's. Onderdeel van de Deltascenario's zijn de grensoverschrijdende debieten van de grote rivieren (Rijn bij Lobith en Maas bij Sint Pieter). Deze aanvoeren zijn zeer relevant voor de zoetwatervoorziening van Nederland bij droogte. De modellen zijn echter gekalibreerd voor middel tot hoogwatersituaties en niet voor laagwatersituaties. Dit geldt voor beide stroomgebieden. Vanwege het grotere belang van de Rijnafvoer in droge tijden voor de zoetwatervoorziening ten opzichte van de bijdrage van de Maas wordt de prioriteit bij de verbetering van het instrumentarium bij het Rijnstroomgebied gelegd.

Het instrumentarium bestaat uit een neerslag-afvoermodel (HBV) voor het stroomgebied tot aan de grens van Nederland (Figuur 1.1) en een hydrodynamisch model (SOBEK) voor de hoofdstroom. De modellen worden aangestuurd binnen een FEWS omgeving voor operationele resultaten (RWSOS Rivieren) en voor scenario berekeningen (FEWS GRADE). Het modelinstrumentarium is tot op heden niet op laag water afgeregeld, de prioriteit heeft altijd gelegen bij het goed kunnen simuleren van hoogwatersituaties.

Voor het operationele systeem is in het verleden de keuze gemaakt om een versimpelde versie van het HBV model voor de Rijn te gebruiken in verband met operationele prioriteiten zoals snel beschikbaar zijn van modelresultaten in crisis situaties. Dit is de reden dat de Zwitserse meren niet zijn meegenomen in het huidige operationele HBV model.

In laagwater periodes is het Zwitserse deel van het stroomgebied extra belangrijk. In extreme situaties kan meer dan 80% van de afvoer bij Lobith uit het Zwitserse deel van het stroomgebied komen. Zwitserland wijkt met de Alpen nogal van de rest van het gebied af, zowel qua geografie als het afvoerregime, met de hoogste waarden in de zomer. Verder zijn er in Zwitserland een aantal grote meren die benedenstrooms een significant effect hebben. De meren hebben een bufferende werking met een positief effect op de lage afvoer en een dempend effect op hoge afvoeren. Deze meren worden tot op heden niet goed meegenomen in het HBV model. Dit was een belangrijk kritiekpunt van onze Duitse collega's op onze analyses van de effecten van klimaatverandering op de Rijnafvoeren.

1.1 Eerdere onderzoeken

Het HBV model voor de Rijn is ontwikkeld door Rijkswaterstaat in samenwerking met het Duitse Instituut voor hydrologie (BfG) tussen 1997 en 2004. De focus van het model lag voornamelijk in het Duitse stroomgebied. In 2009 heeft het Zweedse SMHI samen met de BfG een herkalibratie uitgevoerd met nieuwe neerslag en temperatuur datasets. Hierbij werd ook meer aandacht gegeven aan laagwatersituaties en verdamping. Deze kalibratie bevatte onder andere een contributie benadering voor laagwatersituaties en een evaluatie van de verdamping berekeningen. Het model presteerde hierna beter in laagwatersituaties. Het Zwitserse deel van het stroomgebied was echter niet meegenomen in deze herkalibratie en zomerafvoeren werden in het algemeen onderschat (SMHI, 2009).

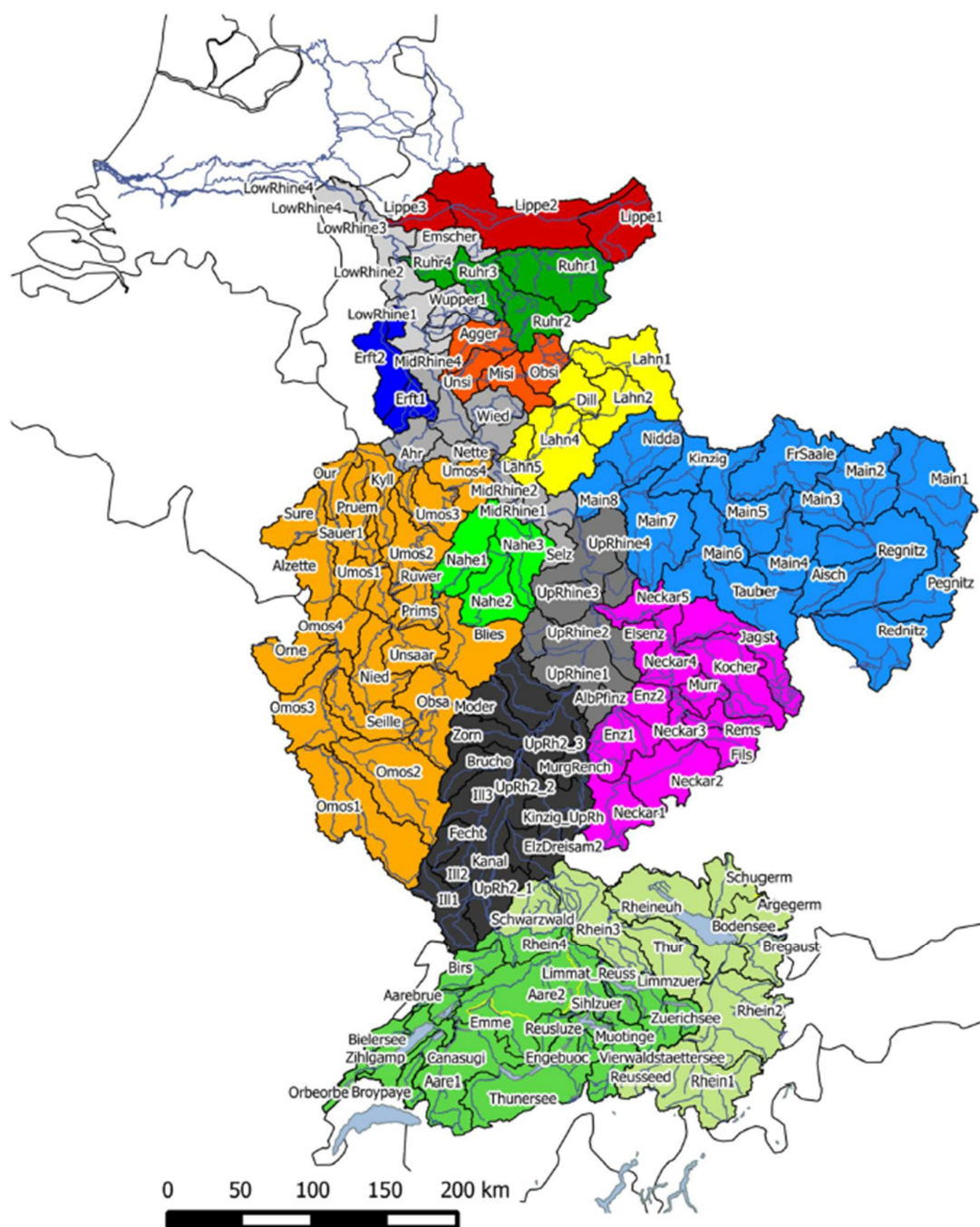
In 2013 is voor het GRADE project een herkalibratie en onzekerheidsanalyse gedaan op de modelparameters met een GLUE analyse (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) op het dagelijkse HBV model voor de Rijn voor extreme afvoeren. Aan de hand van deze analyses is besloten het dagelijkse model uit te breiden met de vier grote meren in Zwitserland.

1.2 Doelstellingen

Het algemene doel van deze exercitie is de oplevering van een HBV model voor de Rijn gekalibreerd op laagwater (zowel uur als dag model). Het uurmodel zal najaar 2015 geïmplementeerd worden in het operationele systeem RWSOS Rivieren zodat de modelresultaten geëxporteerd kunnen worden naar het operationele systeem RWSOS Waterbeheer.

Aanvankelijk is een eerste aanzet tot verbetering van het modelinstrumentarium gedaan door in het huidige operationele model uit RWSOS Rivieren vier Zwitserse meren toe te voegen en een korte analyse te doen van de gevolgen van deze verandering voor de locatie Maxau. Hier is begin 2015 een rapport van verschenen (Perwitasari, 2015). In hoofdstuk 2 wordt een korte samenvatting van deze analyse gegeven.

Naar aanleiding van de resultaten van deze analyse is besloten om door te gaan met een kalibratie van dit uitgebreide Rijn model specifiek gericht op laagwater. Deltares heeft een kalibratie voor het droogteseizoen uitgevoerd op het HBV Rijnmodel met uur tijdstappen. Het gekalibreerde HBV Rijnmodel is vervolgens omgezet naar een HBV Rijn model met dag tijdstappen. Op beide modellen is een performance analyse uitgevoerd. Het doel van dit gekalibreerde HBV Rijn model is om dit te gebruiken tijdens het droogteseizoen (april t/m september) en met nadruk niet voor de winterperiode.



Figuur 1.1 Overzicht van het huidige operationele HBV model voor de Rijn. De kleuren geven de belangrijkste substroomgebieden aan (e.g. Main, Moezel, Neckar etc.)

2 Eerste analyse toevoeging meren aan Zwitsers deel van HBV

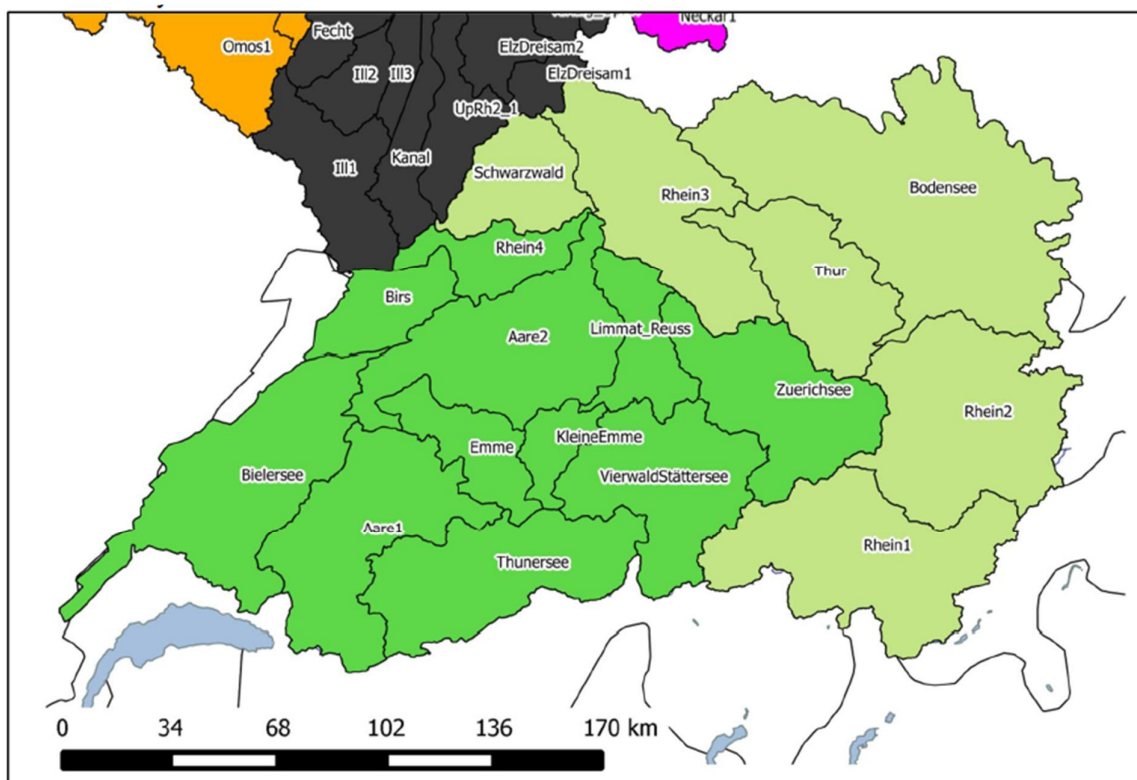
Dit hoofdstuk is een beknopte samenvatting van het rapport “HBV Rhine model improvement for low flow conditions using four lakes configuration in Upper Rhine basin” (Perwitasari, 2015) met als doel om de achtergrond informatie samen te brengen in deze uitgebreide studie.

De vier meren (Figuur 2.1) in Zwitserland zijn toegevoegd aan de volgende operationele HBV stroomgebieden:

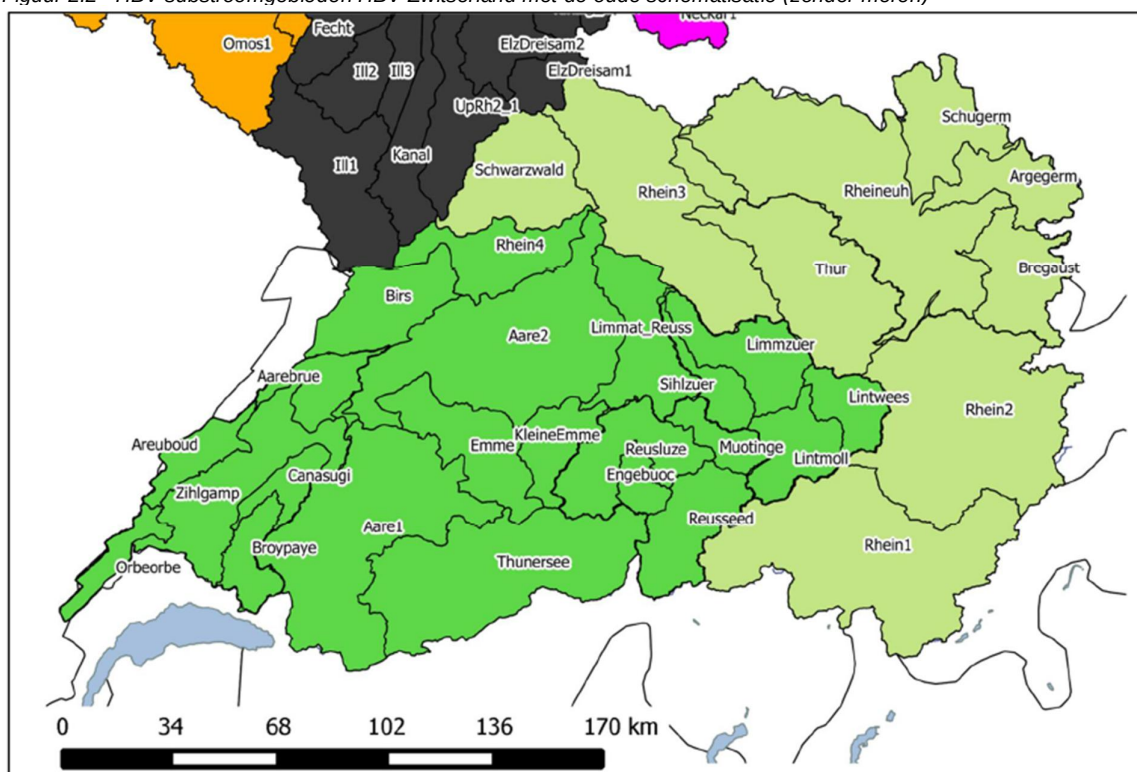
- 1 Bodensee
- 2 Neuenburgersee
- 3 Vierwaldstattersee
- 4 Zurichsee



Figuur 2.1 Een overzicht van de meren in Zwitserland.



Figuur 2.2 HBV substroomgebieden HBV Zwitserland met de oude schematisatie (zonder meren)



Figuur 2.3 HBV substroomgebieden HBV Zwitserland met de nieuwe schematisatie (met meren)

De model schematisatie is in deze vier stroomgebieden aangepast door deze op te delen in kleinere substroomgebieden waar de meren als meest benedenstroomse substroomgebied zijn geconfigureerd (Figuur 2.2 en 2.3).

Na deze aanpassing is een simulatie uitgevoerd om initieel te testen of deze aanpassing een verbeterend effect zou hebben op de gesimuleerde afvoer bij Maxau van januari 2011 t/m augustus 2011.

De afvoer vergelijking voor Maxau gaf aan dat er een verbetering was in de performance en Nash-Sutcliffe efficiency van het aangepaste model ($R^2 = 0.890$ and $E = 0.847$) ten opzichte van het huidige operationele model zonder meren ($R^2 = 0.809$ and $E = 0.447$). Vooral in de periode april t/m juni gedurende laagwater situaties zijn de simulaties van het nieuwe model dichter bij de observaties dan het oude model. De relatietabel tussen uitstroom en waterdiepte voor de meren presteert goed in deze periode.

3 Voorbereiding kalibratie HBV model voor laag water

3.1 Data en FEWS configuratie

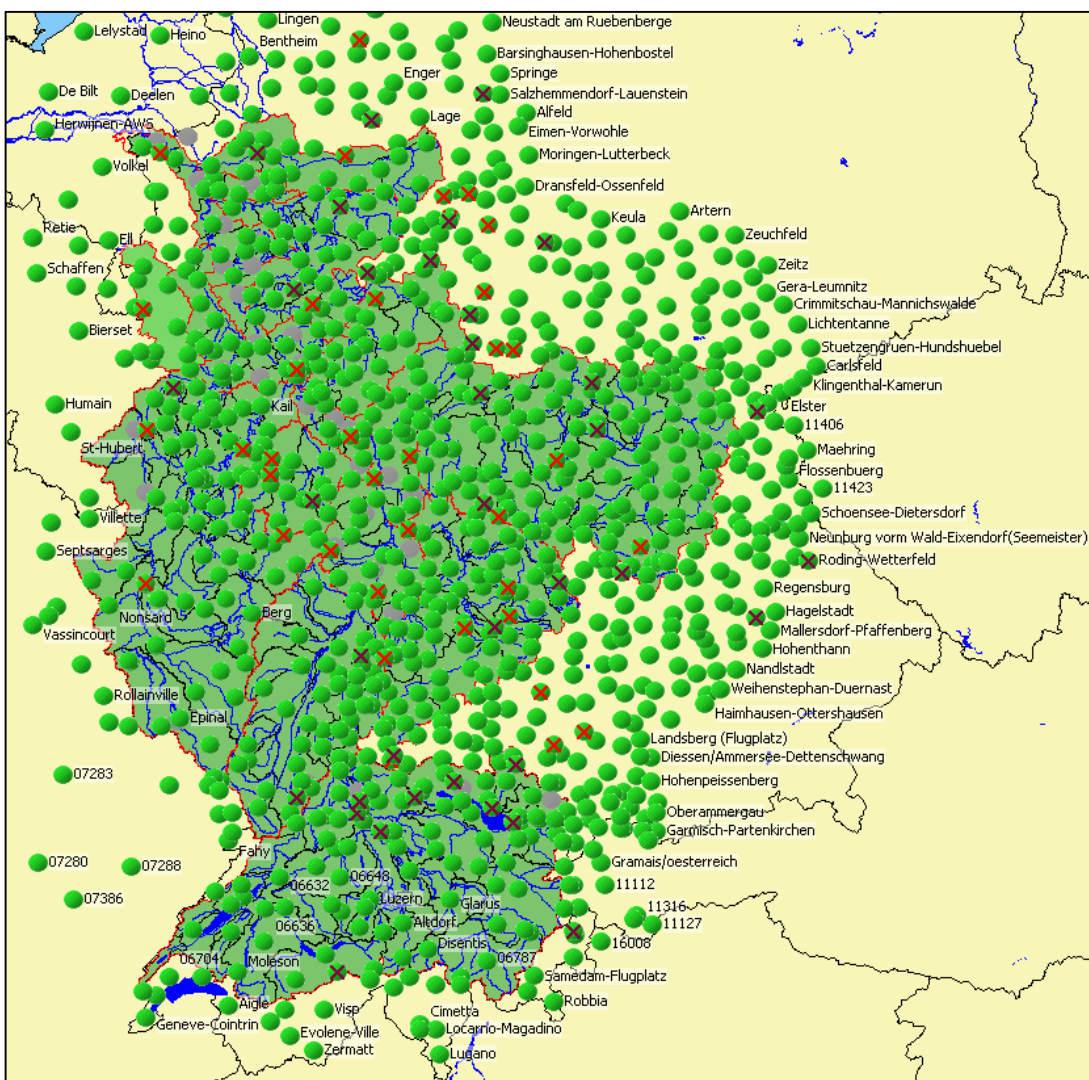
Om de kalibratie van het uurmodel uit te voeren zijn zowel meteorologische data nodig om het model mee te draaien (neerslag, temperatuur en verdamping) als hydrologische data om het model mee te kalibreren en de performance van het model te kunnen evalueren (rivierafvoeren).

3.1.1 Meteorologische data

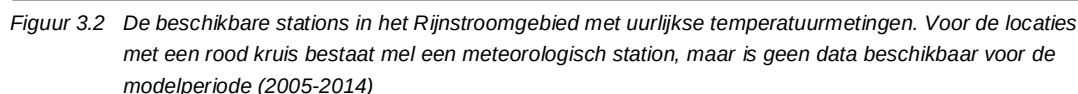
De meteorologische invoerreeksen die het model ingaan worden in FEWS gegenereerd door middel van interpolatie van stationsmetingen over het hele Rijnstroomgebied, waarna de resulterende tijdserie per substroomgebied berekend wordt. De meteorologische data die is gebruikt voor de kalibratie is gebaseerd op dezelfde data die gebruikt wordt in het operationele model, alleen voor de kalibratie zijn alleen historische metingen gebruikt, waar in het operationele systeem ook voorspellingen worden gebruikt. De gebruikte meteorologische data zijn uurlijkse neerslag- en temperatuurreeksen van stations van het KNMI, de DWD (Deutsche Wetterdienst) en Météo-France. Een overzichtskaart van alle neerslagstations staat in Figuur 3.1; dit zijn alle meteorologische stations die tenminste voor een deel van de periode uurlijkse neerslagmetingen hebben. Een kaart van alle temperatuurstations staat in Figuur 3.2.

Uurlijkse data is voor een deel beschikbaar vanaf 2005, en voor een deel vanaf 2006 of later. Na het importeren van de tijdseries worden de in FEWS ingebouwde checks op extreme waardes uitgevoerd op de tijdseries, waarbij onwaarschijnlijk hoge of lage waardes er uit worden gehaald als zijnde meetfouten en worden alle series die dat nog niet zijn gedisaggregeerd tot uurwaarden (sommige hebben een tijdstap van 3, 6 of 12 uur). De tijdreeksen worden vervolgens geïnterpoleerd; zo ontstaan gebiedsdekkende kaarten met temperatuurwaardes en met neerslagwaardes. Over deze kaarten wordt per tijdstap het gemiddelde berekend per substroomgebied, zodat per substroomgebied een tijdserie ontstaat met uurlijkse neerslagwaardes en een tijdserie met uurlijkse temperatuurwaardes, die als input dienen voor het HBV model.

Voor verdamping worden langjarige maandelijkse gemiddelden van potentiële verdamping gebruikt (Eberle et al., 2005), gedisaggregeerd naar uurwaarden.

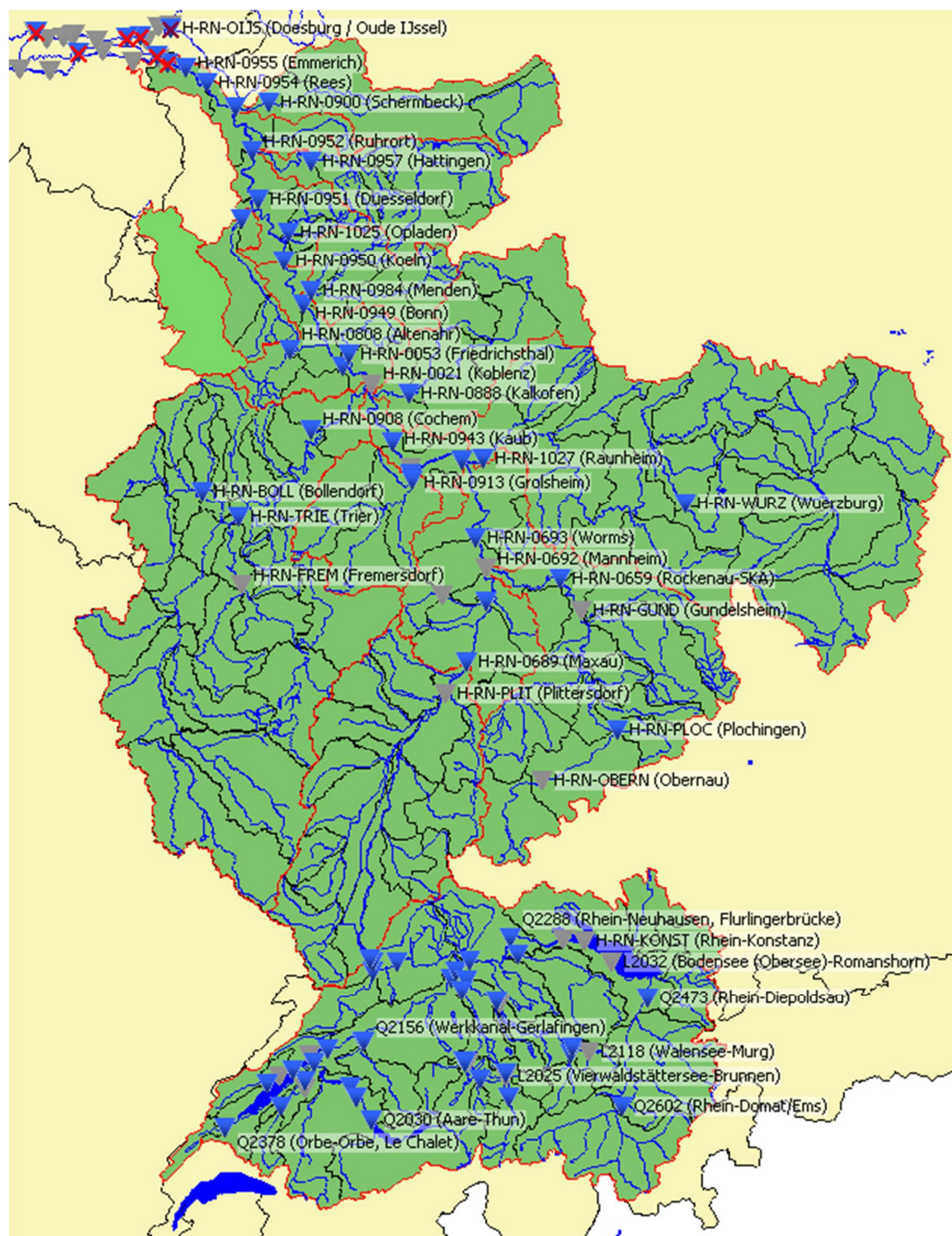


Figuur 3.1 De beschikbare stations in het Rijnstroomgebied met uurlijkse neerslagmetingen. Voor de locaties met een rood kruis bestaat wel een meteorologisch station, maar is geen data beschikbaar voor de modelperiode (2005-2014)



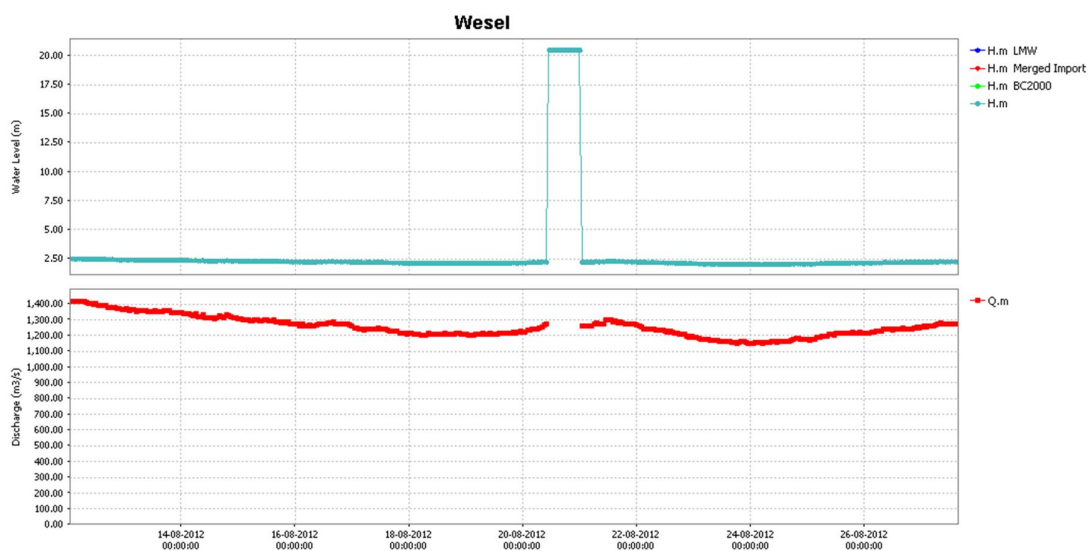
De uurlijkse afvoerreeksen die nodig zijn om het model te kalibreren komen van verschillende bronnen. De data voor Duitse stations zijn afkomstig van BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde), via Pegelonline en BC2000, en via een aantal Duitse deelstaten (Nordrhein-Westfalen, Hessen, Rheinland-Pfalz, Bayern). Voor de Zwitserse stations zijn nauwelijks uurlijkse metingen beschikbaar voor het operationele model. Historische uurreeksen van afvoeren zijn tijdens dit project beschikbaar gemaakt door BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Lucas Pfister), via de CHR (Eric Sprockereef) – FOEN data. De beschikbare hydrologische data was een combinatie van afvoerreeksen en waterstandsreeksen die met behulp van rating curves zijn omgerekend naar afvoeren.

Het overzicht van de stations met beschikbare uurlijkse metingen staat in Figuur 3.3. Voor de blauwe stations hebben we uurlijkse afvoermetingen. Voor de grijze stations hebben we alleen waterstandsdata, en geen afvoerdata of rating curves om de waterstanden om te rekenen naar afvoerdata; deze stations kunnen we dus niet gebruiken voor de kalibratie. Het valt op dat de dichtheid van stations niet erg gelijk over het gebied verdeeld is. Er zijn redelijk wat stations beschikbaar in de Midden- en Beneden-Rijn vlakbij de rivier, en ook in Zwitserland is de stationsdichtheid hoog. Er zitten daarentegen grote gebieden zonder data in het oosten, het westen, en de Boven-Rijn (het Duitse deel). Dit betekent dat in die gebieden er grotere stukken tegelijk moeten worden gekalibreerd, en er dus minder gedifferentieerd kan worden met modelparameters.



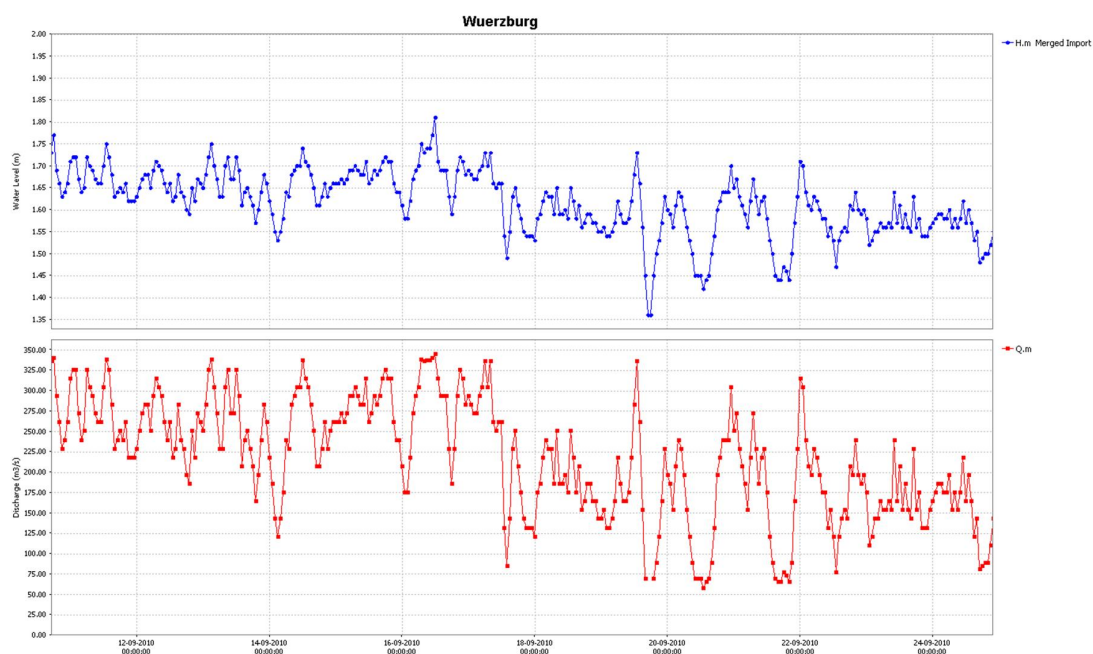
Figuur 3.3 De stations in het Rijnstroomgebied met beschikbare uurlijkse hydrologische data. Voor de stations met een grijs icoontje hebben we alleen waterstandsdata, voor de stations met een blauw icoontje hebben we (ook) afvoerdata

Voordat het model op deze afvoerreeksen is gekalibreerd, is de data gevalideerd. Dit gebeurt in FEWS: extreme waarden worden met behulp van eerder gedefinieerde drempelwaardes uit de tijdseries gefilterd. Een voorbeeld is te zien in Figuur 3.4, hier wordt voor station Wesel een abrupte, extreem hoge waterstandswaarde gemeten (lichtblauwe grafiek). Deze waarde wordt niet meegenomen in de conversie van waterstanden naar afvoeren, en zo ontstaan er een paar ontbrekende waardes in de afvoerserie. Die gaten worden vervolgens niet meer opgevuld, en worden dus tijdens de berekening van de performance van de gesimuleerde afvoer buiten beschouwing gelaten. Het is geen probleem als er af en toe enkele ontbrekende waardes in een afvoerserie zitten; het zou daarentegen wel een probleem zijn als er foutieve waardes in zouden zitten, omdat het model dan wordt bijgestuurd op basis van verkeerde informatie.

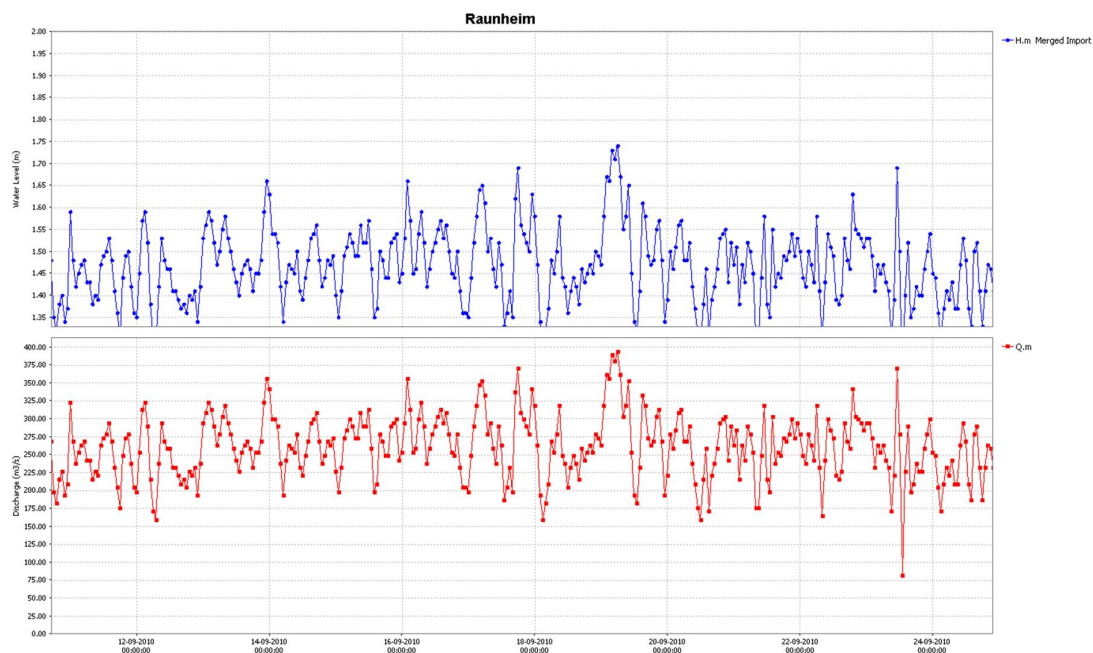


Figuur 3.4 Voorbeeld van datavalidatie binnen FEWS. De originele data is waterstandsdata (bovenste grafiek, lichtblauw). De grafiek springt ineens van ca. 2 m naar ca. 20 m, en daarna weer terug naar 2 m. Deze foutieve waardes worden er in FEWS uitgefilterd bij de conversie van waterstanden naar afvoerseries (onderste grafiek, rood)

Voor een aantal substroomgebieden benedenstrooms van Maxau zijn helemaal geen adequate afvoerstations gevonden. In de Main zijn wel twee stations met uurlijkse afvoerdata beschikbaar (Würzburg en Raunheim), maar de geobserveerde afvoeren zijn vanwege grote uurlijkse fluctuaties die niet gesimuleerd kunnen worden met het HBV model uitgesloten van de kalibratie. In Figuur 3.5 en Figuur 3.6 wordt een voorbeeld gegeven van deze sterke fluctuaties voor beide stations. De afvoeren (rode grafiek) fluctueren sterk, en kunnen binnen een paar uur met wel $150 \text{ m}^3/\text{s}$ omhoog of omlaag schieten, of soms nog meer. Dit is duidelijk een onnatuurlijk verschijnsel binnen deze stroomgebieden, en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door stuwen in de buurt van deze stations. Het effect is zo sterk dat kalibreren op uurlijkse waarden niet gaat, daarom zijn deze stations niet meegenomen in de kalibratie en is de Main dus ongekalibreerd gebleven.



Figuur 3.5 Hydrologische uurmetingen bij Würzburg. In dit voorbeeld worden de waterstanden (blauw) en de afgeleide afvoeren (rood) gegeven voor ongeveer 12 dagen. De waterstanden fluctueren in dit voorbeeld tussen ongeveer 1.35 en 1.80 m, en de bijbehorende afvoeren tussen 50 en 350 m³/s



Figuur 3.6 Hydrologische uurmetingen bij Raunheim. In dit voorbeeld worden de waterstanden (blauw) en de afgeleide afvoeren (rood) gegeven voor ongeveer 12 dagen. De waterstanden fluctueren in dit voorbeeld tussen ongeveer 1.30 m en 1.75 m, en de bijbehorende afvoeren tussen 150 en 400 m³/s

3.1.3 Modelperiodes

Gebaseerd op de beschikbaarheid van de data en op de specificaties van het HBV model is er voor gekozen om het model vanaf 2005 te laten draaien. Er zijn zo lang mogelijke tijdseries nodig om het model zowel te kunnen warmdraaien, als kalibreren, als valideren. Het HBV model wordt dus gekalibreerd op de laagwaterperiodes (zomerperiodes) van 2009, 2010 en 2011 en gevalideerd op de zomers van 2012, 2013 en 2014 (zomerperiode = 1 april tot 1 oktober). De inspeelperiode van het model (het warmdraaien) loopt van oktober 2005 t/m maart 2009. We draaien het model wel voor het hele jaar, ook voor de winter, maar de performance aan de hand van de performance-indicatoren (zie paragraaf 3.3.4) wordt alleen berekend voor de zomermaanden.

3.1.4 FEWS configuratie

Voor het opzetten van het kalibratie-experiment is de FEWS-configuratie van RWSOS Rivieren gebruikt, met een aantal aanpassingen. Om te beginnen zijn de grote Zwitserse meren ingebouwd, zoals besproken in hoofdstuk 2, waardoor er in de huidige configuratie 148 substroomgebieden zijn in plaats van de originele 134. Eerst wordt alle beschikbare hydrologische en meteorologische data geïmporteerd in FEWS RWSOS Rivieren. Daarna wordt een aantal databewerkingen uitgevoerd (*preprocessing*), en worden tijdseries gegenereerd waarmee het HBV model gedraaid kan worden.

De geïmporteerde neerslagtijdseries worden geïnterpoleerd op basis van kriging, met een maximum aantal stations van 12 dat wordt meegenomen in de interpolatie. Daarna worden de neerslagwaardes gecorrigeerd op basis van de REGNIE grids, waarmee de neerslag aangepast wordt op basis van topografie en hoogte (Weerts et al., 2008). Vervolgens wordt per tijdstap het gemiddelde uitgerekend per HBV substroomgebied, om zo tot een tijdreeks met uurlijkse neerslagwaardes te komen. In de gemeten tijdseries zitten soms gaten met ontbrekende data. Het opvullen van deze gaten gebeurt op verschillende manieren. Bij de neerslagreeksen worden gaten in eerste instantie opgevuld door middel van interpolatie van de omliggende stations. Als er dan nog gaten overblijven worden die opgevuld met default-waarde nul.

