



Hercalibratie Model Lobith

Onderzoek naar mogelijke verbeteringen van de
voorspellingen met het Meervoudig Lineaire Regressie
Model Lobith na de hoogwaters van 1993 en 1995

RIZA rapport 97.061





Hercalibratie Model Lobith

Onderzoek naar mogelijke verbeteringen van de
voorspellingen met het Meervoudig Lineaire
Regressie Model Lobith na de hoogwaters van
1993 en 1995

RIZA rapport 97.061

ISBN 9036951070

Auteur: B.W.A.H. Parmet
E. Sprokkereef

RIZA

Lelystad, december 1997

Voorwoord

Aan de totstandkoming van dit rapport is door velen een bijdrage geleverd. Zoals gewoonlijk is het ondoenlijk iedereen te vermelden, maar een aantal mensen en instituten willen we toch noemen.

Zonder gegevens van de Bundesanstalt für Gewässerkunde had de hercalibratie niet uitgevoerd kunnen worden. De mogelijkheden van neurale netwerken zijn diepgaand onderzocht door Jacco Vos. De basis informatie voor het hysteresis effect bij Lobith is aangeleverd door Rolf van der Veen. Sjors van de Kamer en Floris Schultze worden bedankt voor hun stimulerende statistische ondersteuning. Een speciaal woord van dank geldt voor Paul Torfs en Hans van Twuiver. De eerste voor de begeleiding van Jacco Vos en de vele vruchtbare discussies, de tweede voor de niet aflatende SPSS steun en beide voor de kwaliteitsborging achteraf.

Eric Sprokkereef en Bart Parmet
Juni 1997

Inhoud

Voorwoord 3

1. Inleiding 5

2. Waterstandsvoorspellingen Lobith 7

2.1 Inleiding 9

2.2 Model Lobith 11

2.3 Kwaliteit voorspellingen 12

2.4 Mogelijkheden voor verbetering 14

2.5 Afhankelijkheid van verklarende variabelen 15

3. Heralibratie Model Lobith 17

3.1 Aanpak 17

3.2 Resultaten 19

3.3 Conclusies 22

4. Calibratie deelmodel voor hoge afvoeren; $\geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 23

4.1 Inleiding 23

4.2 Aanpak 24

4.3 Resultaten 24

4.4 Conclusies 28

5. Het hysteresis effect 29

5.1 Inleiding 29

5.2 Aanpak 30

5.3 Resultaten 31

5.4 Conclusies 31

6. Neurale netwerken als foutencorrector voor Model Lobith 33

6.1 Inleiding 33

6.2 Wat zijn neurale netwerken? 33

6.3 Generalized Regression Neural Network als residuenvoorspeller 34

6.4 Optimaliseren selectie van inputvariabelen 39

6.5 Conclusies 40

7. Samenvatting en conclusies 41

Literatuur 43

Bijlagen

1 Inleiding

Waterstandsvoorspellingen voor onze rivieren zijn van groot belang voor het operationele (hoog)waterbeheer. Het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) is verantwoordelijk voor de voorspellingen van de grenspunten van Rijn (Lobith) en Maas (Borgharen). RIZA is ook verantwoordelijk voor het up-to-date houden van het voorspel instrumentarium. Voor Lobith worden voorspellingen dagelijks gemaakt. Hiervoor wordt een statistisch model gebruikt, Model Lobith. Dit model rekent vier dagen vooruit. Alleen de voorspellingen voor de eerste en tweede dag vooruit zijn voldoende nauwkeurig en worden openbaar gemaakt.

Model Lobith is gebaseerd op de multilineaire regressietechniek. De regressievergelijkingen van het model worden gecalculeerd op basis van gemeten waterstands-, en neerslaggegevens. Hoe uitgebreider de reeks waarmee gecalculeerd wordt, met name wat betreft de variatie in gebeurtenissen, hoe meer zekerheid er is over de voorspel kwaliteiten van het model. Het is daarom van belang het model van tijd tot tijd opnieuw te calibreren. Dat is sinds de eerste versie van het model, die dateert uit 1982, dan ook twee keer gedaan. De tot nu toe uitgevoerde hercalibraties hebben in het algemeen steeds tot, zij het geringe, verbeteringen van de modelresultaten geleid. Echter, het algemene beeld dat alleen de eerste en tweede dag goed voorspeld kunnen worden is niet veranderd.

Sinds de laatste hercalibratie van 1991 hebben zich twee grote hoogwaters in de Rijn voorgedaan. In december 1993 en januari 1995 werden afvoeren gemeten die deze eeuw alleen in 1926 hoger waren. Door een hercalibratie met de gegevens van deze hoogwaters wordt het model up-to-date gemaakt. Daarnaast is uit een evaluatie na het hoogwater van 1995 duidelijk naar voren gekomen dat er behoefte is aan goede voorspellingen verder vooruit dan de twee dagen die op dit moment mogelijk zijn (TAW, 1995). Gezien de eerdere ervaringen zal een hercalibratie alleen niet tot spectaculaire verbeteringen leiden. Daarom is ook gekeken naar andere mogelijkheden om de voorspellingen met Model Lobith verder te verbeteren. Hierbij is onderzocht in hoeverre een apart deelmodel voor hoge afvoeren meerwaarde oplevert. Ook is gekeken of het expliciet meenemen van onnauwkeurigheden die optreden bij de vertaling van waterstand naar afvoer als gevolg van het hysteresis effect, tot verbeteringen leidt. Tenslotte zijn de mogelijkheden verkend om de fouten die met het lineaire Model Lobith worden gemaakt, met niet-lineaire technieken (neurale netwerken) te voorspellen, en op die manier de waterstandsvoorspellingen verder te verbeteren.

In dit rapport worden de resultaten weergegeven van de hercalibratie met recente gegevens en de effecten van de hierboven genoemde mogelijkheden om Model Lobith te verbeteren. Achtereenvolgens komen Model Lobith en de ontwikkelingen tot en met de recente hoogwaters (hoofdstuk 2), de hercalibratie met gegevens van tot en met maart 1995 (hoofdstuk 3), een apart deelmodel voor hoge afvoeren (hoofdstuk 4), de effecten van onnauwkeurigheden in de afvoergegevens (hoofdstuk 5) en het gebruik van neurale netwerken als residuenvoorspellers (hoofdstuk 6) aan bod. Tenslotte worden in hoofdstuk 7 de stand van zaken en mogelijkheden voor verdere verbetering van de voorspellingen voor Lobith beschreven.

2 Waterstandsvoorspellingen Lobith

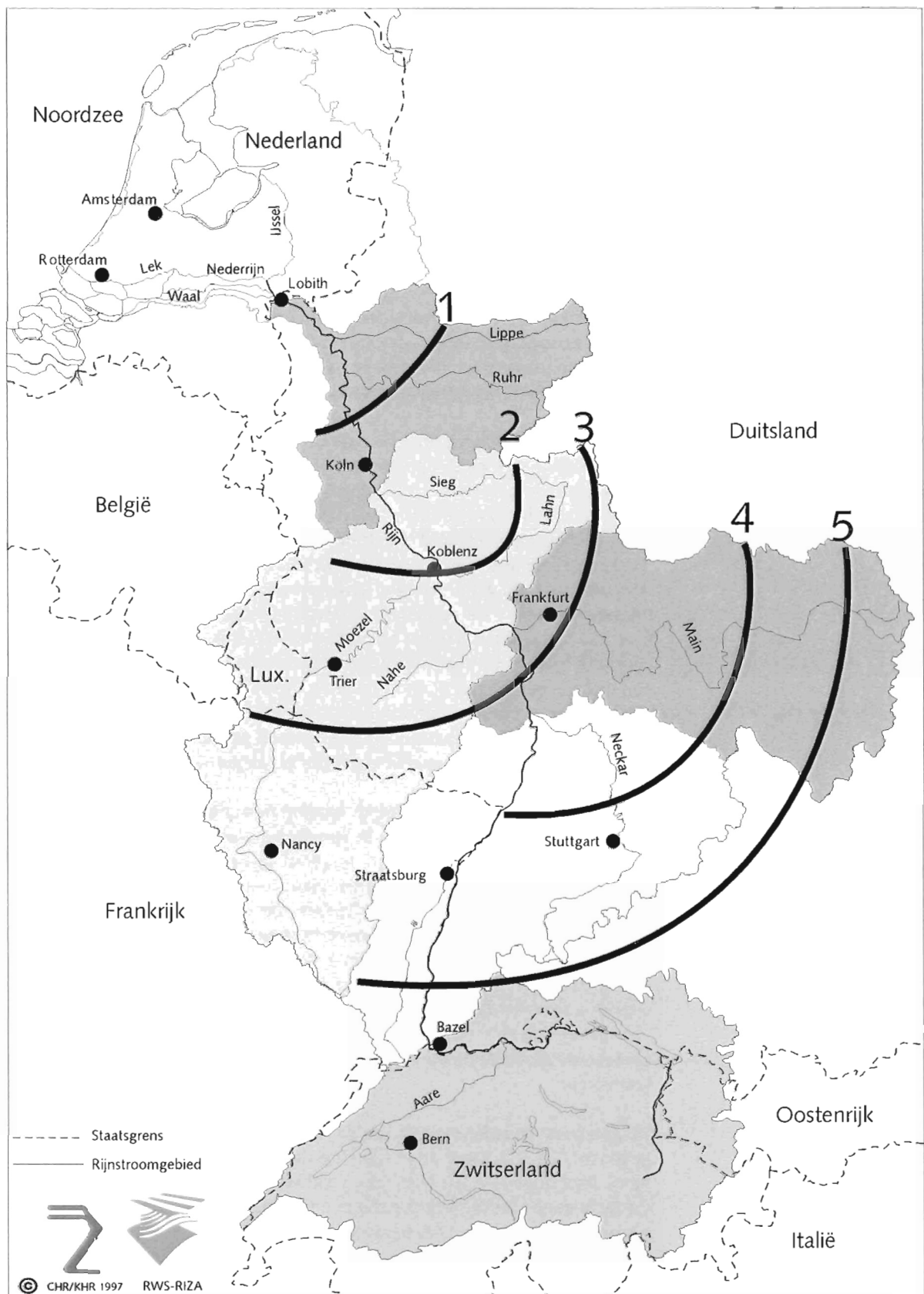
2.1 Inleiding

Waterstandsvoorspellingen voor Lobith worden in normale situaties op werkdagen gemaakt. Deze "dagelijkse" voorspellingen zijn vooral voor de scheepvaart en de rivierbeheerder van belang. In een hoogwaterperiode is de frequentie van voorspellen hoger. Iedere dag worden dan minimaal twee voorspellingen gemaakt. Tijdens een hoogwater vormen de voorspellingen één van de weinige harde gegevens waar de verantwoordelijke overheden hun maatregelen op kunnen baseren, zoals bijvoorbeeld de grootschalige evacuatie tijdens het hoogwater van 1995 (Van de Ven, 1995).

De voorspellingen voor Lobith worden tot op heden gebaseerd op een relatief eenvoudig model. Het zogeheten "Model Lobith" is een statistisch model gebaseerd op de meervoudig lineaire regressietechniek (MLR). De eerste versie van het model dateert van 1982, en het is daarna in 1987 en in 1991 opnieuw gecalibreerd (De Ronde, 1983; Promes, 1987; Van den Eertwegh, 1992). Waterstanden worden tot vier dagen vooruit berekend. Invoergegevens zijn waterstanden, afvoeren en gemeten en voorspelde neerslaghoeveelheden. De benodigde waterstandsgegevens voor Model Lobith komen tweemaal per dag per fax vanuit het Wasser- und Schifffahrtsamt in Duisburg binnen. Een on-line verbinding, zodat uurlijks over waterstanden kan worden beschikt, is in voorbereiding. Neerslaggegevens worden iedere zes uur via een on-line verbinding door het KNMI beschikbaar gesteld. De neerslagvoorspellingen worden iedere ochtend per fax door het KNMI toegestuurd. Het betreft voorspellingen voor zes dagen vooruit.

De berekeningen van Model Lobith worden niet zonder meer overgenomen. Er vindt een controle door de voorspeller plaats. Deze kan besluiten de modelberekening te corrigeren, en rondt sowieso af op 5 cm. Tijdens hoogwater situaties vindt die controle plaats met behulp van vuistregels. Deze zijn gebaseerd op gemeten afvoeren, voorspellingen vanuit Duitsland voor bovenstrooms gelegen punten en heel eenvoudige empirische neerslag-afvoer-relaties, in combinatie met looptijden van afvoergolven (Sprokerekreef, 1996). In figuur 2.1 is globaal deze looptijd tot Lobith weergegeven voor de verschillende delen in het Rijnstroomgebied. Uit de evaluatie van Van den Eertwegh (1992) is gebleken dat de eigen interpretatie over het algemeen de gemiddelde voorspelfout groter maakt, maar grote fouten helpt voorkomen.

De gewenste nauwkeurigheid van de voorspellingen voor Lobith is weergegeven in tabel 2.1. Deze eisen zijn afgeleid van wensen van gebruikers van de voorspellingen. In het algemeen voldoen de voorspellingen voor de eerste twee dagen wel en voor de derde en vierde dag niet aan de gestelde nauwkeurigheidseisen. Daarom worden in de dagelijkse berichtgeving alleen de voorspellingen voor de eerste twee dagen openbaar gemaakt. Tijdens hoogwater wordt daar voor de derde dag en verder een kwalitatief doorkijkje aan toegevoegd, bijvoorbeeld "een verdere stijging wordt verwacht".



Figuur 2.1
Stroomgebied van de Rijn met belangrijkste deelstroomgebieden en gemiddelde looptijden tot Lobith

Tabel 2.1
Gewenste nauwkeurigheid voorspellingen Lobith.