Bij de temperatuurreksen worden in het operationele systeem gaten tot 3 uur lineair opgevuld. Binnen de kalibratie-setup levert dit echter nog steeds structurele gaten op, aangezien in het begin van de subdagelijkse metingen (eerste jaren – 2005, 2006) op veel stations slechts iedere 6 uur werd gemeten. De configuratie is daarom zo aangepast, dat gaten van maximaal 6 uur lineair worden opgevuld. Gaten van langer dan 6 uur worden niet opgevuld, omdat de onzekerheid dan te groot wordt. Voor sommige stations blijven dus gaten bestaan in de invoertijdseries. Deze gaten worden opgevuld door kriging interpolatie van de omliggende stations, waarbij wordt gekeken naar maximaal 8 omliggende stations. Na deze stappen van opvulling te hebben doorlopen, blijven er nog enkele gaten over in de tijdseries, wat resulteert in het buiten beschouwing laten van het desbetreffende station voor de desbetreffende tijdstappen met ontbrekende data bij de uiteindelijke interpolatie van stations naar HBV substroomgebieden (dat is geen probleem zolang de gaten verspreid zijn in tijd en ruimte). De gaten die dan nog overblijven, worden in het operationele systeem opgevuld met een default-waarde 8. Dit is binnen de kalibratie-setup aangepast: de laatst overgebleven gaten worden ook weer opgevuld door lineaire interpolatie.

Binnen de interpolatie van temperatuurdata is bovendien nog een andere aanpassing gedaan, die wordt aangeraden ook op te nemen in de operationele configuratie. In het operationele systeem wordt interpolatie van temperatuurdata op basis van kriging toegepast, waarbij voor ieder HBV stroomgebied het gemiddelde wordt berekend uit alle omliggende temperatuurstations. Het probleem hiermee is echter dat op deze manier geen rekening gehouden wordt met de hoogte van de verschillende stations. Om de temperatuur te kunnen gebruiken in het HBV model wordt de gemiddelde temperatuur per substroomgebied gekoppeld aan de gemiddelde hoogte van dat substroomgebied. Alleen deze hoogte en deze temperatuur horen niet daadwerkelijk bij elkaar. De temperatuurseries die op deze manier gegenereerd zijn in FEWS, worden in het HBV model zelf vervolgens gebruikt om een temperatuurverdeling te maken op basis van hoogte- en landgebruikszones binnen ieder substroomgebied. In HBV bestaat per substroomgebied een verdeling van hoeveel oppervlak in welke hoogtecategorie valt (300-400 m, 400-500 m, 500-600 m, etc.), en op basis daarvan wordt in combinatie met een *lapse rate* ($-0.6\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$) berekend wat de uiteindelijke gemiddelde temperatuur is in ieder substroomgebied. Als dus de gemiddelde hoogte van de stations in een substroomgebied niet precies gelijk is aan de gemiddelde hoogte van het hele substroomgebied, dan wordt de temperatuurverdeling op basis van hoogte in HBV foutief berekend. De kans is groot dat dat gebeurt, en dat kan mogelijk voor grote fouten zorgen, bijvoorbeeld als er in een bergachtig stroomgebied 8 stations in een dal geplaatst zouden zijn, en 2 stations op een berg. Dit kan een significant effect hebben op de sneeuwopbouw en sneeuwsmelt binnen een stroomgebied, en dat kan weer een effect hebben op de afvoer.

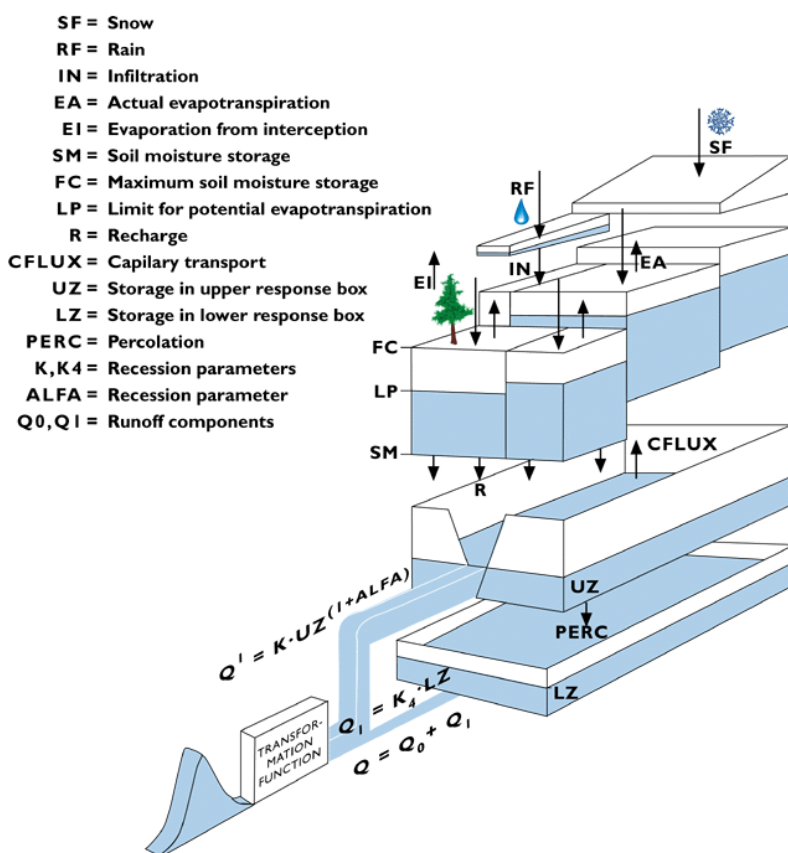
Om deze reden is de bewerking van de temperatuurdata aangepast in de configuratie. Vóórdat geïnterpoleerd wordt, worden de temperaturen van alle stations omgerekend naar dezelfde referentiehoogte. De toegepaste referentiehoogte is -100 m, zodat de methode onveranderd voor het hele Rijnstroomgebied gebruikt kan worden, ook in de lageregelegen delen waar stations soms beneden zeeniveau liggen. Dit gebeurt op basis van dezelfde *lapse rate*: $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$. Vervolgens worden de stations geïnterpoleerd; de interpolatiemethode op zich blijft hetzelfde (kriging). Na deze interpolatie worden de resulterende gemiddelde temperatuurseries voor de HBV substroomgebieden weer omgerekend naar de gemiddelde hoogte per substroomgebied, met dezelfde *lapse rate*, zodat nu de gemiddelde temperatuur per substroomgebied ook past bij de gemiddelde hoogte per substroomgebied.

Binnen de opzet van deze kalibratie is ervoor gekozen om alle datavoorbereiding in FEWS te doen (importeren, valideren, bewerken, tijdseries genereren), en vervolgens het HBV model buiten FEWS om (met Python) te draaien en de resultaten te bekijken. Meer over de technische opzet in paragraaf 3.3.2.

3.2 HBV Model

Voor het maken van afvoervoorstellingen van het Rijn stroomgebied wordt binnen RWsOS Rivieren het HBV 96 model (Lindström et al., 1997) gebruikt. Dit is een semi-gedistribueerd conceptueel hydrologisch model. Het modelconcept is gevisualiseerd in Figuur 3.7.

- Semi-gedistribueerd betekent dat er geen ruimtelijk onderscheid wordt gemaakt op substroomgebiedsniveau wat betreft modelschematisatie en parameters. Tevens wordt de neerslagdata waarmee het model geforceerd wordt ook op substroomgebiedsniveau geaggregeerd. Voor temperatuur en verdamping wordt wel onderscheid gemaakt naar verschillende zones binnen een substroomgebied in verband met verschillen in hoogte en landgebruik.
- Conceptueel betekent dat, dat de fysische processen die bepalen hoe neerslag ten afvoer komt geschematiseerd worden met lineaire en niet-lineaire reservoirs.



Figuur 3.7 Visualisatie HBV-96 modelconceptualisatie

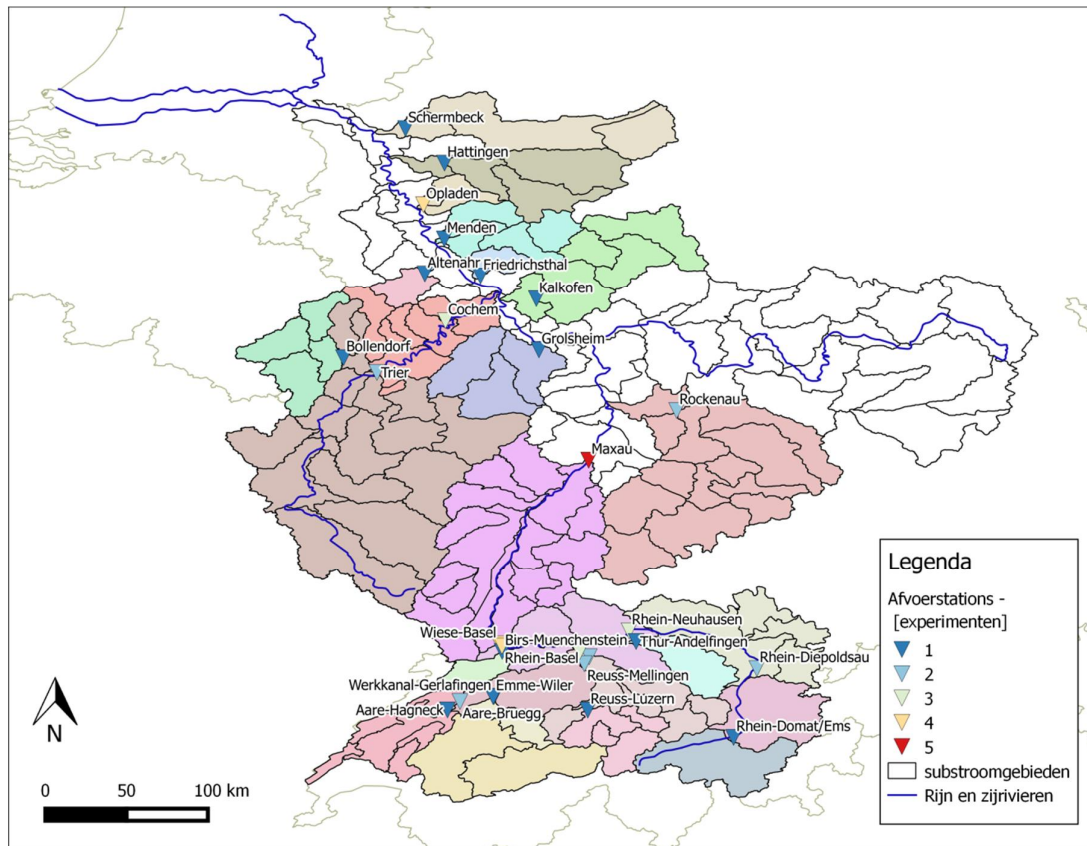
3.3 Opzet kalibratie

De kalibratie is uitgevoerd aan de hand van een Monte-Carlo analyse. Zeven parameters zijn gevarieerd door willekeurig waarden te trekken uit een uniforme verdeling tussen een minimum en maximum waarde van de parameter, zie paragraaf 3.3.3. De door het HBV model gesimuleerde afvoer op basis van elke getrokken parameterset is vergeleken met de geobserveerde afvoer aan de hand van drie performance-indicatoren. De vergelijking is gemaakt voor de zomermaanden april t/m september vanwege de doelstelling om voor deze maanden de afvoerspellingen te verbeteren. De optimale parameterset is, tenzij anders vermeld, gekozen op basis van een gewogen gemiddelde van deze indicatoren, zie ook paragraaf 3.3.4.

3.3.1 Monte-Carlo analyse voor het Rijn stroomgebied

Hoewel een Monte-Carlo analyse een relatief eenvoudige opzet is, brengt deze toch uitdagingen met zich mee voor een de kalibratie voor een complex stroomgebied als de Rijn. Het Rijn stroomgebied is opgedeeld in 148 substroomgebieden in het HBV model. Voor 25 substroomgebieden, waarvan 12 gelegen in Zwitserland, waren adequate afvoerobservaties beschikbaar, zie paragraaf 3.1.2. Dit betekent dat met name in het Duitse deel van de Rijn een aantal substroom gebieden 'gelumped' worden: hier worden verschillende substroomgebieden op hetzelfde afvoerstation gekalibreerd en is dus geen sprake van onderlinge differentiatie van parameters. In totaal zijn dus voor 25 (combinaties van) substroomgebieden optimale parametersets bepaald. Deze gebieden zijn met verschillende kleuren aangegeven in Figuur 3.8.

Gesimuleerde afvoeren in substroomgebieden zijn afhankelijk van de gesimuleerde afvoeren en daarmee de parametersets van bovenstroomse substroomgebieden. Daarom zijn eerst de meest bovenstroomse substroomgebieden gekalibreerd (experiment 1), vervolgens is de optimale parameterset hiervoor 'vastgezet' en het volgende benedenstroomse substroomgebied gekalibreerd (experiment 2), etc. De verschillende experimenten zijn met verschillende kleuren voor de afvoerstations weergegeven in Figuur 3.8. In totaal zijn vijf experimenten onderscheiden om de afvoer tot aan station Maxau te kalibreren.



Figuur 3.8 Ruimtelijke verdeling experimenten en bijbehorende afvoerstations voor kalibratie

3.3.2 Technische opzet kalibratie

Voor de kalibratie is naast een 'stand-alone' versie van het HBV-96 model, zie paragraaf 3.2, een aantal scripts in Python geschreven om parametersets te trekken, het model aan te sturen en de performance analyse uit te voeren. Per experiment zijn minimaal 5000 modelruns gemaakt met verschillende parametersets. Elke modelrun start op 1 oktober 2005 en loopt tot 1 oktober 2011. De eerste 3,5 jaar (oktober 2005 t/m maart 2009) worden gebruikt om de initiële condities van het model te optimaliseren voor de getrokken parameterset (warmdraaien). De performance van het model wordt berekend voor de zomermaanden april t/m september voor de jaren 2009, 2010 en 2011 (kalibratie). Voor de optimale parametersets is nog een validatie modelrun gemaakt met extra data t/m oktober 2014 waarbij de performance berekend is voor de zomermaanden in de jaren 2012, 2013 en 2014.

De processortijd van het model is geoptimaliseerd door met een aanpassing van het 'basin.par' bestand allen de substroomgebieden van het experiment en eventuele bovenstroomse substroomgebieden mee te nemen in de simulatie.

3.3.3 Behandeling van de parameters

Deze paragraaf beschrijft de aanpak ten behoeve van de parameteroptimalisatie van het HBV Rijnmodel voor deze studie. Voor de kalibratie heeft één parameter een nieuwe 'vaste' waarde gekregen, verder zijn zeven parameters gekalibreerd en de overige parameters overgenomen uit de kalibratie uitgevoerd door SMHI (Berglöv et al., 2009). Voor deze paragraaf is geput uit eerdere beschrijving van HBV parameters in Winsemius et al. (2013).

Het HBV-96 model gebruik een groot aantal parameters om alle neerslag-afvoer processen te beschrijven. Mathematisch geeft elke parameter het model een extra vrijheidsgraad en daarmee een grotere kans op 'equifinality', d.w.z.: verschillende parametersets geven vergelijkbaar goede resultaten. Dit komt omdat veel parameters sterk gecorreleerd zijn. Bijvoorbeeld parameters die een tijdsschaal aanduiden, zoals de routing- en recessieparameters van het 'snelle' reservoir (*HQ*, *KHQ*, *alpha*) en van het 'langzame' reservoir (*K4*, *perc*), kunnen voor elkaar 'compenseren'. Dit betekent dat de invloed op de afvoer van een incorrecte waarde van een parameter opgeheven worden door een incorrecte waarde van de andere parameter. Om dit soort correlatieproblemen te voorkomen zijn maar een beperkt aantal parameters gekalibreerd en de overige zijn 'vastgezet'. Een overzicht van deze parameters is gegeven in Tabel 3.1 en Tabel 3.2. Tenzij anders vermeld komen de waarden voor deze parameters uit Berglöv et al. (2009).

pcalt: correctiefactor neerslag voor hoogte ($\Delta/100\text{m}$)

Ten opzichte van het originele model is *pcalt*, de lapse-rate parameter om neerslag te corrigeren voor hoogte, aangepast en nu vastgezet op nul voor alle substroomgebieden. In het originele model stond de waarde van deze parameter voor alle Duitse substroomgebieden op 0.1, wat een 10% correctie per 100 meter hoogte betekent. Hierdoor werd gemiddeld 3.4% extra neerslag gegenereerd ten opzichte van de neerslag zoals berekend in FEWS. In FEWS vindt al een interpolatie van neerslag plaats waarbij ook de ruimtelijke verdeling van neerslag wordt meegenomen volgens zogenaamde REGNIE-grids, zie Weerts et al. (2008). De *pcalt* parameter is daarom voor het nieuwe model aangepast.

Tabel 3.1 Parameters met 'default' waarden in alle substroomgebieden

parameter	Uitleg	unit	waarde
alfa	Parameter for the non-linear behaviour in the response function	-	1
cfr	Refreezing factor	-	0.05
focfmax	Correction parameter for the melting factor in forested areas	-	0.6
gmelt	Glacier melting factor	mm/°C and day	4
pcalt	Lapse rate parameter to correct precipitation for altitude	/100m	0
tcalt	Temperature lapse	°C/100 m	0.6

Tabel 3.2 Vastgezette parameters met variërende waarden, waardes volgen uit Berglöv et al. (2009)

parameter	Uitleg	unit	min	max
cevpfo	Correction factor for potential evaporation in forest zones	-	1.0	1.2
cfmax	Snow melt factor	mm/°C and day	1.9	5.0
etf	Temperature factor for evaporation	-	0.05	0.10
foscfc	Forest snow fall correction	-	0.8	1.0
hq	Threshold discharge above which <i>khq</i> holds	Mm/day	0.5	12.5
icfi	Interception storage capacity in field zones	mm	1.0	1.5
icfo	Interception storage capacity in forest zones	mm	1.5	4.0
k4	Recession coefficient slow reservoir	1/day	0.001	0.080
maxbaz	Number of days in the transformation routine	day	0.0	1.6

Na het vastzetten van de bovenstaande parameters is het model gekalibreerd op zeven parameters die veel invloed hebben op de laagwatervoorspellingen, zie Tabel 3.3. Het bereik van de uniforme verdeling waaruit de parameters getrokken zijn, zijn gegeven in de 'min' en 'max' kolommen in de tabel. Deze waarden zijn grotendeels overgenomen van de GLUE analyse (Winsemius et al., 2013). Onderstaand worden de gekozen parameters beschreven.

beta: bepaald de toename in bodemvocht voor elke mm neerslag (-)

Beta is een empirische coëfficiënt die de hoeveelheid neerslag bepaald die direct wordt vertaald naar neerslag of naar een toename van het bodemvochtgehalte.

cflux: maximum voor capillaire werking naar bodemvocht zone (mm/dag)

Cflux bepaald de maximale capillaire werking die zorgt voor het bijvullen van bodemvocht. De maximale capillaire werking treedt op als de bodemvochtzone leeg is en neemt lineair af tot nul als deze vol is.

fc: maximum capaciteit bodemvochtzone (mm)

Fc (veldcapaciteit) is de waarde voor het maximale bodemvochtgehalte. Een grote waarde van fc betekent dat er meer water kan worden opgeslagen in de bodemvochtzone van het model. De afvoer is erg gevoelig voor de keuze van deze parameter. In werkelijkheid kan deze parameter sterk variëren binnen een stroomgebied waardoor deze lastig is te bepalen op basis van metingen.

KHQ: recessie parameter bij afvoeren groter of gelijk aan *hq* (1/dag)

Deze parameter bepaald de tijdschaal van de recessie van hoge afvoeren.

lp: limiet voor potentiële evaporatie (-)

Lp beschrijft het bodemvochtgehalte (percentage van veldcapaciteit) waarboven evaporatie plaatsvindt volgens de waarde van de potentiële evaporatie. Vanaf een bodemvochtgehalte van nul tot *lp* neemt de evaporatie lineair toe met het bodemvochtgehalte.

Perc: perkolatie**(mm/dag)**

De perkolatie parameter stuurt het perkolatie proces van het bovenste grondwaterreservoir naar het diepe grondwaterreservoir.

tt: drempelwaarde temperatuur i.v.m. sneeuw**(°C)**

Deze drempelwaarde bepaalt of sneeuw smelt en of neerslag valt als sneeuw of regen. Het model is zeer gevoelig voor deze parameter. In werkelijkheid is het echter niet alleen temperatuur, maar ook radiatie dat bepaalt of sneeuw smelt. Dit is een van de oorzaken van de sterke variatie van de waarde van *tt* tussen substroomgebieden.

Tabel 3.3 Parameters die gekalibreerd zijn voor laag water

parameter	Uitleg	unit	min	max
beta	control for the increase in soil moisture for every mm of precipitation	-	1.0	4.0
cflux	Maximum capillary flow from upper zone to soil moisture zone	mm/day	0.0	4.0
fc	Field capacity	mm	20	500
khq	Recession coefficient for the upper zone when water discharge equals hq	1/day	0.005	0.4
lp	Limit for potential evaporation	-	0.3	1.0
perc	Percolation capacity from upper to lower zone	mm/day	1.0	4.0
tt	Threshold temperature below which precipitation is assumed to be snow	°C	-2.0	2.0

3.3.4 Performance-indicatoren

De performance van het model is berekend aan de hand van een drietal performance-indicatoren: de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), de Nash-Sutcliffe Efficiency van de log-geschaalde afvoer ($NSE_{\log Q}$) en de Relative Volume Error (RVE). De optimale parameterset is, tenzij anders vermeld, bepaald op basis van een gewogen gemiddelde van de drie individuele indicatoren volgens vergelijking (1.1). De performance-indicator kan een waarde tussen 1 en $-\infty$ aannemen, waar een hogere waarde een beter fit betekend. De waarde van de gewichten zijn vastgesteld doormiddel van 'trial and error' om de beste fit van de geobserveerde afvoerreeks te krijgen. De gevonden waarden zijn specifiek voor dit experiment en kunnen niet als algemeen geldende regel worden geïnterpreteerd. Bovendien is er voor sommige substroomgebieden ook van afgeweken als dit volgens ons realistischere resultaten oplevert. De verschillende indicatoren worden in deze paragraaf besproken.

$$prestatie = 0.4 * NSE + 0.4 * NSE_{\log Q} + 0.2 * (1 - |RVE|) \quad (1.1)$$

Nash-Sutcliffe efficiency

De NSE is een waarde voor hoe goed het model de dynamiek van de geobserveerde afvoerreeks weet te simuleren. De NSE wordt berekend door de som van het gekwadeerde verschil tussen simulatie en observatie te normaliseren door variantie van de geobserveerde afvoerreeks, zie vergelijking (1.2). Waardes van NSE variëren tussen 1 en $-\infty$, waar een perfecte fit van de observatie een waarde van 1 oplevert. Een negatieve NSE betekend dat de gemiddelde geobserveerde afvoer een betere voorspellende waarde heeft dan het model.

Een nadeel van de NSE is dat afwijkingen tussen observatie en simulatie van piekafvoeren relatief zwaarder tellen dan voor lage afvoeren omdat het verschil gekwadrateerd wordt (Krause et al., 2005). Om dit probleem te ondervangen is ook NSE van de log-geschaalde afvoeren bepaald volgens dezelfde formule. De $NSE_{\log Q}$ geeft in vergelijking met de NSE meer gewicht aan relatief lage afvoeren.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{sim},i} - Q_{\text{obs},i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \quad (1.2)$$

Relative Volume Error

Omdat de NSE-indicatoren geen rekening houden met systematische over- of onderschatting van de afvoer is tevens de RVE berekend. De RVE wordt berekend door de som van het verschil simulatie en observatie als percentage van de som van de geobserveerde afvoerreeks uit te drukken, zie vergelijking (1.3). Een RVE dicht bij nul betekent dat de gemodelleerde afvoer de werkelijke afvoer niet systematisch over- of onderschat. De RVE waarden in dit rapport zijn berekend voor de zomermaanden (april t/m september) en duiden daarom alleen de systematische over- of onderschatting van de afvoer in de zomer. Voor een volledige analyse van de waterbalans moet echter het hele hydrologische jaar bekeken worden, omdat hydrologische processen zoals sneeuwsmelt en grondwateropslag de seizoenen overstijgen. De RVE in dit rapport moet daarom als een performance indicator van de simulatie worden opgevat in plaats van een volledige waterbalans analyse. Ervan uitgaande dat de geobserveerde afvoerreeks correct is, kan een onder- of overschatting veroorzaakt worden door onjuiste meteorologische data waarmee het model wordt geforceerd of een onjuiste parametrisatie van hydrologische processen in het HBV model.

$$RVE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{sim},i} - Q_{\text{obs},i})}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i})} \quad (1.3)$$

3.3.5 Aanbevelingen voor aanpassingen in HBV en FEWS

In de voorgaande paragrafen is een aantal aanpassingen beschreven die zijn gedaan ten opzichte van het huidige operationele systeem. Voor een deel zijn dit kleine aanpassingen die zijn gedaan voor de specifieke doeleinden van dit project (kalibratie van het HBV Rijnmodel), met name omdat de verwerking van historische data iets andere vereisten heeft dan verwerking van operationele data. Een aantal aanpassingen wordt echter aangeraden ook op te nemen in het operationele systeem. Dit zijn:

- Het inbouwen van een 'lapse rate' voor temperatuurmetingen in de FEWS-configuratie (zie paragraaf 3.1.4). Door de temperatuurreksen in FEWS eerst naar dezelfde referentiehoogte te trekken en dan pas te interpoleren vindt een meer reële koppeling met de temperatuurverwerking in HBV plaats.

- Het op nul zetten van de *pcalt* parameter in HBV (zie paragraaf 3.3.3). In FEWS vindt een uitgebreide interpolatie plaats van de neerslagdata op basis van hoogte en topografie met behulp van REGNIE-grids. Hierdoor is een hoogtecorrectie van de neerslag binnen HBV overbodig, of zelfs onjuist geworden. Door *pcalt* op nul te zetten in plaats van 0.1 zoals in het huidige operationele systeem wordt deze dubbeling weggenomen.

4 Kalibratie HBV model Rijn voor laagwater

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de kalibratie van het laagwater model met een tijdstap van een uur gepresenteerd. In totaal zijn voor 109 van de 148 substroomgebieden nieuwe parameters afgeleid op basis van afvoergegevens van 25 meetstations. Bij het bespreken van de resultaten wordt specifiek ingegaan op drie grote substroomgebieden: de Zwitserse Rijn tot Maxau, de Moezel en de Neckar. De resultaten bij Lobith worden specifiek gepresenteerd. In alle hydrografen in dit hoofdstuk is de blauwe lijn de gemeten afvoer, de groene lijn de gesimuleerde afvoer met het huidige operationele model en de rode lijn de gesimuleerde afvoer met het nieuwe model. De uitgebreide kalibratie- en validatieresultaten van alle substroomgebieden zijn in Appendix A bijgevoegd.

4.1 Resultaten per stroomgebied Rijn

4.1.1 Zwitserse en bovenstroomse Rijn tot Maxau

De grootste veranderingen in het HBV model zijn gemaakt voor het Zwitserse deel van het Rijn stroomgebied, zie hoofdstuk 2. Dit deel van de Rijn heeft relatief het grootste aandeel in de afvoer bij Lobith in de zomerperiode. In het huidige model worden de meren in de bovenstroomse substroomgebieden echter niet goed gesimuleerd. Bovendien laat de simulatie van het huidige model in vergelijking met de observaties grote volumefouten zien voor de meeste substroomgebieden. Het Zwitserse deel van de Rijn telt in het nieuwe model 31 substroomgebieden die gekalibreerd zijn aan de hand van 12 stations met geobserveerde afvoeren.

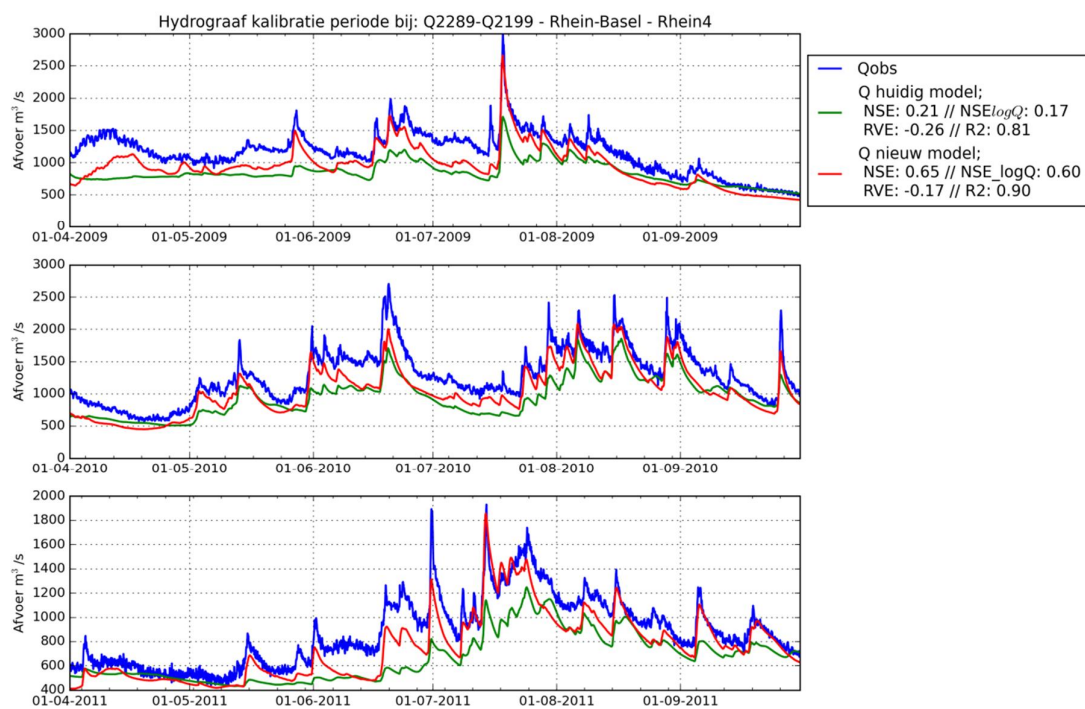
Voor alle experimenten behalve Reus_1, Reus_2, Birs_1 en Emme_1 zijn de optimale parametersets bepaald volgens vergelijking (1.1). Bij Reus_1 zijn handmatig parameters gekozen; voor Reus_2 op basis van de optimale parameterset volgens de NSE indicator alleen en voor Birs_1 en Emme_1 de optimale parameterset volgens de NSE van de logaritmisches geschaalde afvoer. De performance-indicatoren voor zowel de kalibratie- als validatieperiodes van het nieuwe model zijn gegeven in Tabel 4.1.

De verbeterde representatie van de meren in het model en kalibratie van dertien (combinaties van) substroomgebieden heeft tot significante verbeteringen in de performance van de gesimuleerde afvoer geleid bij Basel en Maxau. De hydrograaf bij Basel, zie Figuur 4.1, laat zien dat de simulatie veel beter de dynamiek van de geobserveerde afvoer volgt, echter wel nog met een consequente onderschatting van zowel de pieken als de baseflow. De fout wordt echter tegen het eind van de zomerperiode kleiner. De hydrograaf bij Maxau, zie Figuur 4.2, laat een nog positiever beeld zien. Hier wordt de geobserveerde baseflow vaak redelijk benaderd door de simulatie. Zowel de NSE waarden als de volumefout zijn sterk verbeterd voor beide stations. Bij Basel is de NSE_{logQ} (de indicator voor lage afvoeren) gestegen van 0,17 tot 0,60 terwijl de volumefout verkleind is van een gemiddelde onderschatting van 26% naar 17% in het nieuwe model. Bij Maxau is de NSE_{logQ} waarde gestegen van 0,38 tot 0,87 en de volumefout verkleind van een onderschatting van 21% tot een onderschatting van 7%. Voor de validatieperiode worden vergelijkbare resultaten behaald.

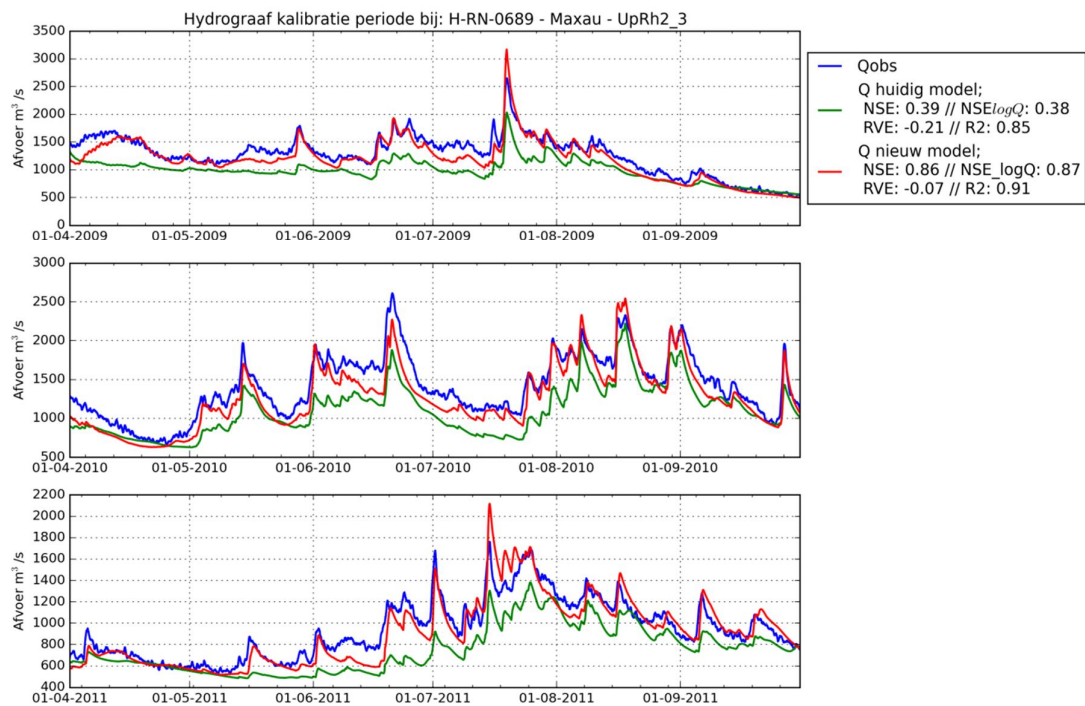
Het verkleinen van de volumefout komt vooral door een grote verbetering van de volume simulaties in de bovenstroomse substroomgebieden met meren. De individuele substroomgebieden hebben nog steeds een onderschatting van het volume tot maximaal 28% in het nieuwe model. Dit is een sterke verbetering ten opzichte van een volumefout van tot 50% in het huidige model voor diezelfde substroomgebieden. De verbeteringen in de waterbalans worden onder andere veroorzaakt door meer sneeuwopbouw in de winter en een betere simulatie van de buffercapaciteit van de meren. Dat de waterbalans toch niet sluitend is, wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een onderschatting van de geobserveerde neerslag.

Tabel 4.1 Resultaten kalibratie Zwitserse Rijn

experiment	Stationsnaam	Station_id	Kalibratie			Validatie		
			NSE	NSE_ logQ	RVE	NSE	NSE_ logQ	RVE
Aare_1	Aare-Hagneck	Q2085	0.15	-0.11	-0.28	0.38	-0.01	-0.26
Aare_2	Aare-Bruegg	Q2029	0.38	0.34	-0.20	0.60	0.42	-0.17
Aare_3	Aare-Untersiggenthal	Q2205	0.61	0.55	-0.18	0.63	0.41	-0.18
Emme_1	Emme-Wiler / Werkkanal	Q2155- Q2156	0.37	0.67	0.08	0.63	0.71	0.03
Reuss_1	Reuss-Luzern	Q2152	0.20	0.13	-0.28	-0.06	-0.77	-0.32
Reuss_2	Reuss-Mellingen / Limmat-Baden	Q2018- Q2243	0.53	0.29	-0.19	0.37	-0.35	-0.22
Birs_1	Birs-Muenchenstein	Q2106	0.69	0.70	-0.06	0.64	0.69	-0.04
Thur_1	Thur-Andelfingen	Q2044	0.85	0.79	0.00	0.83	0.75	0.05
Rhein_1	Rhein-Domat/Ems	Q2602	0.42	-0.09	-0.22	0.40	-0.10	-0.21
Rhein_2	Rhein-Diepoldsau	Q2473	0.52	0.29	-0.18	0.45	0.07	-0.23
Rhein_3	Rhein-Neuhausen	Q2288	0.47	0.19	-0.20	0.44	-0.09	-0.22
Rhein_4	Rhein-Basel	Q2289- Q2199	0.65	0.60	-0.17	0.65	0.50	-0.17
Rhein_5	Maxau	H-RN-0689	0.86	0.87	-0.07	0.82	0.75	-0.10



Figuur 4.1 Hydrograaf kalibratieperiode bij Basel



Figuur 4.2 Hydrograaf kalibratieperiode bij Maxau

4.1.2 Moezel

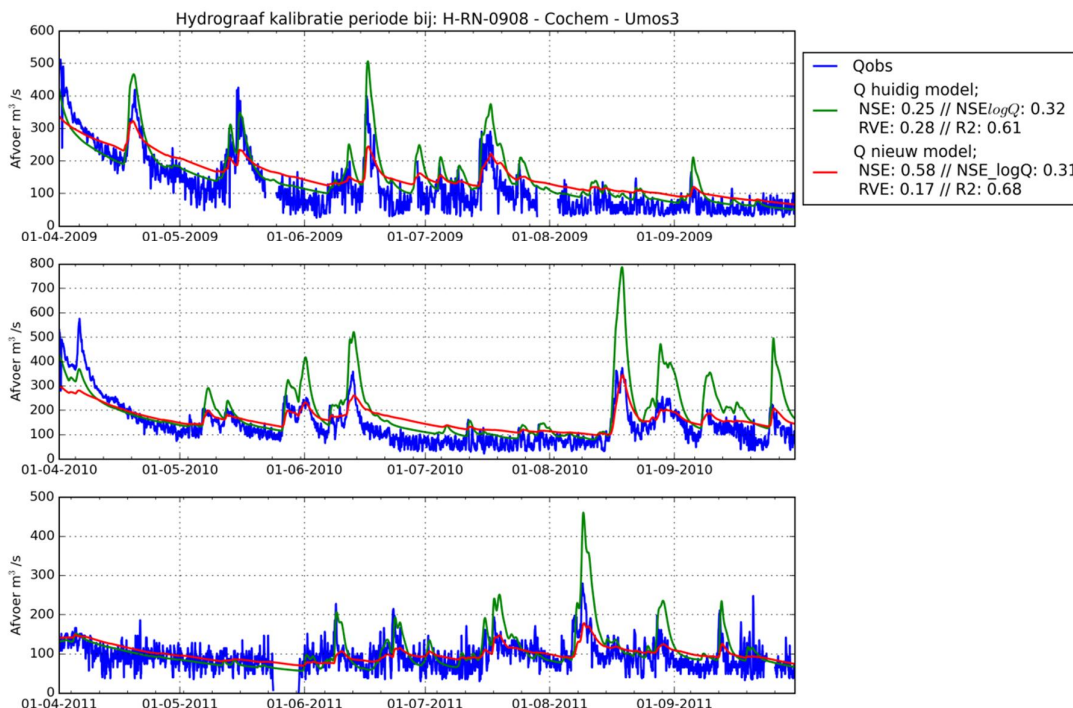
De Moezel telt 26 substroomgebieden die gekalibreerd zijn aan de hand van drie stations met geobserveerde afvoeren. In het huidige model worden vooral de piekafvoeren in de zomerperiode overschat, terwijl de baseflow redelijk gesimuleerd wordt.

Voor alle experimenten zijn de optimale parametersets bepaald volgens vergelijking (1.1). De performance-indicatoren voor zowel de kalibratie- als validatieperiodes van het nieuwe model zijn gegeven in Tabel 4.2. De hydrografen voor de afvoer bij Cochem zijn gegeven in Figuur 4.3.

Over het algemeen wordt de piekafvoer in het nieuwe model nu beter benaderd en volgt het redelijk goed de gemiddelde afvoer. De verbetering in de gesimuleerde piekafvoeren is te zien door de verandering van de NSE indicator van 0,25 tot 0,58. Echter de indicator voor lage afvoeren (NSE_{logQ} waarde) is niet verbeterd. Het nieuwe model lijkt de recessieafvoeren minder goed te modelleren voor de Moezel. De overschatting van de gemiddelde afvoer wordt verkleind van 28% tot 17%. In de validatie periode worden de gemiddelde en de piekafvoeren onderschat, terwijl de baseflow beter wordt gesimuleerd. Verder valt op dat de performance van de simulatie afneemt van Bollendorf naar Cochem. Dit heeft mogelijk te maken met een toename van de 'menselijke' invloeden op de afvoer benedenstrooms.

Tabel 4.2 Resultaten kalibratie Moezel

experiment	stationsnaam	stationid	Kalibratie			Validatie		
			NSE	NSE_{logQ}	RVE	NSE	NSE_{logQ}	RVE
Moesel_1	Bollendorf	H-RN-BOLL	0.74	0.63	0.05	0.54	0.67	-0.16
Moesel_2	Trier	H-RN-TRIE	0.66	0.56	-0.02	0.50	0.57	-0.14
Moesel_3	Cochem	H-RN-0908	0.58	0.31	0.17	0.54	0.67	-0.16



Figuur 4.3 Hydrograaf kalibratieperiode bij Cochem

4.1.3 Neckar

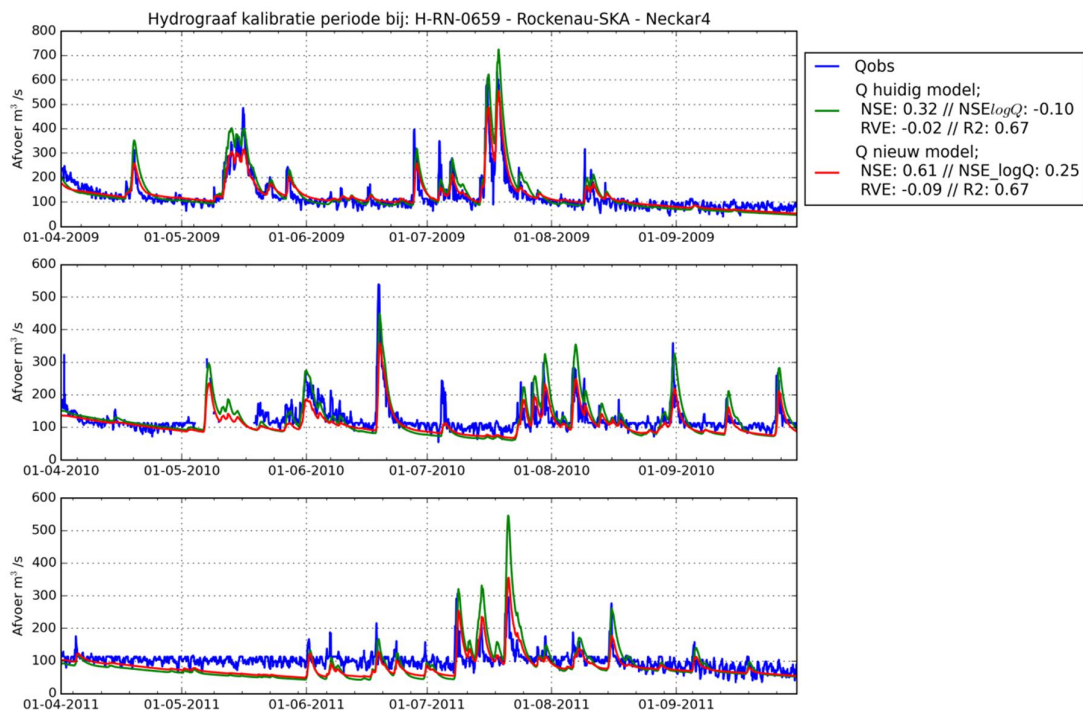
De Neckar telt 13 substroomgebieden die gekalibreerd zijn aan de hand van maar één station met geobserveerde afvoeren. In het huidige model worden de piekafvoeren in de zomerperiode overschat, terwijl de baseflows worden onderschat. Gemiddeld wordt de waterbalans echter goed gesimuleerd.

De optimale parameterset voor dit experiment is bepaald aan de hand van vergelijking (1.1). De performance-indicatoren voor zowel de kalibratie- als validatieperiodes van het nieuwe model zijn gegeven in Tabel 4.3. De hydrografen voor de afvoer bij Rockenau-SKA zijn gegeven in Figuur 4.4.

Over het algemeen worden de piekafvoer in het nieuwe model niet meer overschat en de baseflow iets minder onderschat. De leidt tot een verbetering van zowel de NSE als de NSE van de logaritmischeschaalde afvoer. De gemiddelde volumefout is echter groter in het nieuwe model. De algemene performance van het nieuwe model voor met name de baseflows is nog steeds matig. Een oorzaak hiervoor kan liggen in het feit dat voor het hele Neckar substroomgebied in deze kalibratie dezelfde parameterset wordt toegepast.

Tabel 4.3 Resultaten kalibratie Neckar

experiment	stationsnaam	stationid	Kalibratie			Validatie		
			NSE	NSE_ logQ	RVE	NSE	NSE_ logQ	RVE
Neckar_1	Rockenau-SKA	H-RN-0659	0.61	0.25	-0.09	0.86	0.17	-0.14



Figuur 4.4 Hydrograaf kalibratieperiode bij Rockenau-SKA

4.1.4 Kleine Duitse substroomgebieden

De overige Duitse stroomgebieden worden gezamenlijk beschreven in deze paragraaf omdat de performance vergelijkbaar is. In totaal zijn 21 substroomgebieden in Duitsland op basis van geobserveerde afvoeren bij acht stations gekalibreerd. In het huidige model worden zowel de piekafvoeren als de gemiddelde afvoer in de zomer voor deze stroomgebieden overschat, in de Lippe met wel 100%.

De optimale parameterset voor alle experimenten is bepaald aan de hand van vergelijking (1.1). De performance-indicatoren voor zowel de kalibratie- als validatieperiodes van het nieuwe model zijn gegeven in Tabel 4.4.

De tabel laat over het algemeen goede performance zien van het model in de meeste stroomgebieden voor alle indicatoren. De Lippe is nog steeds een negatieve uitzondering, ook na kalibratie wordt de dynamiek van de geobserveerde afvoer niet goed gesimuleerd. Bovendien worden pieken gemist en de gemiddelde afvoer in het nieuwe model i.p.v. overschat, nu in de meeste gevallen onderschat. Een deel van het verkleinen van de overschatting van de gemiddelde afvoer is te verklaren door de wijziging van de *pcalt* parameter waardoor en 3,4% minder neerslag in het model zit voor het Duitse deel van de Rijn, zie paragraaf 3.3.3. Daarnaast heeft ook de kalibratie ervoor gezorgd dat zowel baseflow als pieken nu beter gesimuleerd worden in de zomerperiode. Net als voor de overige stroomgebieden geldt overigens dat dit wel ten dele ten koste gaat van de performance voor het simuleren van piekafvoeren in het winterhalfjaar.

Tabel 4.4 Resultaten overige stroomgebieden Duitse Rijn

experiment	stationsnaam	stationid	Kalibratie			Validatie		
			NSE	NSE_ logQ	RVE	NSE	NSE_ logQ	RVE
Ahr_1	Altenahr	H-RN-0808	0.89	0.80	0.02	0.72	0.69	-0.05
Lahn_1	Kalkofen	H-RN-0888	0.81	0.70	-0.06	0.76	0.66	-0.11
Lippe_1	Schermbeck	H-RN-0900	0.15	-0.17	0.02	-0.09	-0.94	-0.31
Nahe_1	Grolsheim	H-RN-0913	0.78	0.58	0.07	0.64	0.74	-0.08
Ruhr_1	Hattingen	H-RN-0957	0.77	0.69	0.05	0.72	0.61	-0.05
Sieg_1	Menden	H-RN-0984	0.71	0.71	0.12	0.71	0.68	-0.04
Wied_1	Friedrichsthal	H-RN-0053	0.87	0.78	0.08	0.81	0.64	-0.13
Wupper_1	Opladen	H-RN-1025	0.53	0.51	0.09	0.73	0.63	0.08

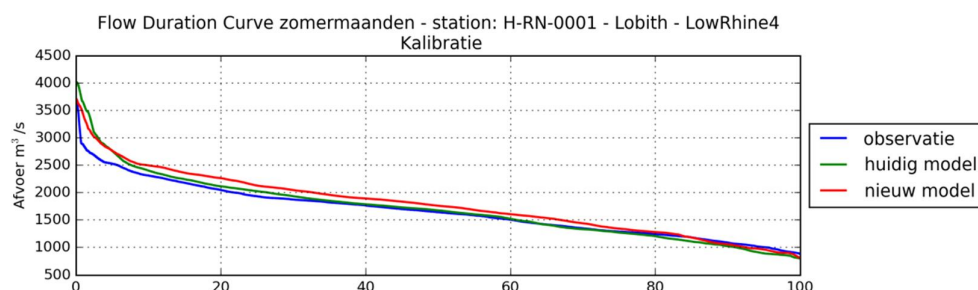
4.1.5 Lobith

Na kalibratie van 109 substroomgebieden is de performance van de gesimuleerde afvoer bij Lobith bepaald. Het huidige model overschat vaak de pieken in de zomerperiode, terwijl de baseflow vaak wordt onderschat.

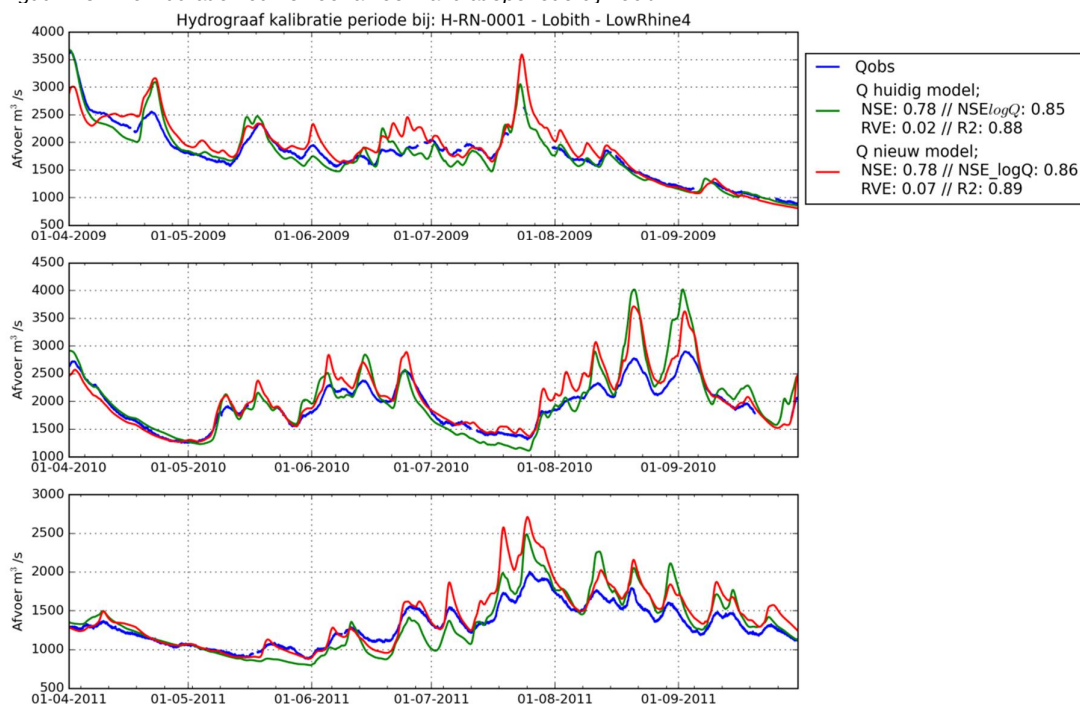
De performance van het nieuwe model bij Lobith is vergelijkbaar, zie Tabel 4.5 en Figuur 4.6. De 'flow duration curve' in Figuur 4.5 laat zien dat het nieuwe model de laagste 20% van de afvoeren en de allerhoogste afvoeren in de kalibratie periode beter simuleert dan het huidige model, de verschillen zijn echter zeer klein. Het model presteert, vergelijkbaar met het huidige model, behoorlijk op het simuleren van de baseflow met waarden voor de NSE van de logaritmisch geschaalde afvoer rond de 0,85 voor zowel de kalibratie- als de validatieperiode. Pieken in de zomerafvoeren worden in het nieuwe model over het algemeen echter overschat. Piekafvoeren in juli 2011 bijvoorbeeld worden in het nieuwe model meer overschat dan in het huidige model. Dit wordt onder andere veroorzaakt door een overschatting van de afvoer rond dezelfde periode bij Maxau met het nieuwe model, terwijl met het huidige model dezelfde piekafvoer wordt onderschat. De gesimuleerde piekafvoer in die periode van 1300 m³/s is in het huidige model gestegen naar 2100m³/s. Voor de validatie periode is er wel een verbetering te zien in het nieuwe model wat betreft de simulatie van de zomer piekafvoeren met een NSE waarde die met 0.10 is toegenomen van 0.78 naar 0.88.

Tabel 4.5 Resultaten simulatie bij Lobith

stationsnaam	stationid	Kalibratie			Validatie		
		NSE	NSE_ logQ	RVE	NSE	NSE_ logQ	RVE
Lobith	H-RN-0001	0.78	0.86	0.07	0.88	0.84	-0.05



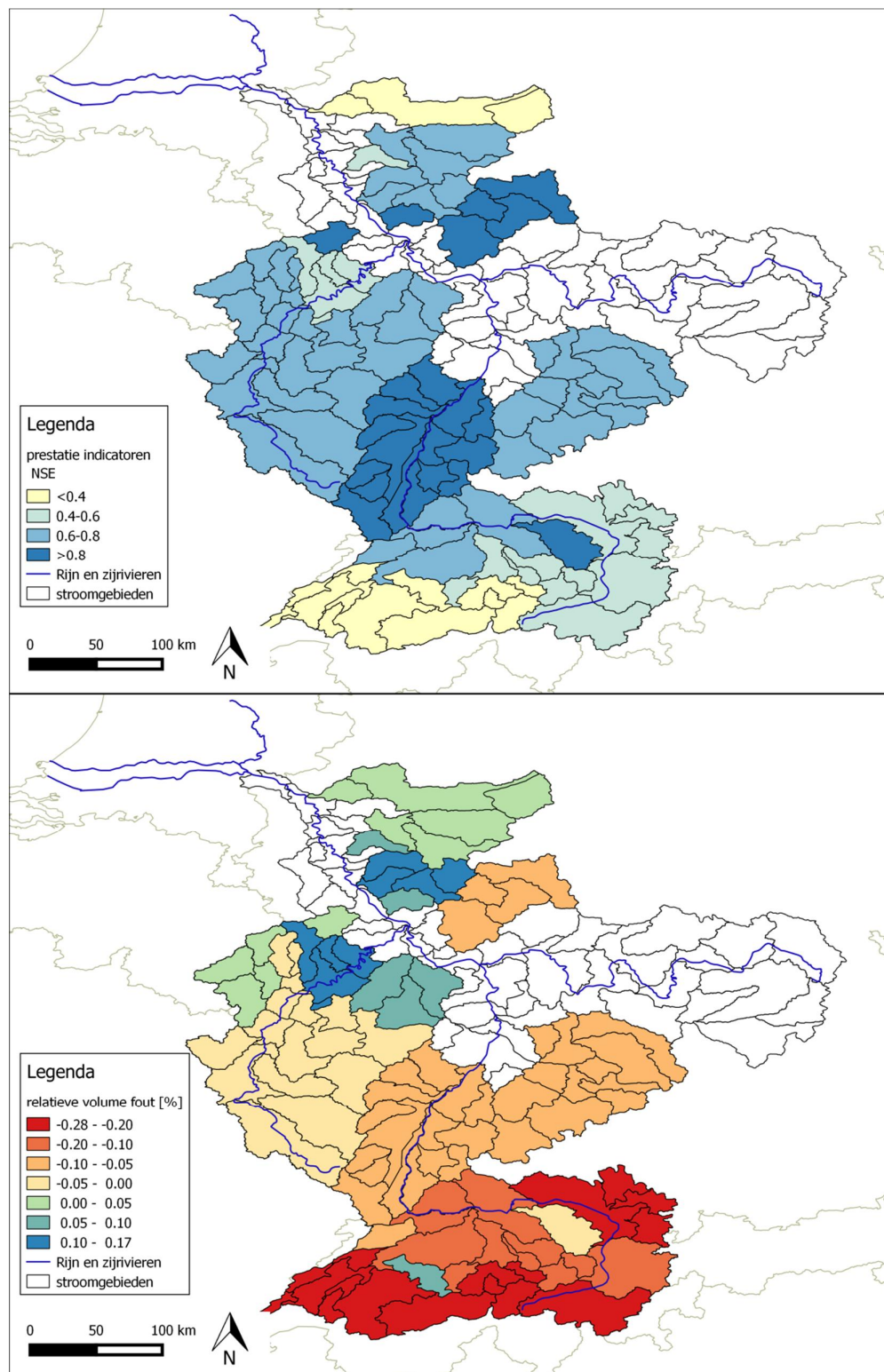
Figuur 4.5 Flow duration curve voor afvoer kalibratieperiode bij Lobith



Figuur 4.6 Hydrograaf kalibratie periode bij Lobith

4.2 Samenvatting performance HBV model

De performance van het nieuwe model is redelijk tot goed en is significant verbeterd voor de zomerperiode ten opzichte van het huidige model. De NSE waarde is groter dan 0.6 voor het merendeel van het Rijnstroomgebied. Alleen enkele bovenstroomse stroomgebieden in Zwitserland en de Lippe laten nog matige performance-indicatoren zien, zie ook de kaart in Figuur 4.7. De waterbalans is over het algemeen verbeterd voor de zomermaanden in het nieuwe model. In Zwitserland en het merendeel van zuidelijk Duitsland is echter nog steeds een onderschatting van de afvoer, terwijl de meeste stroomgebieden in Noordelijk Duitsland nu een kleinere overschatting laten zien, zie ook onderste kaart in Figuur 4.7.



Figuur 4.7 Performance-indicatoren voor gekalibreerde substroomgebieden in de Rijn

4.3 Conclusies en aanbevelingen

Na implementatie van een aantal nieuwe substroomgebieden in het Zwitserse gedeelte van de Rijn om beter de afvoer te kunnen voorspellen tijdens de zomerperiode is het nieuwe HBV uurmodel gekalibreerd. Voor zeven parameters in 109 van de 148 substroomgebieden zijn nieuwe waarden gevonden. Het belangrijkste doel van dit project was om het Zwitserse deel van het Rijnstroomgebied te kalibreren en te verbeteren. De aanpassingen in het uurmodel hebben in het Zwitserse gedeelte van de Rijn tot aan de bovenstroomse Rijn bij Maxau tot significante verbeteringen geleid. Bij Lobith zijn de resultaten van het huidige en nieuwe model echter vergelijkbaar, en hebben geen significante verbeteringen opgetreden op basis van performance-indicatoren. Afgezien daarvan zijn er wel een aantal verbeteringen doorgevoerd in het HBV model die het fysisch realistischer maken, wat voor een betere representatie van het systeem zorgt. De input van het model is realistischer geworden door het op nul zetten van de *pcalt* parameter waardoor de neerslag niet langer dubbel gecorrigeerd wordt, er is nu meer differentiatie van parameters in Zwitserland door kalibratie, en de interpolatie van temperatuur is verbeterd door het inpassen van een lapse rate. Het effect van de kalibratie is geweest dat afvoer van de wintermaanden is verplaatst naar de zomermaanden door onder andere meer sneeuwopbouw en de bufferwerking van de meren in Zwitserland. Het model is daarom goed geschikt om laagwater afvoeren te voorspellen tussen 1 april en 1 oktober. Voor afvoervoorspellingen in de winter wordt aanbevolen het huidige model te blijven hanteren.

Voor verdere verbetering van het model zijn meer afvoerstations nodig in met name de Duitse substroomgebieden. Voor bijvoorbeeld de Neckar waar nu identieke parameters voor 13 substroomgebieden worden verondersteld, wordt verwacht dat met verdere ruimtelijke differentiatie van de modelparameters de performance van het model verbeterd kan worden. Ook een betere kalibratie van de Main zal een verschil maken. Op de uurlijkse meetreeksen van de Main is niet te kalibreren, maar dit zou wellicht wel kunnen op basis van bijvoorbeeld moving averages of dag-gemiddeldes. Dat zou waarschijnlijk een goede bijdrage leveren aan een betere performance bij Lobith. Voor verdere verbeteringen in het Zwitserse deel van de Rijn zijn meer of verbeterde neerslag observaties nodig. Ook zouden metingen van sneeuwopbouw kunnen helpen bij het beter kalibreren van het model.

5 Performance HBV Rijnmodel voor laag water met dagelijkse tijdstap

Naast een uurmodel is het gekalibreerde HBV model ook omgezet naar een dagmodel. Hiervoor is de dagelijkse data uit het GRADE project gebruikt. Binnen GRADE was het doel juist om het HBV model zo goed mogelijk bij hoogwatersituaties te laten presteren. Met deze exercitie wordt bepaald of het nieuwe gekalibreerde model een betere performance geeft voor laagwatersituaties dan het oorspronkelijke GRADE dagmodel wanneer het model met deze dagelijkse forcing data wordt gedraaid. Het model is niet opnieuw gekalibreerd met dagelijkse data; de parameters zijn van het uurlijkse model overgenomen en de performance is berekend zonder aanvullende kalibratie.

5.1 Data

In deze performance-analyse wordt dezelfde historische dataset gebruikt als in FEWS GRADE. Dit is de HYRAS 2.0 neerslag dataset (Rauthe et al., 2012), een rasterdataset met dagelijkse neerslagmetingen voor het gehele Rijnstroomgebied voor de periode 1955-2006 (resolutie 0.25°), en de E-OBS v4.0 dataset van het KNMI voor temperatuur (Haylock et al., 2008), ook een rasterdataset met een resolutie van 0.25° en dagelijkse tijdstap voor de periode 1955-2006 (Winsemius et al., 2013; Hegnauer & Van Verseveld, 2013).

De afvoerdataset waarop is gekalibreerd in het GRADE project wordt hier gebruikt voor validatie, een combinatie van dagelijkse afvoeren uit de HYMOG dataset en data van BfG (Winsemius et al., 2013), beide met dagelijkse tijdstappen.

Door de beschikbaarheid van lange tijdseries met dagelijkse afvoeren kon de performance berekend worden over een lange periode. Het dagelijkse HBV model is gedraaid over de periode 1955-2000, en de performance is berekend voor de zomermaanden april t/m september vanaf 1965.

5.2 Aanpassingen model voor dagtijdstap

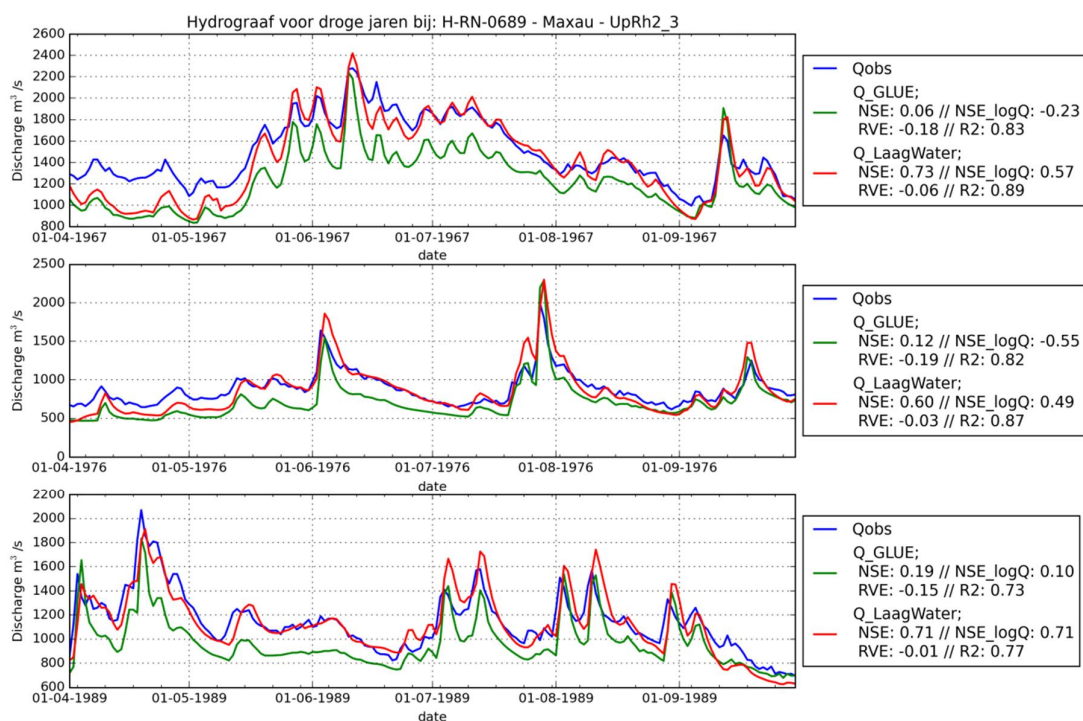
De invoer data en de kalibratiedata zijn anders voor het model met dagelijkse tijdstap ten opzichte van het model met uurlijkse tijdstap. Dit betekent dat ook nieuwe tijdseries gegenereerd moeten worden in FEWS die als invoer in het HBV model worden gebruikt. Ook moeten nieuwe initiële condities gegenereerd worden voor het model goed kan draaien. De geobserveerde afvoerseries waarmee de performance van het dagmodel berekend wordt, zijn anders dan die van het uurmodel, dus de locaties die met elkaar vergeleken worden na de run zijn ook anders; dit is aangepast in de Python scripts. Om dezelfde reden moeten in de koppeling naar HBV alle '.key' bestanden worden nagelopen en aangepast waar zij locaties, tijdstap of begin- en eindtijd van de modelrun aangeven. Tussen de gebruikte uurlijkse neerslagdata en de dagelijkse neerslagdata (HYRAS) zit ook nog een verschil in eenheden: de neerslag in HYRAS is gegeven in 0.1 mm, in plaats van 0.01 mm zoals in de uurlijkse neerslagreeksen. Dit is aangepast in het rmod.par bestand binnen HBV.

5.3 Resultaten

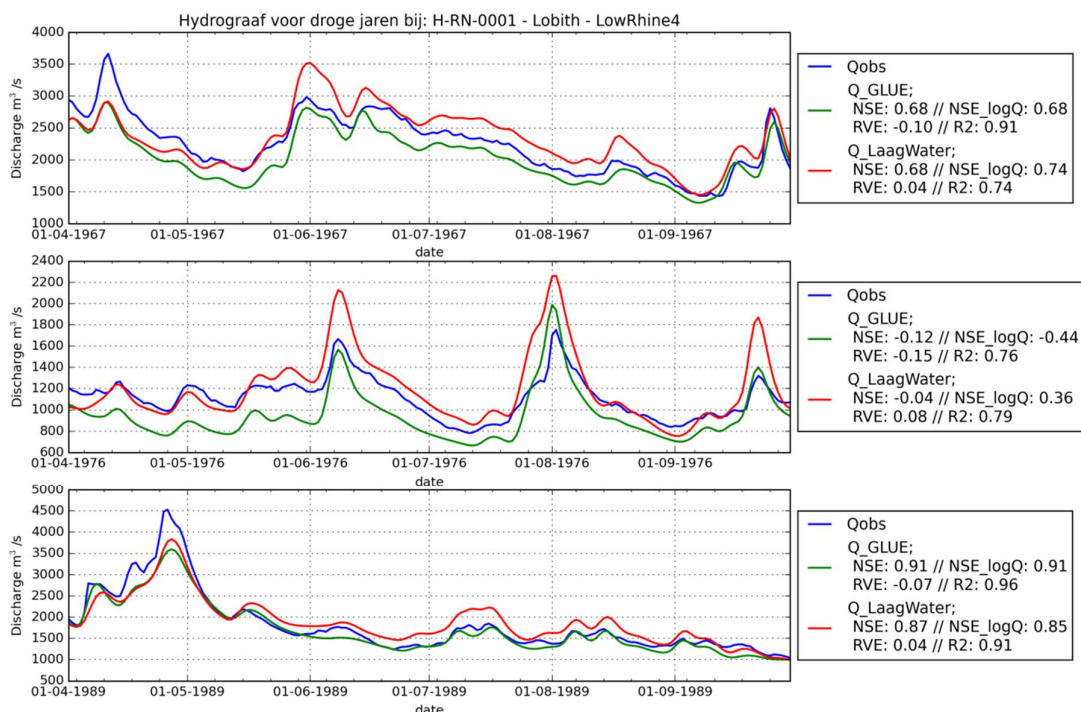
Het HBV model is gedraaid voor een periode van 45 jaar, over 1955-2000. De performance is berekend over alle zomermaanden vanaf 1965 (1 april – 1 oktober), en nog eens apart voor de zomermaanden van drie droge jaren: 1967, 1976, 1989. Over het algemeen is de performance van het nieuwe, op laag water gekalibreerde model beter dan de performance van het originele dagmodel voor laagwatersituaties.

In Figuur 5.1 en Figuur 5.2 worden de resultaten voor drie droge zomers getoond (1967, 1976 en 1989) voor Maxau en Lobith. In Appendix B staan de resultaten voor de hele modelperiode (1965-2000) voor Maxau en Lobith. Het valt op dat de performance van het nieuwe model (rode lijn) bijna overal redelijk tot goed is (NSE van 0,60 tot 0,87), en bovendien veel beter dan het oorspronkelijke model. Alleen in 1976 bij Lobith is de fit behoorlijk slecht (hoewel nog steeds 'beter' dan voor het originele model): de pieken worden met het nieuwe model sterk overschat, terwijl ze in het oude model juist sterk werden onderschat. Het oorspronkelijke model (groene lijn) geeft overal een onderschatting van de afvoeren voor deze droge jaren (negatieve RVE waarden), alleen bij Lobith in 1989 doen zowel het oude als nieuwe model het erg goed.

In Tabel 5.1 staat een overzicht van de performance-indicatoren van het nieuwe dagmodel over de gehele gemodelleerde periode (alleen de zomers) voor Lobith, Maxau en nog een paar locaties. 'GRADE' geeft hierbij de performance-indicatoren weer van het oorspronkelijke dagmodel (dus gekalibreerd op hoog water), en 'Laagwater' geeft de performance aan van het nieuwe gekalibreerde model met dezelfde input data. Uit deze tabel wordt ook duidelijk dat het nieuwe, op laag water gekalibreerde model over het algemeen een betere performance geeft dan het oude model. De RVE wordt op alle locaties teruggebracht of blijft gelijk, de NSE van de log van de afvoeren is zelfs overal beter. De rode waarden geven aan waar de NSE van het nieuwe model onder die van het oude model ligt, maar over het geheel bezien doet het nieuwe model het beter voor laagwater dan het oude model.



Figuur 5.1 De modelresultaten van het dagmodel bij Maxau voor de zomerperiode van drie droge jaren: 1967, 1976 en 1989. De blauwe lijn is de geobserveerde afvoer, de groene lijn de modelresultaten van het originele dagmodel, en de rode lijn de resultaten van het nieuwe model met de dagelijkse data



Figuur 5.2 De modelresultaten van het dagmodel bij Lobith voor de zomerperiode van drie droge jaren: 1967, 1976 en 1989. De blauwe lijn is de geobserveerde afvoer, de groene lijn de modelresultaten van het originele dagmodel, en de rode lijn de resultaten van het nieuwe model met de dagelijkse data

Tabel 5.1 De performance-indicatoren van het dagmodel, berekend over de zomerperiodes van 1965-2000. GRADE geeft de performance van het originele model; Laagwater geeft de performance van het huidige, op laag water gekalibreerde model met dagelijkse forcing data

stationsnaam	station id	NSE		NSE_logQ		RVE	
		Laagwater	GRADE	Laagwater	GRADE	Laagwater	GRADE
Lobith	H-RN-0001	0.86	0.88	0.86	0.85	0.09	-0.09
Maxau	H-RN-0689	0.88	0.63	0.85	0.52	-0.02	-0.17
Cochem	H-RN-0908	0.74	0.86	0.70	0.57	0.08	-0.20
Basel	H-RN-BFG004	0.78	0.60	0.66	0.48	-0.12	-0.18
Trier	H-RN-TRIE	0.67	0.87	0.54	0.51	0.20	-0.20
Andernach	H-RN-0947	0.88	0.83	0.89	0.77	0.06	-0.13
Kaub	H-RN-0943	0.87	0.79	0.89	0.75	0.04	-0.13
Köln	H-RN-0950	0.88	0.83	0.89	0.76	0.05	-0.13
Worms	H-RN-0693	0.88	0.72	0.89	0.65	0.02	-0.14

5.4 Conclusies

Na conversie van uur naar dag geeft het nieuwe HBV laagwatermodel ook een betere performance in het laagwaterseizoen, ook als het geforceerd met de dagelijkse data waarmee het oorspronkelijke HBV model voor GRADE gekalibreerd was. Dit geldt vooral voor de drie droogste jaren in de simulatieperiode. De performance van het oorspronkelijke hoogwatermodel blijft wel beter tijdens hoog water dan het nieuwe model. Het is dus belangrijk om van tevoren het doel van een kalibratie-experiment duidelijk te hebben. Bovendien lijkt het nuttig om een HBV model voor hoogwatersituaties en een voor laagwatersituaties naast elkaar te laten draaien voor verschillende doeleinden.

6 Validatie HBV model met ECMWF-DET voorspellingen

Naast een validatie van het nieuwe HBV model met meetreeksen, is ook een validatie van het nieuwe HBV model met ECMWF-DET (Deterministische (DET) voorspelling van de European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)) voorspellingen uitgevoerd. Met deze analyse wordt bepaald of ECMWF-DET voorspellingen met het nieuwe HBV model een betere performance geven dan het huidige HBV model, voor de locaties Maxau en Lobith. Voor deze vergelijking is de analyse situatie zoveel mogelijk hetzelfde gehouden als de operationele situatie. Dit houdt in dat de volledige modellentrein (HBV en Sobek) in FEWS is gedraaid, met een dagelijkse ECMWF-DET voorspelling en een historische simulatie met Ensemble Kalman Filter (EnKF) voor Sobek.

6.1 Data, model en configuratie

Voor de validatie van het nieuwe HBV model met ECMWF-DET voorspellingen is gebruik gemaakt van historische metingen (neerslag en temperatuur) over de periode januari 2010 tot en met juni 2011. De inspeelperiode van het HBV model loopt van januari 2010 tot en met 2 april 2011. De inspeelperiode van het Sobek model loopt van 21 maart 2011 tot en met 2 april 2011. Voor de periode 2 april 2011 tot en met 30 juni 2011, zijn dagelijks ECMWF-DET voorspellingen gemaakt, 90 in totaal. Voor de analyse is gebruikt gemaakt van de FEWS-configuratie van RWsOS. Voor het nieuwe HBV model is gebruik gemaakt van de aangepaste FEWS-configuratie zoals beschreven in paragraaf 3.1.4.

Voor de analyse zijn drie verschillende situaties doorgerekend:

1. Huidige HBV model en externe afvoer voorspelling (Q.fx) bij Maxau (operationele instelling)
2. Huidige HBV model (zonder externe afvoer voorspelling (Q.fx) bij Maxau)
3. Nieuwe HBV model (zonder externe afvoer voorspelling (Q.fx) bij Maxau)

Dit houdt in dat er wordt gerekend met 3 verschillende randvoorwaarden voor het Sobek model bij Maxau. De externe voorspelling bij Maxau wordt operationeel aangeleverd door de regionale Duitse partij: Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg.

Voor het vaststellen van de performance van de ECMWF-DET voorspellingen met de verschillende modellen zijn dezelfde performance indicatoren gebruikt als voor de kalibratie van het HBV model voor laagwater (paragraaf 3.3.3). Dit zijn de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), de Nash-Sutcliffe Efficiency van de log-geschaalde afvoer ($NSE_{\log Q}$) en de Relative Volume Error (RVE). Daarnaast is ook het gewogen gemiddelde van deze performance indicatoren berekend (vergelijking (1.1)). De performance is per ECMF-DET voorspelling bepaald (in totaal 90).

Voor de vergelijking van de drie verschillende situaties worden mediaan waarden en boxplots van de 90 ECMWF-DET voorspellingen voor de locaties Maxau en Lobith gepresenteerd in de volgende paragraaf. Voor locatie Lobith zijn ECMWF-DET voorspellingen met het huidige en nieuwe HBV model vergeleken, en zijn ECMWF-DET voorspellingen met het Sobek model voor de drie verschillende situaties vergeleken. Voor locatie Maxau zijn de ECMWF-DET voorspellingen met het huidige HBV model en nieuwe HBV model, en de externe afvoer voorspelling (Q.fx) met elkaar vergeleken.

6.2 Resultaten

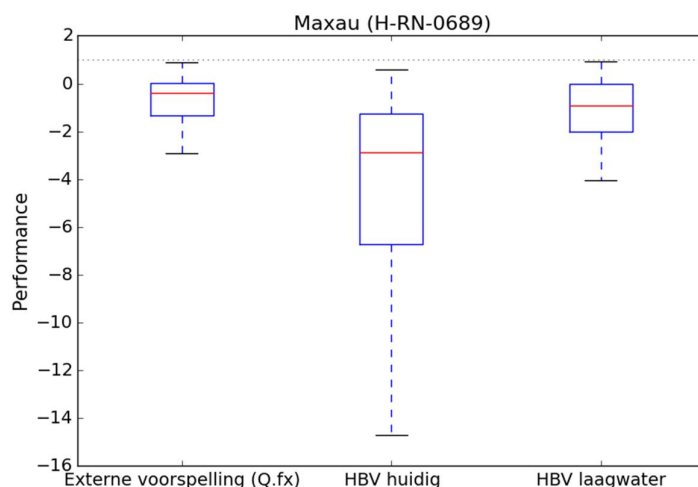
Het nieuwe HBV model geeft duidelijk een betere performance (optimaal bij een waarde van 1.0) dan het huidige HBV model voor zowel locatie Maxau als Lobith. De mediaan waarden van de verschillende performance indicatoren voor het nieuwe HBV model zijn voor zowel Maxau als Lobith allemaal hoger vergeleken met het huidige HBV model (Tabel 6.1, Tabel 6.2, Figuur 6.1, Figuur 6.2). Het nieuwe HBV model geeft geen verbeterde performance ten opzichte van de externe voorspelling voor locatie Maxau die in het huidige operationele systeem als invoer voor het Sobek model wordt gebruikt (Tabel 6.1, Figuur 6.1).