Zichttijd [dagen]	Gewenste nauwkeurigheid [cm]	
	Hoogwater	Laagwater
1	± 10	± 5
2	± 15	± 15
3	± 20	± 20
4	± 40	± 25

2.2 Model Lobith

Model Lobith bestaat uit een aantal deelmodellen die zijn opgebouwd uit meerdere MLR-vergelijkingen. Er zijn deelmodellen voor een ongestuwde en gestuwde situatie. Daarnaast zijn er deelmodellen die waterstanden als invoergegevens gebruiken en een deelmodel dat uitgaat van afvoeren. Voor iedere voorspeldag, één, twee, drie en vier dagen vooruit, zijn aparte regressievergelijkingen afgeleid. De regressievergelijkingen zijn opgebouwd volgens:

$$Y = \beta_0 X_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + C$$

waarin:

- Y : te verklaren grootte, i.c. waterstand te Lobith, x dagen na nu
- X_i : verklarende variabelen, i.c. waterstands-, afvoer- en neerslaggegevens van vandaag, gisteren, eergisteren
- β_i : regressiecoëfficiënten
- C : regressieconstante

De beschikbare invoergegevens zijn waterstanden van een groot aantal meetpunten langs de Rijn van Maxau tot Lobith en van de zijrivieren Neckar, Main, Lahn, Moezel, Sieg, Ruhr en Lippe. Middels afvoer-waterstandsrelaties kunnen waterstanden worden omgezet in afvoeren, zodat ook afvoergegevens beschikbaar zijn. Daarnaast zijn neerslaggegevens beschikbaar van verschillende stations in Duitsland en Frankrijk en een neerslagvoorspelling voor het noordelijk en het zuidelijk deel van het Rijnstroomgebied. In figuur 3.1 is een overzicht gegeven van de gebruikte meetpunten voor Model Lobith.

De coëfficiënten en de selectie van verklarende variabelen van de MLR-modellen zijn op statistische gronden afgeleid. De statistiek en niet de fysica bepaalt de relatie tussen model in- en output. Model Lobith in zijn huidige vorm is dan ook een schoolvoorbeeld van een black-box model. De black-box is in dit geval de meervoudig lineaire regressievergelijking die het verband aangeeft tussen waterstanden (of afvoeren) en neerslagen in het stroomgebied en de waterstand bij Lobith.

Tijdens de laatste hercalibratie in 1991, zijn in totaal 3 deelmodellen gecalibreerd (zie tabel 2.2). De deelmodellen zijn gebaseerd op waterstands- en neerslaggegevens. Eén model voor lage waterstanden en één voor hoge waterstanden. De grens is een waterstand van NAP+10.00 m bij Lobith. Bij deze waterstand of lager is de stuw bij Driel in bedrijf. Het effect van de stuw is merkbaar tot bovenstrooms van Lobith. Daarnaast is er een model dat gebaseerd is op afvoeren. Dit deelmodel is gecalibreerd voor de ongestuwde situatie, en geldt voor afvoeren bij Lobith groter dan 2300 m³/s. Dit is de afvoer bij een waterstand van NAP+10.00 m bij Lobith.

Tabel 2.2
Overzicht gehercalibreerde MLR-modellen. Per deelmodel 7 regressievergelijkingen, aangeduid met x.

Deelmodel	zichttijd [dag]			
	1	2	3	4
H Lobith $\leq$ 10.00 m + NAP procedure met neerslagvoorspellingen	x	x	x	x
H Lobith $>$ 10.00 m + NAP procedure met neerslagvoorspellingen	x	x	x	x
H Lobith $\geq$ 2300 m ³ /s procedure met neerslagvoorspellingen	x	x	x	x

Ieder deelmodel bestaat uit meerdere regressievergelijkingen, in totaal 7. Voor iedere voorspeldag is er een vergelijking die gemeten waterstanden en neerslagen als input gebruikt. Daarnaast wordt voor de voorspellingen van twee, drie en vier dagen vooruit nog een tweede vergelijking gebruikt om het effect van voorspelde neerslag mee te nemen. Deze heeft als invoer de waterstandsvoorspelling die met de eerste vergelijking is berekend en daarnaast de voorspelde neerslag. Voor deze dagen wordt de voorspelling als het ware met een tweetraps raket berekend.

2.3 Kwaliteit voorspellingen

Door Van den Eertwegh (1992) is voorafgaand aan de hercalibratie van 1991 een uitgebreide evaluatie gemaakt van de voorspellingen met Model Lobith zoals dat was gec calibreerd door Promes (1987), voor de periode 1988 tot en met 1991. Uit de evaluatie bleek dat de voorspellingen voor de beschouwde periode voor de eerste en tweede dag redelijk tot goed waren. Het percentage voorspellingen met de gewenste nauwkeurigheid was hoog. Er traden wel relatief grote uitschieters op (Van den Eertwegh, 1992). Voor de derde en vierde dag waren de resultaten minder goed. Voor bijna geen enkele zichttijd werd in 95% van de gevallen de gewenste nauwkeurigheid gehaald (zie tabel 2.3). Reden genoeg voor de hercalibratie in 1991. Het hoogwater van 1988 was een extra aanleiding voor een hercalibratie. Dit hoogwater was een stuk hoger dan de hoogwaters uit de calibratieset zoals gebruikt door Promes in 1987. De hercalibratie van Van den Eertwegh had tot resultaat dat de modellen voor de ongestuwde situatie, dus voor de hogere waterstanden en afvoeren, licht verbeterden. Voor de gestuwde situatie werden de resultaten echter slechter.

Tabel 2.3
Percentage voorspellingen dat met gewenste nauwkeurigheid is berekend voor de periode 27-10-1988 tot en met 09-01-1991, berekend met Model Lobith zoals gec calibreerd door Promes (1987) - links in de kolom -, (bron: Van den Eertwegh, 1992), en voor de periode 01-01-1988 tot en met 30-03-1995 met Model Lobith zoals gec calibreerd door Van den Eertwegh (1992) - rechts, cursief in de kolom.

Zichttijd in dagen	1		2		3		4	
model gestuwde situatie [%]	86	82	95	94	91	86	87	83
model ongestuwde situatie [%]	88	89	69	85	52	65	67	80

Met het door Van den Eertwegh gehercalibreerde model zijn voorspellingen vanaf 1992 gemaakt. Ook tijdens de hoogwaters van 1993 en 1995. Deze waren beide beduidend hoger dan het hoogwater van 1988, wat het grootste hoogwater in de calibratieset van Van den Eertwegh was. De prestaties van het model voor de periode 1988 tot en met 1995 zijn in lijn met de bevindingen van Van den Eertwegh (1992). Voor hoge waterstanden is

er een lichte verbetering en voor lage waterstanden worden de voorspellingen iets slechter. Tabel 2.3 laat dit zien uitgedrukt in percentages van de voorspellingen met de gewenste nauwkeurigheid. Het beeld van redelijk tot goede voorspellingen voor de eerste en tweede dag en matige tot slechte voorspellingen voor de derde en vierde dag blijft bestaan.

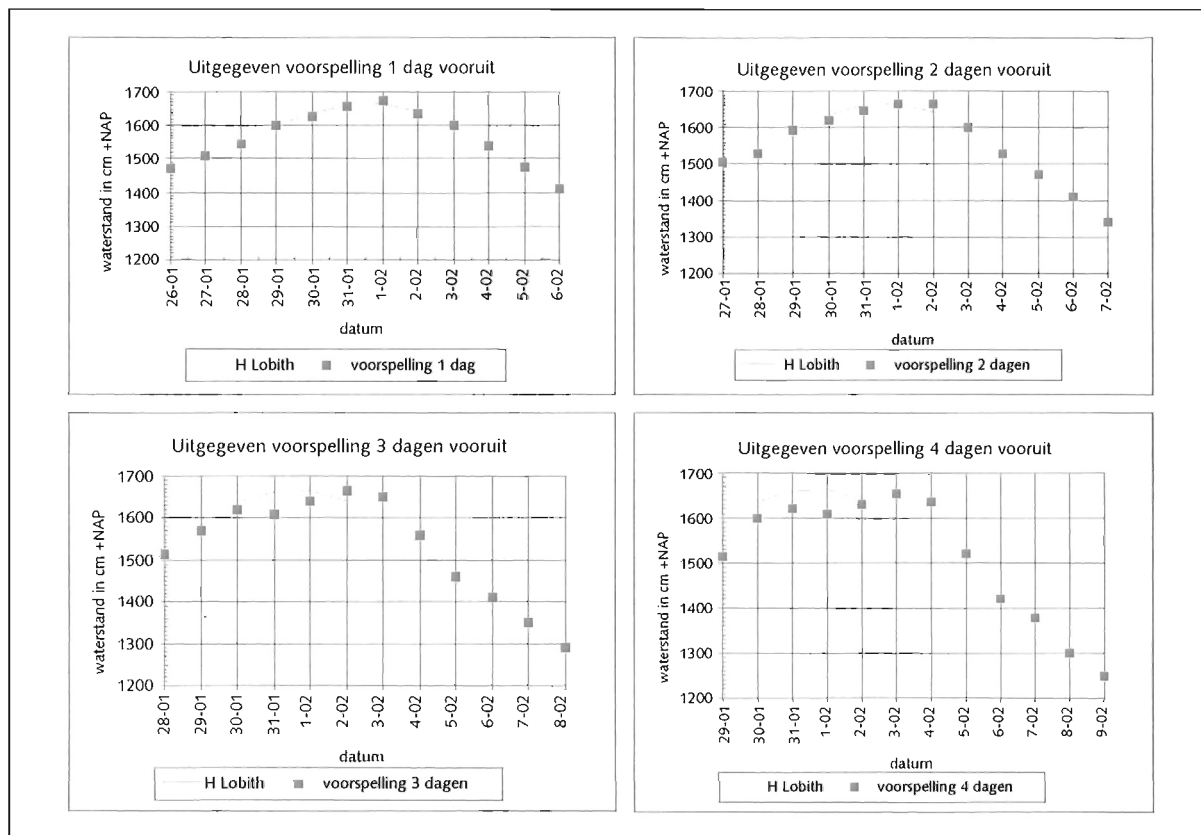
In tabel 2.4 en figuur 2.2 wordt ingezoomd op de voorspellingen tijdens de hoogwaterperiode van januari/februari 1995. Dit hoogwater is ontstaan doordat in grote delen van het Rijnstroomgebied medio januari sprake was van een verzadigde ondergrond als gevolg van het langzaam smelten van eerder in de maand gevallen sneeuw. Rond 20 januari veranderde het tot dan redelijk winterse weerbeeld volkomen. Depressies vanaf de oceaan brachten grote hoeveelheden regen in de periode tot 30 januari. In totaal viel in die 10 dagen gemiddeld over het hele Rijnstroomgebied twee keer de normale hoeveelheid voor de hele maand januari (Parmet, 1995). Langs bijna de gehele Rijn en in bijna alle zijrivieren ontstond een hoogwatersituatie. Niet overal was de situatie even ernstig. Maar, vooral doordat de afvoerpiek op de Rijn samenviel met de afvoerpieken van de noordelijke zijrivieren, ontstond benedenstrooms van Keulen een situatie die ernstiger was dan in 1993. In Keulen werd dezelfde waterstand gemeten als in 1926. In Lobith is een topafvoer van rond 12.000 m³/s gemeten, de op één na hoogst gemeten afvoer ooit. Mede op basis van de voorspellingen is besloten tot de grootschalige evacuatie van ongeveer 200.000 mensen. Toen waterstanden hoger dan NAP+16.50m werden verwacht, konden dijkbeheerders de standzekerheid van een aantal dijkvakken niet langer garanderen.

Zoals in 2.1 beschreven, worden tijdens een hoogwater de modelvoorspellingen gecontroleerd met behulp van vuistregels, en zo nodig aangepast. In tabel 2.4 is het percentage correcte voorspellingen gegeven van de modelberekeningen en van de waarden zoals vastgesteld en uitgegeven door de voorspellers. De tabel laat zien dat het model in vergelijking met tabel 2.3 beneden de maat heeft gepresteerd. De eigen interpretatie heeft voor de eerste twee dagen geleid tot uiteindelijk goede voorspellingen. Voor de derde en vierde dag is het matige modelresultaat door de eigen interpretatie niet verbeterd en voor de derde dag zelfs verslechterd. Voor deze dagen is slechts in ongeveer de helft van de gevallen de gewenste nauwkeurigheid bereikt.

Tabel 2.4	Zichttijd in dagen	1	2	3	4
Percentage voorspellingen dat met					
gewenste nauwkeurigheid is berekend	gewenste nauwkeurigheid [cm]	10	15	20	40
voor de hoogwaterperiode in 1995, van	model [%]	58	75	42	75
25-01-1995 tot en met 05-02-1995,	eigen interpretatie [%]	100	83	42	50
zoals berekend met Model Lobith versie					
Van den Eertwegh, en zoals uitgegeven					
tijdens het hoogwater van 1995					
(Parmet en Sprokkereef, 1995).					

Figuur 2.2

Gemeten waterstanden (H-Lobith) en voorspelde waterstanden voor één, twee, drie en vier dagen vooruit zoals uitgegeven tijdens hoogwater 1995 (Parmet en Sprokkereef, 1995).



2.4 Mogelijkheden voor verbetering

Model Lobith voldoet ook na de hercalibratie door Van den Eertwegh nog niet aan de in tabel 2.1 gestelde eisen. Voor de eerste twee dagen is het aantal mis-sers beperkt. Echter, tijdens het recente hoogwater waren de *modelvoorspellingen* voor deze dagen beneden het gemiddelde. Door de eigen interpretatie waren de *uitgegeven voorspellingen* van betere kwaliteit. Constant goede voorspellingen, waarbij slechts sporadisch door de voorspeller gecorrigeerd hoeft te worden, zijn gewenst, ook in niet-hoogwater situaties. De behoefte aan goede voorspellingen, ook verder dan twee dagen vooruit, is duidelijk naar voren gekomen in de evaluatie van het hoogwater van 1995 (TAW, 1995).

Wat zijn nu de mogelijkheden voor een verdere verbetering van de voorspellingen met het statistische Model Lobith? Door Van den Eertwegh (1992) worden hiervoor een aantal aanbevelingen gedaan, o.a. transformatie van invoervariabelen, niet-lineaire regressie, meer fysica in het model en opsplitsen van het model in meer dan twee waterstandstrajecten. In dit onderzoek zijn een aantal van deze aanbevelingen nader onderzocht.

In de eerste plaats is gekeken naar de effecten van een hercalibratie van Model Lobith. Doel hiervan is de bestaande deelmodellen up-to-date te maken. In de calibratieset die gebruikt is door Van den Eertwegh zaten geen hoogwaters van het kaliber van 1993 en 1995. Met een langere calibratieset, in dit geval van 1982 tot en met 1995 in plaats van 1982 tot en met 1990, kunnen de regressiecoëfficiënten beter bepaald worden.

Vervolgens is, in lijn met de aanbevelingen van Van den Eertwegh (1992) onderzocht, in hoeverre de opsplitsing van het model in meerdere waterstands- of afvoertrajecten tot verbetering van de voorspellingen leidt. Nu zijn er alleen deelmodellen voor het traject beneden en boven een waterstand bij Lobith van NAP+10.00 m, wat overeenkomt met een afvoer van circa 2300 m³/s, ongeveer de jaargemiddelde afvoer bij Lobith. Tijdens een hoogwatersituatie gedragen de hydrologische processen zich anders dan in een gemiddelde situatie. Daarom is een apart deelmodel gecalibreerd voor hoge afvoeren.

Afvoergegevens worden berekend uit waterstandsgegevens met behulp van een afvoer-waterstandsrelatie (Q(H)-relatie). De Q(H)-relatie beschrijft de gemiddelde relatie tussen waterstand en afvoer zoals afgeleid uit metingen. De Q(H)-kromme is dan ook een lijn die door een puntenwolk wordt 'gefit'. Bij het vaststellen van zo'n gemiddelde relatie wordt geen rekening gehouden met niet-stationaire effecten. Bij een afvoergolf is echter wel sprake van een niet-stationaire situatie. Als gevolg van het hysteresis effect is in geval van stijgende waterstanden de afvoer bij een bepaalde waterstand hoger en bij dalende waterstanden bij dezelfde waterstand lager dan de gemiddelde situatie. Het verschil in afvoer kan bij stijgende waterstanden voor Lobith oplopen tot meer dan 400 en bij dalende waterstanden tot 250 m³/s. Er is nagegaan of door het corrigeren van de met de Q(H)-relatie berekende afvoer voor het hysteresis effect, de voorspellingen met Model Lobith verbeteren.

Model Lobith is een lineair model. Indien verondersteld wordt dat met Model Lobith "alle" lineaire verbanden beschreven worden, kan gesteld worden dat het residu, de voorspelfout die met Model Lobith wordt gemaakt, wordt veroorzaakt door niet-lineaire effecten. Door de voorspelfouten van het lineaire model met een niet-lineair model te beschrijven zou de voorspelling voor Lobith verbeterd kunnen worden. Een eenvoudig toe te passen type niet-lineaire modellen zijn neurale netwerken. De mogelijkheden van neurale netwerken als foutencorrector voor Model Lobith zijn onderzocht.

2.5 Afhankelijkheid van verklarende variabelen

Zoals in 2.2 al naar voren is gekomen, zijn er in het Rijnstroomgebied een groot aantal potentieel verklarende variabelen beschikbaar die voor de in 2.4 voorgestelde verbeteringen gebruikt kunnen worden. Voor Model Lobith worden gegevens van 13 waterstandsmeeptpunten en 8 neerslagstations gebruikt tot vier dagen terug. Dit zijn alleen al 105 variabelen. Verder is er de neerslagverwachting voor het noorden en zuiden van het Rijnstroomgebied tot twee dagen vooruit, wat weer zes extra variabelen oplevert. Vervolgens zouden ook nog gegevens van waterstandsmeeptpunten of neerslagstations gebruikt kunnen worden die niet als invoer voor het huidige Model Lobith dienen, maar waar wel gegevens van beschikbaar zijn. Deze variabelen zijn niet onafhankelijk, wat inherent is aan de fysica van het systeem. Immers, neerslaggegevens in een bepaald gebied vertonen onderling correlatie, en de afvoer is weer gecorreleerd aan de neerslag. Bij het zoeken naar lineaire verbanden kan te veel afhankelijkheid tussen de verklarende variabelen voor multi-collineariteit zorgen, met als gevolg dat de regressiecoëfficiënten onnauwkeurige schatters zijn. Bij niet-lineaire verbanden treedt een zelfde effect op, afhankelijkheid zorgt voor onnauwkeurige modeparameters. Het gevaar van schijnafhankelijkheid is dan groot. Schijnafhankelijkheid betekent dat onzin-verbanden tussen de verklarende

en de te verklaren variabele worden gevonden. Voor de calibratie-dataset leidt dit nog wel tot goede resultaten, maar in de validatie, met een andere dataset, leiden de schijnverbanden tot slechte resultaten.

Om afhankelijkheid en daarmee schijnverbanden zoveel mogelijk te voorkomen, is selectie van de verklarende variabelen noodzakelijk. Voor lineaire verbanden kan gebruik worden gemaakt van stapsgewijze regressie. Met deze methodiek wordt op basis van statistische criteria de beste set van verklarende variabelen geselecteerd. Door zowel Promes als Van den Eertwegh is stapsgewijze regressie toegepast om de verklarende variabelen voor Model Lobith af te leiden. Deze methode is ook hier weer toegepast bij de hercalibratie van Model Lobith en bij het afleiden van een apart deelmodel voor hoge afvoeren. Voor niet-lineaire verbanden zijn eenvoudig toepasbare methoden niet direct voorhanden. Deze problematiek wordt verder uitgewerkt bij het toepassen van neurale netwerken als foutencorrector.

Omdat er altijd een zekere afhankelijkheid tussen de verklarende variabelen zal zijn, bestaat ook altijd het gevaar van schijnafhankelijkheid. Om na te gaan of hier sprake van is, moet een nieuw model gevalideerd worden met een dataset die niet voor de calibratie is gebruikt. Zonder validatie is er geen inzicht in de prestaties van een model voor situaties anders dan die in de voor de calibratie gebruikte dataset. Aan de andere kant is het wel wenselijk een model voor een zo lang mogelijke datareeks af te regelen, zodat hiermee zoveel mogelijk informatie in de black box wordt meegegeven. Inherent aan het splitsen van de beschikbare set gegevens in een deel voor calibratie en een deel voor validatie, is dat niet alle informatie kan worden gebruikt om een model te calibreren. Het zekerheid hebben over niet merkbaar aanwezig zijn van schijnafhankelijkheid en toch alle beschikbare gegevens gebruiken om te calibreren, zijn op het eerste gezicht tegenstrijdig. Bij het onderzoek naar verbeteringen van Model Lobith is als uitgangspunt gekozen dat wanneer duidelijk is dat er tussen geselecteerde verklarende variabelen en de te verklaren variabelen geen schijnverbanden bestaan, de modelparameters voor de gehele beschikbare datareeks gecaliibreerd kunnen worden. Het huidige Model Lobith heeft bijvoorbeeld in de praktijk, voor situaties waarvoor niet gecaliibreerd was, bewezen dat de geselecteerde verklarende variabelen tot goede resultaten leiden. Bij de hercalibratie is dan ook geen aparte dataset voor de validatie gebruikt. Voor nieuwe modellen, zoals een apart deelmodel voor hoge afvoeren en de neurale netwerken is deze praktijkervaring niet beschikbaar en is in eerste instantie wel gewerkt met afzonderlijke datasets voor calibratie en validatie.

3 Heralibratie Model Lobith

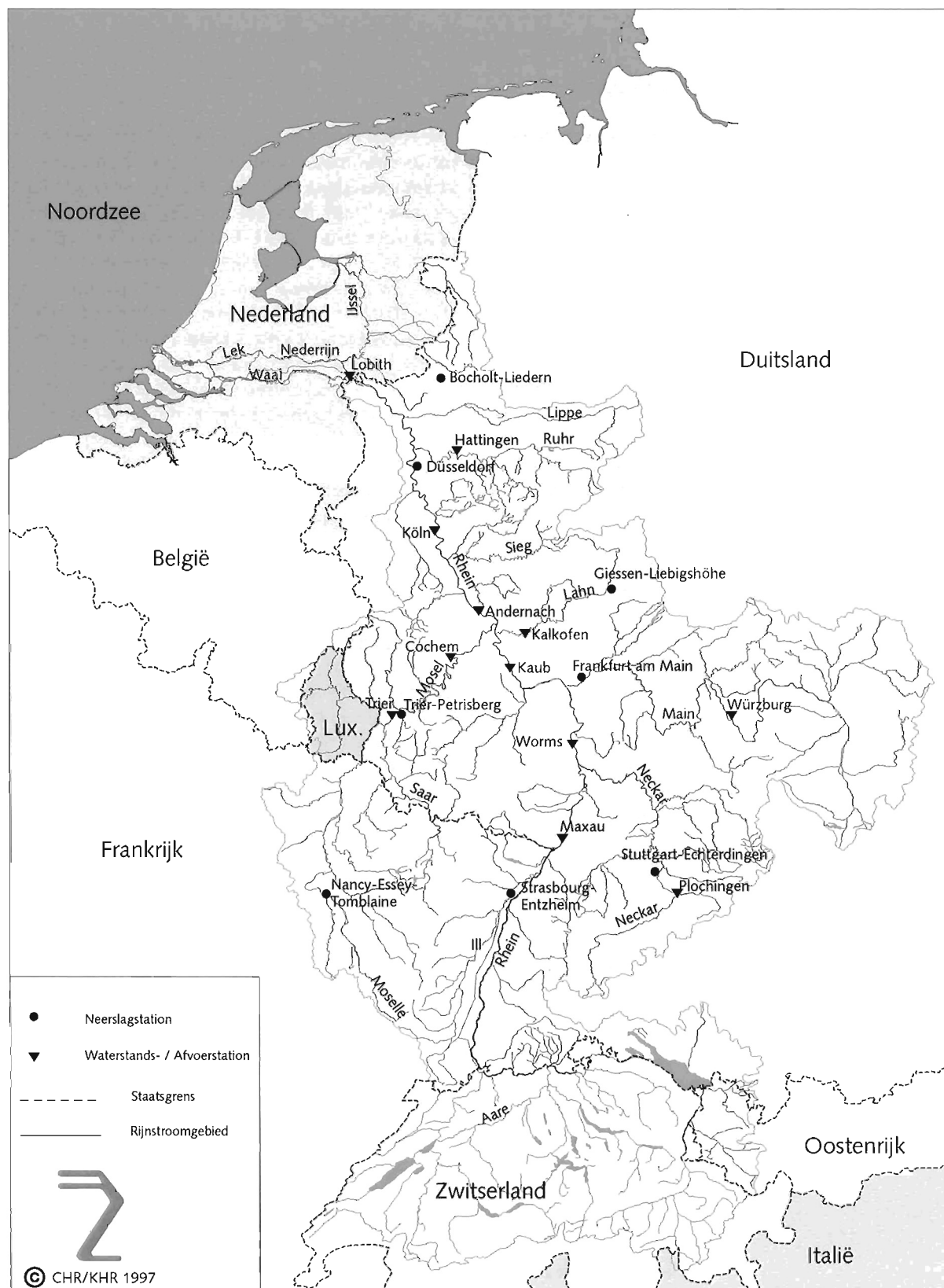
3.1 Aanpak

Het doel van de hercalibratie is een model te krijgen dat met de meest recente data is geijkt: een 'up-to-date' model. Concreet betekent dit dat de calibratie periode, gebruikt door Van den Eertwegh (1992) is verlengd met de periode 1990 tot en met maart 1995. Door Van den Eertwegh was een calibratie uitgevoerd met data voor de periode 1-1-1982 t/m 30-11-1990 (waterstandsmodellen) en 1-1-1982 t/m 31-12-1989 (afvoermodel). De hercalibratie is gedaan voor de twee deelmodellen gebaseerd op waterstanden ($H \leq 10.00$ m en $H > 10.00$ m) en het deelmodel gebaseerd op afvoeren ($Q \geq 2300$ m³/s). De hercalibratie is vergelijkbaar met Van den Eertwegh uitgevoerd. De dataverwerking en hercalibratie hebben plaats gevonden met behulp van de software pakketten Excel 7.0 en SPSS 7.0. Het is de verwachting dat de voorspellingen verbeteren, omdat met een langere calibratieset de regressiecoëfficiënten beter bepaald kunnen worden. Maar omdat een langere dataset over het algemeen leidt tot een grotere standaardafwijking van de voorspelfout en ook de range van de te voorspellen waterstanden en invoergegevens toeneemt, hoeft een hercalibratie niet automatisch tot nauwkeuriger voorspellingen te leiden. De hercalibratie leidt wel tot een grotere range van situaties waarvoor het model gecalibreerd is. De range waarvoor het model "geldig" is, neemt dus toe.