Tabel 6.1 Mediaan waarden voor de performance-indicatoren van ECMWF-DET voorspellingen berekend met het huidige HBV model, het nieuwe HBV model (HBV laagwater) en extern aangeleverde voorspellingen (Q.fx), over de zomerperiode van 2011, voor locatie Maxau (H-RN-0689)

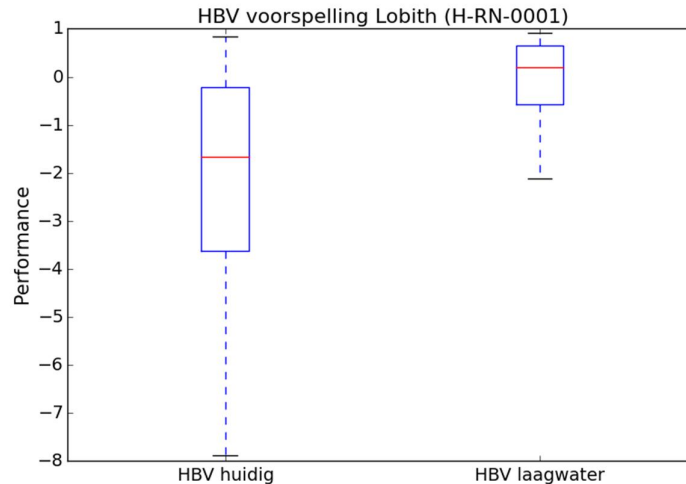
Performance Indicator	Externe voorspelling (Q.fx)	HBV huidig	HBV laagwater
NSE_logQ	-0.78	-4.36	-1.35
NSE	-0.59	-3.17	-1.25
RVE	-0.02	-0.19	-0.05
Gewogen gemiddelde	-0.38	-2.90	-0.92

Tabel 6.2 Mediaan waarden voor de performance-indicatoren van ECMWF-DET voorspellingen berekend met het huidige HBV model en het nieuwe HBV model (HBV laagwater), over de zomerperiode van 2011, voor locatie Lobith (H-RN-0001)

Performance Indicator	HBV huidig	HBV laagwater
NSE_logQ	-2.28	0.03
NSE	-2.19	0.02
RVE	-0.03	-0.004
Gewogen gemiddelde	-1.66	0.20



Figuur 6.1 Performance (gewogen gemiddelde) van ECMWF-DET voorspellingen berekend met het huidige HBV model, het nieuwe HBV model (HBV laagwater) en extern aangeleverde voorspellingen (Q.fx), over de zomerperiode van 2011, voor locatie Maxau (H-RN-0689)



Figuur 6.2 Performance (gewogen gemiddelde) van ECMWF-DET voorspellingen berekend met het huidige HBV model en het nieuwe HBV model (HBV laagwater), over de zomerperiode van 2011, voor locatie Lobith (H-RN-0001)

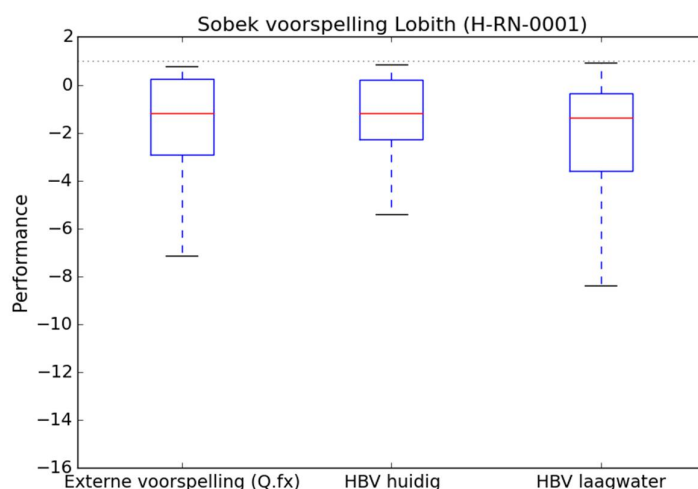
Het Sobek model in combinatie met het nieuwe HBV model geeft over het algemeen een wat lagere performance dan het Sobek model in combinatie met het huidige HBV model (met en zonder externe voorspelling (Q.fx)) (Tabel 6.3, Figuur 6.3). Op basis van de verbeterde performance van het nieuwe HBV model ten opzichte van het huidige HBV model (Tabel 6.2, Figuur 6.2) is dit een wat onverwacht resultaat. Opvallend is dat het nieuwe HBV model bij Lobith de afvoer gemiddeld gezien niet systematisch onder- of overschat (Tabel 6.2; RVE - 0.004), terwijl het nieuwe HBV model in combinatie met Sobek gemiddeld gezien de afvoer overschat (Tabel 6.3; RVE 0.06).

In het rapport van Toom (2014) is een analyse gedaan naar de structurele overschatting van de waterstand bij Lobith. Er zijn verschillende oorzaken aangewezen voor deze overschatting. Eén oorzaak van de structurele overschatting is de veroudering van het Duitse SOBEK-RE model. Dit model is sinds 2007 niet meer geactualiseerd waardoor aanpassingen aan het rivierbed en aanpassingen in maatregelen niet meer actueel zijn. Deze fout zal door de tijd heen alleen maar groter worden. Een andere oorzaak zijn de randvoorwaarden van het SOBEK model, zoals de QH relaties en de correctie factoren tussen HBV en SOBEK. In 2015 zijn enkele aangepaste Qh relaties aangeleverd door de BfG die de randvoorwaarden mogelijk ook zullen verbeteren. De correctie factoren worden aangeleverd door de BfG in Duitsland en zijn een correctie op de gesimuleerde afvoer voor het feit dat niet elk substroomgebied meegenomen wordt als input naar het hydrodynamische model en dat er een vertraging zit bij sommige randvoorwaarden. De nieuwe BfG factoren (Meissner, 2011) die eind 2014 operationeel zijn geïmplementeerd hebben de overschatting van de waterstand al met enkele centimeters omlaag gebracht. Het nieuwe SOBEK 3 model dat in 2016 operationeel in gebruik genomen zal worden zal naar verwachting de overschatting ook reduceren.

Het verschil in resultaat in deze analyse tussen het huidige en het nieuwe HBV model in combinatie met SOBEK kan mogelijk veroorzaakt worden doordat de BfG factoren die gebruikt zijn mogelijk niet de meest optimale factoren zijn voor een laagwater situatie.

Tabel 6.3 Mediaan waarden voor de performance-indicatoren van ECMWF-DET voorspellingen berekend met het Sobek model in combinatie met het huidige HBV model, het nieuwe HBV model (HBV laagwater) en extern aangeleverde voorspellingen (Q.fx), over de zomerperiode van 2011, voor locatie Lobith (H-RN-0001)

Performance Indicator	Externe voorspelling (Q.fx)	HBV huidig	HBV laagwater
NSE_logQ	-1.67	-1.57	-1.89
NSE	-1.94	-1.81	-2.21
RVE	0.05	0.05	0.06
Gewogen gemiddelde	-1.18	-1.17	-1.38



Figuur 6.3 Performance (gewogen gemiddelde) van ECMWF-DET voorspellingen berekend met het Sobek model in combinatie met het huidige HBV model, het nieuwe HBV model (HBV laagwater) en extern aangeleverde voorspellingen (Q.fx), over de zomerperiode van 2011, voor locatie Lobith (H-RN-0001)

6.3 Conclusies

Van 90 ECMWF-DET voorspellingen met het huidige HBV model (met en zonder externe voorspelling voor Maxau (Q.fx)) en het nieuwe HBV model, over de periode april tot en met juni 2011, is de performance berekend en vergeleken voor locaties Maxau en Lobith.

Het nieuwe HBV model geeft een performance verbetering ten opzichte van het huidige HBV model voor locaties Maxau en Lobith.

Het nieuwe HBV model geeft geen verbeterde performance ten opzichte van de externe voorspelling (Q.fx) voor locatie Maxau. Het Sobek model in combinatie met het nieuwe HBV model geeft over het algemeen een wat lagere performance dan het Sobek model in combinatie met het huidige HBV model (met en zonder externe voorspelling (Q.fx)). Een mogelijke oorzaak is het gebruik van BfG factoren die voor een aantal locaties de gesimuleerde HBV afvoer verhogen voordat deze afvoer als rand aan het Sobek model wordt opgelegd.

7 Conclusies en aanbevelingen

Na implementatie van een aantal nieuwe substroomgebieden in het Zwitserse gedeelte van de Rijn om beter de afvoer te kunnen voorspellen tijdens de zomerperiode is het nieuwe HBV uurmodel gekalibreerd. Voor zeven parameters in 109 van de 148 substroomgebieden zijn nieuwe waarden gevonden. Het belangrijkste doel van dit project was om het Zwitserse deel van het Rijnstroomgebied te kalibreren en te verbeteren.

Er zijn ook een aantal verbeteringen doorgevoerd in het HBV model die het fysisch realistischer maken, wat voor een betere representatie van het systeem zorgt. De input van het model is realistischer geworden door het op nul zetten van de *pcalt* parameter waardoor de neerslag niet langer dubbel gecorrigeerd wordt, er is nu meer differentiatie van parameters in Zwitserland door kalibratie, en de interpolatie van temperatuur is verbeterd door het inpassen van een lapse rate.

Het effect van de kalibratie is geweest dat afvoer van de wintermaanden is verplaatst naar de zomermaanden door onder andere meer sneeuwopbouw en de bufferwerking van de meren in Zwitserland. Het model is daarom goed geschikt om laagwater afvoeren te voorspellen tussen 1 april en 1 oktober. Voor afvoervoorstellingen in de winter wordt aanbevolen het huidige operationele model te blijven hanteren.

7.1 Uur model

De performance van het nieuwe uurmodel is redelijk tot goed en is significant verbeterd voor de zomerperiode ten opzichte van het huidige model. De NSE waarde is groter dan 0.6 voor het merendeel van het Rijnstroomgebied. Alleen enkele bovenstroomse stroomgebieden in Zwitserland en de Lippe laten nog matige performance-indicatoren zien. De waterbalans is over het algemeen verbeterd voor de zomermaanden in het nieuwe model. In Zwitserland en het merendeel van zuidelijk Duitsland is echter nog steeds een onderschatting van de afvoer, terwijl de meeste stroomgebieden in Noordelijk Duitsland nu een kleinere overschatting laten zien. De aanpassingen in het uurmodel hebben in het Zwitserse gedeelte van de Rijn tot aan de bovenstroomse Rijn bij Maxau tot significante verbeteringen geleid. Bij Lobith zijn de resultaten van het huidige en nieuwe model echter vergelijkbaar, en hebben niet tot significante verbeteringen geleid op basis van performance-indicatoren.

Van 90 ECMWF-DET voorspellingen met het huidige HBV model (met en zonder externe voorspelling voor Maxau (Q.fx - van de Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg)) en het nieuwe HBV model, over de periode april tot en met juni 2011, is de performance berekend en vergeleken voor locaties Maxau en Lobith. Het nieuwe HBV model geeft een performance verbetering ten opzichte van het huidige HBV model voor locaties Maxau en Lobith.

Het nieuwe HBV model geeft geen verbeterde performance ten opzichte van de externe voorspelling (Q.fx) voor locatie Maxau. Het Sobek model in combinatie met het nieuwe HBV model geeft over het algemeen een wat lagere performance dan het Sobek model in combinatie met het huidige HBV model (met en zonder externe voorspelling (Q.fx)). Een mogelijke oorzaak is het gebruik van BfG factoren die voor een aantal locaties de gesimuleerde HBV afvoer veranderen voordat deze afvoer als rand aan het Sobek model wordt opgelegd.

7.2 Dag model

Na conversie van uur naar dag geeft het nieuwe HBV laagwatermodel ook een betere performance in het laagwaterseizoen, ook als het geforceerd wordt met de dagelijkse data waarmee het oorspronkelijke HBV model voor GRADE gekalibreerd is. Dit geldt vooral voor de drie droogste jaren in de simulatieperiode. De performance van het oorspronkelijke voor GRADE gekalibreerde HBV model blijft wel beter tijdens hoog water dan het nieuwe model.

7.3 Aanbevelingen

- Het wordt aanbevolen het HBV model voor hoogwatersituaties en het HBV model voor laagwatersituaties naast elkaar te laten draaien voor verschillende doeleinden.
- Performance HBV model kan nog verbeterd worden door een kalibratie met:
 - Meer afvoerstations in Duitsland
 - Specifiek voor de Main met moving averages of dag gemiddelden i.p.v. uur waarden vanwege de sterke fluctuaties op het meetstation
 - Meer en/of verbeterde neerslag observaties in Zwitserland
 - Metingen van sneeuwopbouw mee te nemen
- De aanpassingen binnen het HBV model (pcalt parameter) en in de FEWS configuratie (temperatuur interpolatie rekening houdend met hoogte stations) zouden toegepast moeten worden in de operationele modellen van RWsOS Rivieren en GRADE om deze modellen fysisch realistischer te maken.
- Het is nuttig inzicht te krijgen in de betrouwbaarheid van de afvoergegevens van individuele referentiestations. Daartoe wordt aanbevolen de resultaten van de door Deltares uitgevoerde waterbalans studie uit 2006 opnieuw te beschouwen en deze te realiseren aan de actualisaties van de Qh-relaties en het nieuwe SOBEK 3 model die sinds 2006 zijn aangepast.
- Het is aan te bevelen het gebruik van de BfG correctie factoren te onderzoeken voor hoog – en laagwater situaties en deze factoren te optimaliseren.

8 Literatuur

Berglöv, G., German, J., Gustavsson, H., Harbman, U. & Johansson, B. (2009). *Improvement HBV model Rhine in FEWS*. SMHI.

Eberle, M., Buiteveld, H., Krahe, P. and Wilke, K. (2005). *Hydrological modelling in the Rhine basin, Part III: Daily HBV model for the Rhine basin*. Report No. 1451, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, Germany.

Hegnauer, M., & van Verseveld, W. (2013). *Generalised Likelihood Uncertainty Estimation for the daily HBV model in the Rhine Basin, Part B: Switzerland*. Deltares.

Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. Advances in Geosciences, 5, 89–97.

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., & Bergström, S. (1997). *Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model*. Journal of Hydrology, 201(1-4), 272–288. doi:10.1016/S0022-1694(97)00041-3.

Meissner, D. (2011). Input_SOBEK-WAVOS_2011.doc.

Perwitasari, T. (2015) *HBV Rhine model improvement for low flow conditions using four lakes configuration in Upper Rhine basin*. Deltares rapport.

SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) (2009). *Improvement HBV model Rhine in FEWS* (Final Report).

Toom, M. den (2014). *Analyse overschatting waterstand Lobith in RWSOS-Rivieren*. Deltares rapport 1209453-000-ZWS-0005.

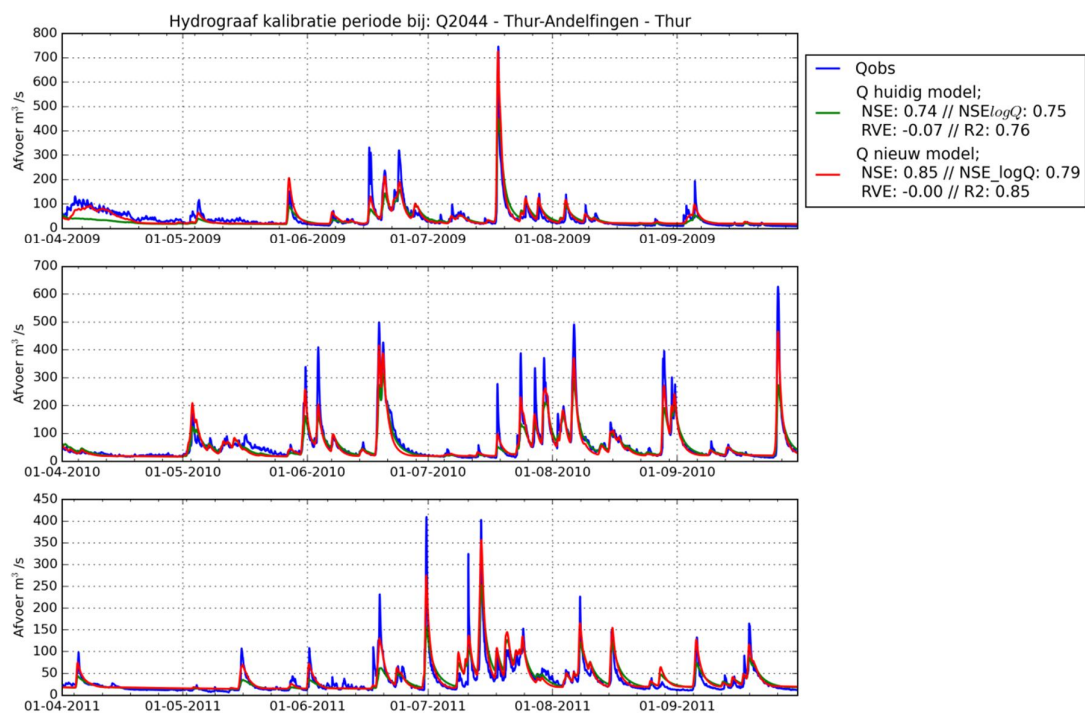
Weerts, A.H., Meißner, D., Rademacher, S. (2008). *Input Data Rainfall-Runoff Model Operational Systems FEWS-NL & FEWS-DE*. Deltares, December 2008.

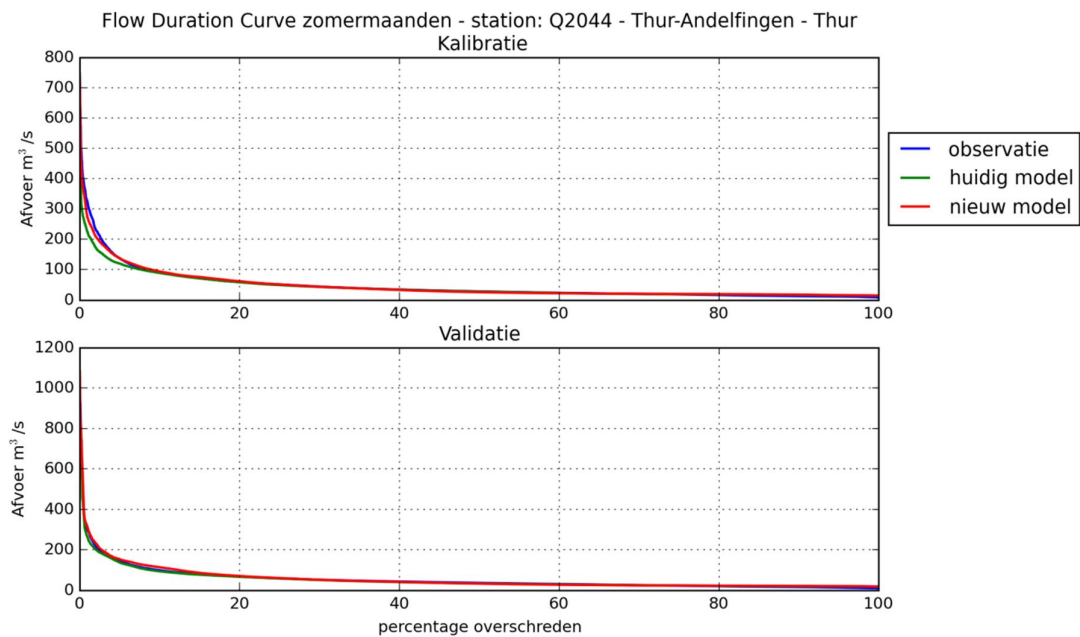
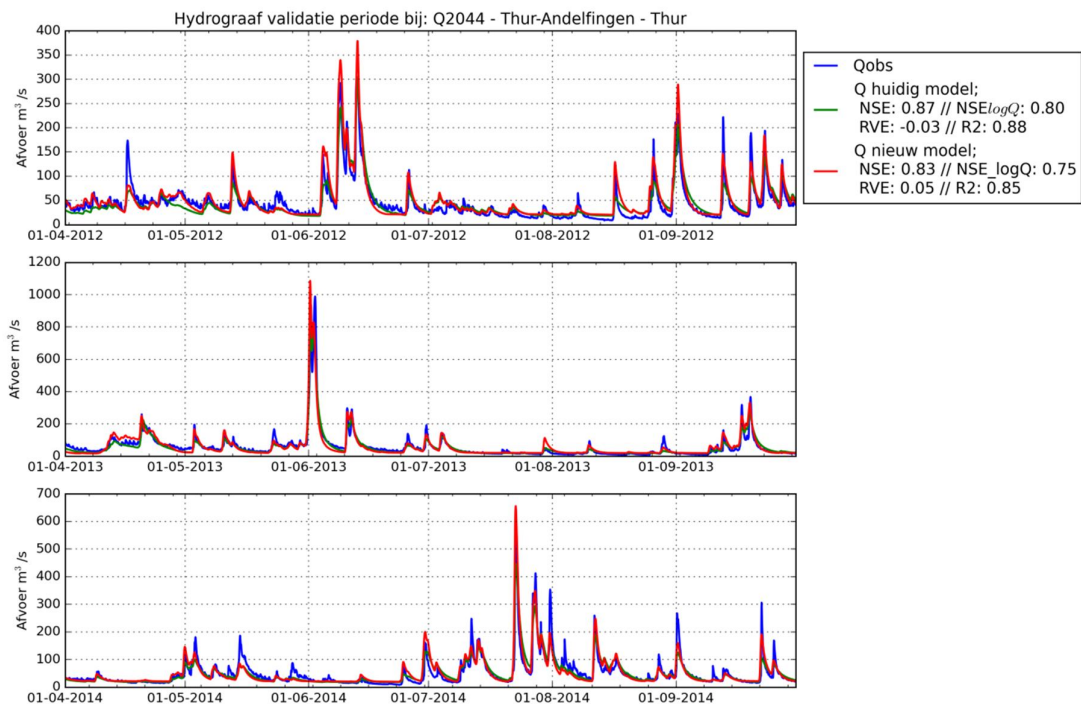
Winsemius, H., van Verseveld, W., Weert, A., & Hegnauer, M. (2013). *Generalised Likelihood Uncertainty Estimation for the daily HBV model in the Rhine Basin (Part A: Germany)*. Deltares.

A Resultaten uurmodel

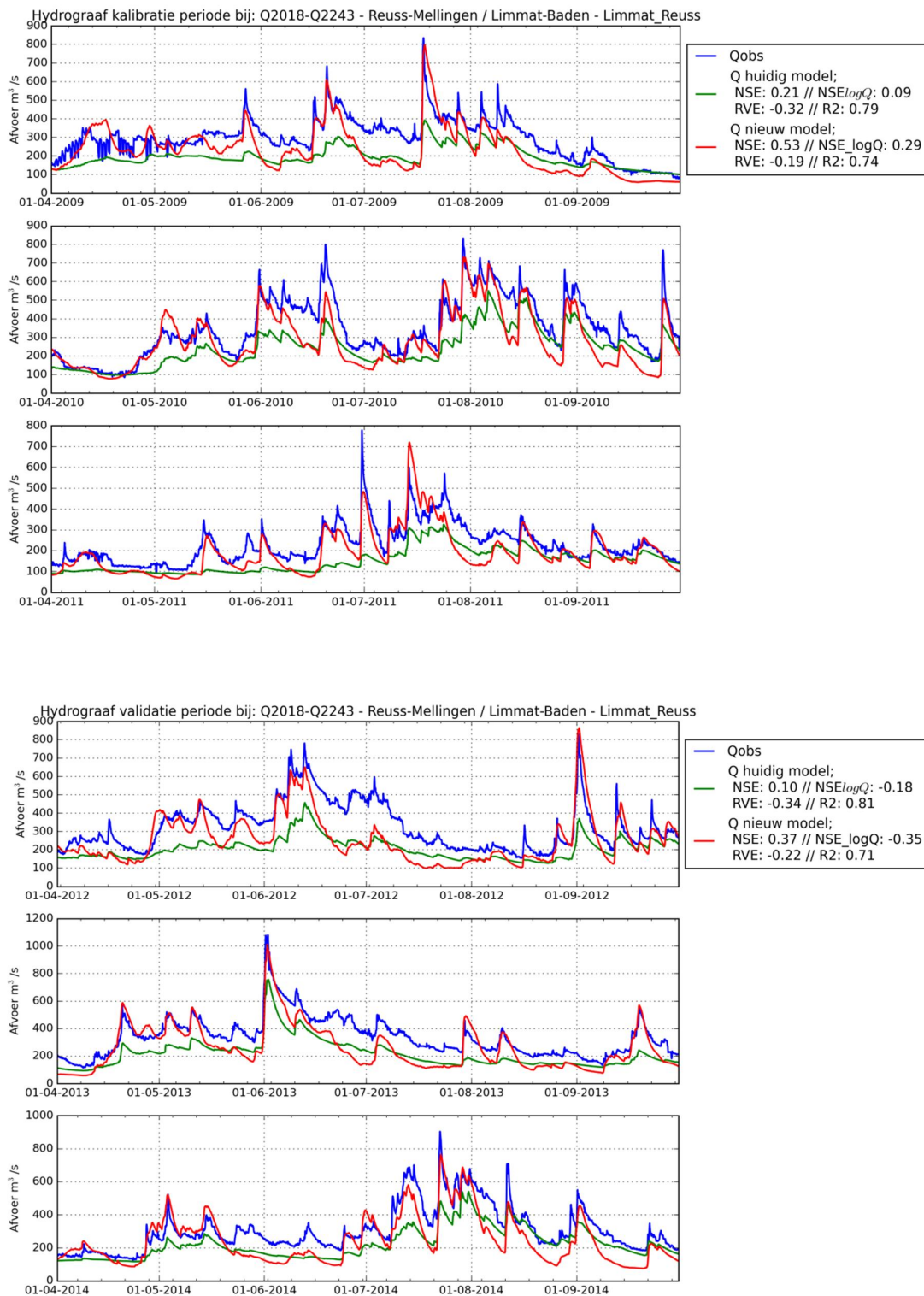
A.1 Zwitserse en bovenstroomse Rijn tot Maxau

A.1.1 Thur-Andelfingen

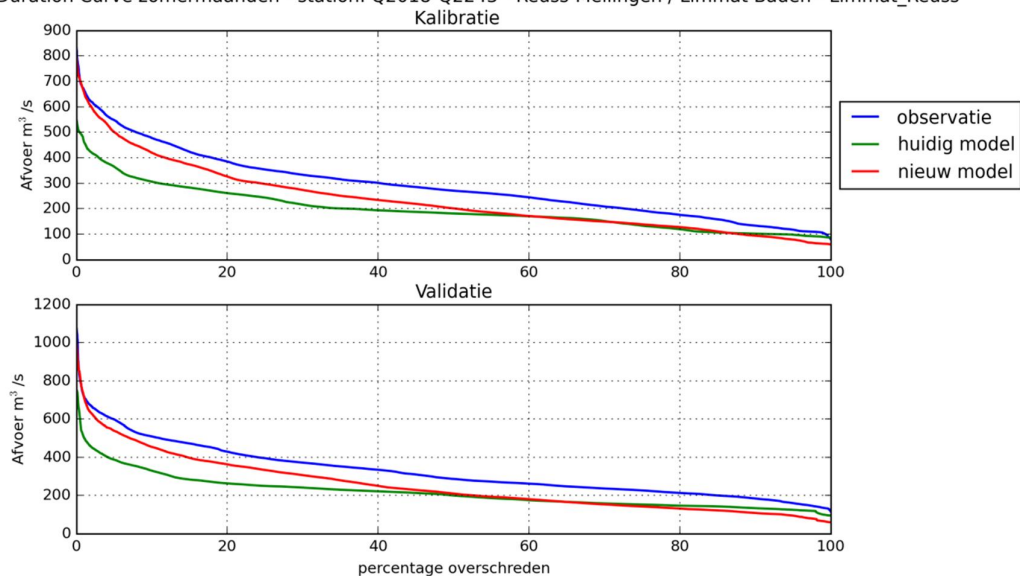




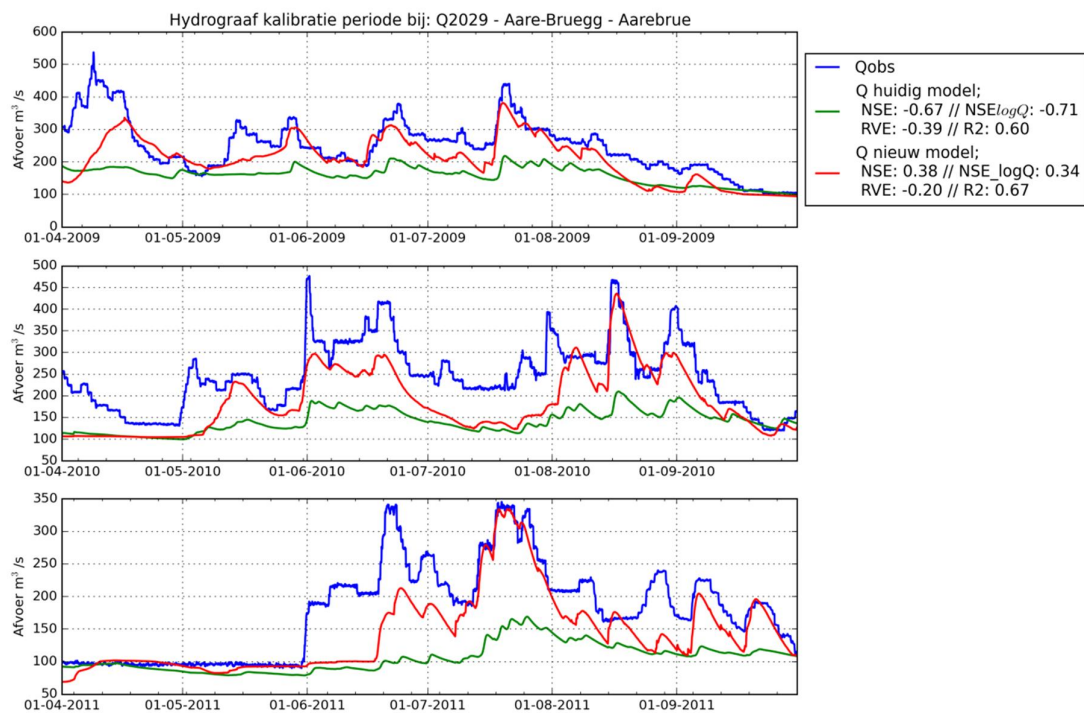
A.1.2 Reuss-Mellingen/ Limmat-Baden

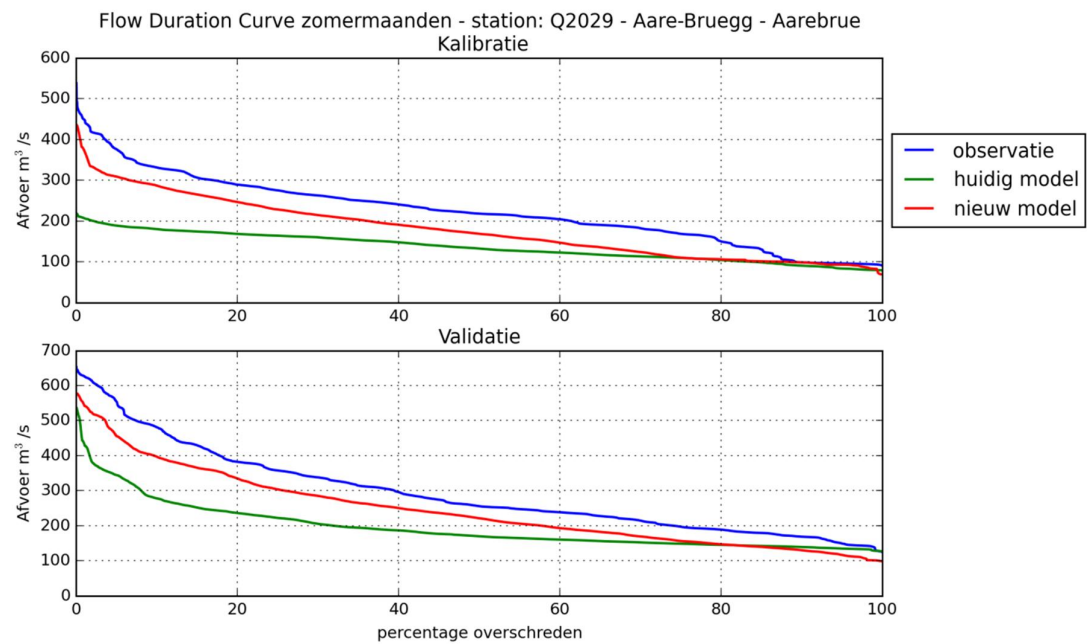
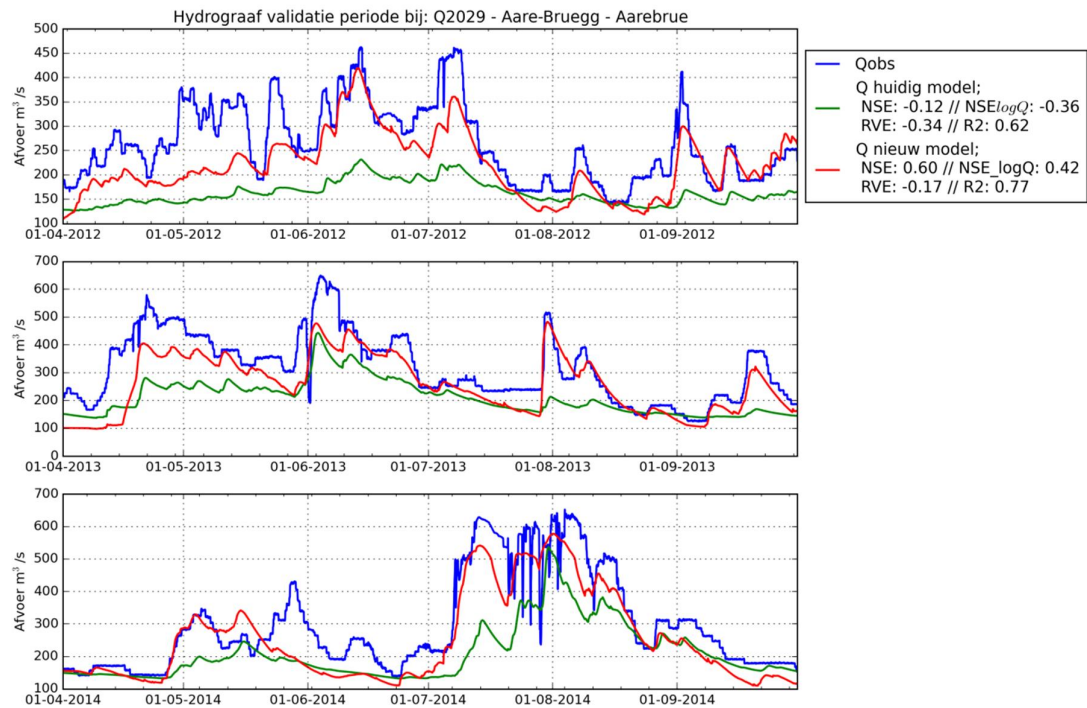


Flow Duration Curve zomermaanden - station: Q2018-Q2243 - Reuss-Mellingen / Limmat-Baden - Limmat_Reuss

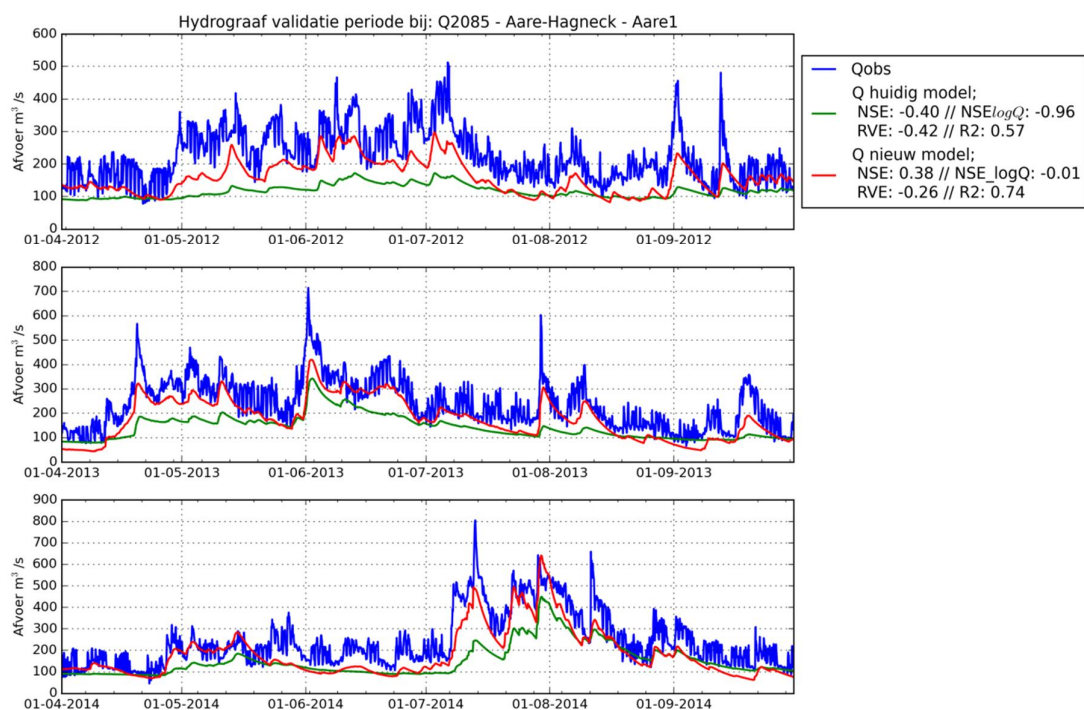
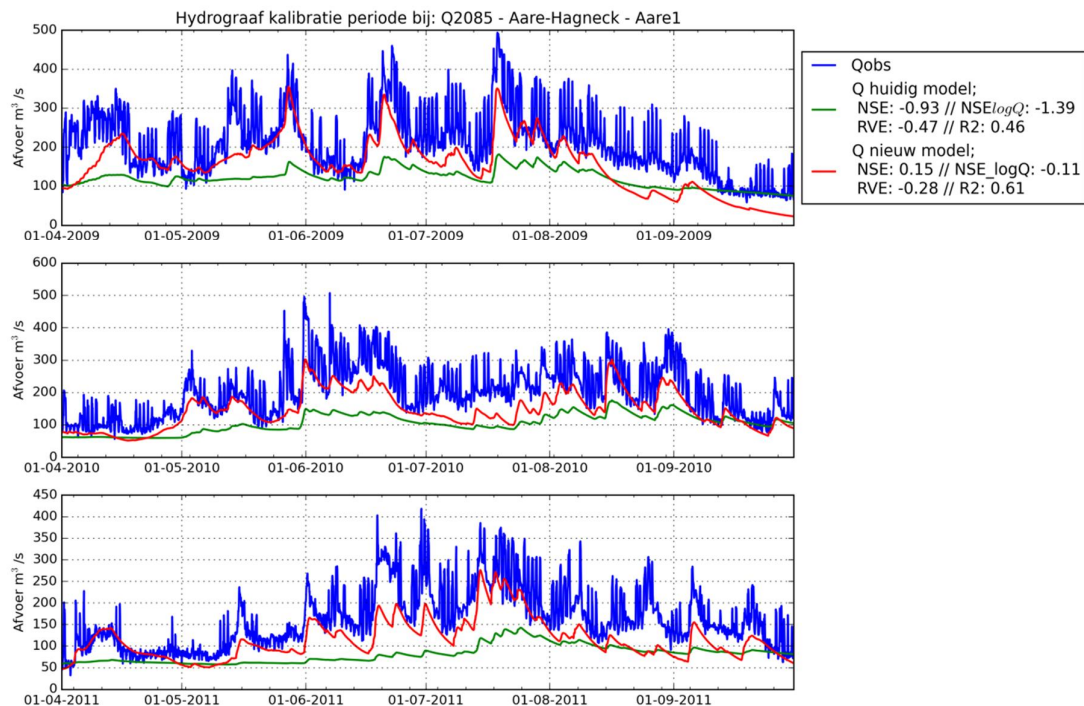


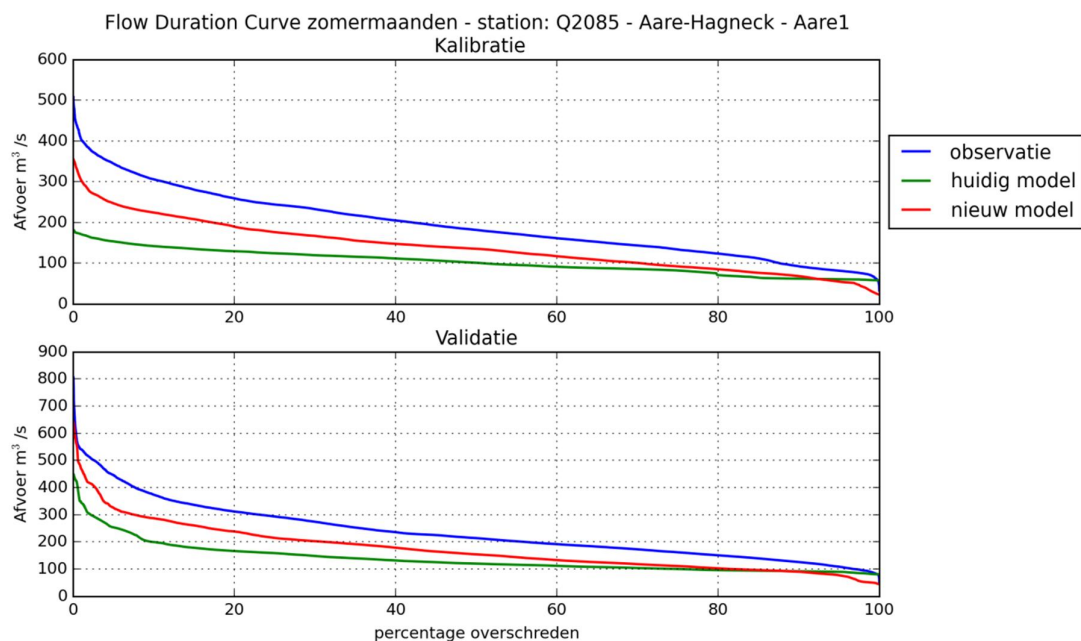
A.1.3 Aare-Brügg



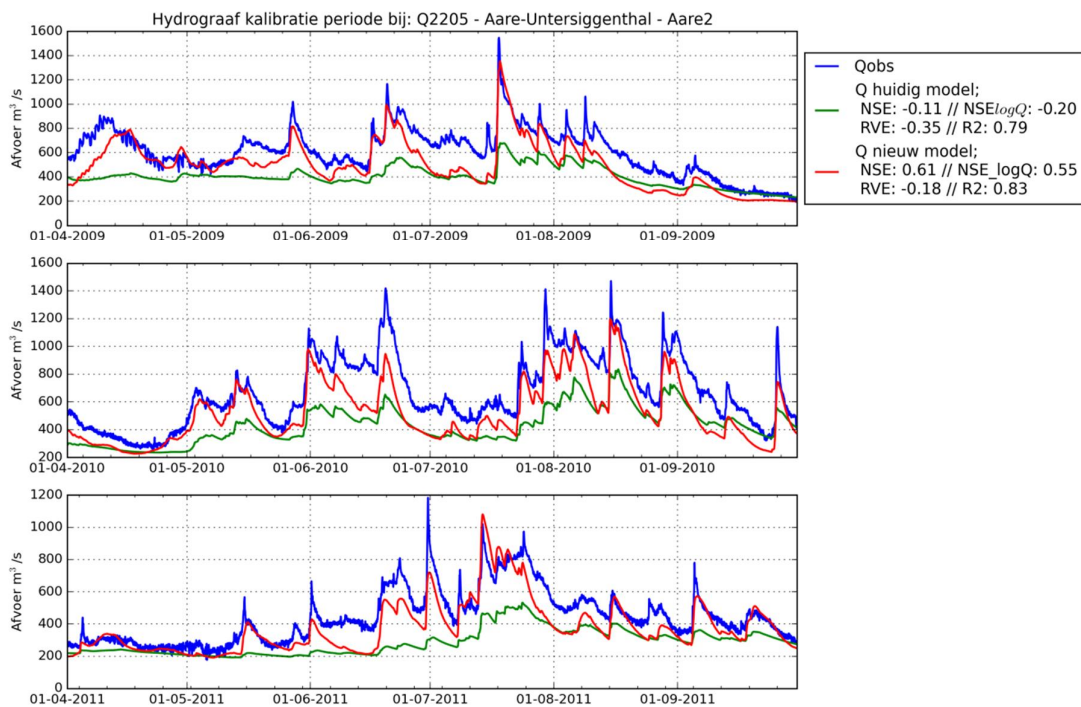


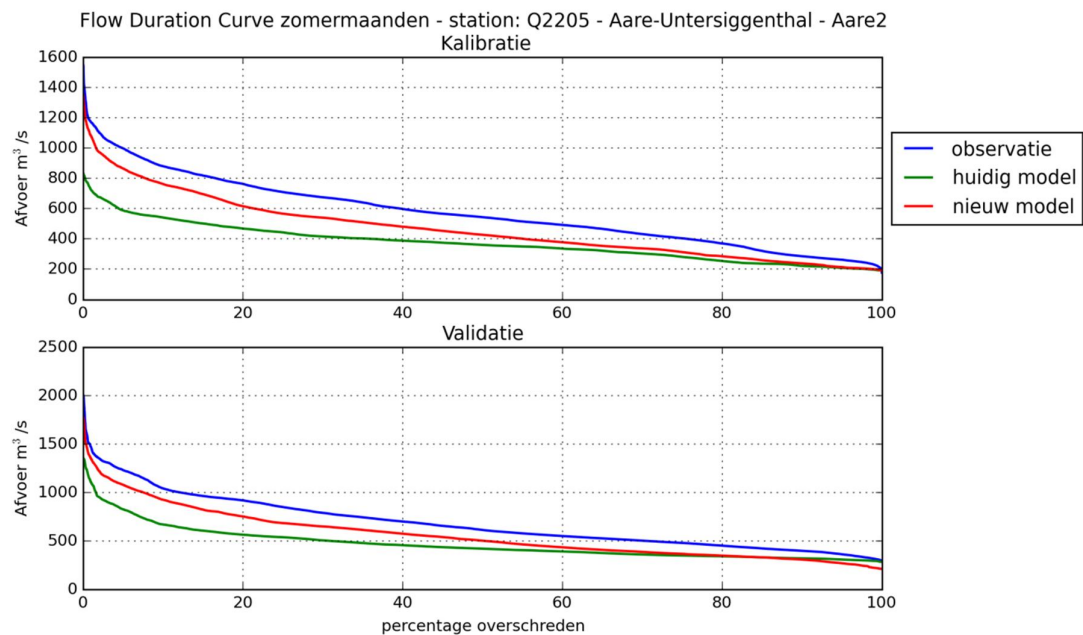
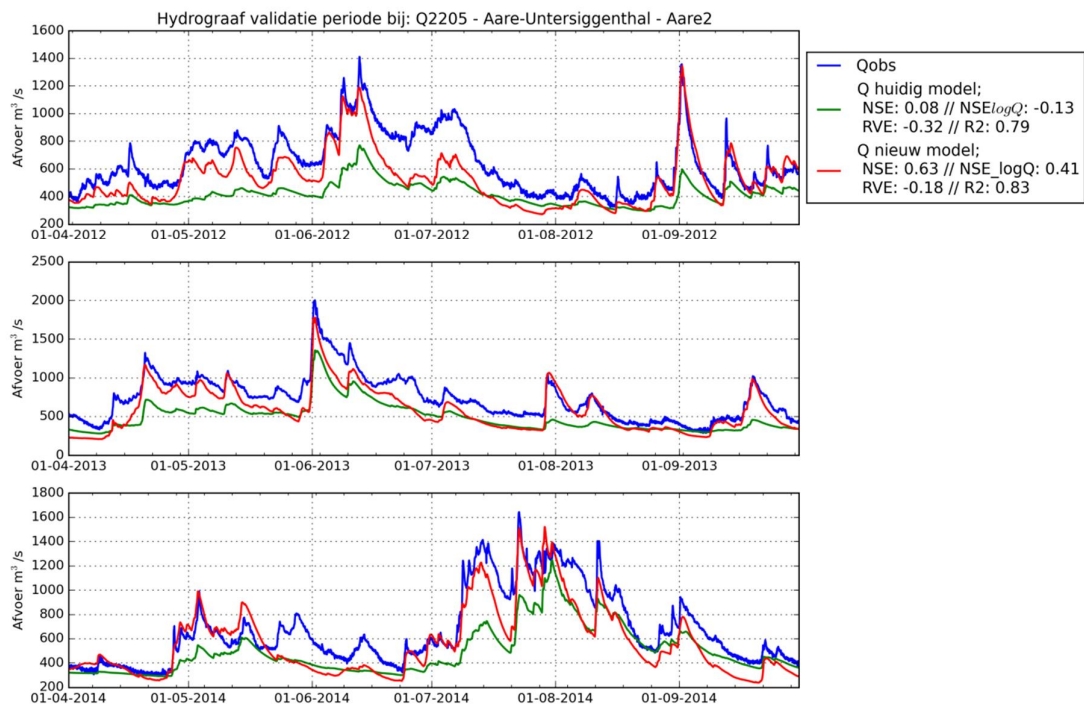
A.1.4 Aare-Hagneck



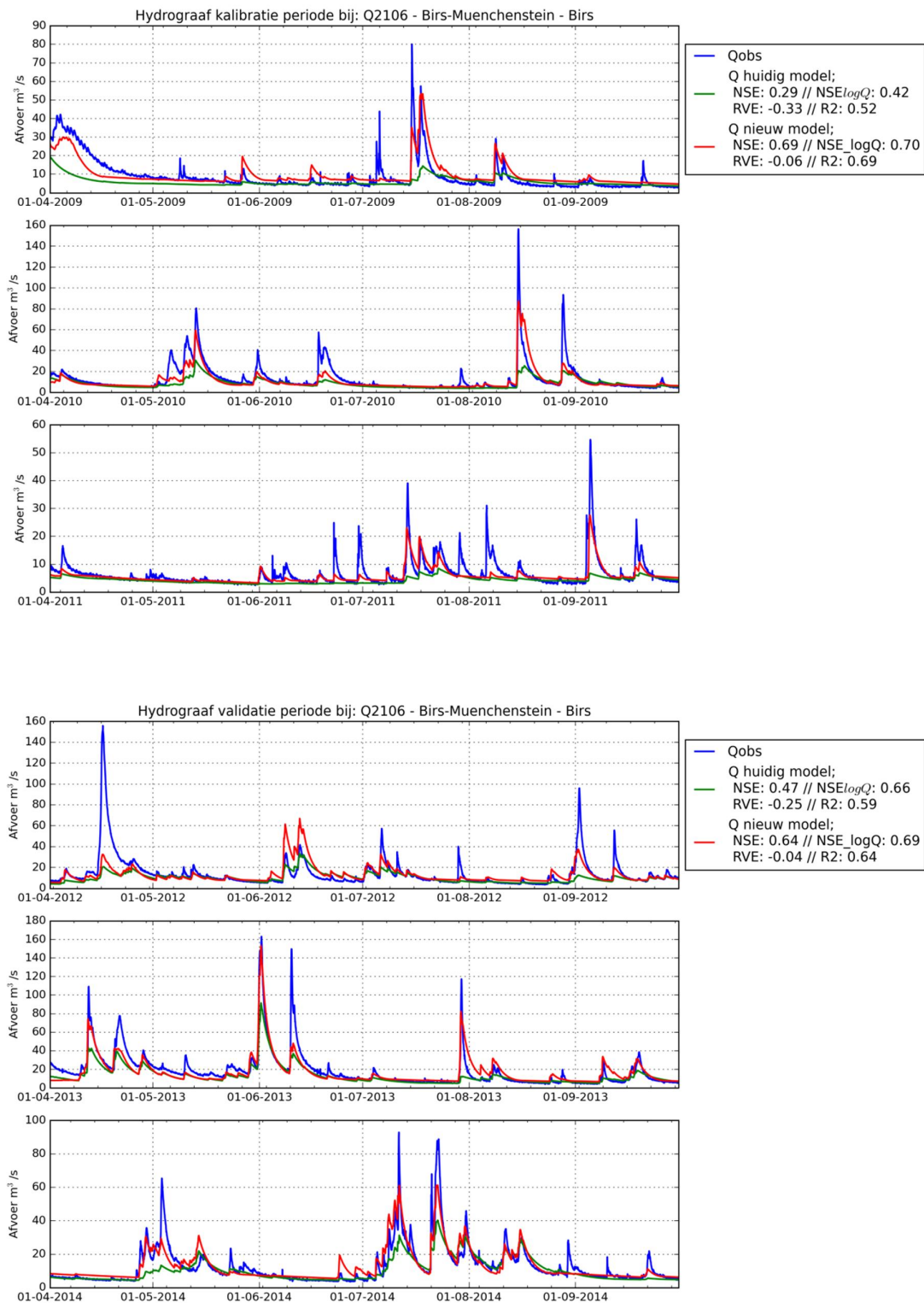


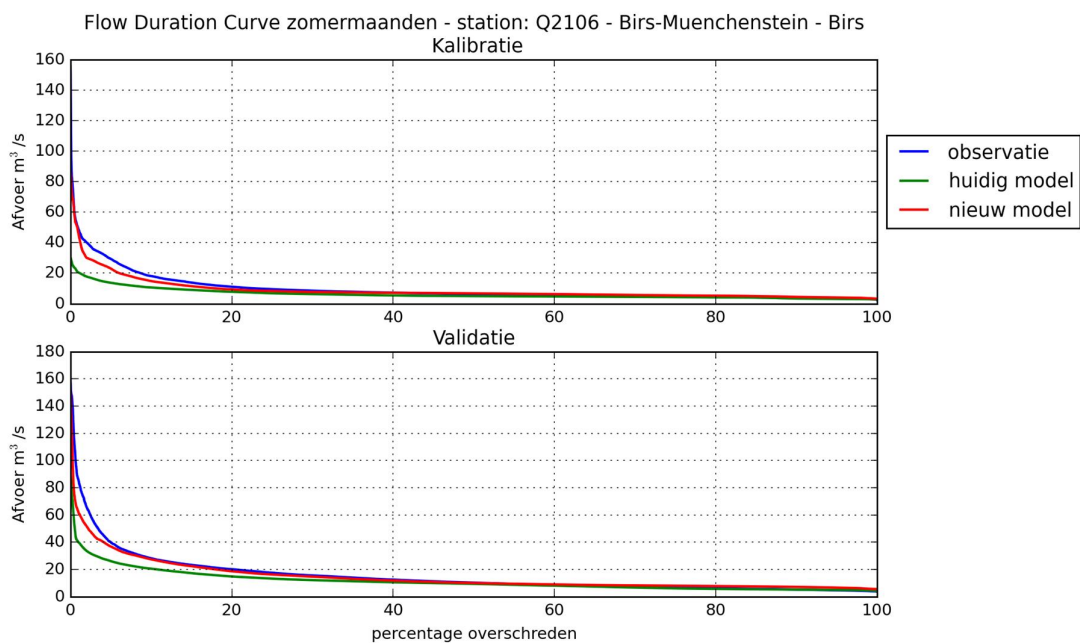
A.1.5 Aare-Untersiggenthal



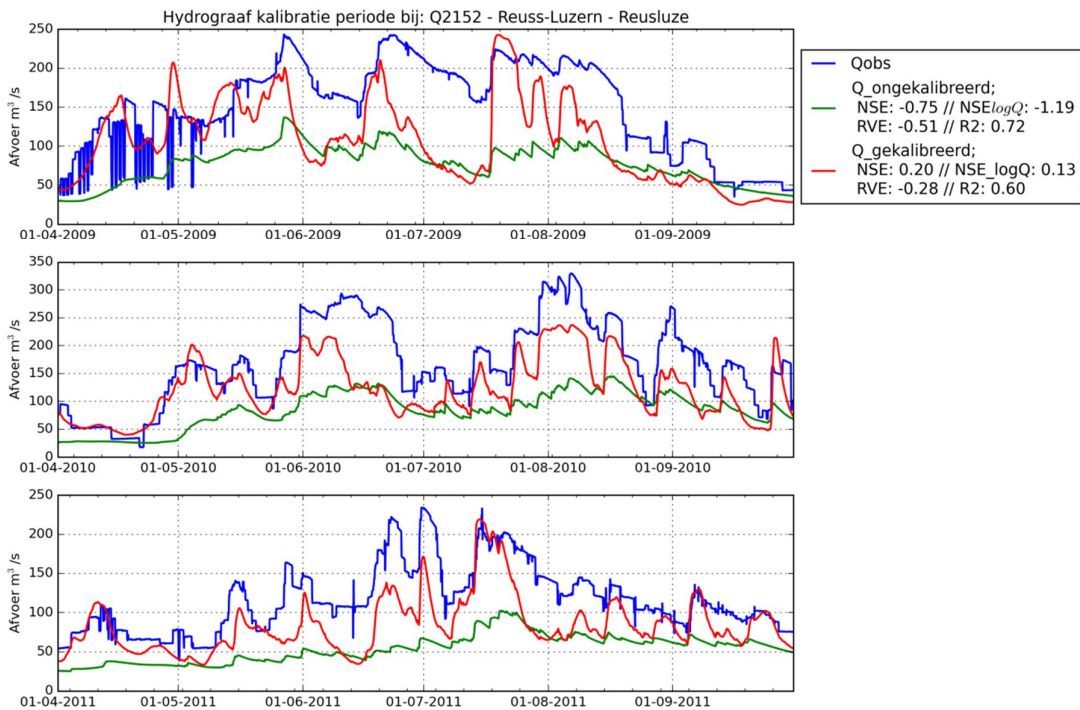


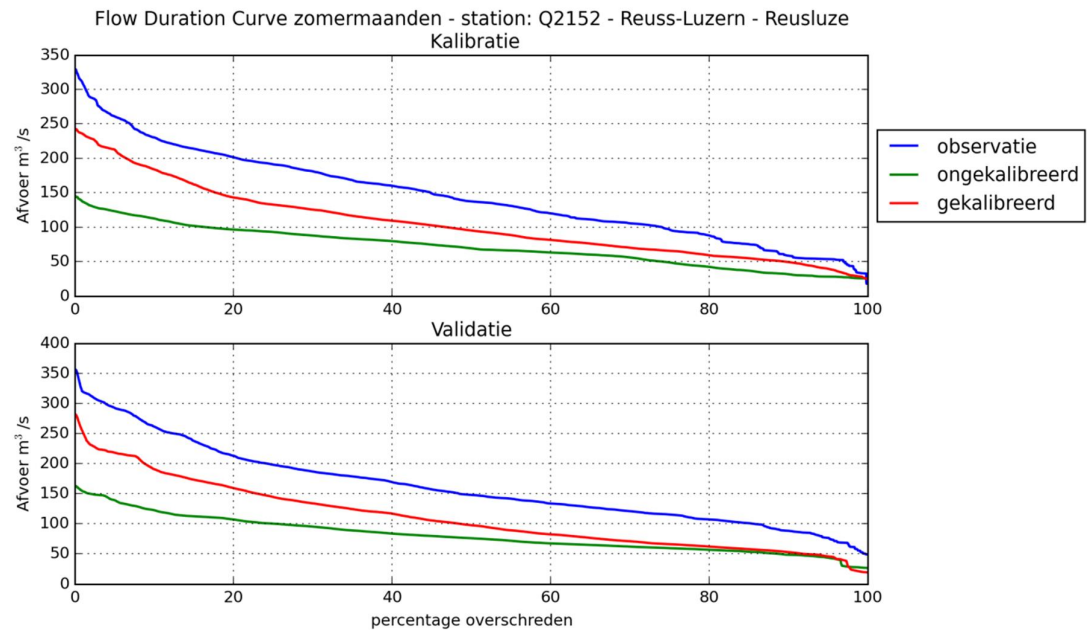
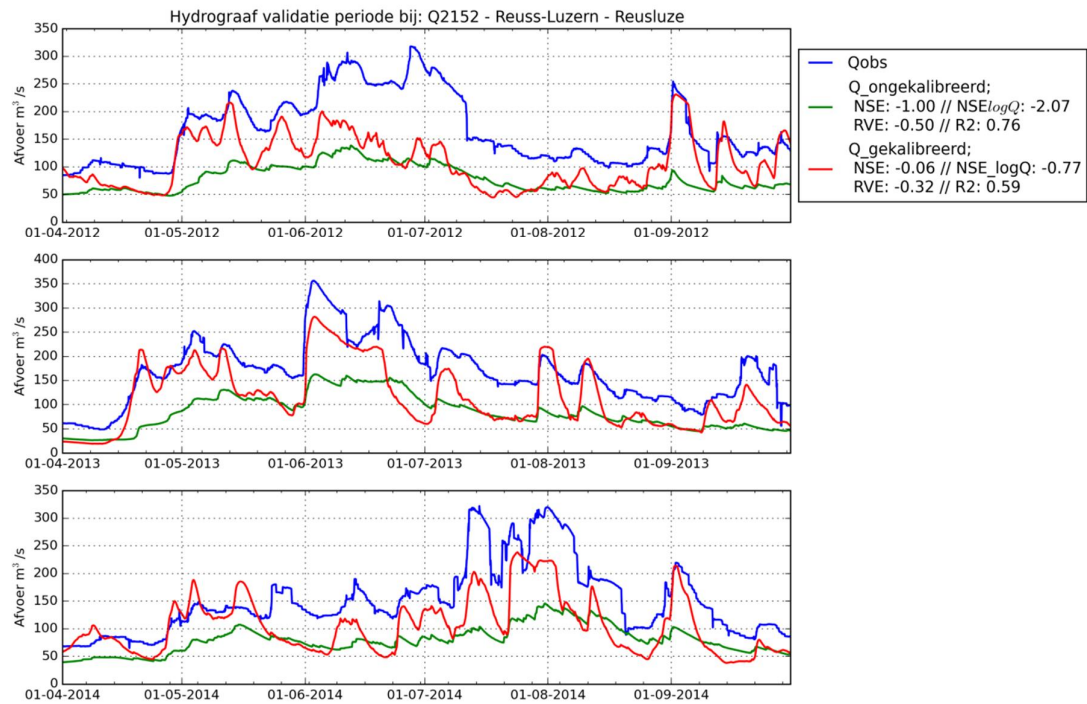
A.1.6 Birs-Münchenstein



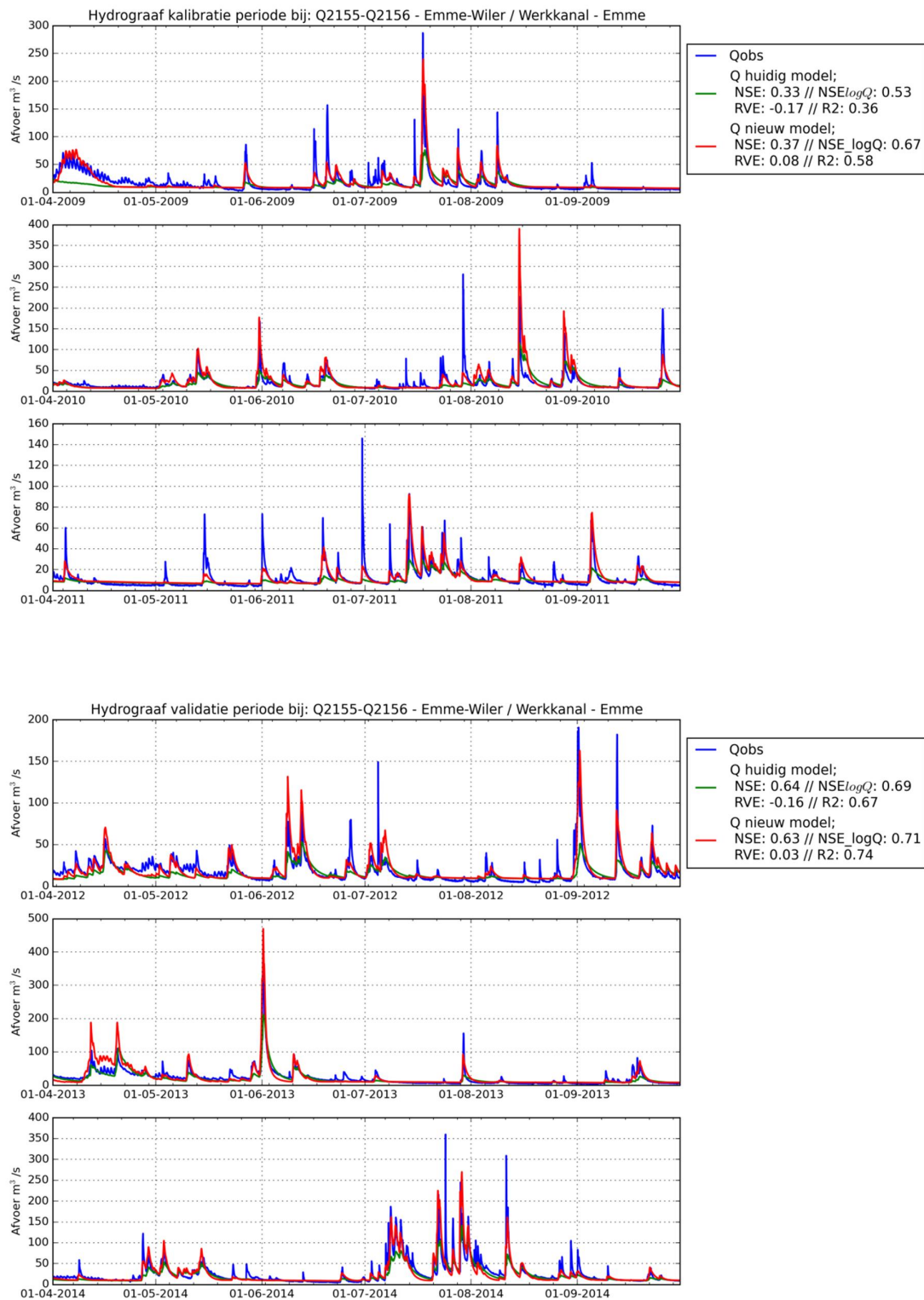


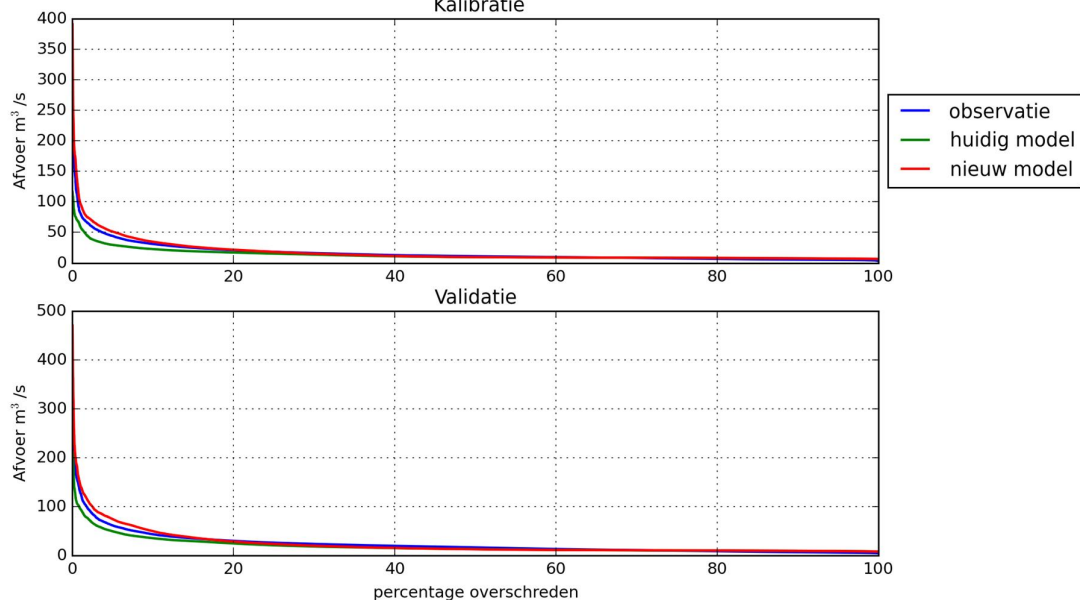
A.1.7 Reuss-Luzern



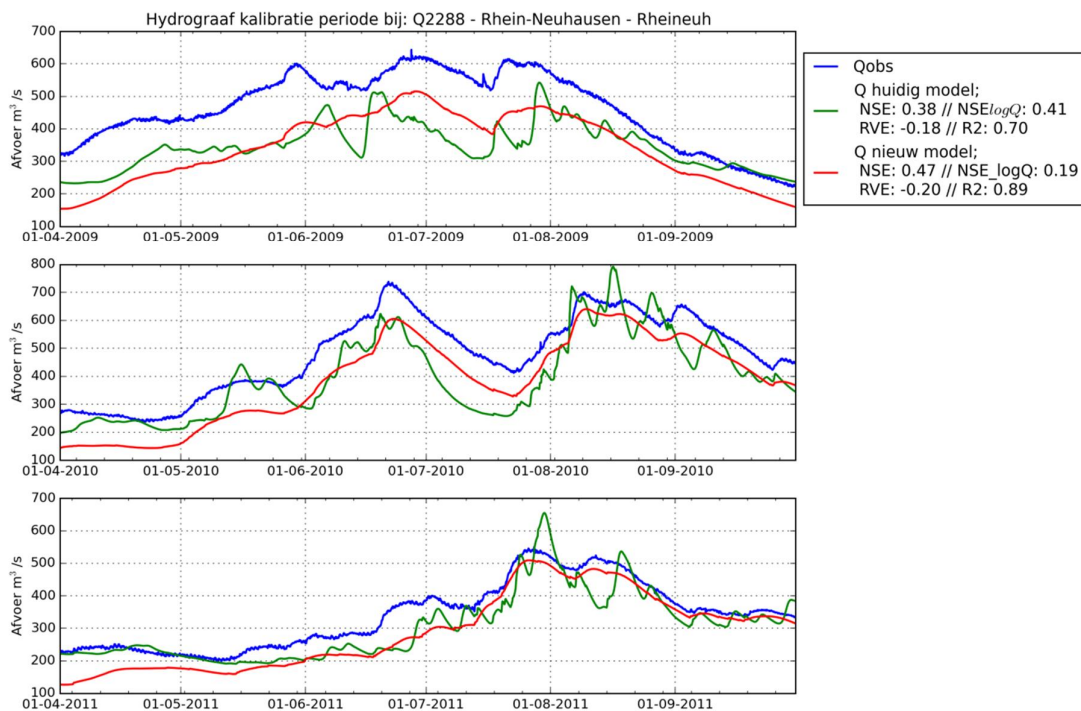


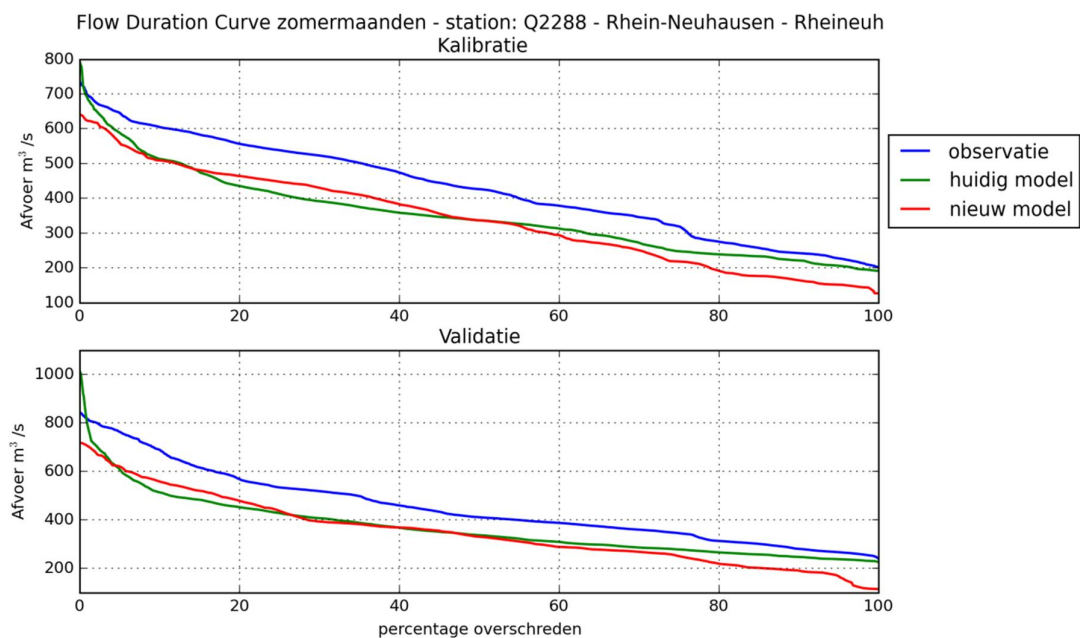
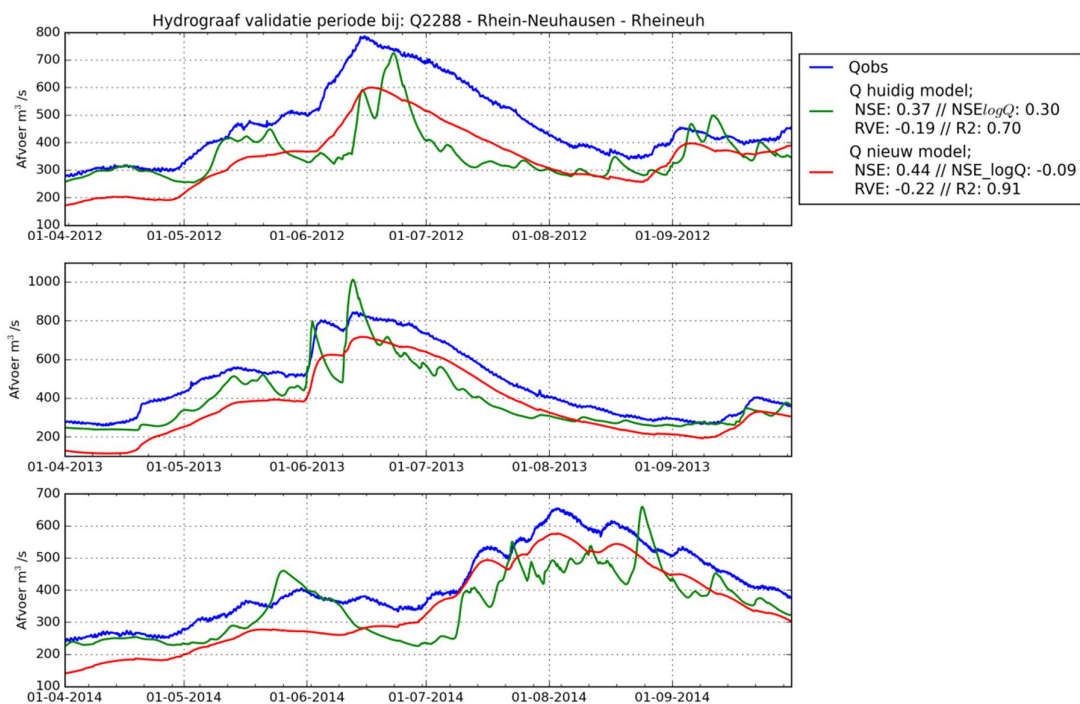
A.1.8 Emme-Wiler/ Werkkanal



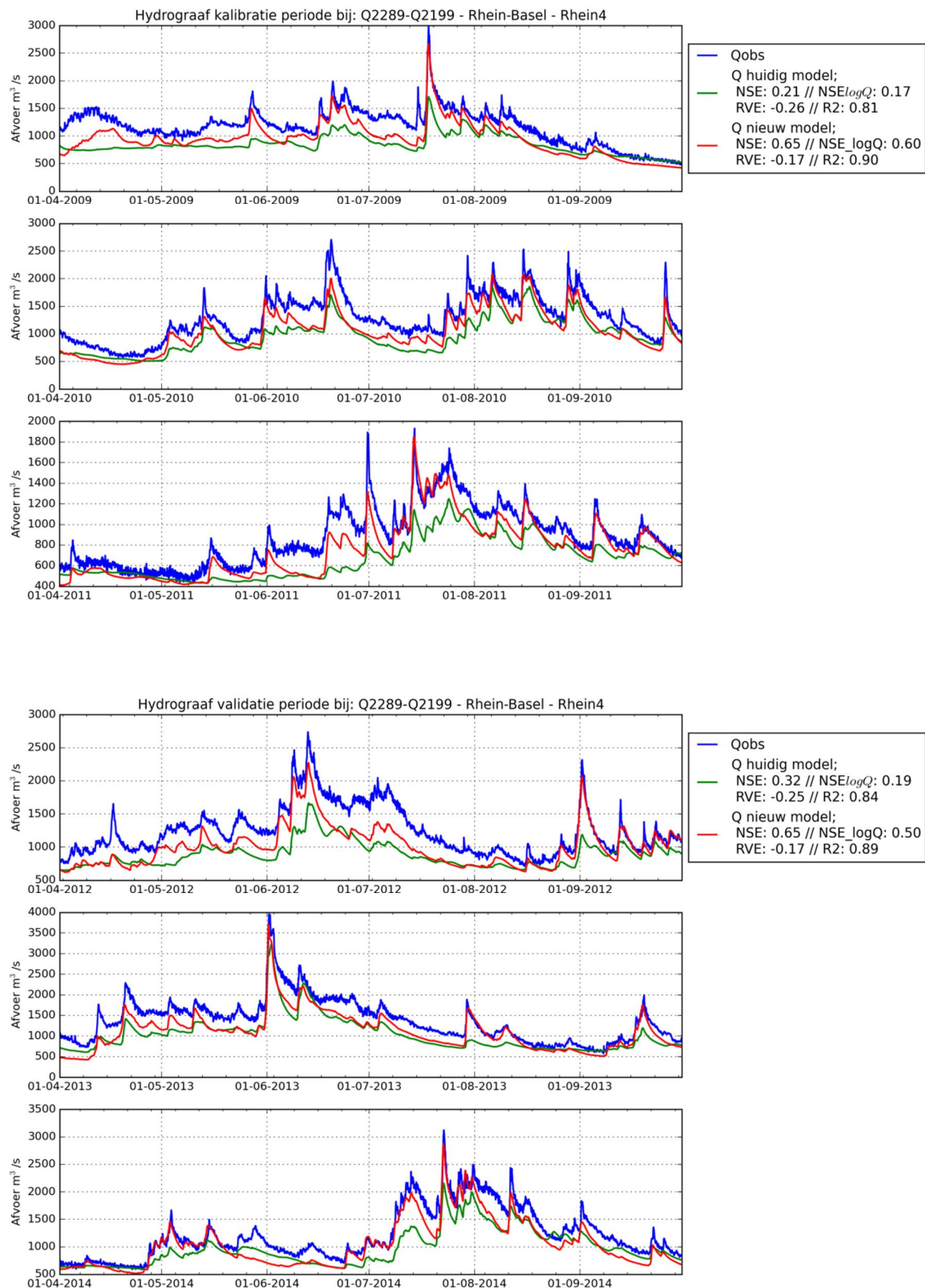
Flow Duration Curve zomermaanden - station: Q2155-Q2156 - Emme-Wiler / Werkkanal - Emme
Kalibratie