Model Lobith gebruikt als invoergegevens waterstanden (H), gemeten neerslagen (P) en neerslagvoorspellingen (P-VSP). Afvoergegevens (Q) worden afgeleid uit de waterstanden middels afvoer-waterstandsrelaties. In figuur 3.1 is een overzicht gegeven van de gebruikte meetpunten. Een eerste keuze van de meetpunten is door Promes (1987) gemaakt, op basis van stapsgewijze regressie, uit de veel grotere verzameling van meetpunten waarvoor binnen de Dagelijkse Berichtgeving (DB) gegevens worden verzameld. Door Van den Eertwegh (1992) is bij de hercalibratie uitgegaan van dezelfde stations als door Promes, maar zijn een tweetal afvoerstations wegens onbetrouwbare Q(H)-relaties vervangen. Daarnaast is nogmaals een stapsgewijze regressie uitgevoerd waardoor in de regressievergelijkingen nog een aantal variabelen is geëlimineerd. De selectie van Van den Eertwegh is het uitgangspunt voor deze hercalibratie. De datasets zoals verzameld door Van den Eertwegh zijn daartoe aangevuld met gegevens van de Bundesanstalt für Gewässerkunde en van het KNMI. De aanvullingen zijn gecontroleerd op eventuele fouten.

Gegevens van neerslagvoorspellingen zijn in navolging van Van den Eertwegh afgeleid uit gemeten neerslagen. Als voorspellingen voor het noordelijke deel van het Rijngebied worden de gemiddelde dagsommen van de stations Bochocht-Liedern, Düsseldorf en Giessen-Liebigshöhe gebruikt. Voor het zuidelijke deel worden de gemiddelde dagsommen van de stations Nancy-Essey/-Tomblaine, Strasbourg-Entzheim en Stuttgart-Echterdingen gebruikt. De gecombineerde stations zijn onderling niet sterk gecorreleerd (bijlage 1) en zijn daardoor geen goede weerspiegeling van de gevallen neerslag in het noordelijk respectievelijk zuidelijk deel van het stroomgebied. Een betere methode is echter niet direct voorhanden en op deze manier wordt wel een indruk verkregen of het "nat" of "droog" is in het stroomgebied.

.....
Figuur 3.1
 Waterstands-/afvoer- en neerslagstations gebruikt door Model Lobith



De verlengde reeks van 01-01-1982 tot en met 30-03-1995 is in zijn geheel als calibratiereeks gebruikt om zo goed mogelijk de regressiecoëfficiënten te kunnen schatten (zie 2.5). De kwaliteit na de hercalibratie is beoordeeld door voor de gehele reeks de voorspelfouten of residuen (gemeten minus voorspelde afvoer c.q. waterstand) van de MLR-modellen voor en na hercalibratie te vergelijken. Hierbij is gekeken naar statistische karakteristieken van de werkelijke residuen voor de gehele dataset, zoals gemiddelde, mediaan, maximale over- en onderschattingen. In aanvulling op Van den Eertwegh is ook naar de absolute residuen gekeken voor wat betreft gemiddelde, mediaan, standaardafwijking en de 95% en 99% intervallen op basis van de cumulatieve verdeling. Verder zijn de residuen van het deelmodel dat gebaseerd is op afvoeren ook geanalyseerd op basis van waterstanden. Immers, de gewenste nauwkeurigheid van Model Lobith is in cm waterstand uitgedrukt (zie tabel 2.1). Dit is gedaan door zowel de gemeten als voorspelde afvoer, met een relatie tussen waterstand en afvoer, naar waterstanden om te rekenen en vervolgens de waterstandsresiduen te bepalen.

Analoog aan Van den Eertwegh is de hercalibratie van de MLR-modellen uitgevoerd in twee stappen. De stappen zijn gescheiden om de invloed van neerslagvoorspellingen op de verwachte waterstanden te kunnen onderzoeken.

1. stapsgewijze meervoudige lineaire regressie met gemeten waterstanden, afvoeren en neerslagen ter berekening van een voorspelling;
2. bijstelling van de onder stap 1. gemaakte voorspelling met behulp van neerslagvoorspellingen voor het noordelijke en zuidelijke gedeelte van het Rijnstroomgebied.

Een analyse van de gegevens van de stations uit de selectie van Van den Eertwegh laat zien dat een aantal van de gekozen stations nog steeds multicollineariteit vertoont (bijlage 1). Dit betekent dat de onafhankelijke variabelen in de regressievergelijking niet onafhankelijk genoeg zijn. Vanwege de aard van de gebruikte variabelen zou dit ook hoogst opmerkelijk zijn. Neerslag over een gebied als het Rijnstroomgebied zal altijd gecorreleerd zijn en de afvoeren dus ook. Om deze multicollineariteit verder terug te brengen en dus variabelen te elimineren, is opnieuw een stapsgewijze regressie uitgevoerd met als regressiecriteria: tolerantie=0,01, $P_{in}=0,05$ en $P_{uit}=0,10$. Dit heeft tot gevolg dat in een aantal vergelijkingen variabelen verdwijnen. Verder terugbrengen van gecorreleerde variabelen zou kunnen door een volgende stapsgewijze regressie uit te voeren met een hogere tolerantie. Het effect hiervan is door Van den Eertwegh (1992) onderzocht. Een tolerantie van 0,10 leidde tot een reductie van het aantal variabelen, echter, de voorspelresultaten werden er niet beter van. Daarom is er hier van af gezien opnieuw stapsgewijze regressie met een hogere tolerantie uit te voeren.

3.2 Resultaten

De hercalibratie is uitgevoerd voor de gehele periode van 1982 tot en met maart 1995. Bij het analyseren van de modelresultaten is onderscheid gemaakt tussen de periode 1982 tot en met 1987 en 1988 tot en met maart 1995. De eerste periode met relatief weinig extremen, de tweede periode met de grote hoogwaters, maar ook met enkele laagwaterperiodes in het begin van de jaren negentig. De resultaten van Model Lobith voor en na de hercalibratie en de nieuwe modelcoëfficiënten zijn per deelmodel

weergegeven in de bijlagen 2 t/m 4. In de tabellen zijn de karakteristieken van de residuen voor de verschillende deelmodellen weergegeven voor en na de hercalibratie, zowel zonder (stap 1) als met (stap 2) neerslagvoorspelling als input. Bij de beoordeling van de kwaliteit van de voorspellingen na hercalibratie is met name gekeken naar het percentage voorspellingen dat met de gewenste nauwkeurigheid wordt berekend, de standaardafwijking van de absolute residuen en de maximale over- en onderschatting. Om de resultaten van de stapsgewijze regressie te kunnen vergelijken met de door Van den Eertwegh uitgevoerde analyse zijn de standaardafwijkingen gegeven van de residuen voor zowel de oude als de nieuwe (gehercalibreerde) deelmodellen voor de perioden 1982-1990 (calibratieperiode Van den Eertwegh) en 1982-1995 (verlengde calibratieperiode). Er is gekozen voor de standaardafwijking van de werkelijke residuen omdat bij de stapsgewijze regressie de regressieparameters op deze waarde worden geoptimaliseerd. Hiervan uitgaande kunnen er een aantal controles worden uitgevoerd, waarbij de verschillende standaardafwijkingen worden aangeduid als S_{oud}^{82-90} , S_{nieuw}^{82-90} , S_{oud}^{82-95} en S_{nieuw}^{82-95} . Zo is het zeer waarschijnlijk dat $S_{oud}^{82-90} < S_{oud}^{82-95}$. Immers, het is zeer onwaarschijnlijk dat een model beter presteert voor een dataset waarop het niet gecalibreerd is. Een absolute voorwaarde is dat $S_{oud}^{82-90} < S_{nieuw}^{82-90}$. Door de stapsgewijze regressie is het oude model per definitie het beste model voor de dataset waarop het gecalibreerd is; het nieuwe model kan voor deze dataset niet beter presteren. Om dezelfde reden moet ook gelden dat $S_{nieuw}^{82-95} < S_{oud}^{82-95}$.

Hercalibratie waterstandsmodellen

De hercalibratie van het deelmodel voor lage waterstanden ($H \leq 10.00$ m) leidt tot een geringe aanpassing van de modelcoëfficiënten. Het aantal gebruikte variabelen wordt als gevolg van de stapsgewijze regressie voor de eerste dag met drie gereduceerd. Voor de tweede dag verdwijnt er één variabele, voor de derde dag en vierde dag blijven de waterstands- en neerslagstations ongewijzigd. Voor de derde dag verdwijnt echter één van de variabelen uit de neerslagvoorspelling. In tabel 3.1 is het percentage voorspellingen met de gewenste nauwkeurigheid voor en na de hercalibratie gegeven, voor de gehele calibratieperiode. Stap 1 is de voorspelling zonder, stap 2 de voorspelling met neerslagverwachting. Voor de eerste en tweede dag voorspelling levert het model gelijkblijvende tot iets betere resultaten op. In tabel 3.2 zijn de standaardafwijkingen van de werkelijke residuen gegeven voor het deelmodel voor en na hercalibratie en voor de respectievelijke calibratieperiodes. Aan de in de bovenstaande alinea genoemde voorwaarden wordt in alle gevallen voldaan. Bijlage 2 laat zien dat de standaardafwijking van de absolute residuen niet of marginaal verandert en in het algemeen iets afneemt. De maximale onder- en overschattingen veranderen eveneens slechts in geringe mate. De verschillen voor de twee onderscheiden periodes zijn zeer gering. De voorspellingen voor de derde en vierde dag blijven gelijk of worden zelfs iets slechter, zeker voor de periode 1982 t/m 1987. De verbetering van de voorspellingen door het gebruik van neerslagverwachtingen blijft beperkt.

Tabel 3.1
Percentage voorspellingen dat met gewenste nauwkeurigheid is berekend, voor de periode 1982 tot en met maart 1995, berekend met deelmodel voor lage waterstanden ($H \leq 10.00$) vóór (versie Van den Eertwegh) en na hercalibratie. Stap 1 geeft percentage weer voor voorspelling zonder en stap 2 voor die met neerslagverwachting.

Zichttijd in dagen gewenste nauwkeurigheid [cm]	1 5		2 15		3 20		4 25	
	voor	na	voor	na	voor	na	voor	na
Stap 1 [%]	83	84	91	92	85	86	76	79
Stap 2 [%]			94	94	86	86	80	81

Tabel 3.2
Standaardafwijking van de residuen in cm, berekend met deelmodel voor hoge waterstanden ($H \leq 10.00$ m) voor de periodes 1982-90 (calibratieperiode Van den Eertwegh) en 1982-1995 (verlengde calibratieperiode). Model oud is het model voor hercalibratie (versie Van den Eertwegh), model nieuw is het model na hercalibratie. Voorspellingen zijn inclusief neerslagverwachting.

Zichttijd in dagen	1 82-90 82-95		2 82-90 92-95		3 82-90 82-95		4 82-90 82-95	
model oud	3,7	4,5	7,2	9,3	16,2	18,6	27,8	28,7
model nieuw	4,1	4,4	8,1	9,1	17,0	18,6	28,3	28,7

De hercalibratie van het waterstandsmodel $H > 10.00$ m leidt ook tot een geringe aanpassing van de modelcoëfficiënten. Voor de eerste dag verdwijnt één van de twee neerslagvariabelen uit het model, terwijl voor de tweede dag voorspelling alle twee de neerslagstations na hercalibratie zijn verdwenen. Het aantal variabelen voor de derde dag voorspelling vermindert met 1 en blijft voor de vierde dag gelijk. De orde grootte van de modelcoëfficiënten verandert niet spectaculair. De resultaten van de hercalibratie wat betreft het percentage goede voorspellingen zijn weergegeven in tabel 3.3. De tabel laat zien dat de verbetering maximaal 1% bedraagt. Ook in de andere statistische karakteristieken van de residuen verandert weinig (zie bijlage 3). De gemiddelde fout neemt iets af en ook de standaardafwijking wordt over het algemeen kleiner. De maximale over- en onderschattingen blijven hoog. De voorspellingen worden niet slechter na de hercalibratie, maar van een verbetering is ook geen sprake. In tabel 3.4 is te zien dat de standaardafwijking van de deelmodellen voor en na hercalibratie in alle gevallen voldoet aan de in de eerste alinea van dit hoofdstuk genoemde eisen.

Tabel 3.3
Percentage voorspellingen dat met gewenste nauwkeurigheid is berekend, voor de periode 1982 tot en met maart 1995, berekend met deelmodel voor hoge waterstanden ($H > 10.00$) vóór (versie Van den Eertwegh) en na hercalibratie. Stap 1 geeft percentage weer voor voorspelling zonder en stap 2 voor die met neerslagverwachting.

Zichttijd in dagen gewenste nauwkeurigheid [cm]	1 10		2 15		3 20		4 40	
	voor	na	voor	na	voor	na	voor	na
Stap 1 [%]	95	95	78	77	53	52	73	73
Stap 2 [%]			80	81	56	57	81	81

Tabel 3.4
Standaardafwijking van de residuen in cm, berekend met deelmodel voor hoge waterstanden ($H > 10.00$ m) voor de periodes 1982-90 (calibratieperiode Van den Eertwegh) en 1982-1995 (verlengde calibratieperiode). Model oud is het model voor hercalibratie (versie Van den Eertwegh), model nieuw is het model na hercalibratie. Voorspellingen zijn inclusief neerslagverwachting.