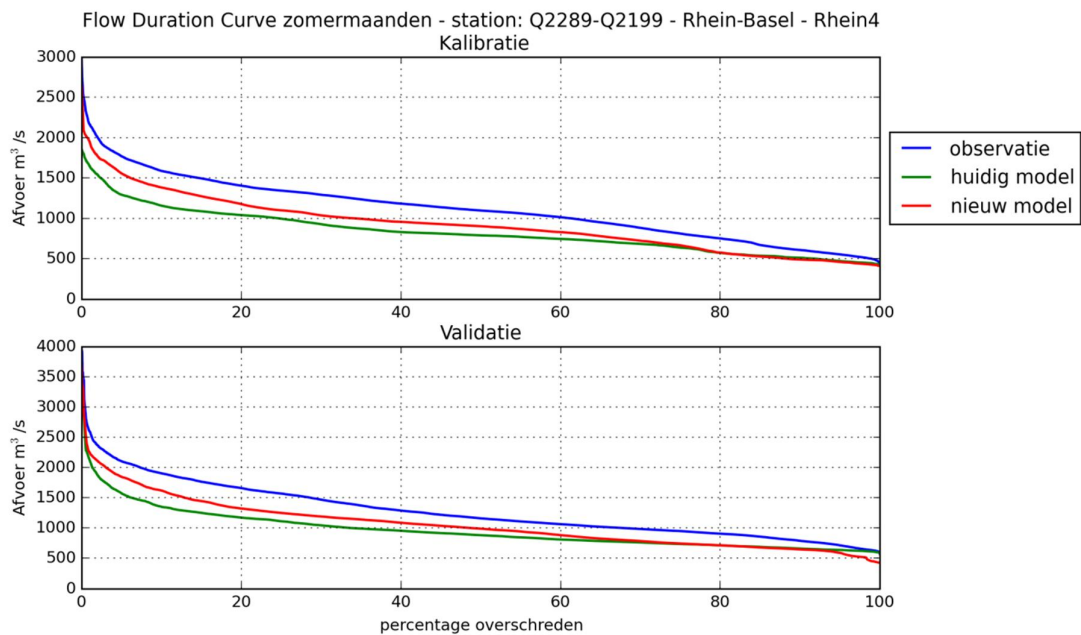
A.1.9 Rhein-Neuhausen



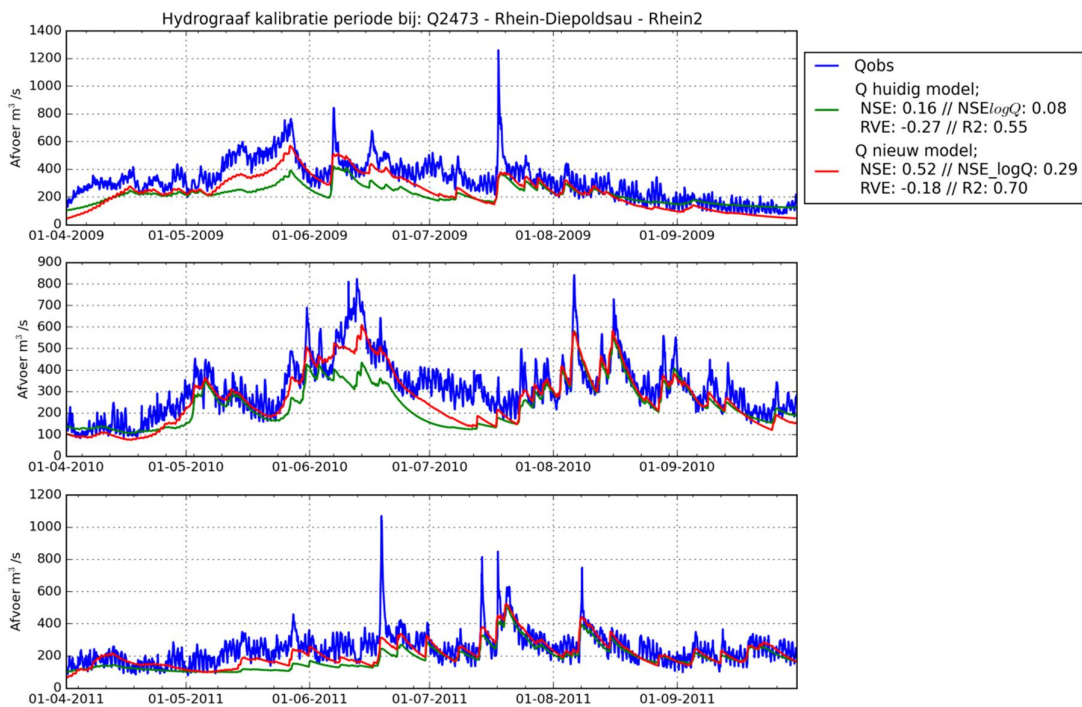


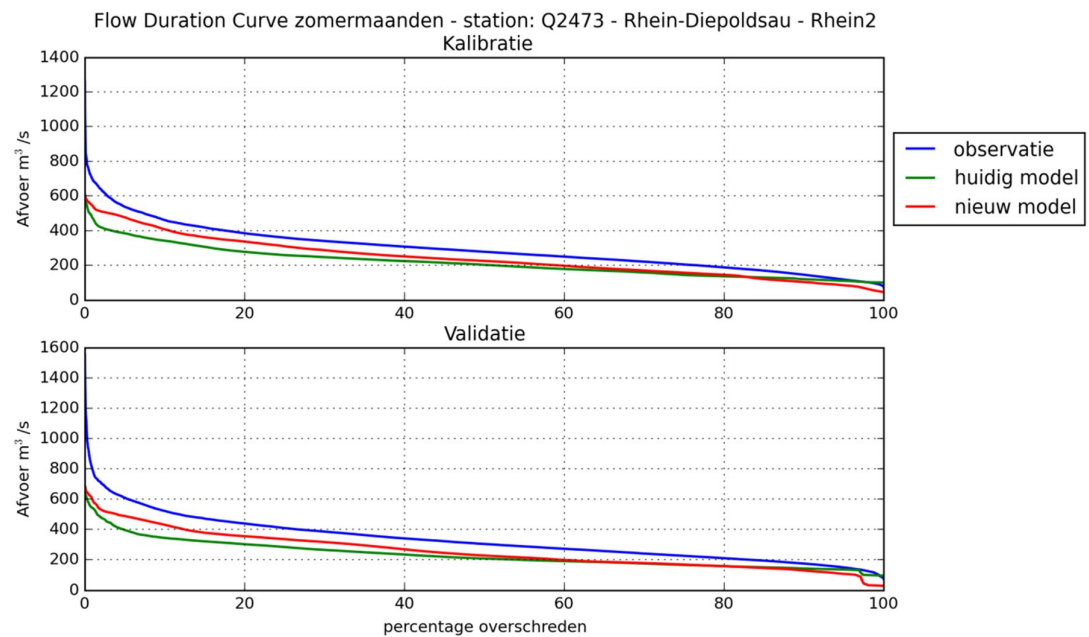
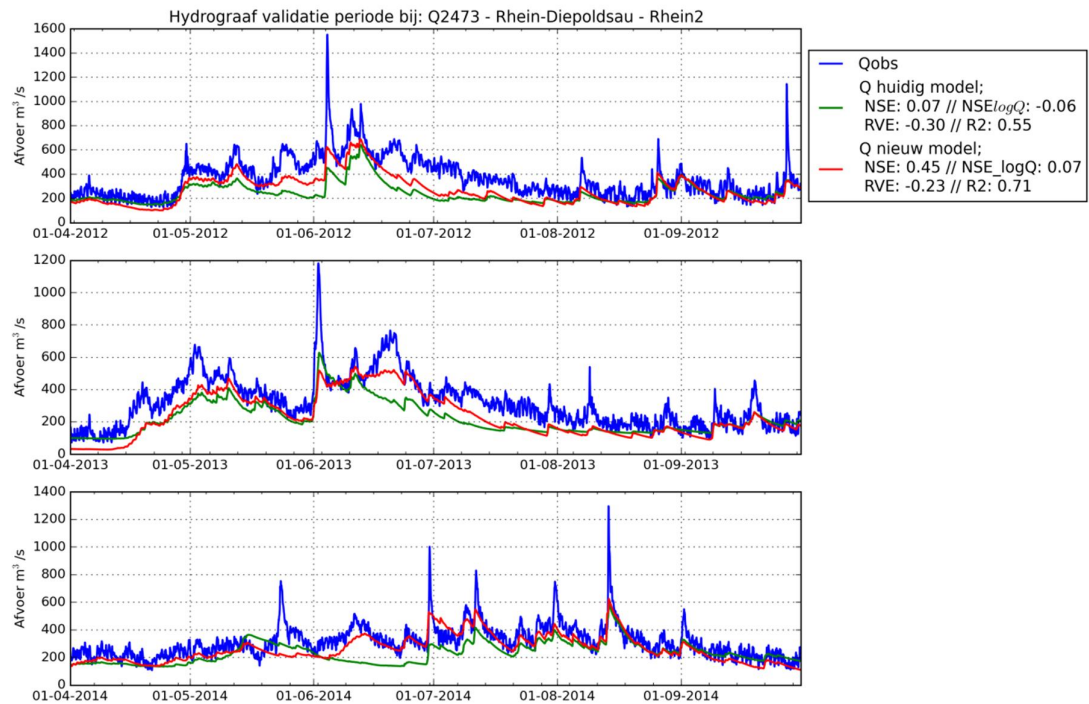
A.1.10 Rhein-Basel



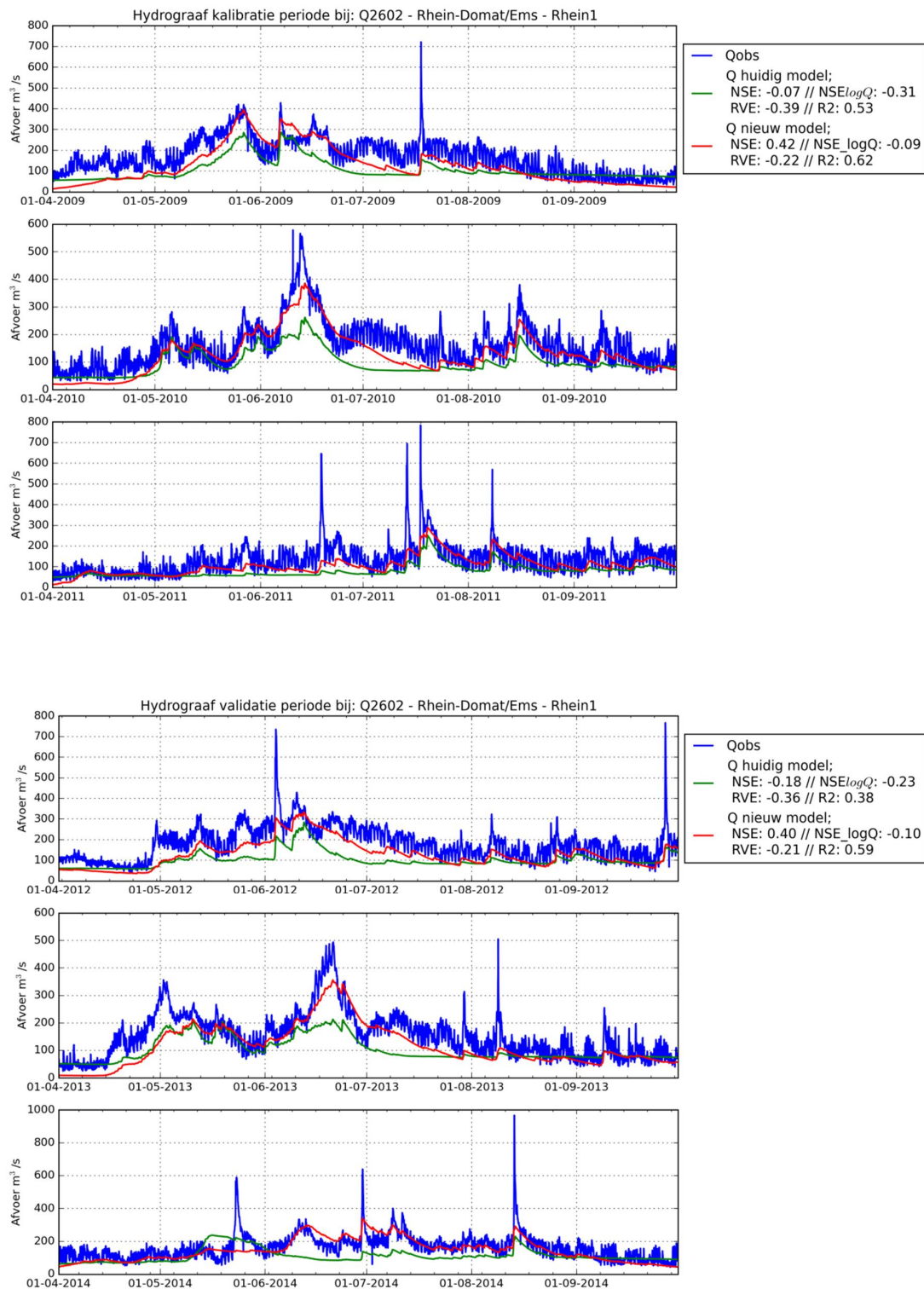


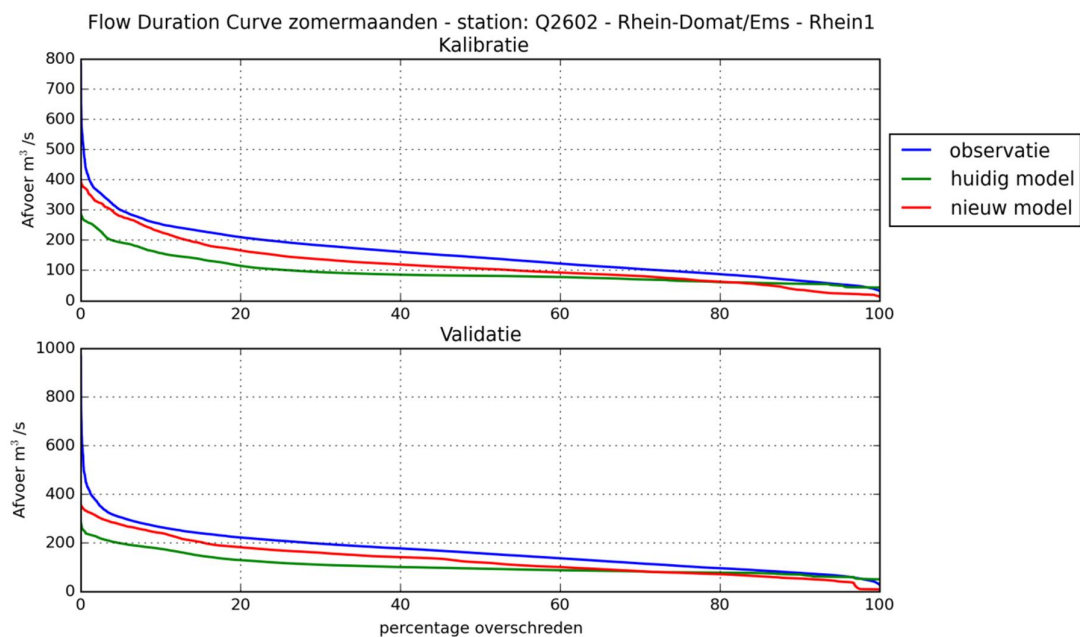
A.1.11 Rhein-Diepoldsau



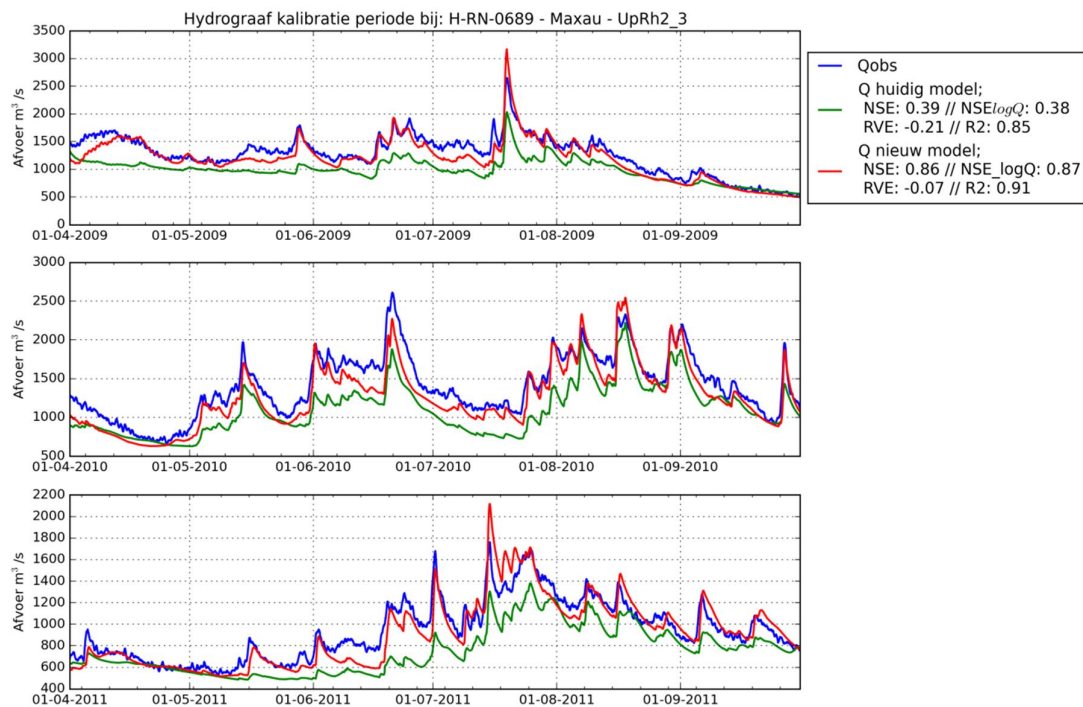


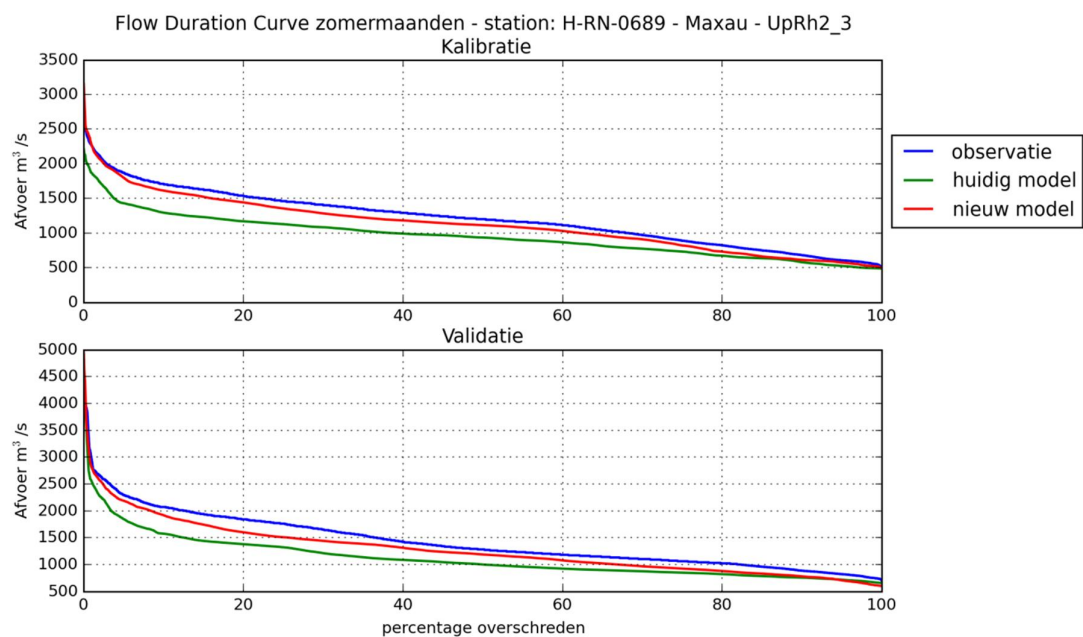
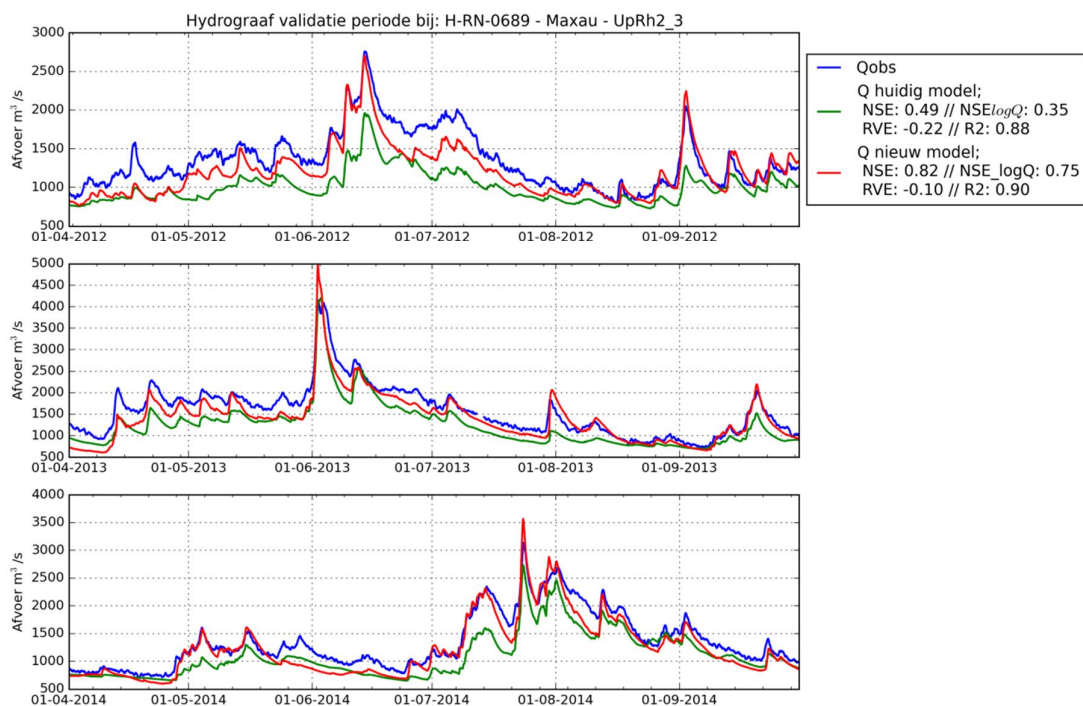
A.1.12 Rhein-Domat/ Ems





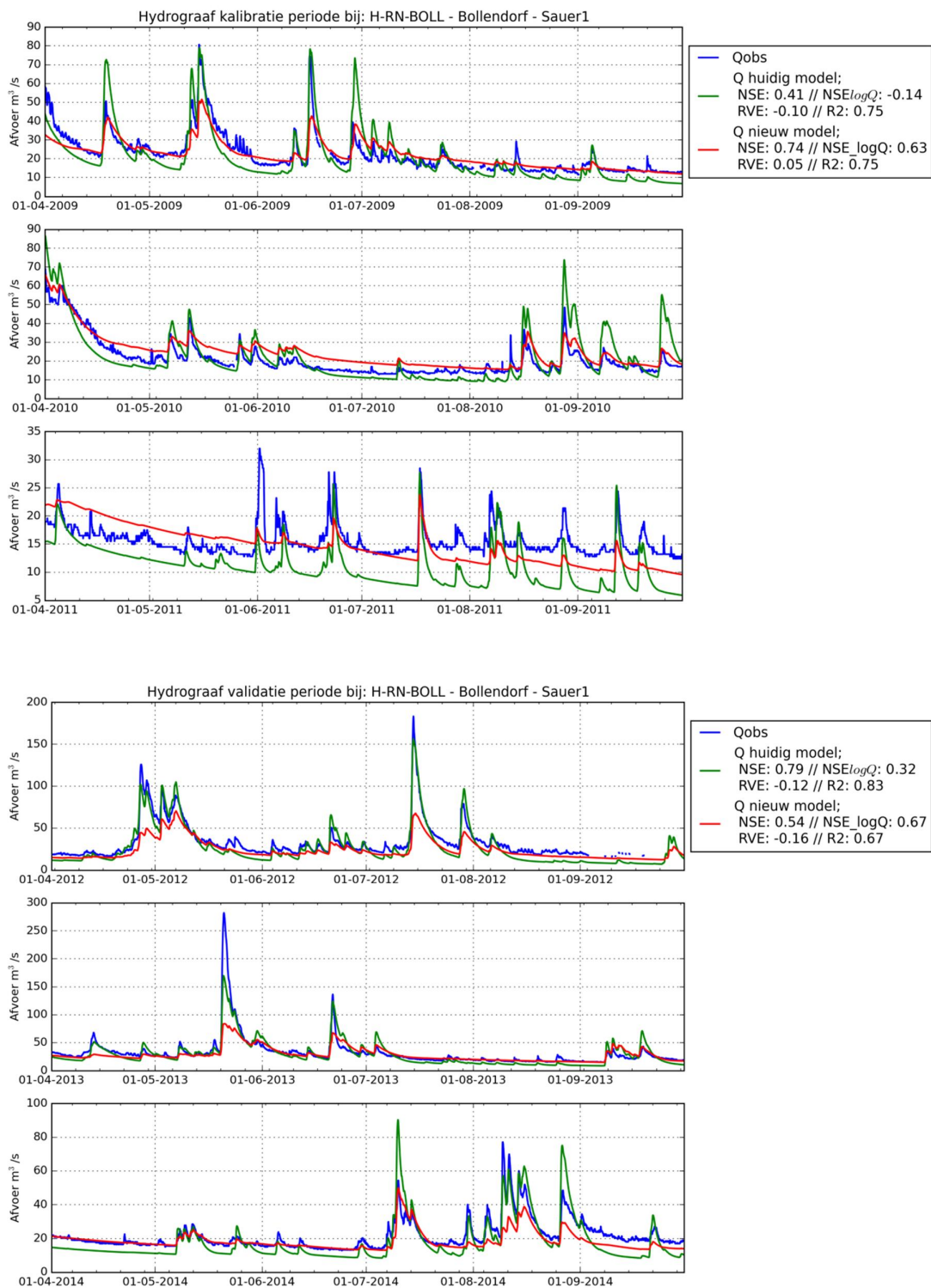
A.1.13 Maxau

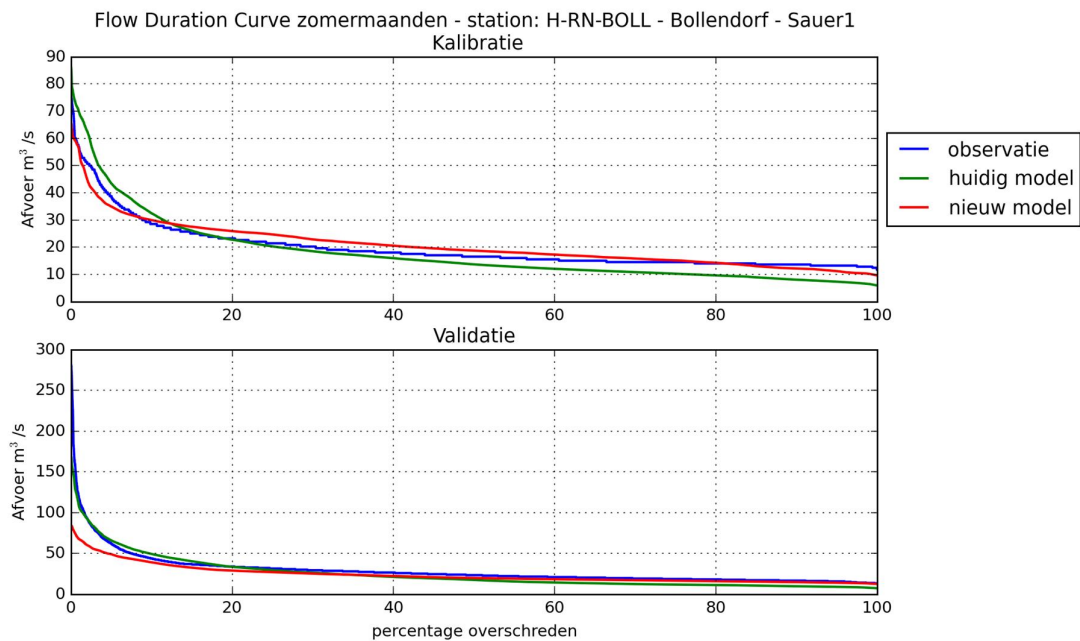




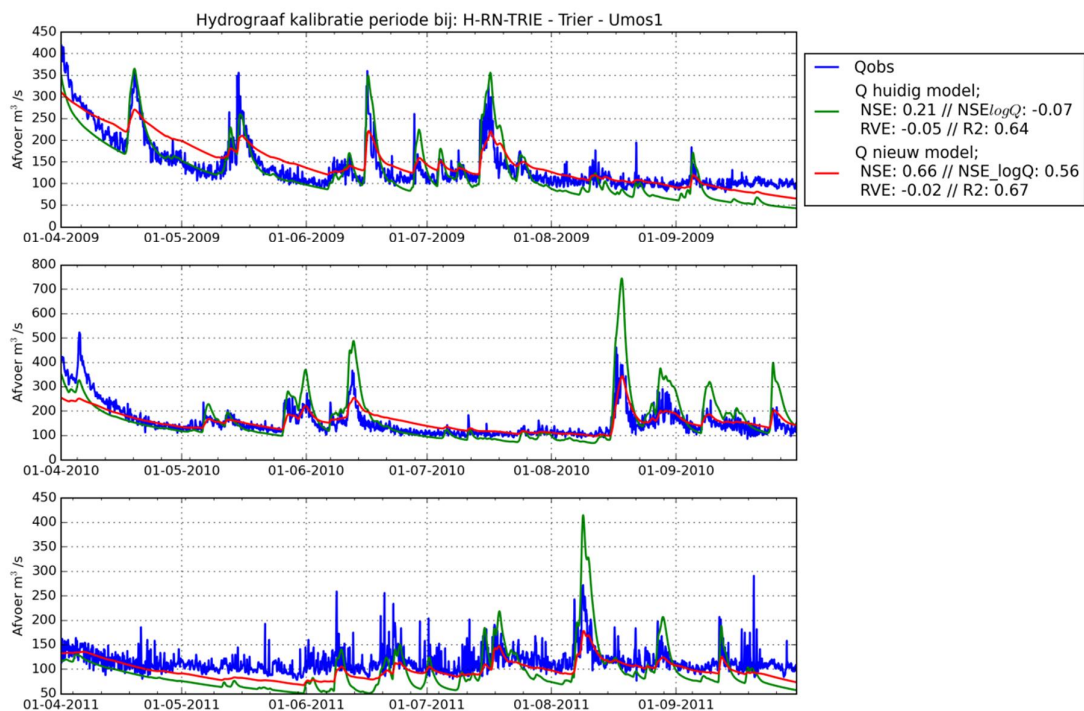
A.2 Moezel

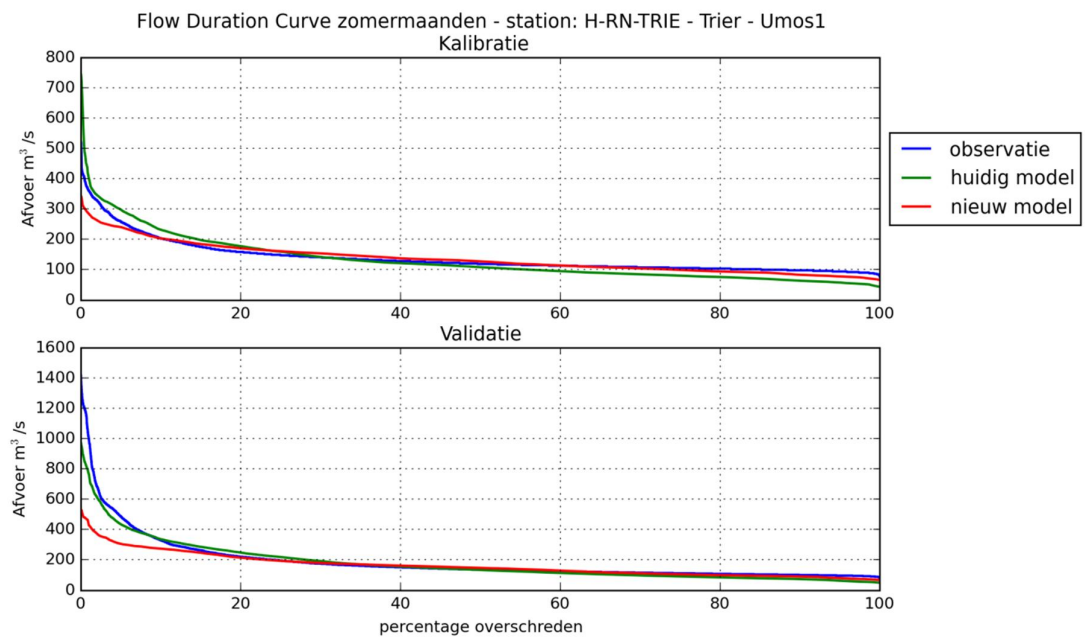
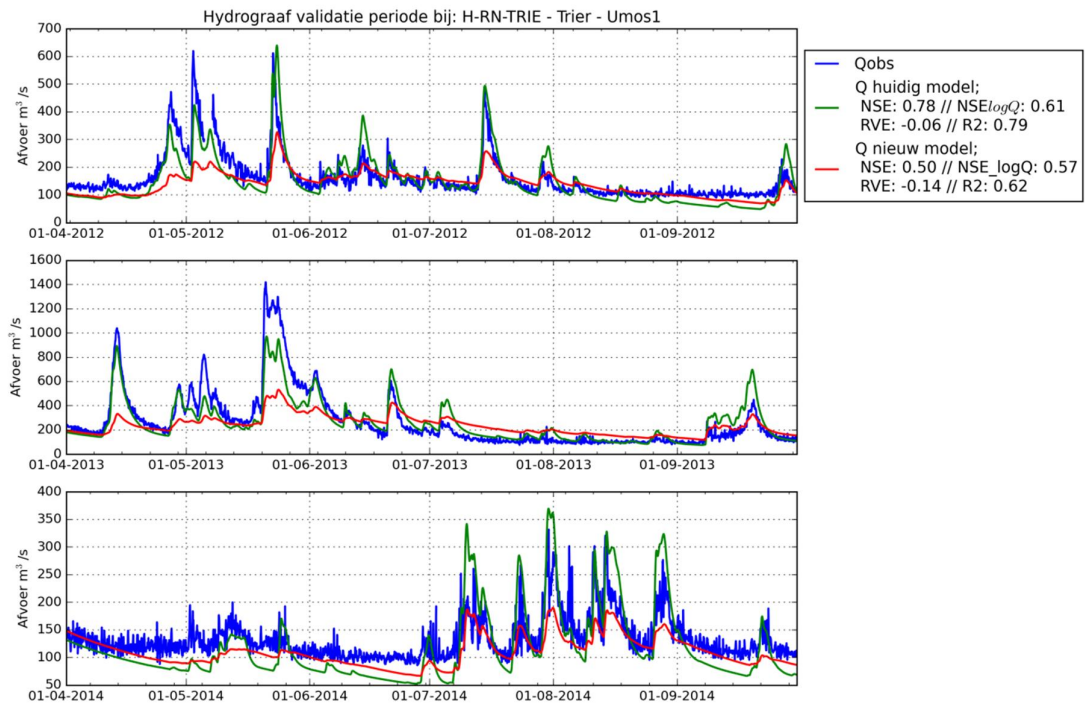
A.2.1 Bollendorf



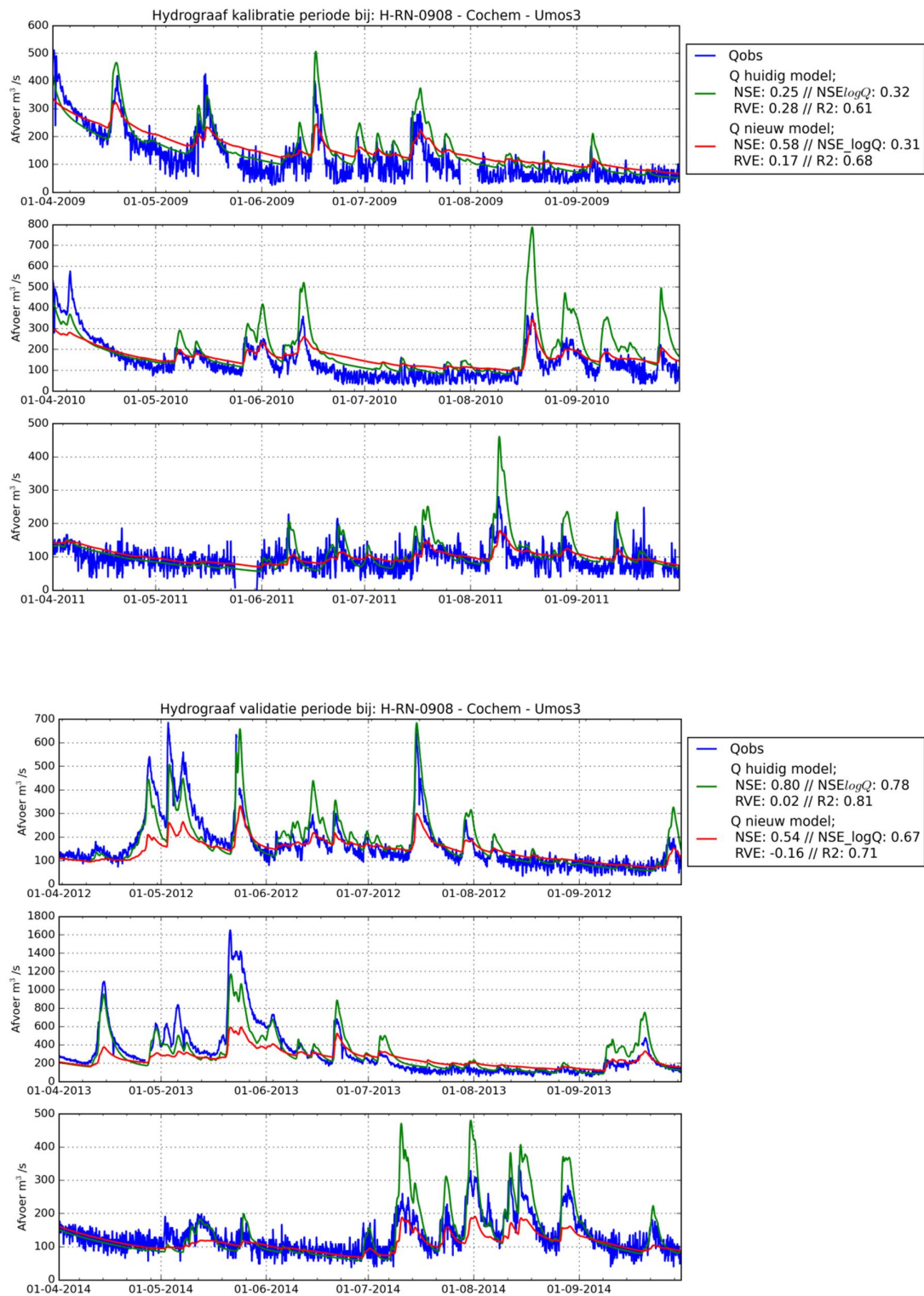


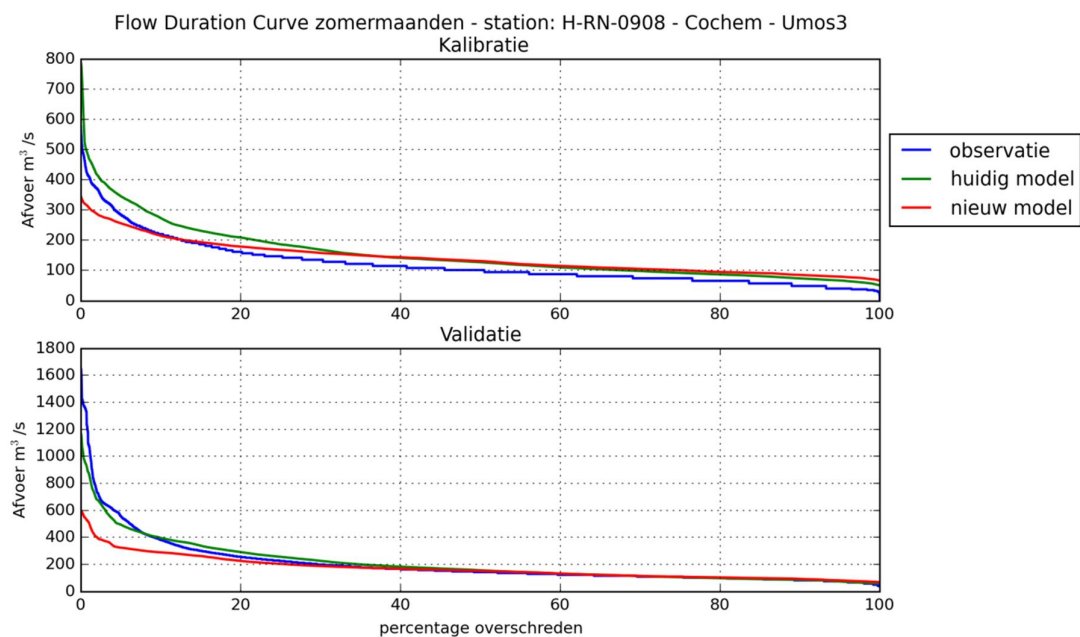
A.2.2 Trier





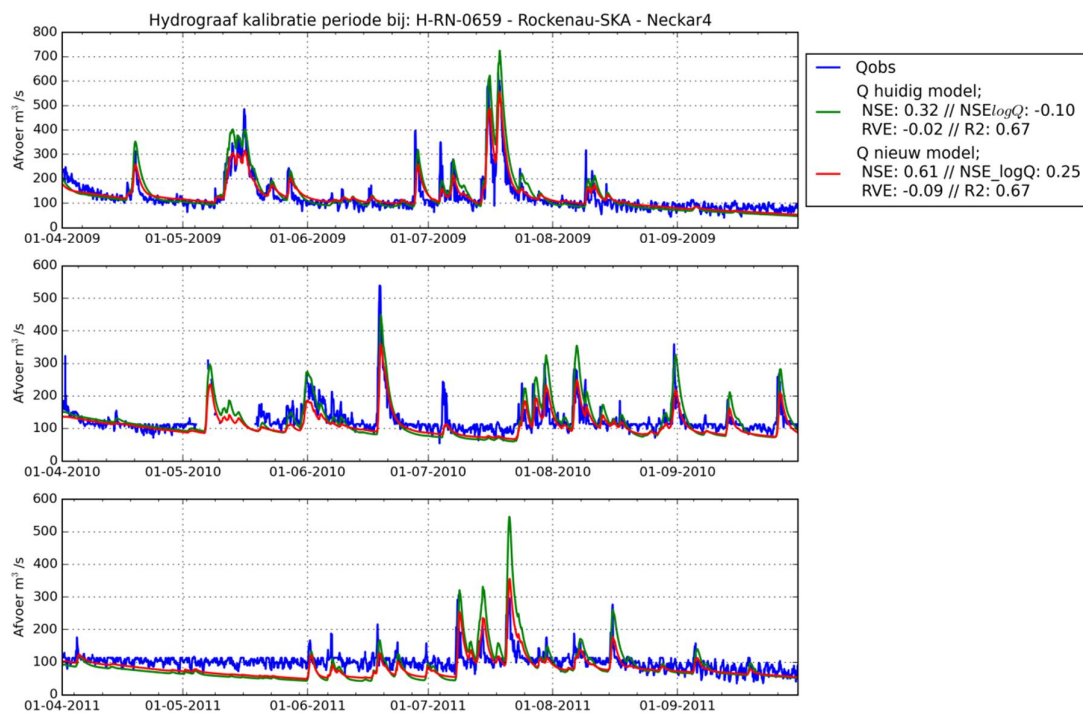
A.2.3 Cochem

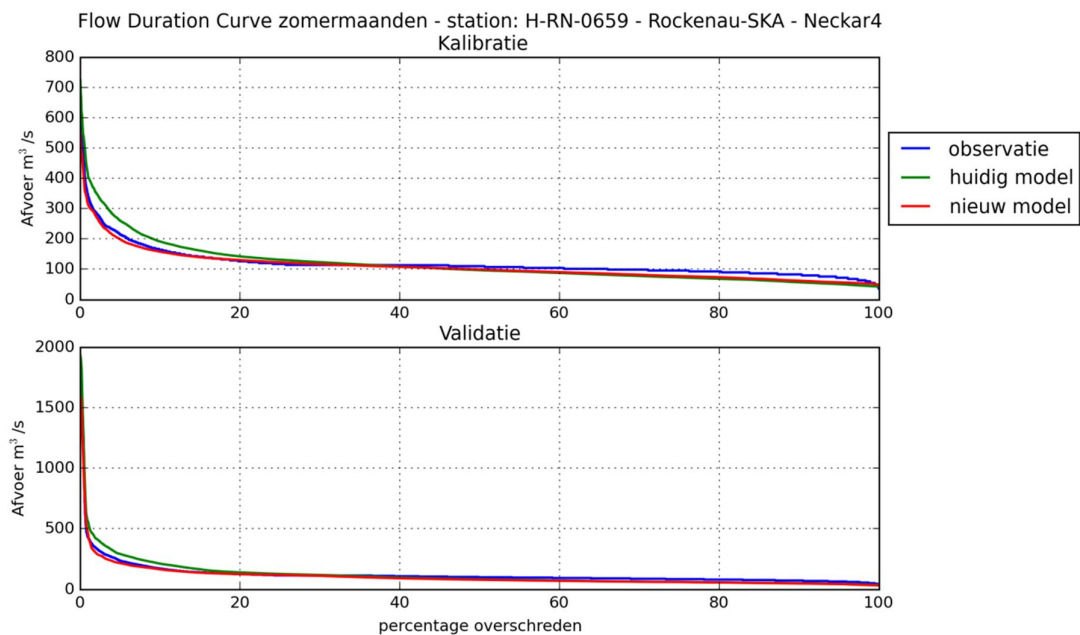
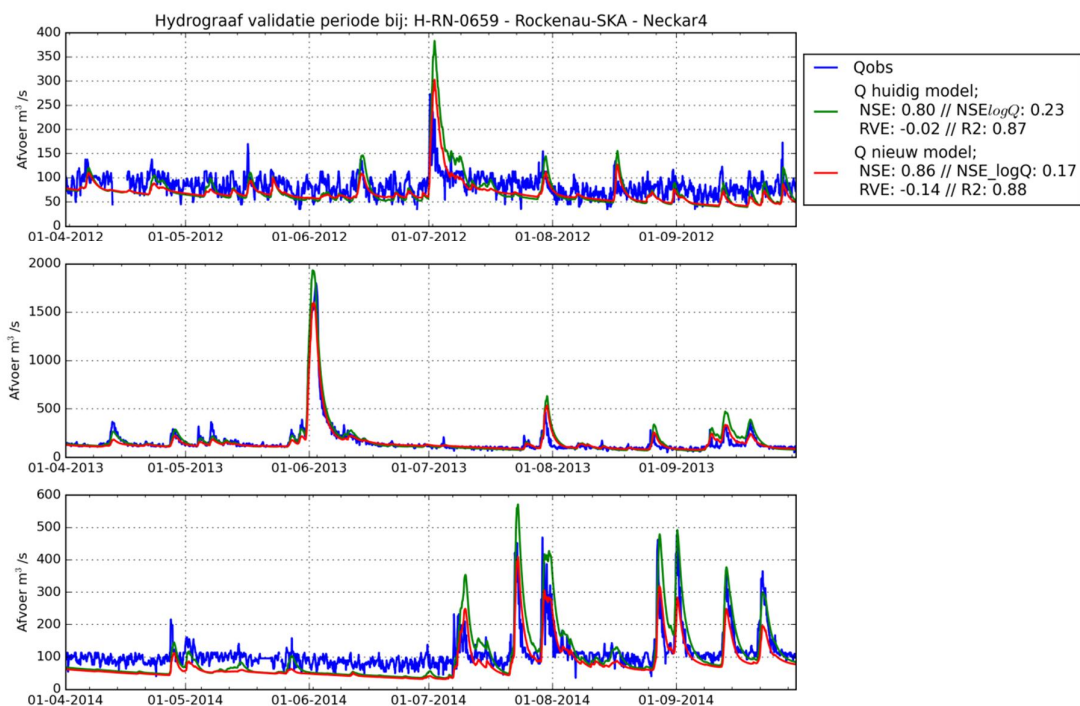




A.3 Neckar

A.3.1 Rockenau-SKA

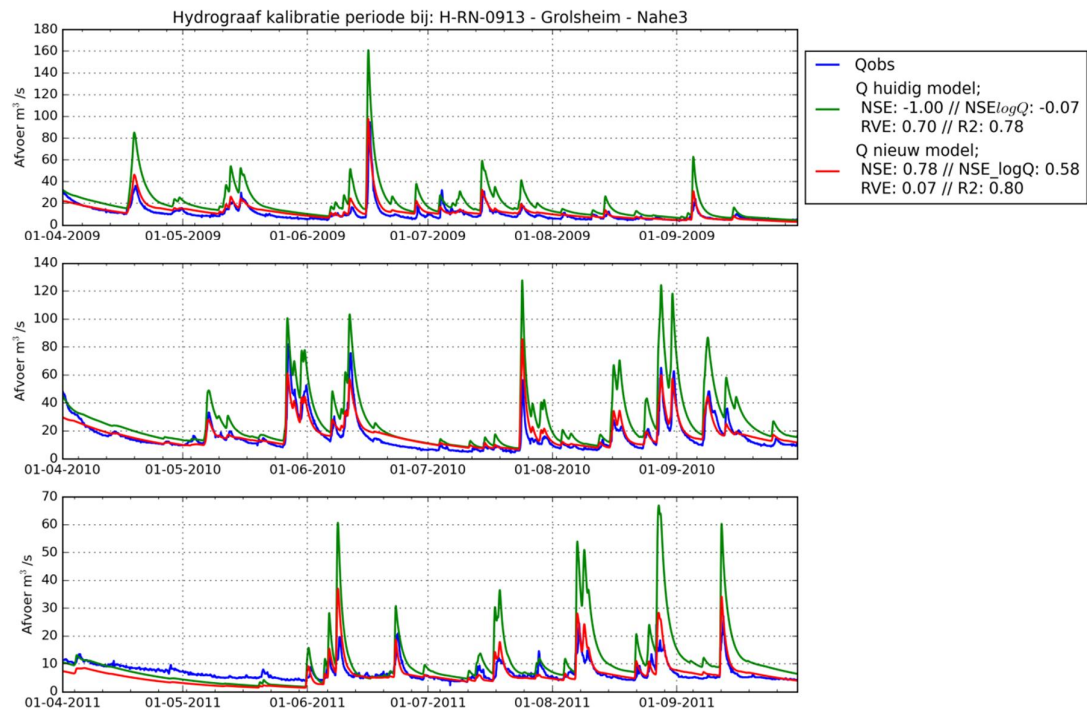


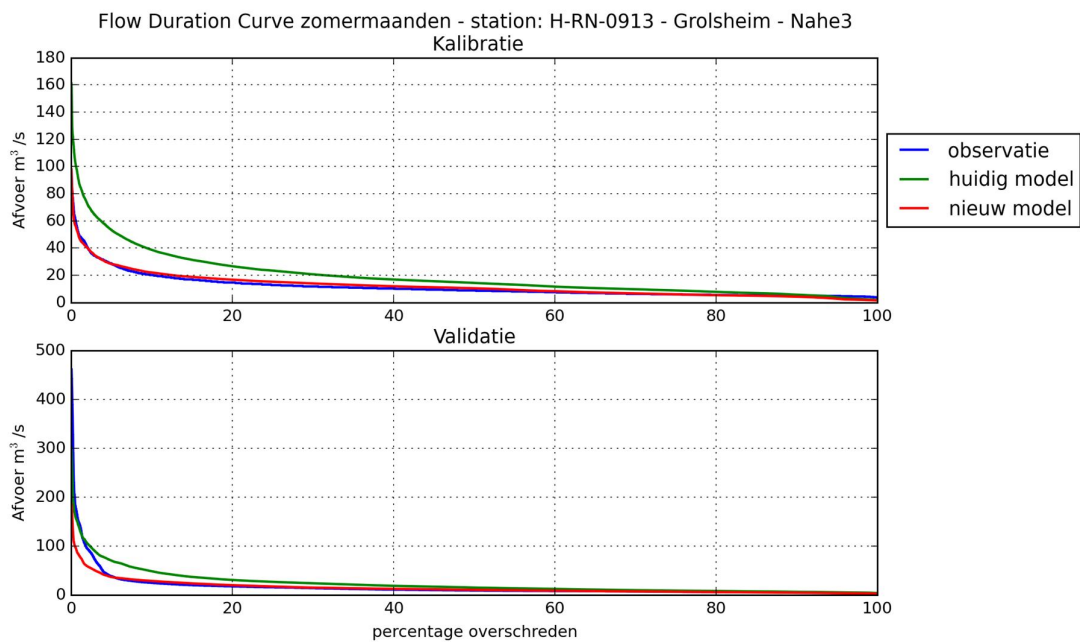
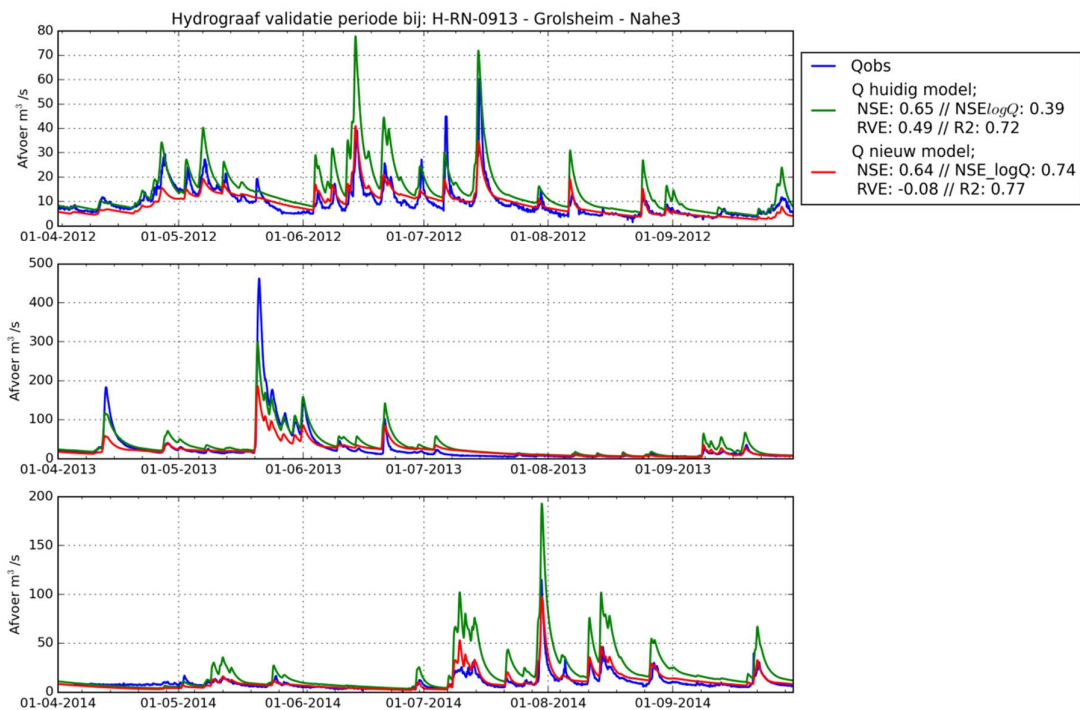


A.4 Kleine Duitse stroomgebieden

A.4.1 Nahe

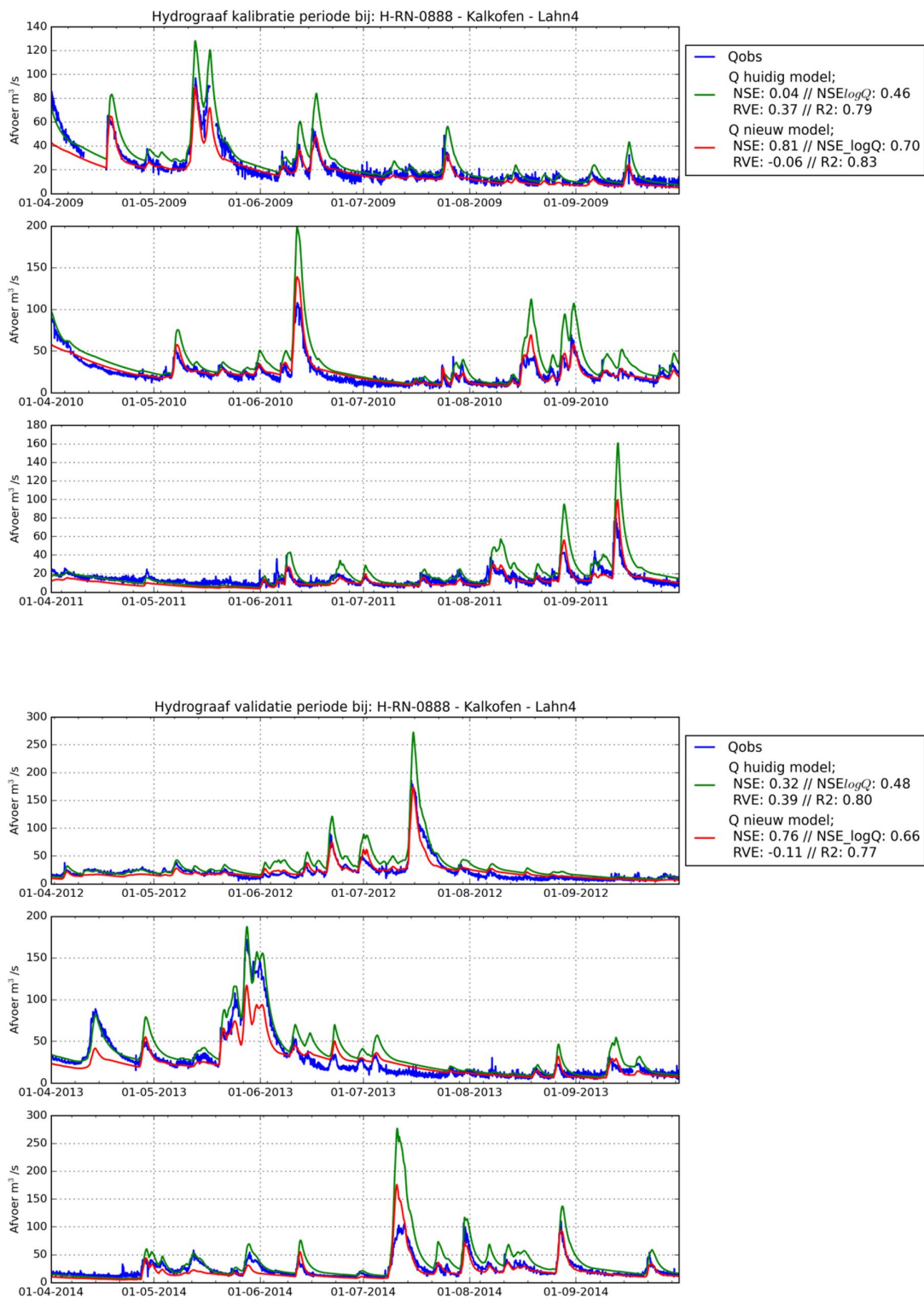
A.4.1.1 Grolsheim

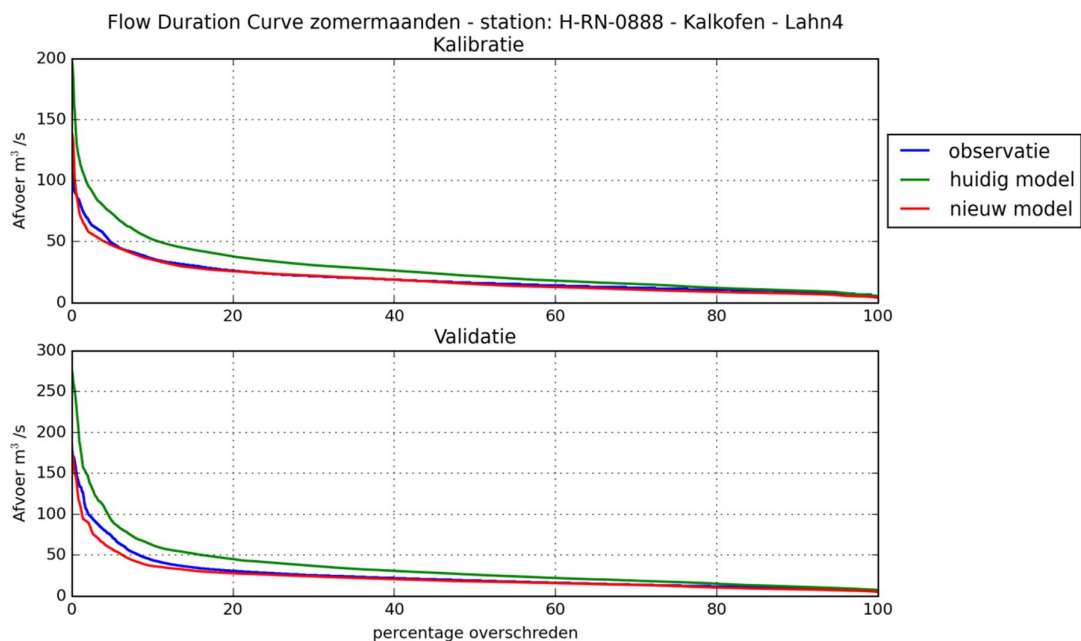




A.4.2 Lahn

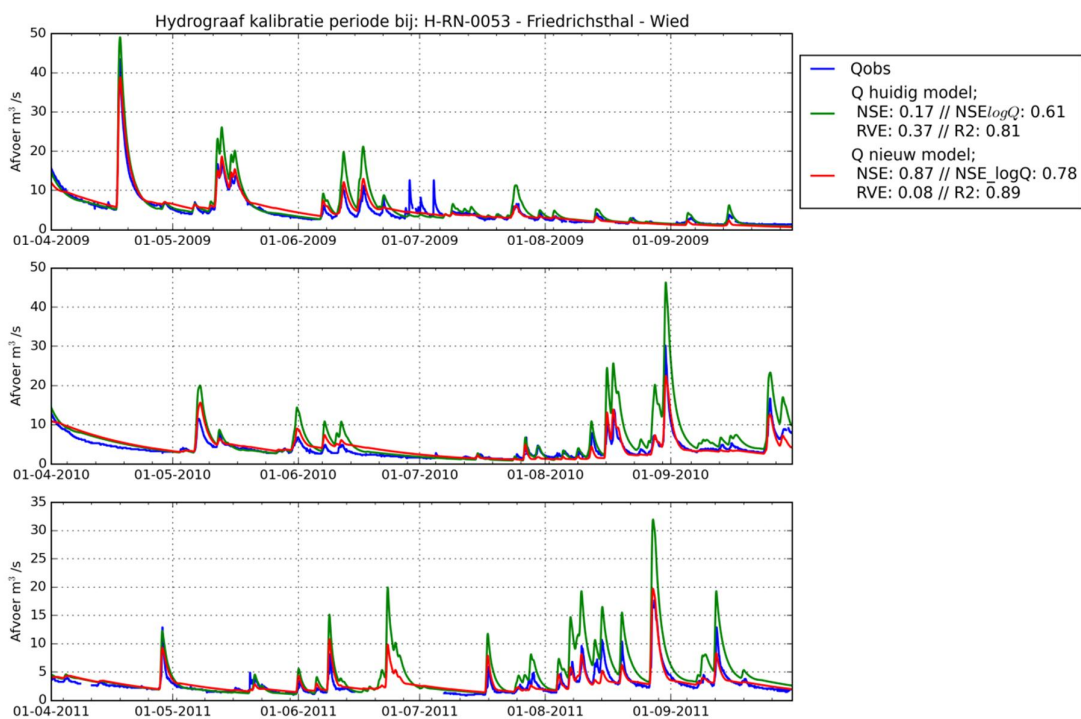
A.4.2.1 Kalkofen

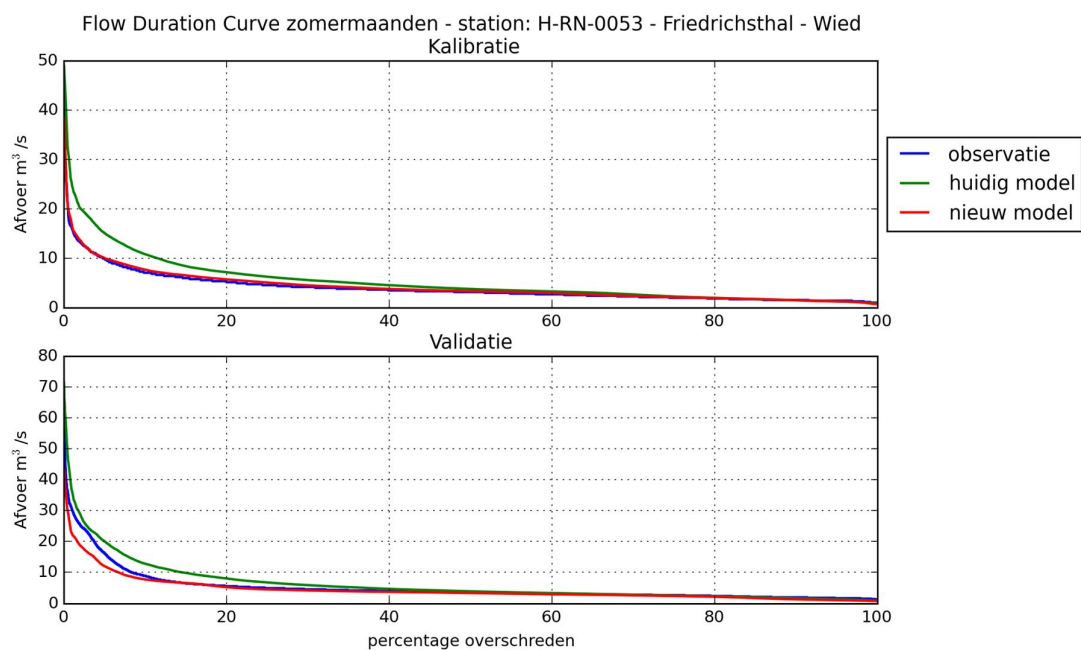
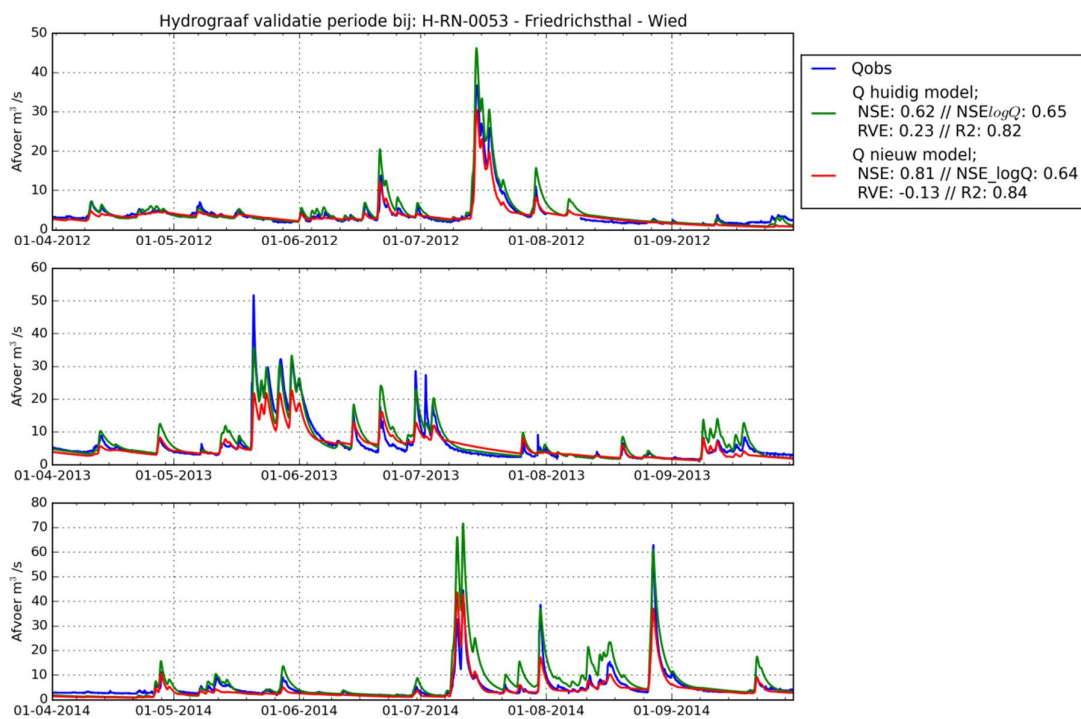




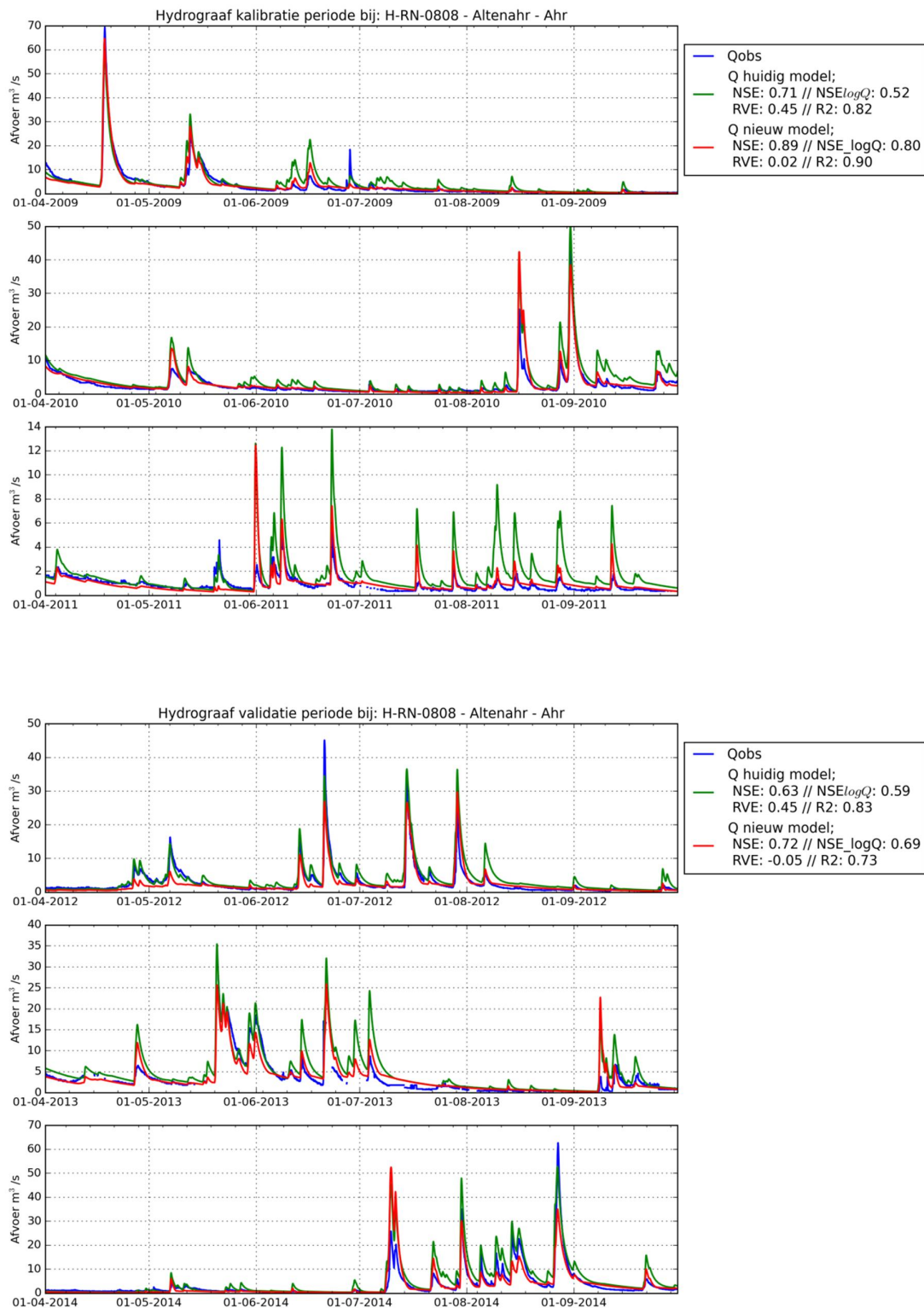
A.4.3 Midden-Rijn

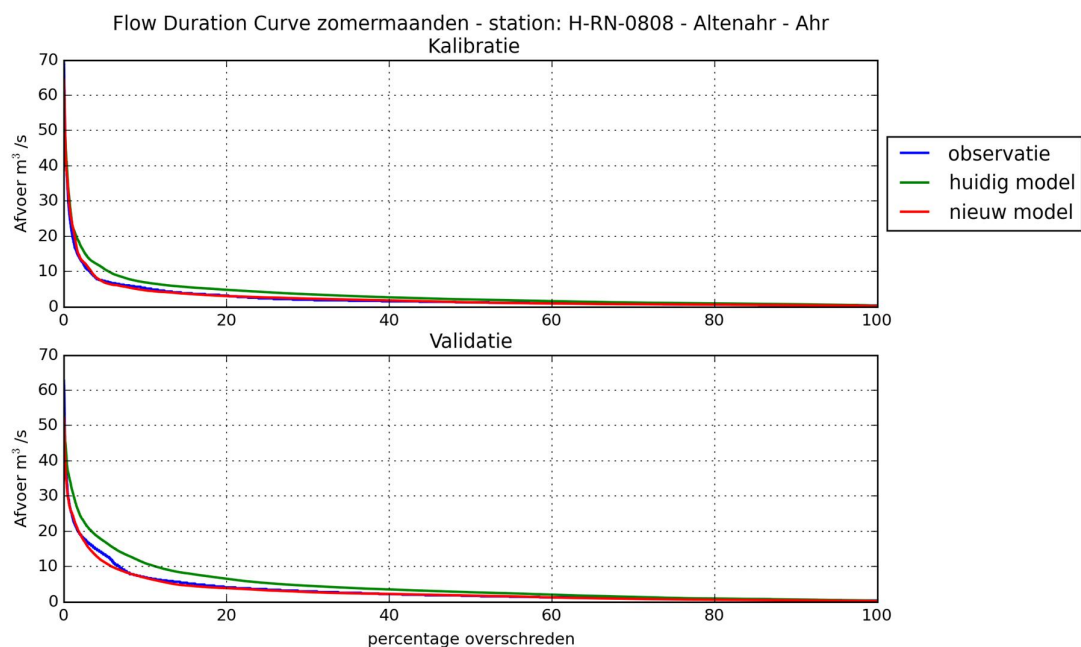
A.4.3.1 Friedrichstal





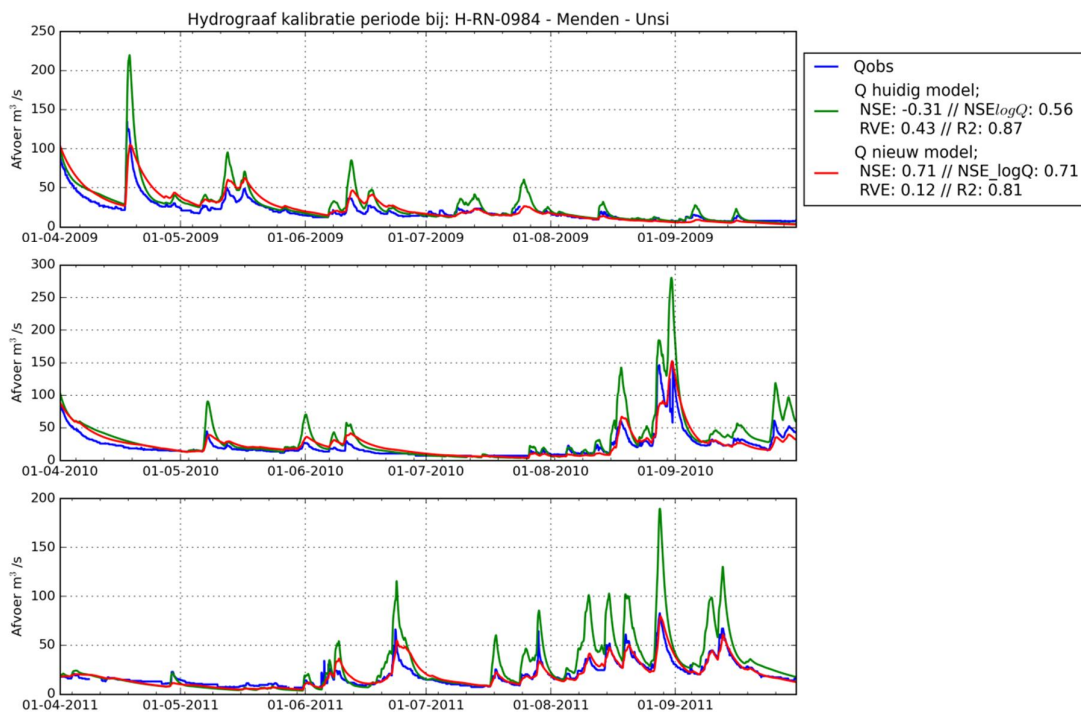
A.4.3.2 Altenahr

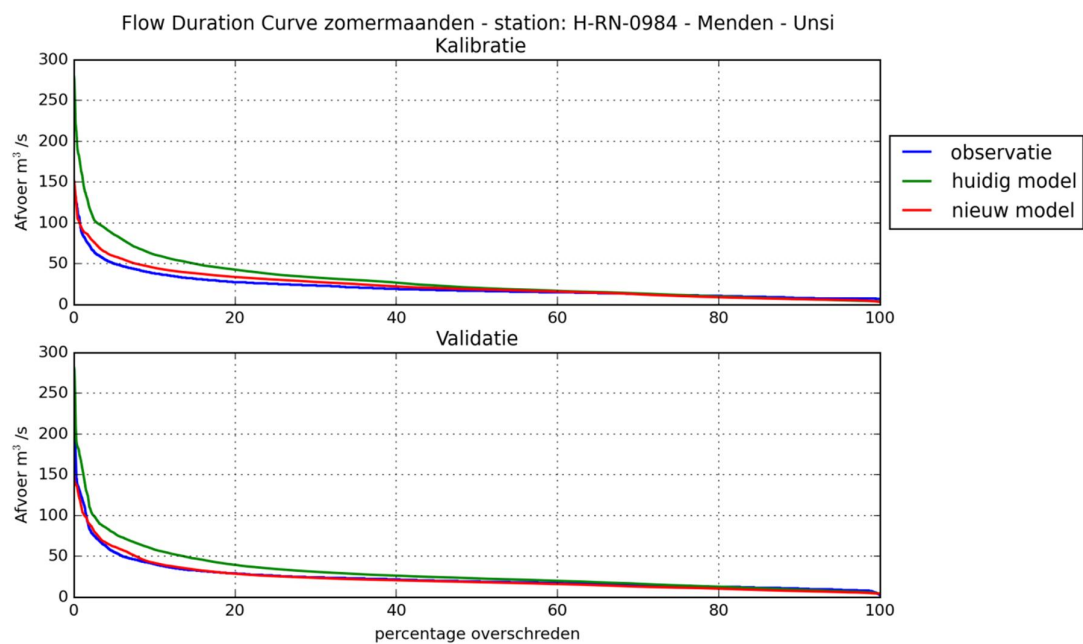
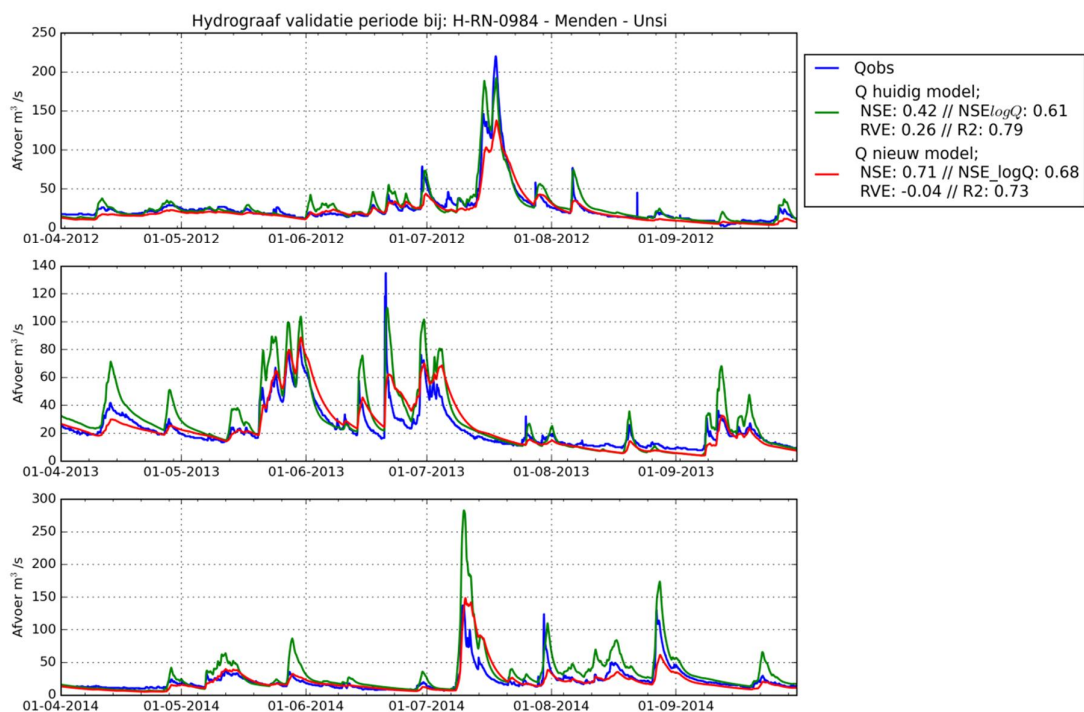