Zichttijd in dagen	1 82-90 82-95		2 82-90 92-95		3 82-90 82-95		4 82-90 82-95	
model oud	5,4	6,7	12,0	14,1	26,3	29,1	32,6	35,5
model nieuw	5,6	6,5	12,7	13,8	26,8	28,8	33,6	35,2

Hercalibratie Q-model ($Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$)

Voor het model voor afvoeren $\geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$ leidt de hercalibratie tot een grotere wijziging van de modelcoëfficiënten dan bij de waterstandsmo-
dellen. Met name de coëfficiënten voor de neerslagstations worden wezen-
lijk groter. Bij de eerste dag voorspelling wordt één neerslagstation geëlimi-
neerd, voor de vierde dag voorspelling verdwijnen er twee afvoerstations.
De karakteristieken van de residuen van het model voor en na hercalibratie
zijn opgenomen in bijlage 4. De hercalibratie leidt voor de eerste en tweede
dag voorspelling tot positieve resultaten, zie ook tabel 3.5. Het percentage
goede voorspellingen wordt iets groter. De gemiddelde fout, de standaard-
afwijking en de 95% en 99% intervallen verbeteren eveneens iets. De
maximale fouten worden iets kleiner maar blijven hoog. Voor de derde en
vierde dag voorspelling neemt het percentage goede voorspellingen zelfs
af. De standaardafwijking van de residuen voldoet aan de eisen zoals be-
schreven in de eerste alinea van dit hoofdstuk. Om te onderzoeken in welk
afvoertraject winst wordt geboekt, zijn de residuen opgesplitst in afvoerin-
tervallen van $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Het resultaat van deze analyse is opgenomen in
bijlage 5. Hieruit blijkt dat de hercalibratie voor afvoeren lager dan 3500
 m^3/s nauwelijks effect heeft. De verbetering wordt echter groter naarmate
de afvoer toeneemt. De meeste winst wordt geboekt in het afvoertraject
tussen 4000 en $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. De algehele verbetering is echter gering.

Tabel 3.5
Percentage voorspellingen dat met de
gewenste nauwkeurigheid is berekend,
voor de periode 1982 tot en met maart
1995, berekend met deelmodel voor af-
voeren ($Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$) vóór (versie
Van den Eertwegh) en na hercalibratie.
Stap 1 geeft percentage weer voor
voorspelling zonder en stap 2 voor die
met neerslagverwachting.

Zichttijd in dagen	1		2		3		4	
gewenste nauwkeurigheid [cm]	10		15		20		40	
	voor	na	voor	na	voor	na	voor	na
Stap 1 [%]	88	90	80	82	64	63	74	72
Stap 2 [%]		83		68		88		77

Tabel 3.6
Standaardafwijking van de residuen in
 m^3/s , berekend met deelmodel voor
hoge waterstanden ($Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$)
voor de periodes 1982-89 (calibratiepe-
riode Van den Eertwegh) en 1982-1995
(verlengde calibratieperiode). Model
oud is het model voor hercalibratie
(versie Van den Eertwegh), model
nieuw is het model na hercalibratie.
Voorspellingen zijn inclusief neerslag-
verwachting.

Zichttijd in dagen	1		2		3		4	
	82-89	82-95	82-89	92-95	82-89	82-95	82-89	82-95
model oud	56,1	71,1	79,8	128,3	214,8	256,1	307,5	394,2
model nieuw	60,9	62,5	113,3	118,9	231,1	251,4	345,2	379,1

3.3 Conclusies

De hercalibratie leidt niet tot grote verbeteringen van de voorspellingen
van Model Lobith. Het algemene beeld van goede resultaten voor de eer-
ste twee dagen en matige resultaten voor de derde en vierde dag blijft be-
staan. Voor de ongestuwde situatie presteert het deelmodel gebaseerd op
afvoeren iets beter dan het model gebaseerd op waterstanden. Het water-
standen deelmodel heeft geen meerwaarde en komt als operationeel deel-
model te vervallen.

4 Calibratie deelmodel voor hoge afvoeren; ≥ 5000 m³/s

4.1 Inleiding

Gezien het grote belang van goede voorspellingen tijdens hoogwater is de meerwaarde van een afzonderlijk deelmodel voor hoge afvoeren onderzocht. Tijdens een hoogwatersituatie gedragen de hydrologische processen zich anders dan in een normale afvoersituatie. Het stroomgebied is over grote delen verzadigd en gevallen neerslag komt snel tot afvoer. In het huidige Model Lobith ligt een splitsing in deelmodellen bij de jaargemiddelde afvoer van ongeveer 2300 m³/s. Er zijn geen aparte deelmodellen voor hoge afvoeren. De prestaties van het huidige deelmodel voor afvoeren boven de 2300 m³/s, voor situaties met een afvoer groter dan 5000 m³/s zijn in tabel 4.1 samengevat. De tabel bevat de voorspelresiduen voor en na hercalibratie, zoals beschreven in hoofdstuk 3. Vergelijking met tabel 3.3 laat zien dat de resultaten van dit deelmodel voor afvoeren boven 5000 m³/s, beter zijn dan voor de gehele range van afvoeren boven 2300 m³/s (zie ook bijlage 5). De hercalibratie met gegevens van de recente hoogwaters leidt tot een duidelijke verbetering van de voorspellingen bij hoge afvoeren. De gemiddelde fout, de standaardafwijking en de maximale fout worden allemaal kleiner. Het percentage voorspellingen dat aan de gestelde eis voldoet neemt voor een zichttijd tot drie dagen toe. Echter, ondanks de verbeteringen, wordt aan de gestelde kwaliteitseisen van tabel 2.1 nog niet voldaan.

Tabel 4.1
Karakteristieken residuen van het deelmodel voor afvoeren ≥ 2300 m³/s, berekend voor de periode 1982 t/m maart 1995, voor dagen met een afvoer ≥ 5000 m³/s, vóór (versie Van den Eertwegh) en na hercalibratie. Voorspellingen voor 2°, 3° en 4° dag inclusief neerslagvoorspelling.

Residuen		1 dag vooruit		2 dagen vooruit		3 dagen vooruit		4 dagen vooruit	
		Q	H	Q	H	Q	H	Q	H
		[m³/s]	[cm]	[m³/s]	[cm]	[m³/s]	[cm]	[m³/s]	[cm]
aantal		223							
gem. abs. waarde	voor	93	5,8	142	9,2	270	18,0	374	26,3
	na	72	4,3	130	8,3	255	16,9	370	25,6
std.dev. abs. waarde	voor	78	4,5	142	8,5	263	14,3	429	24,0
	na	70	3,6	138	7,5	245	13,0	362	20,5
maximum waarde (-)	voor	304	21	475	33	1011	54	1252	75
	na	249	16	552	29	810	45	988	66
maximum waarde (+)	voor	376	23	946	54	1998	76	3685	185
	na	371	15	907	44	1925	73	2598	119
binnen gestelde eis [%]	voor		85		83		61		81
	na		93		85		72		81

Een apart deelmodel is afgeleid voor afvoeren hoger dan 5000 m³/s. Een dergelijke afvoer wordt gemiddeld ongeveer 15 dagen per jaar overschreden. De officiële Hoogwaterberichtgeving begint wanneer een waterstand te Lobith van NAP+14.00 m (afvoer van ca. 6000 m³/s; komt gemiddeld 6 keer per jaar voor) wordt overschreden en een verdere stijging tot boven NAP+15.00 m (afvoer van ca. 8000 m³/s; komt gemiddeld 1 keer per jaar voor) wordt verwacht. Er zijn ook modellen gecalibreerd voor nog hogere drempels, maar het aantal beschikbare waarnemingen om te calibreren neemt sterk af bij een toenemend afvoerniveau.

4.2 Aanpak

Bij het ontwikkelen van een nieuw deelmodel, specifiek voor hoge afvoeren, kan niet worden teruggevallen op eerdere calibraties en ervaringen uit de praktijk. Zoals in 2.5 al is aangegeven, is er dan zonder afzonderlijke validatie geen inzicht in de prestaties van het model voor situaties buiten de calibratiereeks. Daarom is de beschikbare datareeks opgesplitst in een calibratie- en een validatieset. Met de calibratieset is vervolgens met het programma SPSS versie 7.0 stapsgewijze regressie uitgevoerd met als regressie-criteria: tolerantie=0,01, $P_{in}=0,05$ en $P_{uit}=0,10$. De calibratie is analoog aan hoofdstuk 3 in twee stappen uitgevoerd. In de eerste stap zijn de afvoer- en neerslagstations geselecteerd en de regressiecoëfficiënten voor de geselecteerde stations geoptimaliseerd. In een tweede stap zijn de (statistisch) van belang zijnde neerslagvoorspellingen geselecteerd en de daarbij behorende regressiecoëfficiënten bepaald. Het aldus gecalibreerde model is vervolgens gevalideerd.

Bij het analyseren van de modelresultaten voor de calibratie en de validatie datasets is naast de in de vorige hoofdstukken genoemde statistische criteria (gemiddelde, mediaan, standaardafwijking, etc.) tevens gekeken naar de wijze waarop de reeks van residuen is verdeeld om na te gaan of de resultaten uit de calibratie niet teveel afwijken van die van de validatie. Hier toe zijn met behulp van het programma SPSS de parameters skewness en kurtosis bepaald (SPSS, 1996). Met name de skewness is interessant om te onderzoeken in hoeverre de betreffende verdeling symmetrisch is. Een hoge positieve waarde duidt op scheefheid naar de positieve kant, een negatieve waarde naar de negatieve kant. Een optimale waarde ligt in de buurt van 0. De kurtosis geeft aan in hoeverre de vorm van de verdeling afwijkt van de standaard normale Gauss kromme; een hoge positieve waarde betekent een brede en platte kromme met een grote range van waarden, een hoge negatieve waarde een smalle en spitse kromme met veel waarden rond het gemiddelde.

4.3 Resultaten

Calibratie en validatie

In eerste instantie is een verdeling gemaakt door de gehele dataset te splitsen in min of meer vergelijkbare periodes, met zowel in de calibratie- als in de validatieset jaren met enkele grote hoogwaters. Dit resulteerde in de volgende verdeling:

1. Calibreren voor de jaren 1982 t/m 1984 en 1991 t/m 1994, valideren voor de jaren 1985 t/m 1990 en 1995
2. Calibreren voor de jaren 1985 t/m 1990 en 1995, valideren voor de jaren 1982 t/m 1984 en 1991 t/m 1994

In beide gevallen leidde de calibratie tot een deelmodel voor hoge afvoeren ($5000 \text{ m}^3/\text{s}$) dat goede voorspellingen opleverde, zie tabel 4.2. Echter, de validatie leverde veel minder goede resultaten op. De calibratie geeft over het algemeen een goede verdeling van de residuen. De mediaan en het gemiddelde liggen in de buurt van 0, de skewness is niet al te groot. Het percentage residuen dat voldoet aan de gestelde eis is over het algemeen hoger dan bij het $Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$ deelmodel. De residuen van de validatie zijn echter duidelijk anders verdeeld, het gemiddelde en de mediaan schieten in de meeste gevallen naar de positieve kant door. Het percentage voorspellingen dat voldoet aan de gestelde eis neemt sterk af. Voor de der-

de en vierde dag voorspelling treedt soms bijna een halvering van dit percentage op ten opzichte van de calibratie. In bijlage 6 is een grafische weergave van de cumulatieve verdeling van de residuen van zowel de calibratie- als de validatieset opgenomen. Het grote verschil tussen calibratie en validatie wordt hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door schijn correlatie. Voor de calibratie dataset worden “onzin”-verbanden tussen variabelen gelegd, die in de validatie dataset dan ook niet terug te vinden zijn. Een extra onderbouwing van het optreden van schijn correlatie is dat er voor de beide calibraties heel verschillende regressievariabelen worden geselecteerd. Zo worden bij calibratie (a) voor de 3^e dag voorspelling 13 afvoervariabelen geselecteerd en in calibratie (b) maar 7. De invloed van de gevallen neerslag is in het ene geval zeer groot (9 variabelen voor de 2^e dag voorspelling in calibratie (a) en in het andere geval te verwaarlozen (4 stations voor de 2^e dag voorspelling in calibratie (b)). Een belangrijke oorzaak voor dit probleem is dat de gekozen verdeling van de dataset niet tot een vergelijkbare calibratie en validatie dataset heeft geleid. Om een goed deelmodel voor hoge afvoeren te kunnen afleiden is dat wel een vereiste.

Tabel 4.2

Karakteristieken van de residuen (in cm) voor twee deelmodellen voor afvoeren $\geq 5000\text{ m}^3/\text{s}$, calibratie (cal) voor de periode 1982-84 en 1991-94 en validatie (val) voor de periode 1985-90 en jan.-mrt. 1995 [(a)] en calibratie voor de periode 1985-90 en jan.-mrt. 1995 en validatie voor de periode 1982-84 en 1991-94 [(b)]. Voorspellingen voor 2^e, 3^e en 4^e dag inclusief neerslagvoorspelling.

calibratie		(a)				(b)			
zichttijd [dagen]		1	2	3	4	1	2	3	4
aantal residuen	cal.	115				108			
	val.	108				115			
gemiddelde [cm]	cal.	0	0	0	0	0	0	0	0
	val.	19	20	21	20	3	-1	-1	-5
gem. abs. waarde [cm]	cal.	3	4	9	18	11	12	13	15
	val.	20	21	24	27	7	10	20	31
mediaan	cal.	0	0	-1	2	0	0	-1	2
	val.	1	7	13	8	3	-1	-1	-8
std.dev. abs. waarde [cm]	cal.	2	4	8	17	3	5	10	14
	val.	5	9	20	34	6	8	16	27
maximum waarde (-) [cm]	cal.	8	15	39	75	12	19	37	51
	val.	25	36	50	98	25	39	71	98
maximum waarde (+) [cm]	cal.	10	15	46	104	12	23	51	65
	val.	23	42	94	168	30	31	67	152
binnen gestelde eis [%]	cal.	100	100	93	91	97	91	85	91
	val.	82	71	46	52	82	80	61	68
skewness	cal	0,243	0,015	0,197	0,544	-0,309	0,088	0,432	0,024
	val.	-0,074	-0,202	0,252	0,378	0,142	-0,018	0,083	0,547
kurtosis	cal.	0,092	0,014	1,678	2,854	0,398	-0,335	0,501	-0,634
	val.	0,151	0,425	0,294	0,311	1,880	0,208	0,433	1,495

Om een calibratie- en een validatieset met een vergelijkbare samenstelling te selecteren, is aan alle dagen met een afvoer boven de $5000\text{ m}^3/\text{s}$ van de totale beschikbare dataset 1982 t/m maart 1995 om en om de nummers 0 en 1 toegekend. Met de aldus verkregen verdeling in “even” en “oneven” dagen zijn twee calibratie- en validatiesets gemaakt, calibreren met de “1” dagen en valideren met de “0” dagen en andersom. Het gevaar van deze verdeling van de dagen in een calibratie- en een validatieset is dat de dagen als “losse” gebeurtenis worden beschouwd. Het is best denkbaar dat de hoogste afvoerpieken eerder gebeurtenis-georiënteerd zijn. Dus bijvoorbeeld dat slechts bij extreme hoogwaters de afvoeren van de Neckar belangrijk zijn en bij andere in mindere mate. Een hoogwater op de Rijn heeft echter over het algemeen een duur van 2 tot soms wel 3 weken, zodat vrijwel altijd zowel in de calibratie- als in de validatieset een deel van deze ge-

beurtenis is opgenomen. Op deze manier moet het dus toch mogelijk zijn een hoogwater te reproduceren. De resultaten van de met deze datasets ontwikkelde deelmodellen voor afvoeren groter dan 5000 m³/s zijn weer-gegeven in tabel 4.3.