A.4.4 Sieg

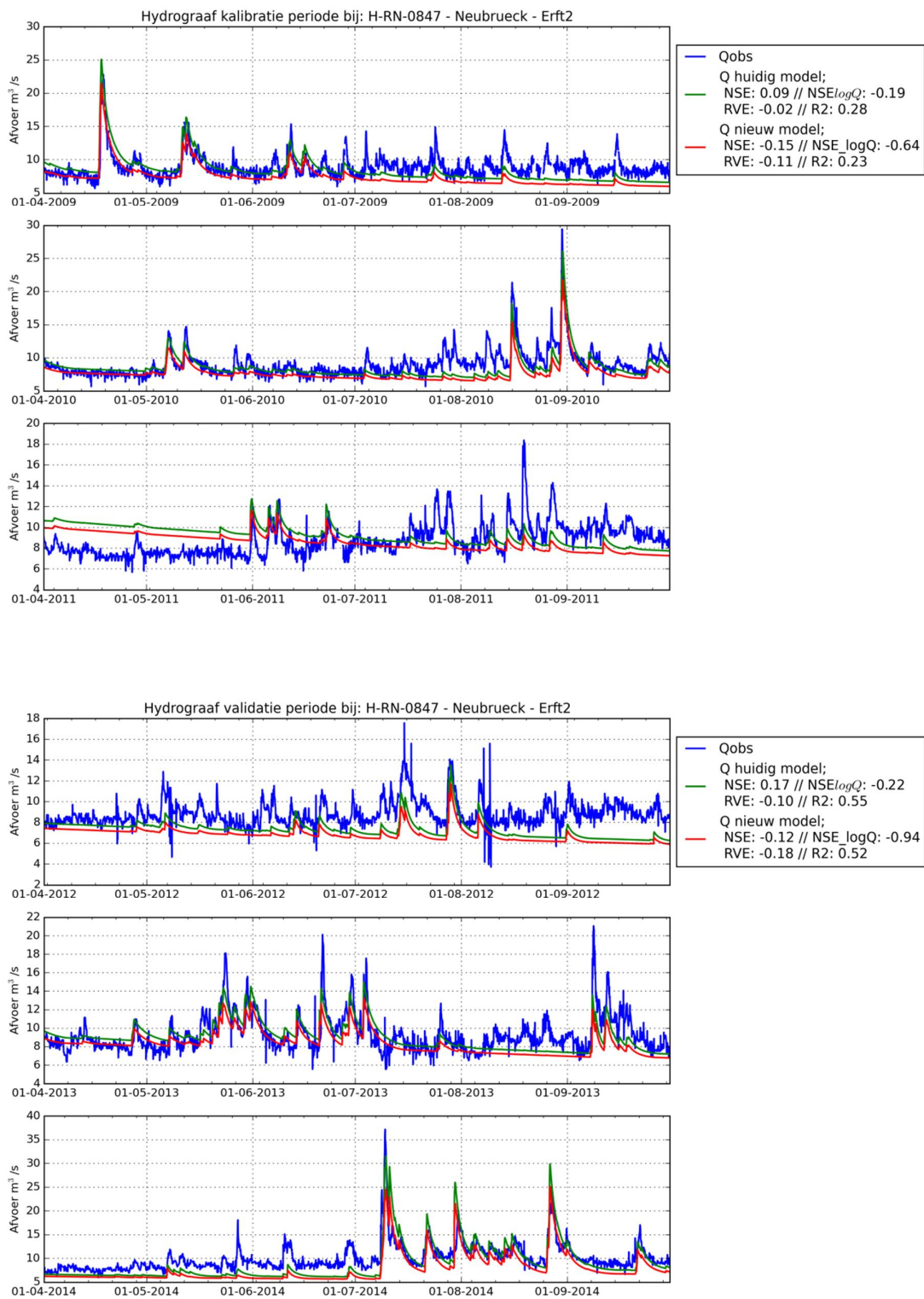
A.4.4.1 Menden

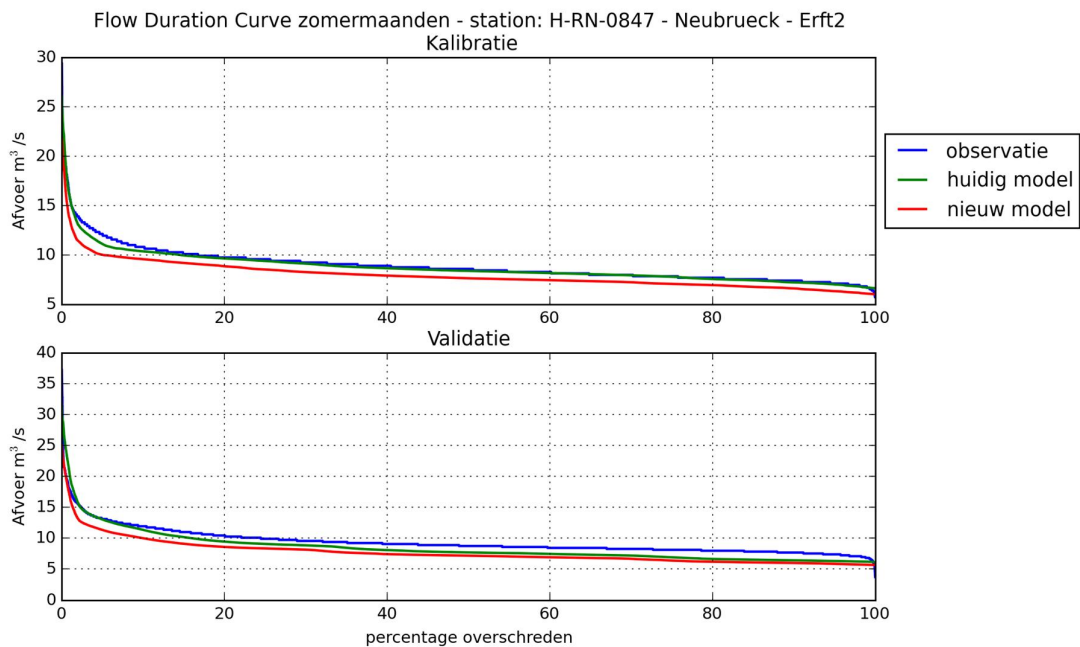




A.4.5 Erft

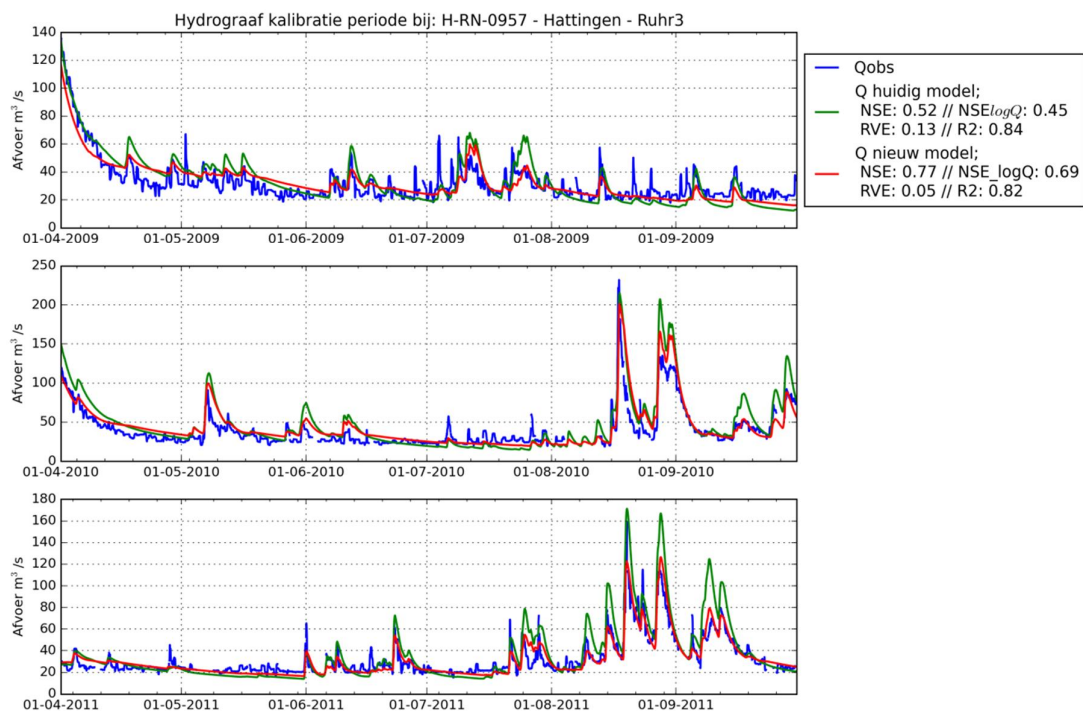
A.4.5.1 Neubrück

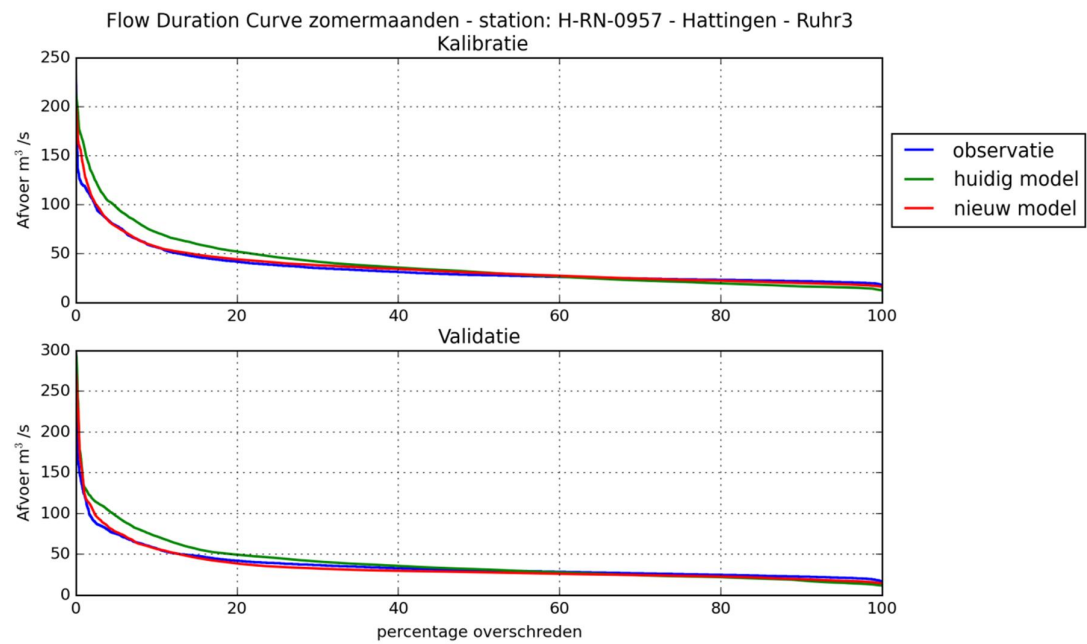
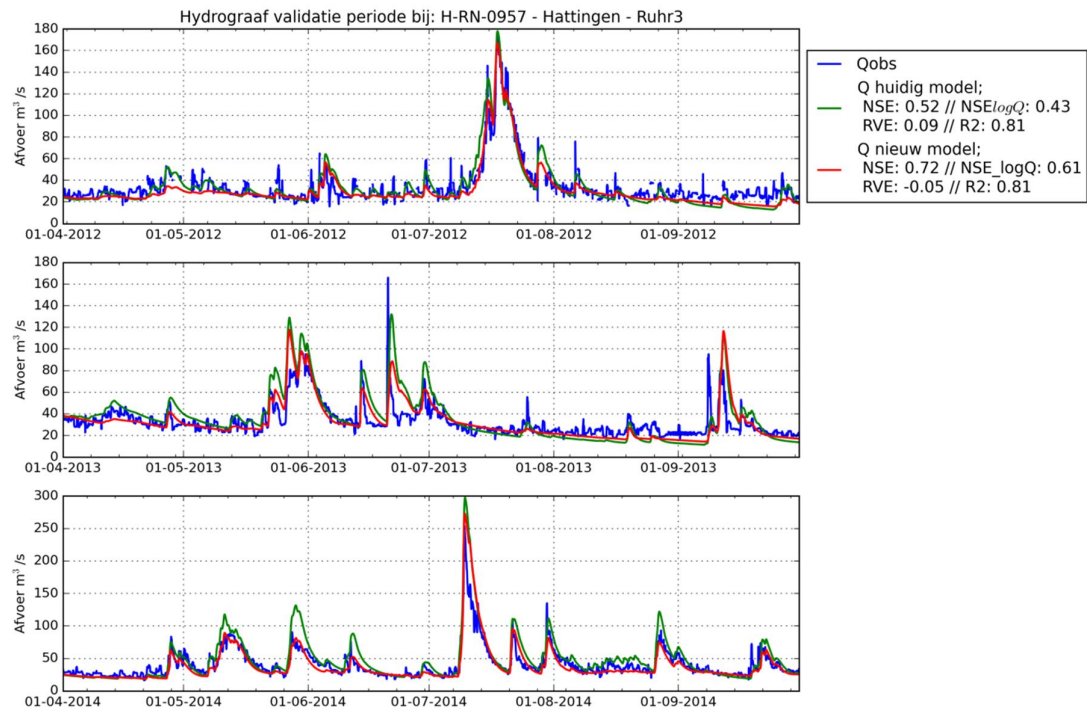




A.4.6 Ruhr

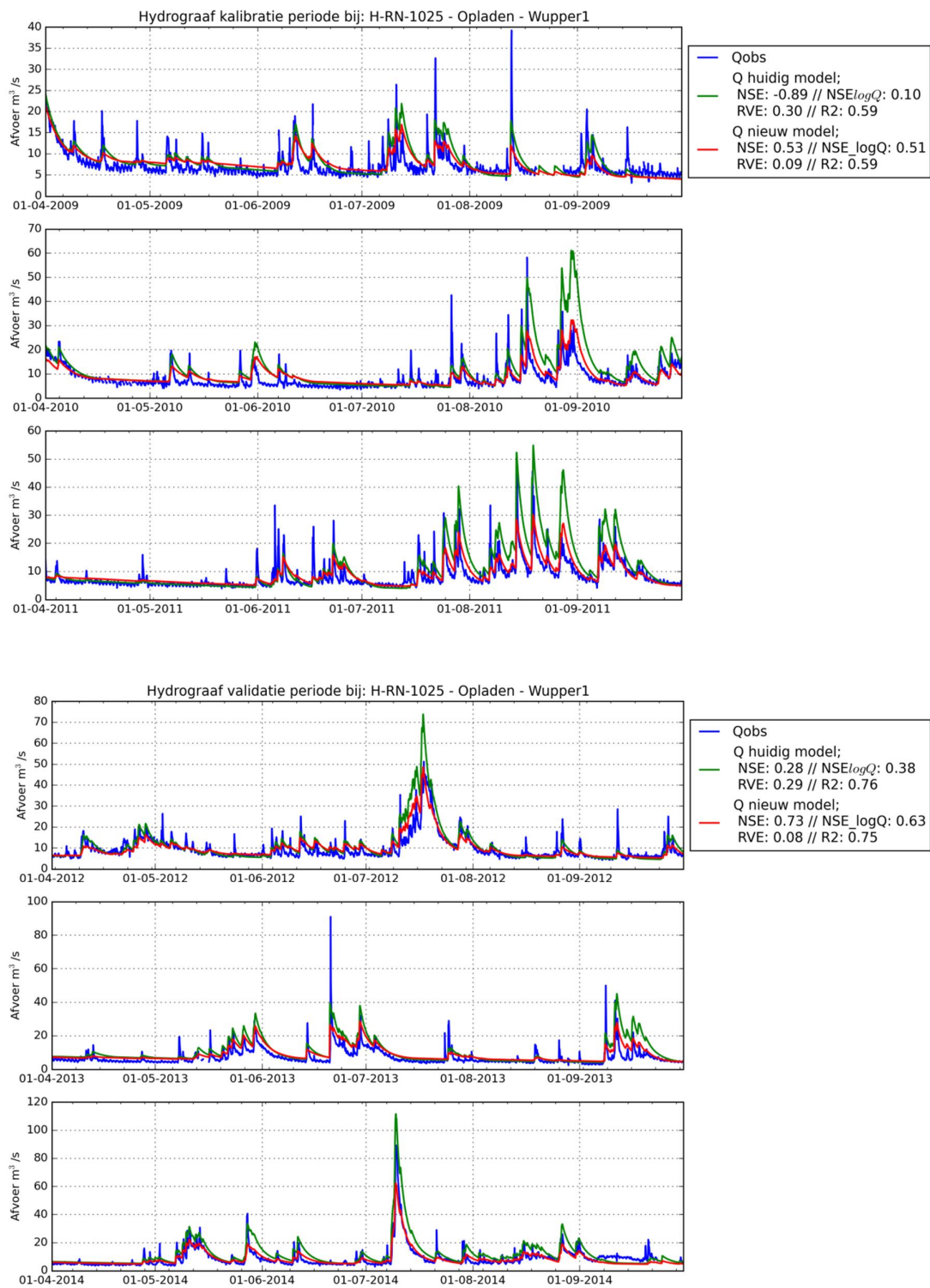
A.4.6.1 Hattingen

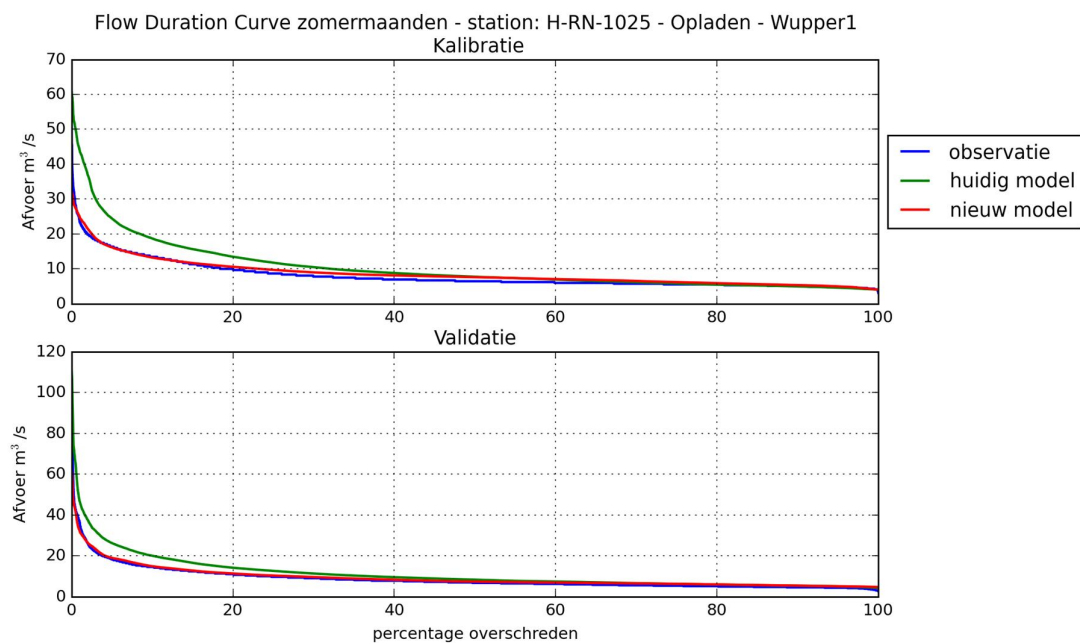




A.4.7 Beneden-Rijn

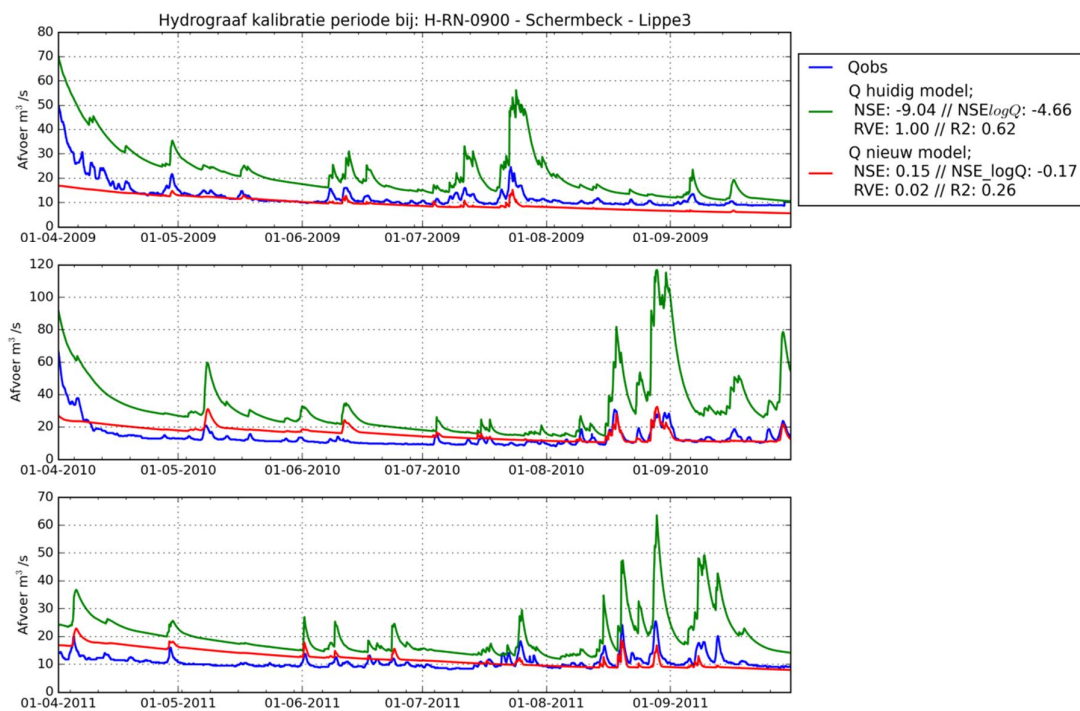
A.4.7.1 Opladen

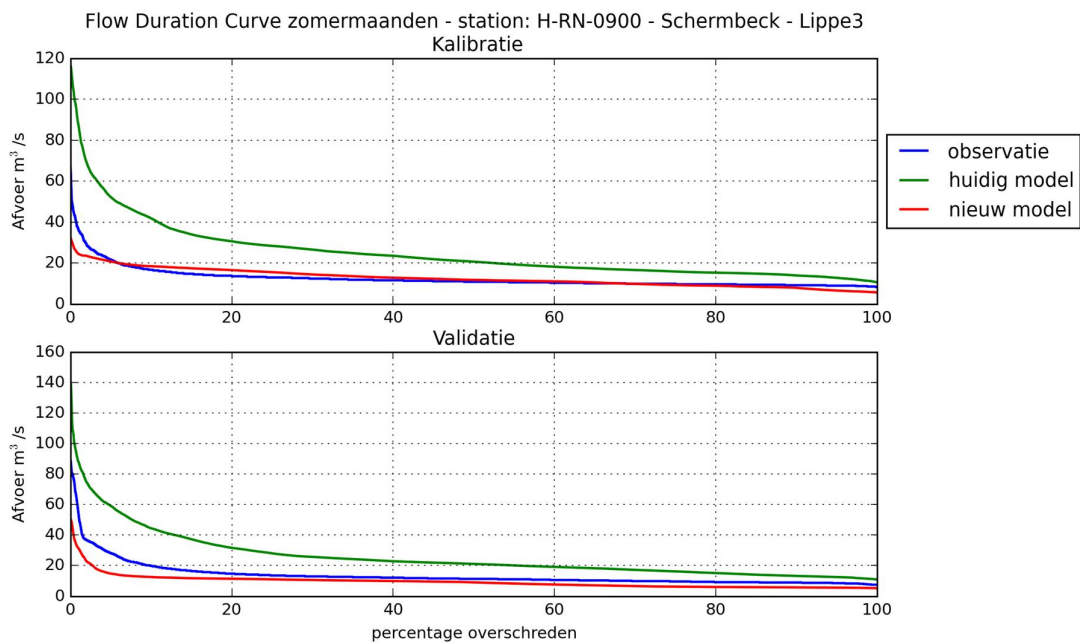
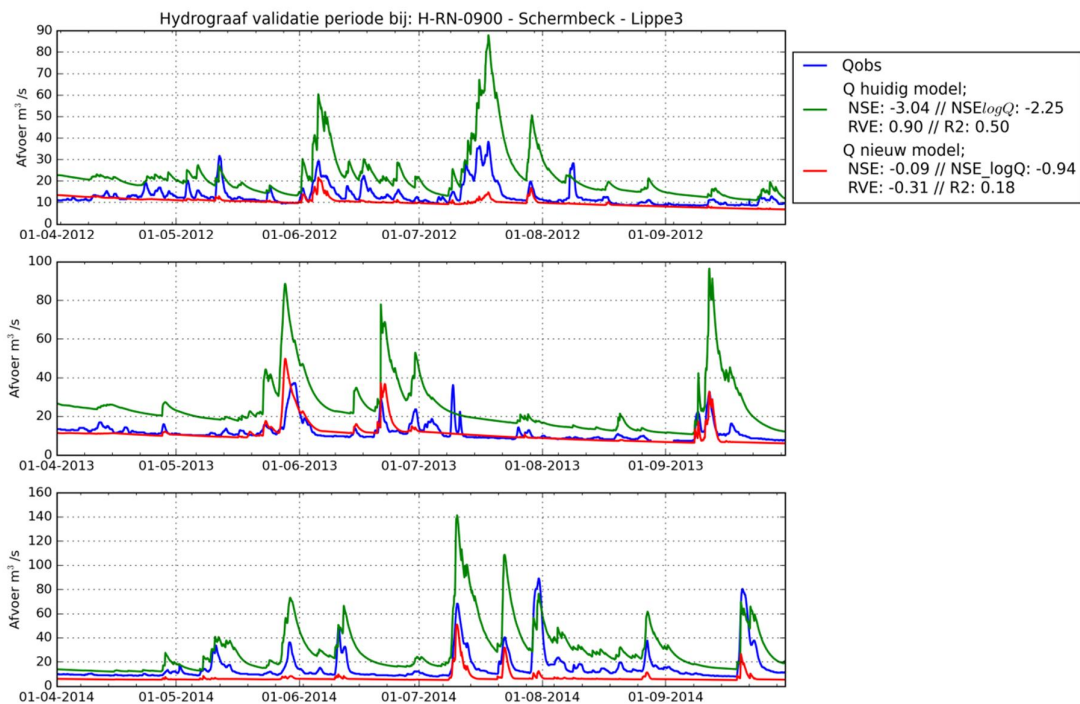




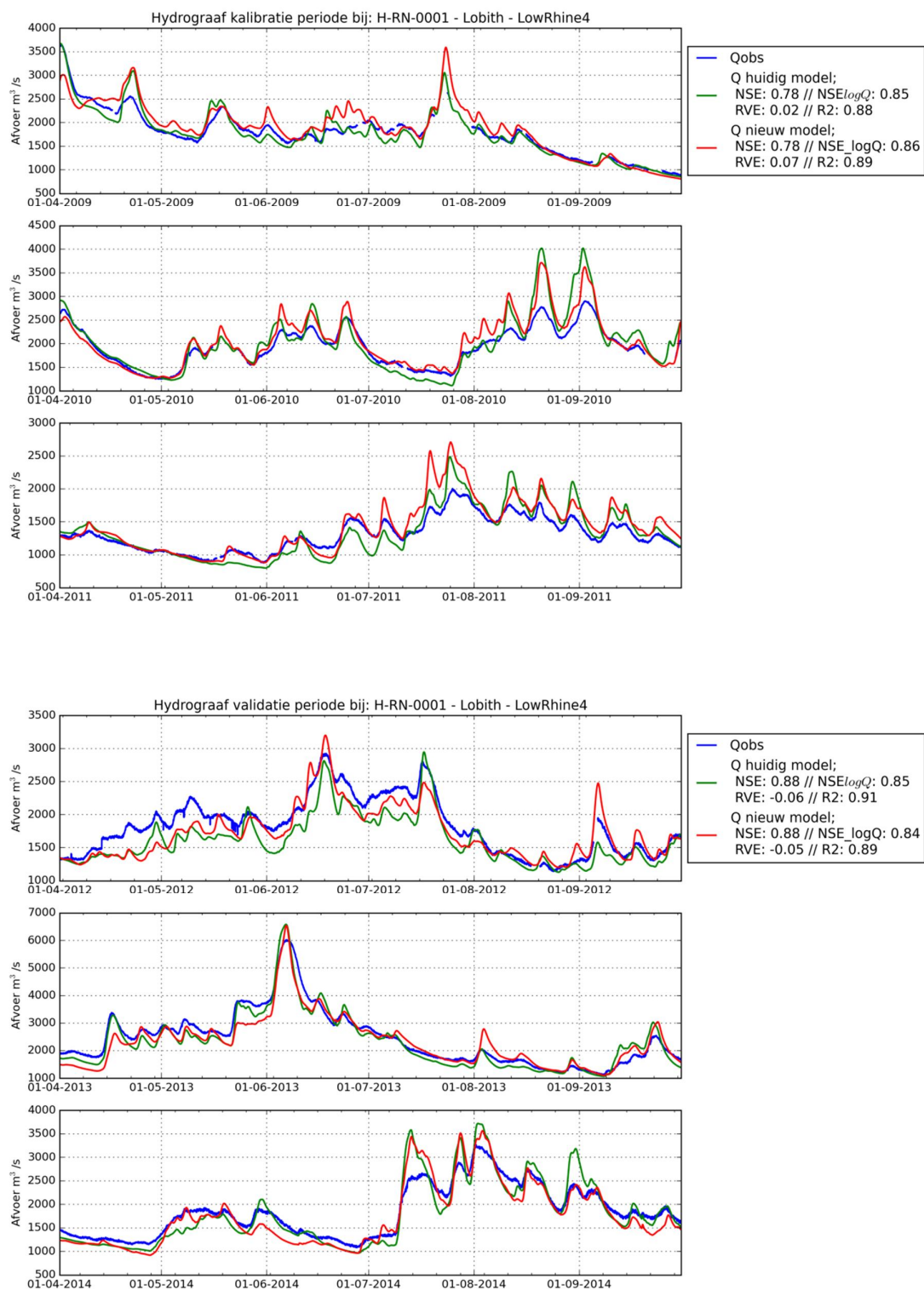
A.4.8 Lippe

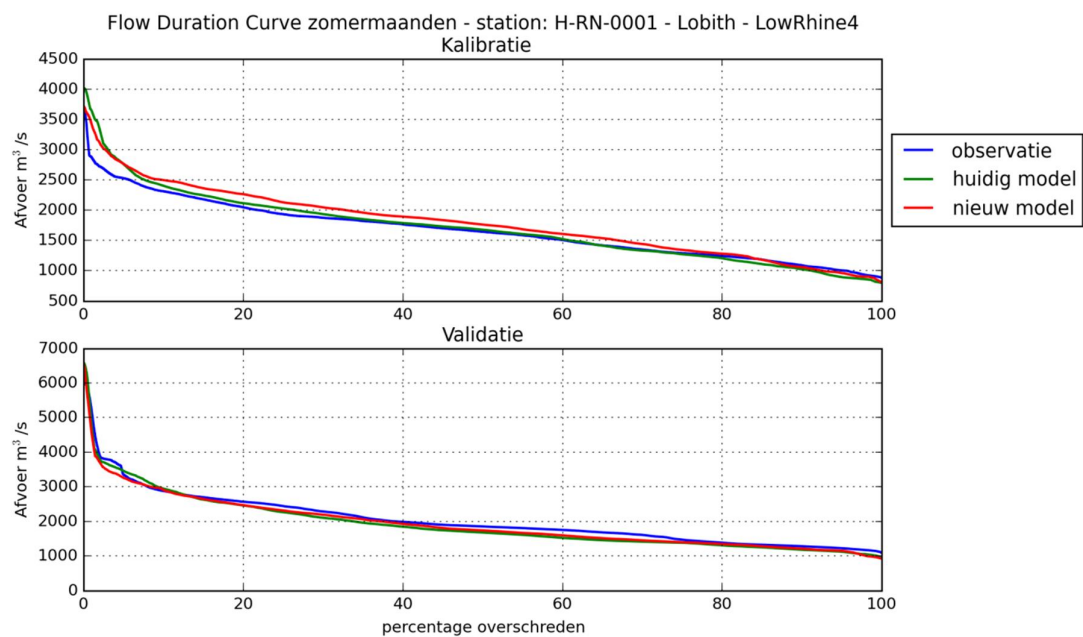
A.4.8.1 Schermbeck





A.5 Lobith

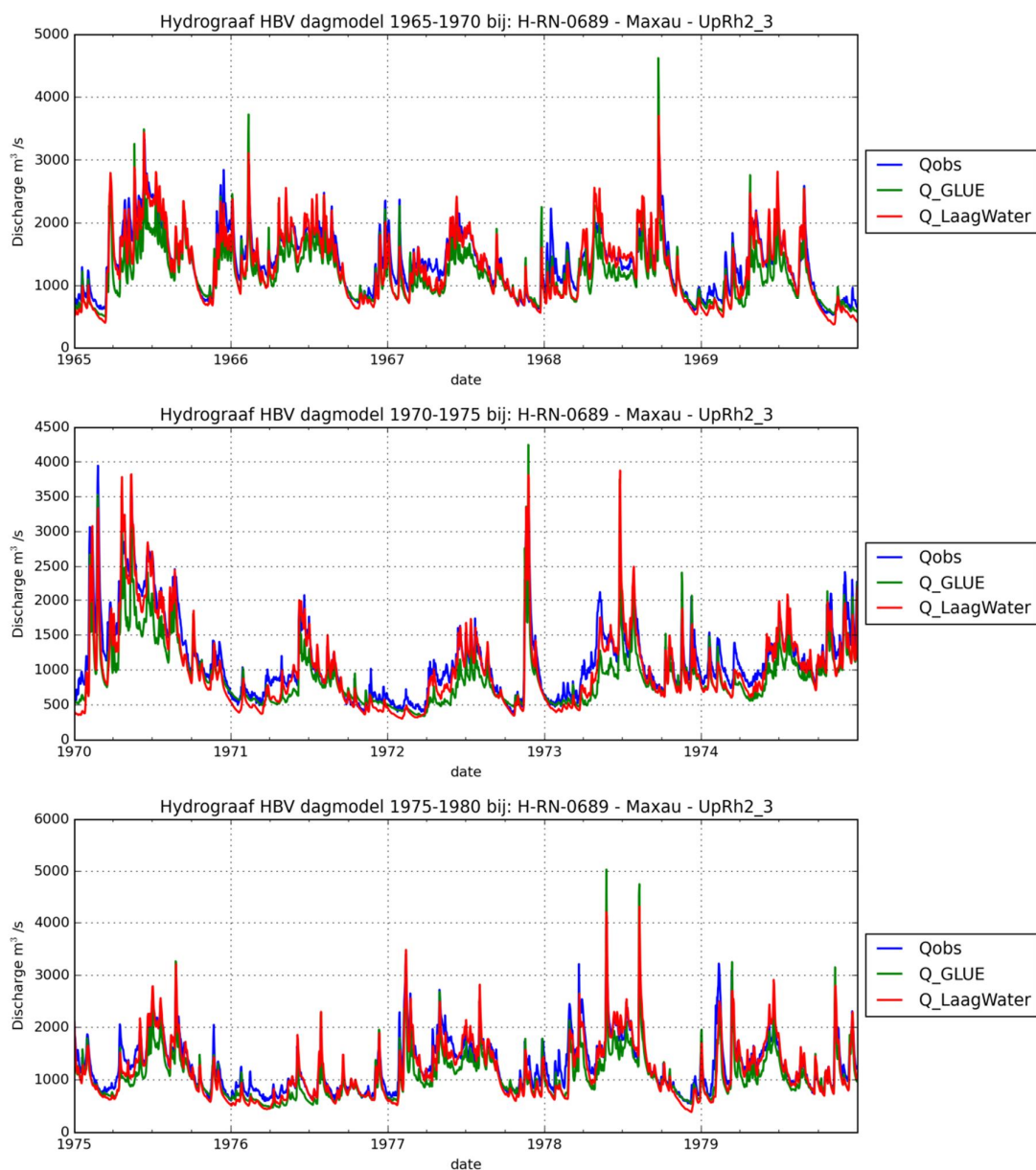


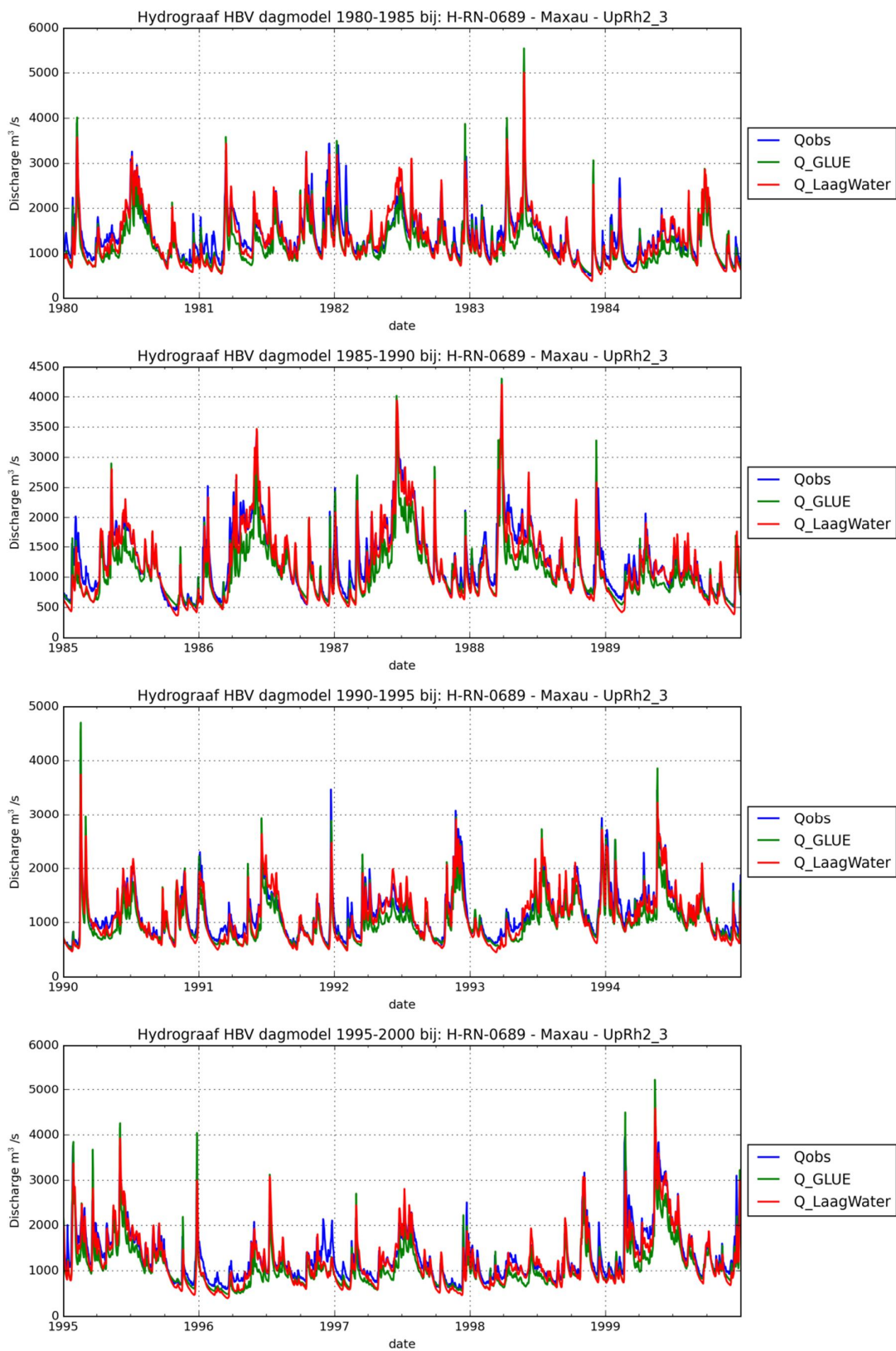


B Resultaten dagmodel Maxau en Lobith

B.1 Maxau

Modelresultaten 1965-2000





B.2 Lobith

Modelresultaten 1965-2000