De verschillen tussen calibratie en validatie zijn in beide gevallen minder groot dan voor de calibraties (a) en (b). Voor de validatie zijn de residuen ook meer volgens een zelfde patroon verdeeld. Het gemiddelde en de mediaan van de werkelijke residuen liggen dicht bij 0 (zie bijlage 6). De maximale afwijkingen en de 95% en 99% intervallen blijven aan de hoge kant. De parameters skewness en kurtosis van de residuen uit de calibratie en de validatie dataset zijn meer met elkaar in evenwicht. Een grafische weergave van de cumulatieve verdeling van de residuen is opgenomen in bijlage 6. De keuze van de regressievariabelen (de stations) is, zeker voor de stations met een hoge significantie, voor beide calibraties vergelijkbaar. De verdeling in even en oneven dagen heeft geleid tot redelijk representatieve calibratie- en validatiesets waardoor de verschijnselen die duiden op schijn correlatie niet of nauwelijks optreden. Dit geeft vertrouwen in de afgeleide deelmodellen.

calibratie		(c) : "1" dagen				(d) : "0" dagen				
zichttijd [dagen]		1	2	3	4	1	2	3	4	
aantal residuen		cal.	111				112			
		val.	112				111			
Tabel 4.3 Karakteristieken van de residuen (in cm) voor twee deelmodellen voor afvoeren $\geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$, calibratie (cal) voor oneven ("1") en validatie (val) voor even ("0") dagen [(c)] en calibratie voor even ("0") en validatie voor oneven ("1") dagen [(d)], beide voor de periode 1982 t/m maart 1995. Voorspellingen voor 2 ^e , 3 ^e en 4 ^e dag inclusief neerslagvoorspelling.	gemiddelde	cal.	1	0	0	0	1	0	-5	21
		val.	0	-4	-1	-1	0	1	-6	11
	gem. abs. waarde [cm]	cal.	3	7	13	22	3	7	15	33
		val.	4	12	19	30	4	10	18	32
	mediaan	cal.	1	-1	2	-1	0	0	-3	18
		val.	0	-3	1	-3	0	1	-6	4
	std.dev. abs. waarde [cm]	cal.	3	6	10	18	3	5	13	30
		val.	3	11	19	22	4	8	16	32
	maximum waarde (-) [cm]	cal.	18	26	51	90	11	29	90	90
		val.	12	62	113	112	18	47	99	78
maximum waarde (+) [cm]	cal.	10	25	46	65	11	19	37	192	
	val.	22	33	60	86	18	39	65	249	
binnen gestelde eis[%]	cal.	99	89	82	87	97	90	75	71	
	val.	95	73	69	74	92	79	68	70	
skewness	cal.	-0,686	0,242	-0,149	-0,087	0,356	-0,084	-0,755	1,017	
	val.	0,869	-0,667	-0,984	0,059	-0,041	-0,177	-0,535	1,577	
kurtosis	cal.	2,901	0,290	0,601	0,266	-0,004	0,455	2,422	3,344	
	val.	2,889	1,562	2,707	-0,131	0,879	1,281	2,480	6,925	

5000+ model

Met de regressievariabelen zoals voor de calibraties met de "even" (d) en "oneven" (c) dagen zijn afgeleid is vervolgens een hercalibratie uitgevoerd om tot een geoptimaliseerd deelmodel voor afvoeren groter dan 5000 m³/s te komen. Ervan uitgaande dat de beide calibraties gezamenlijk tot een betrouwbare modelsamenstelling (lees stationskeuze) zonder schijnafhankelijkheid hebben geleid, is voor de hercalibratie gekozen om, uitgaande van de stations die in de calibraties (c) en (d) zijn geselecteerd, de regressiecoëfficiënten te schatten voor de gehele beschikbare dataset van de periode 1982 t/m maart 1995 met afvoeren groter dan 5000 m³/s.

Een bijkomend voordeel van deze hercalibratie is dat het eventuele effect van het opsplitsen van de dataset in onafhankelijke dagen zo weer wordt opgeheven. De resultaten van dit geoptimaliseerde deelmodel voor afvoeren groter dan 5000 m³/s zijn samengevat in tabel 4.4.

De tabel laat voor de voorspellingen voor alle vier de dagen vergelijkbare resultaten zien als in tabel 4.3. Winstpunt is de afname van de grote afwijkingen die voorkwamen in de testset van met name calibratie (d). Vergeleken met het deelmodel voor afvoeren ≥ 2300 m³/s levert een afzonderlijk deelmodel voor hoge afvoeren vooral meerwaarde op voor de voorspellingen voor de derde dag. Het percentage residuen dat binnen de gewenste nauwkeurigheid valt, neemt met 10% toe. De eerste, tweede en vierde dag scoren een paar procent beter. Een cumulatieve verdeling van de residuen is opgenomen in bijlage 6. De relatief lage skewness duidt op een evenwichtige verdeling tussen positieve en negatieve residuen.

Tabel 4.4
Karakteristieken van de residuen voor het deelmodel voor afvoeren ≥ 5000 m³/s, hercalibratie van de regressiecoëfficiënten met de volledige dataset 1982 t/m maart 1995, voor de geselecteerde regressievariabelen (stations) uit de calibraties (c) en (d). Voorspellingen voor 2e, 3e en 4e dag inclusief neerslagvoorspelling.

zichttijd [dagen]	1	2	3	4
aantal residuen			223	
gem. abs. waarde [cm]	4	9	13	23
std.dev. abs. waarde [cm]	3	7	10	20
maximum waarde (-) [cm]	16	43	60	99
maximum waarde (+) [cm]	14	26	49	80
binnen gestelde eis [%]	97	84	82	83
skewness	0,252	-0,077	-0,226	0,023
kurtosis	0,492	0,431	1,031	0,324

Voor afvoeren ≥ 6000 m³/s - het niveau waarop de Hoogwaterberichtgeving begint (mits een verdere stijging tot boven 8000 m³/s wordt verwacht), is uit proefberekeningen gebleken dat met het beperkte aantal gegevens geen goed deelmodel kan worden afgeleid. Hoe goed is dan het nieuwe deelmodel voor afvoeren boven 5000 m³/s, na hercalibratie met de gehele dataset, het zogeheten 5000+ model, voor deze hoge afvoeren? Tabel 4.5 laat zien dat het 5000+ model het erg goed doet. Voor de reeks 1982 t/m maart 1995, waarin totaal 116 dagen met een afvoer ≥ 6000 m³/s voorkomen, zijn de voorspellingen voor de eerste en tweede dag in bijna 100% van de gevallen voldoende nauwkeurig. Ook voor de derde en vierde dag zijn de resultaten goed.

Tabel 4.5
Karakteristieken van de residuen van het 5000+ model voor afvoeren ≥ 6000 m³/s voor de dataset 1982 t/m maart 1995. Voorspellingen voor 2e, 3e en 4e dag inclusief neerslagvoorspelling.

zichttijd [dagen]	1	2	3	4
aantal residuen			116	
gem. abs. waarde [cm]	3	5	11	22
std.dev. abs. waarde [cm]	3	4	9	17
maximum waarde (-) [cm]	8	14	33	71
maximum waarde (+) [cm]	14	17	43	70
binnen gestelde eis [%]	98	99	83	87

In bijlage 8 is een overzicht gegeven van de resultaten van de diverse oude en nieuwe deelmodellen voor hoge afvoeren, voor en na hercalibratie voor de 4 belangrijkste hoogwaters uit de periode 1982 t/m maart 1995. Voor het hoogwater van 1983 geeft het bestaande deelmodel voor afvoeren groter dan 2300 m³/s de beste resultaten. Voor de overige hoogwaters is te zien dat de hercalibratie van het 2300 model op enkele uitzonderingen na tot een toename van het percentage goede voorspellingen leidt. De meerwaarde van het gebruik van een apart deelmodel voor afvoeren groter dan 5000 m³/s wordt hier echter duidelijk. Voor de hoogwaters van 1993 en

1995 leidt het 5000+ model in alle gevallen tot de beste resultaten, waarbij de verbeteringen t.o.v. het oude deelmodel voor afvoeren groter dan 2300 m³/s in een aantal gevallen spectaculair kan worden genoemd.

4.4 Conclusies

Een afzonderlijk deelmodel voor hoge afvoeren levert meerwaarde op ten opzichte van alleen een deelmodel voor afvoeren boven 2300 m³/s. De voorspellingen verbeteren voor alle dagen, waarbij met name de verbetering voor de derde dag aanzienlijk is. Op basis van het aantal beschikbare gegevens is gekozen voor een drempel van 5000 m³/s. Voor nog hogere drempels kunnen geen goede regressiemodellen worden afgeleid. Het 5000+ model geeft ook voor hogere afvoeren, boven de 6000 m³/s, goede resultaten. Het deelmodel voor afvoeren groter dan 5000 m³/s geeft voldoende goede resultaten om in het vervolg tijdens hoogwaters operationeel in te zetten.

5 Het hysteresis effect

5.1 Inleiding

Afvoeren worden berekend uit waterstanden met behulp van een afvoerwaterstandsrelatie. Zo'n $Q(H)$ -relatie wordt afgeleid uit afvoermetingen. Bij deze afvoermeting spelen een aantal onzekerheden een rol. Zo wordt het resultaat van de afvoerbepaling o.a. beïnvloed door de ijking van het meetinstrument, de beïnvloeding van de stroomsnelheid door het meetvaartuig, de manier waarop gemeten wordt en de wijze waarop de resultaten worden uitgewerkt (Teuber en Veraart, 1986) (Teuber, 1987). Deze invloeden kunnen tot een onnauwkeurigheid van ca. 3 % leiden (Botma en Struyk, 1973). Bij een hoogwater betekent dit een onnauwkeurigheid van 150 tot 350 m³/s. De $Q(H)$ -relatie geeft een gemiddeld verband weer. In de situatie van een afvoergolf geldt een dergelijk gemiddeld verband echter lang niet altijd omdat niet-stationaire effecten optreden. Aan de voorzijde, de stijgende tak, van de afvoergolf is de snelheid groter dan in de dalende tak. Vanwege deze hogere snelheid aan de voorzijde van de golf is daarom bij eenzelfde waterstand in een stijgend traject de afvoer hoger dan bij dalende waterstanden. Het verschil tussen de werkelijke en de met de $Q(H)$ -relatie bepaalde afvoer kan bij stijgende waterstanden voor Lobith oplopen tot meer dan 400 m³/s en bij dalende waterstanden tot zo'n 250 m³/s. Dit verschijnsel wordt het hysteresis effect genoemd. De breedte van de hysteresis-lus, of de spreiding tussen de afvoer in de stijgende en de dalende tak, is afhankelijk van het dwarsprofiel ter plaatse van het meetpunt. Naarmate het profiel ruimer wordt, neemt de spreiding toe.

Bij de input voor de op afvoeren gebaseerde deelmodellen van Model Lobith wordt met deze fout geen rekening gehouden. Waterstanden worden rechtstreeks met behulp van $Q(H)$ -relaties naar afvoeren vertaald, waarmee vervolgens regressieberekeningen worden uitgevoerd. De karakteristieke voorspelfouten van Model Lobith, zoals door Van den Eertwegh (1992) beschreven (onderschatting van stijgende takken en overschatting van dalende takken) duiden op de aanwezigheid van een hysteresis effect. Door rekening te houden met de fout in de $Q(H)$ -relatie als gevolg van dit hysteresis effect, kunnen de voorspellingen van Model Lobith mogelijk verbeteren. Voor het meetpunt Lobith is een verband bekend tussen de snelheid van stijgen respectievelijk dalen van de waterstand en de afwijking in de afvoer ten opzichte van de $Q(H)$ -relatie. Deze relatie is modelmatig afgeleid door Van der Veen et al. (1997) met het één-dimensionale waterbewegingsmodel SOBEK voor de Rijntakken en is weergegeven in tabel 5.1. Met de correctie voor Lobith volgens deze tabel is een afzonderlijk regressiemodel voor afvoeren ≥ 2300 m³/s afgeleid om na te gaan of het in beschouwing nemen van het hysteresis effect meerwaarde heeft voor de voorspellingen.

Tabel 5.1

Correctie afvoer, zoals afgeleid uit de Q(H)-relatie, voor het hysteresis effect, afhankelijk van de stijg- resp. daalsnelheid van de waterstand te Lobith volgens Van der Veen *et al.* (1997).

stijg-/daalsnelheid waterstand te Lobith [cm/dag]	afvoercorrectie [m ³ /s]
-60	-180
-59 t/m -36	-14
-35 t/m -12	-100
-12 t/m +12	0
+13 t/m .36	+20
+37 t/m +60	+80
+61 t/m +84	+130
+85 t/m +108	+180
+109 t/m +132	+240
+133 t/m +156	+290
+157 t/m +180	+340
> +180	+380

5.2 Aanpak

Om de eventuele meerwaarde van het hysteresis effect te kunnen analyseren is het bestaande deelmodel voor afvoeren groter dan 2300 m³/s opnieuw gecalibreerd, waarbij de afvoer voor Lobith is gecorrigeerd volgens tabel 5.1. De hercalibratie is uitgevoerd zoals beschreven in 3.2. De regressievariabelen (stations) zijn niet gewijzigd, alleen de regressiecoëfficiënten zijn opnieuw geschat. Voor de hercalibratie is wederom de gehele dataset van 1982 t/m maart 1995 gebruikt.

De voorspelfouten van het met hysteresis effect gecalibreerde deelmodel voor afvoeren ≥ 2300 m³/s zijn teruggerekend naar waterstandsresiduen. Hiervoor kan niet zonder meer de Q(H)-relatie worden gebruikt, maar dient wederom rekening te worden gehouden met het hysteresis effect. Immers in de stijgende tak hoort dezelfde waterstand bij een hogere afvoer dan in de dalende tak. De berekende afvoeren zijn weer 'terug gecorrigeerd' voor het hysteresis effect afhankelijk van de mate van afvoertoename resp. -afname. Vervolgens is met de geldige Q(H)-relatie de bijbehorende waterstand bepaald. Door deze voorspelde waterstand met de gemeten waterstand te vergelijken wordt het h-residu bepaald. E.e.a. heeft tot gevolg dat een analyse van de h-residuen alleen mogelijk is voor de periode waarvoor de gebruikte Q(H)-relatie geldt (1990-1995). Omdat uit de berekeningen met het deelmodel voor afvoeren een stijging of daling in afvoeren en niet in waterstanden volgt, kan tabel 5.1 niet voor de hysteresis correctie van de berekende afvoer gebruikt worden. Daarom is met de SOBEK berekeningen waarop tabel 5.1 is gebaseerd een vergelijkbare relatie opgesteld, maar dan op basis van afvoer veranderingen. Dit verband is weergegeven in tabel 5.2.

Tabel 5.2

Correctie afvoer, zoals afgeleid uit de Q(H)-relatie voor hysteresis effect, afhankelijk van de stijg- resp. daalsnelheid van de afvoer te Lobith.

stijg- / daalsnelheid afvoer te Lobith [m ³ /dag]	afvoercorrectie [m ³ /s]
-1200	+200
-1199 t/m -720	+170
-719 t/m -240	+120
-239 t/m +240	0
+241 t/m +720	-80
+721 t/m +1200	-140
+1201 t/m +1680	-200
> +1680	-300

5.3 Resultaten

Analyse van de resultaten laat zien dat het in beschouwing nemen van het hysteresis effect op de in 5.2 beschreven wijze niet tot verbetering van de voorspellingen leidt. In tabel 5.3 is het percentage voorspellingen dat voldoet aan de gewenste nauwkeurigheid weergegeven voor het deelmodel voor afvoeren groter dan 2300 m³/s, gecalibreerd met en zonder rekening te houden met het hysteresis effect voor Lobith. De tabel laat zien dat voor de periode 1990 t/m maart 1995 (de periode waarvoor de gebruikte Q(H)-relatie geldt) de voorspellingen in alle gevallen slechter worden. Tabel 5.4 toont het percentage voorspellingen dat voldoet aan de gewenste nauwkeurigheid voor het deelmodel voor afvoeren groter dan 5000 m³/s met en zonder rekening te houden met het hysteresis effect. Ook hier is duidelijk zichtbaar dat meenemen van dit effect een negatieve invloed heeft op de voorspelresultaten. In bijlage 7 zijn de karakteristieken van de residuen van beide deelmodellen na calibratie met hysteresis effect opgenomen. Ook deze worden door het meenemen van het hysteresis effect alleen maar slechter. De bepaalde regressiecoëfficiënten zijn niet in de bijlage opgenomen.

Tabel 5.3
Percentage voorspellingen dat met de gewenste nauwkeurigheid wordt berekend, voor de periode 1990 t/m maart 1995, berekend met het deelmodel voor afvoeren ≥ 2300 m³/s na hercalibratie zonder en met meenemen van het hysteresis effect voor Lobith. Stap 1 geeft het percentage goede voorspellingen zonder en stap 2 met neerslagverwachting.

Zichttijd in dagen gewenste nauw- keurigheid [cm]	1 10		2 15		3 20		4 40	
	zonder	met	zonder	met	zonder	met	zonder	met
Stap 1 [%]	89	82	77	70	58	55	67	68
Stap 2 [%]			84	73	64	53	76	71

Tabel 5.4
Percentage voorspellingen dat met de gewenste nauwkeurigheid wordt berekend, voor de periode 1990 t/m maart 1995, berekend met het deelmodel voor afvoeren ≥ 5000 m³/s na hercalibratie zonder en met meenemen van het hysteresis effect voor Lobith. Stap 1 geeft het percentage goede voorspellingen zonder en stap 2 met neerslagverwachting.

Zichttijd in dagen gewenste nauw- keurigheid [cm]	1 10		2 15		3 20		4 40	
	zonder	met	zonder	met	zonder	met	zonder	met
Stap 1 [%]	99	87	87	77	70	68	80	69
Stap 2 [%]		91		77		80		67

5.4 Conclusies

Het rekening houden met het hysteresis effect voor Lobith, zoals beschreven in dit hoofdstuk, leidt niet tot verbetering van de voorspellingen, zelfs tot slechtere resultaten. Het hysteresis effect is echter wel een belangrijke bron van fouten bij de vertaling van waterstanden in afvoeren en andersom. Waarom geen verbetering optreedt, kan verklaard worden omdat eigenlijk voor alle voor de deelmodellen gebruikte meetpunten de afvoer gecorrigeerd zou moeten worden voor het hysteresis effect en niet alleen voor het meetpunt Lobith. De benodigde informatie voor de overige meetpunten ontbreekt echter. Een andere reden kan zijn dat de relatie, zoals is afgeleid door Van der Veen et al. (1997) voor de beperkte periode van de hoogwaters van 1993 en 1995, niet representatief is voor de gehele calibratieperiode 1982 tot en met maart 1995.

Indien meer kennis over het hysteresis effect voor de verschillende meetstations langs de Rijn beschikbaar komt, moet de mogelijke meerwaarde ervan voor de voorspelling opnieuw onderzocht moeten worden. De huidige kennis levert voor Model Lobith geen winst op.

6 Neurale netwerken als foutencorrector voor Model Lobith

6.1 Inleiding

Hydrologische processen zijn voor een belangrijk deel niet-lineair van aard. Zulke verbanden kunnen niet volledig met het lineaire Model Lobith beschreven worden. De voorspelfouten (residuen) van Model Lobith zouden dan ook veroorzaakt kunnen worden door niet-lineaire effecten. Door de residuen met een niet-lineair model te voorspellen, zouden de voorspellingen voor Lobith kunnen verbeteren. Probleem bij een niet-lineair model is het kiezen van de vorm. Men zou dit kunnen proberen door niet-lineaire functies van de verklarende variabelen (kwadratische orde, produkten, exponentieel, enz.) als niet verklarende variabelen aan een lineair regressie schema toe te voegen, maar het probleem hierbij is dat er ontzettend veel mogelijkheden zijn. Er bestaat geen methode om uit een dataset van in- en gewenste uitvoergegevens de vorm van een niet-lineair verband te analyseren (Vos, 1996a). Het gebruik van neurale netwerken lost het probleem van de vormkeuze op. Een neurale netwerk maakt zelf zijn keuze.

Net als bij lineaire modellen dient men bij niet-lineaire modellen aan inputselectie te doen. Een te uitgebreide selectie levert door het meenemen van schijnafhankelijkheid goede calibratieresultaten en slechte validatieresultaten. Bovendien ontstaan er, omdat het vinden van de coëfficiënten van een neurale netwerk een iteratief proces is, convergentieproblemen. Een niet-lineair analogon van de stapsgewijze regressie (zoals gebruikt in paragraaf 4.2) bestaat niet. Ook bij het oplossen van dit selectie probleem kunnen neurale netwerken ingezet worden. In dit onderzoek zijn neurale netwerken gebruikt om data te comprimeren (Vos, 1996a). Hierbij wordt de informatie van de "originele" invoervariabelen samengebonden in neurale netwerken. Daarnaast is gekeken naar de toepasbaarheid van neurale netwerken om op basis van de niet-lineaire principale componenten analyse een optimale selectie van invoervariabelen te maken (Vos, 1996b).

6.2 Wat zijn Neurale netwerken ?

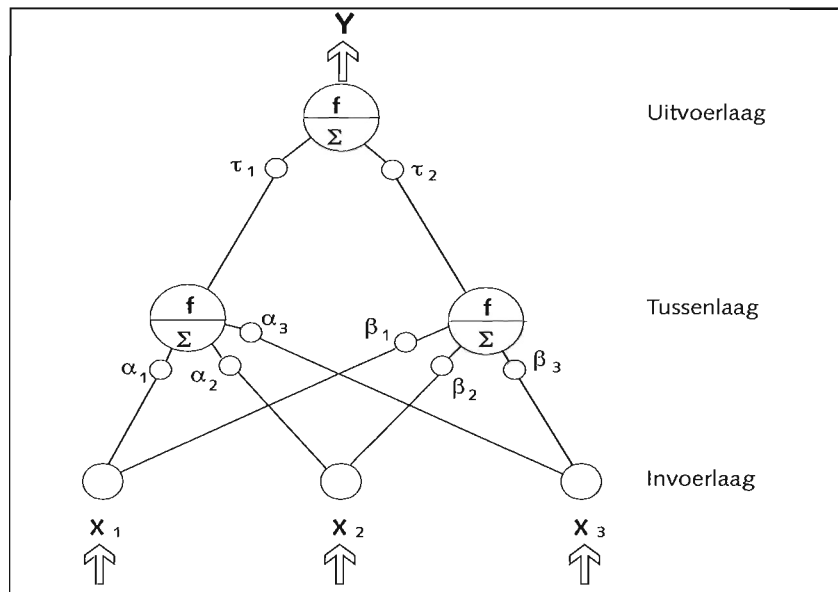
Het belangrijkste kenmerk van neurale netwerken is dat zij bestaan uit veel identiek en parallel werkende elementen, neuronen genaamd. Ook het menselijk zenuwstelsel werkt op deze manier. Dit bestaat uit neuronen die onderling verbonden zijn. Elk neuron krijgt signalen van andere neuronen en afhankelijk van de sterkte van het invoersignaal geeft het neuron een uitvoersignaal. De sterkte van het uitvoersignaal hangt af van de hoeveelheid chemicaliën die afgegeven wordt. Deze hoeveelheid wordt aangepast als de hersens leren.

Net als het zenuwstelsel bestaan neurale netwerken uit onderling verbonden neuronen. Meestal is er sprake van een gelaagde structuur, zie figuur 6.1, met een invoer- en een uitvoerlaag en één of meerdere tussenlagen. Het meest gebruikte type is het feed-forward netwerk (Veldkamp, 1992). Hierbij is de uitgang van elk neuron verbonden met één of meerdere neuronen uit een volgende laag, maar niet met neuronen uit dezelfde of vorige laag. De neuronen in de tussenlaag worden processing elements (PE) ge-

noemd. De verschillende invoersignalen voor een PE worden met een gewicht vermenigvuldigd. De aldus gewogen invoersignalen worden gesommeerd en vervolgens met een zogeheten "transferfunctie" getransformeerd tot een uitvoersignaal naar [één] of meer andere neuronen. De transferfunctie kan niet-lineair zijn en daaraan ontleent het neurale netwerk dan zijn niet-lineariteit (Veldkamp, 1992). De meest gebruikelijke transferfunctie is de tangens hyperbolicus. Het aantal neuronen in de in- en uitvoerlaag is in theorie onbeperkt. In de praktijk is er wel een zekere beperking noodzakelijk. Voor het aantal tussenliggende lagen en het aantal neuronen hierin zijn geen vaste regels, wel een aantal richtlijnen.

Tijdens de calibratie, of het leerproces, van een neurale netwerk moet de optimale verdeling van de verschillende gewichten gevonden worden. De structuur van het netwerk en de gekozen transferfunctie veranderen niet tijdens de calibratie. Er zijn verschillende calibratiemethoden, die allen iteratief zijn en waarvan de bekendste de backpropagation methode is (Veldkamp, 1992). Een nadeel is dat dit soort netwerken bij complexere problemen heel langzaam convergeert (Vos, 1996a). Daarom is voor de residuenvoorspellers met een ander soort netwerken gewerkt, namelijk het zogeheten Generalized Regression Neural Network (GRNN).

Figuur 6.1
Schematische weergave feedforward
neuraal netwerk, X_i staat voor de in-
voervariabelen, Y voor de uitvoer-
variabele, α_i , β_i en τ_i staan voor de gewich-
ten, Σ voor de somming en f voor de
transferfunctie.

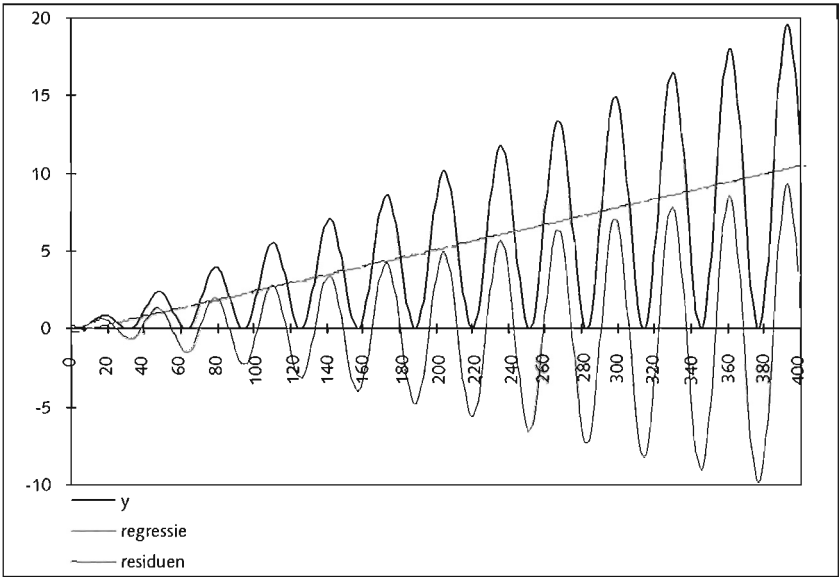


6.3 Generalized Regression Neural Network als residuenvoorspeller

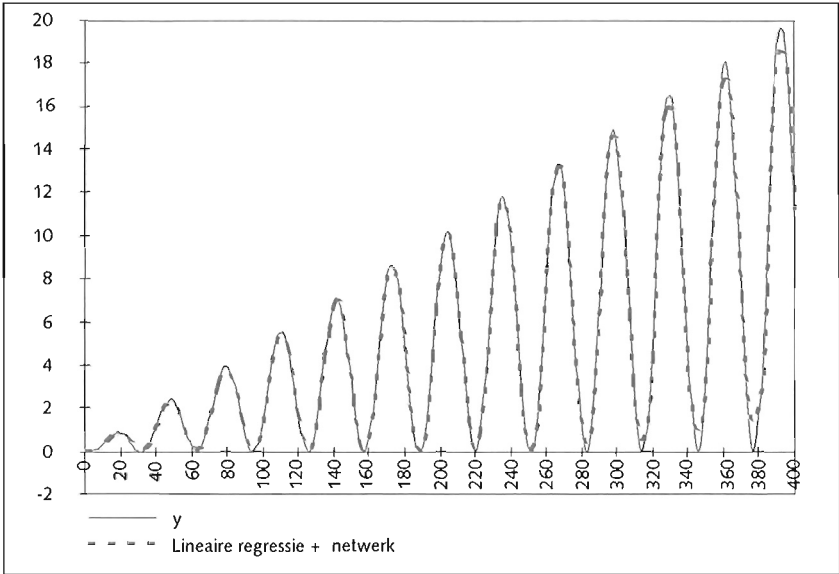
GRNN

Het principe van een Generalized Regression Neural Network (GRNN) is afgeleid van de Probabilistic Neural Networks (Vos, 1996a). In het kort komt het erop neer dat men een voorwaardelijke verwachting gebruikt als voorspeller en de kansverdelingen die men nodig heeft om deze voorwaardelijke verwachting uit te rekenen met een neurale netwerk techniek uit de gegevens afleidt. Kansverdelingen worden benaderd door geschaalde en verschoven versies van één specifieke kernfunctie op te tellen (Parzen's methode). De schaalparameters worden met een neurale netwerk techniek geoptimaliseerd (Vos, 1996a). In een test waarbij de residuen voorspeld moesten worden van een sinusachtige functie die met een lineaire functie was beschreven, zie fig. 6.2, presteerde het GRNN type netwerk veel beter

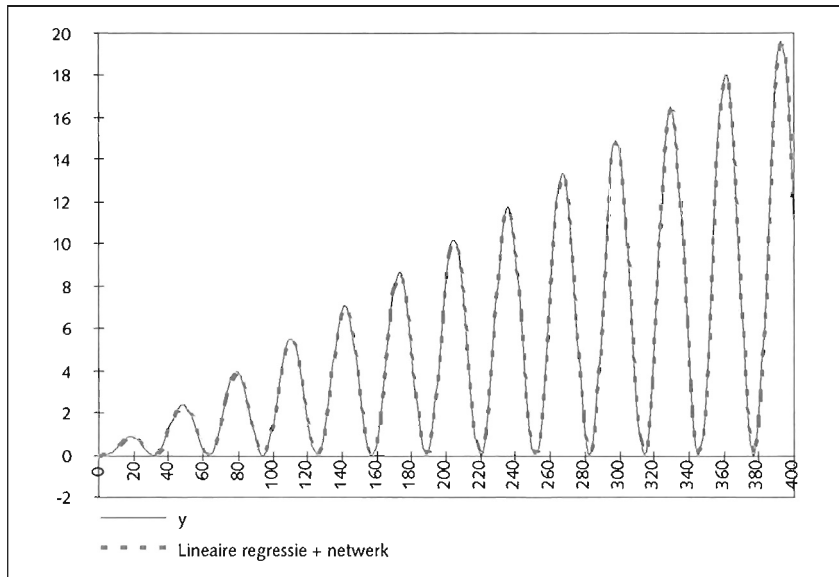
Figuur 6.2A
 Gebruik van neuraal netwerk als foutencorrector. De bovenste figuur toont een lineaire beschrijving van een sinusfunctie met in gestippeld rood de bijbehorende residuen. In de middelste figuur zijn de residuen gecorrigeerd met de uitkomsten van een backpropagation netwerk en in de onderste figuur met behulp van een GRNN netwerk.



Figuur 6.2B



Figuur 6.2C



dan een traditioneel backpropagation netwerk. Het GRNN netwerk convergeerde daarnaast sneller. Met neurale netwerken gebaseerd op GRNN zijn de residuen van Model Lobith voorspeld en is onderzocht in hoeverre de voorspellingen voor Lobith hierdoor verbeteren.

Input selectie

Zoals in 6.1 al genoemd, is een belangrijk probleem bij het trainen van de netwerken, welke invoervariabelen gebruikt moeten worden. Het potentieel aantal verklarende variabelen is groot (zie 2.5). Het gebruiken van alle mogelijke invoervariabelen om een neuraal netwerk te trainen leidt tot praktische problemen. Het netwerk zou extreem lang moeten rekenen om te convergeren. Een ander belangrijk aspect is het gevaar van schijnafhankelijkheid (zie 2.5 en 4.2).

Omdat er geen direct bruikbare methode voorhanden is om een optimale selectie van invoervariabelen te maken, is in eerste instantie gekozen voor een pragmatische benadering. De invoergegevens van de waterstands- en neerslagstations die voor Model Lobith worden gebruikt, zijn gecomprimeerd. Het principe hiervoor is een neuraal netwerk dat als uitvoer de invoer heeft, zogenaamde auto-associatieve netwerken. Dit type netwerk heeft een tussenlaag met een beperkt aantal neuronen. De waarden van de neuronen van deze tussenlaag kunnen als een compressie van de invoer gedacht worden, omdat het netwerk daaruit - tot een zekere precisie - de invoer weer kan reconstrueren (Diamantaras, 1996).

De gecomprimeerde data zijn vervolgens in combinatie met een beperkt aantal extra invoervariabelen in een aantal verschillende combinaties gebruikt om GRNN netwerken te trainen. De extra invoervariabelen zijn min of meer intuïtief gekozen, op basis van een mogelijke relatie met de te voorspellen residuen. De gebruikte combinaties van invoervariabelen vormen slechts een zeer beperkte weergave van het totaal aantal mogelijke combinaties. Daardoor kan nooit uitgesloten worden dat door een andere keuze van invoervariabelen aanzienlijk betere resultaten verkregen zouden worden.

Resultaten voor het deelmodel voor afvoeren groter dan 2300 m³/s

Als foutencorrector voor het deelmodel van Model Lobith voor afvoeren groter dan 2300 m³/s zijn netwerken gecalibreerd voor de residuen van de voorspellingen van één, twee, drie en vier dagen vooruit. Als invoer worden, naast de gecomprimeerde dataset, de waterstand bij Lobith op verschillende tijdstippen, de residuen van Model Lobith voor verschillende zichttijden en de neerslagvoorspellingen als aparte variabelen gebruikt. Voor iedere zichttijd, van één tot en met vier dagen, zijn in totaal drie netwerken getraind, A, B en C. In tabel 6.1 is de invoerselectie voor de netwerken voor de eerste dag voorspelling weergegeven. In bijlage 9 zijn ook de invoerselecties voor de tweede, derde en vierde dag opgenomen. Gegevens van de periode 1980 tot en met 1984 en 1990 tot en met juni 1994 zijn gebruikt om te calibreren. De netwerken zijn gevalideerd voor de periode 1985 tot en met 1989 en juli 1994 tot en met maart 1995.

Tabel 6.1

Invoer voor de netwerken A,B en C die zijn gebruikt om residuen die zijn ontstaan na gebruik van het MLR-model voor de eerste dag en hoog water te voorspellen. Hierbij geldt : t+1 = morgen; t-1 = gisteren enzovoorts. L staat voor de waterstand bij Lobith, R voor het residu (verschil opgetreden en voorspelde waterstand), COMP voor de compressedataset en VSPN voor de neerslagvoorspelling voor het Noordelijk deel en VSPZ voor het Zuidelijk deel van het Rijnstroomgebied (Vos, 1997).

Net	L _t	L _{t-1}	L _{t-1} -L _{t-1}	L _{t+1}	R _{t-1,t}	Comp	VSPN	VSPZ	# inputs
A	x	x	x	x	x				5
B						x			48
C	x		x	x	x	x	x	x	54

In tabel 6.2 zijn de resultaten voor de eerste dag voorspelling weergegeven, berekend met het deelmodel voor afvoeren groter dan 2300 m³/s, zoals gecalculeerd door Van den Eertwegh (1992). Ook zijn in de tabel de resultaten weergegeven na correctie op basis van de residuvoorspelling met neurale netwerken, getraind met de drie invoersets. De tabel is gebaseerd op de resultaten voor de validatieperiode en laat zien dat het corrigeren van de voorspellingen van Model Lobith op basis van residuvoorspellingen met neurale netwerken niet altijd verbeteringen oplevert. Alleen netwerk A zorgt voor een verbetering. Het percentage voorspellingen dat met de gewenste nauwkeurigheid van 10 cm wordt voorspeld, neemt door de residu- en correctie met 5% toe. Voor de andere netwerken wordt het resultaat tot 5% slechter. Opvallend is dat het netwerk met de beste prestaties slechts een beperkt aantal invoervariabelen heeft. Netwerk A heeft hoofdzakelijk waterstanden van Lobith en het residu van de eerste dag voorspelling als invoer, en niet de uitgebreide gecomprimeerde datasets waar de informatie van alle 13 waterstands- en 8 neerslagmeetpunten in zit opgeslagen. Wanneer afzonderlijk naar de dagen met afvoeren boven 5000 m³/s bij Lobith wordt gekeken, blijkt dat neurale netwerken ook voor deze hoge afvoeren niet eenduidig voor verbetering van de voorspellingen van Model Lobith kunnen zorgen. Alleen in het geval van netwerk A treedt een kleine verbetering op van het percentage residuen dat binnen de gewenste 10 cm valt van 84 naar 86%. Voor de netwerken B en C worden de resultaten wederom slechter.

Tabel 6.2

Statistieken (in m³/s) van werkelijke voorspelfouten en percentage dat met de gewenste nauwkeurigheid berekend wordt, voor de eerste dag voorspelling, voor afvoeren bij Lobith groter dan 2300 m³/s. Resultaten van berekeningen voor validatieperiode (930 dagen) met Model Lobith (MLR), deelmodel voor afvoeren groter dan 2300 m³/s (versie Van den Eertwegh) zonder en met residucorrectie (+net A, B, C) door drie neurale netwerken (getraind met invoersets A,B en C, zie tabel 6.1), (Vos, 1997).

	MLR	Net A	Net B	Net C
Minimum, m³/s	-302.80	-252.83	-413.52	-239.94
Maximum, m³/s	363.01	487.40	455.86	455.82
Gemiddelde, m³/s	-1.03	2.63	4.26	5.03
Mediaan, m³/s	1.78	6.49	6.51	8.14
Std. afw. , m³/s	66.62	53.77	70.24	64.77
% < ± 10 cm	87.71	92.51	83.13	84.25

De mogelijke verbeteringen van de voorspellingen bij Lobith op basis van residuvoorspelling met neurale netwerken is ook onderzocht voor de tweede, derde en vierde dag voorspellingen. De residuvoorspelling levert in geen van de gevallen een verbetering op. Ook voor netwerk A verslechteren de resultaten. In tabel 6.3 zijn voor de validatieperiode de resultaten van Model Lobith zelf en na correctie met het best presterende netwerk

weergegeven. Het percentage voorspellingen dat met de gewenste nauwkeurigheid wordt berekend, neemt voor afvoeren boven 2300 m³/s tot 7% af (Vos, 1997). Voor afvoeren boven 5000 m³/s zijn de resultaten nog slechter en is de maximale verslechtering 17% (zie bijlage 9).

Tabel 6.3
Percentage voorspellingen dat voor de validatieperiode wordt berekend met de gewenste nauwkeurigheid voor afvoeren bij Lobith groter dan 2300 en groter dan 5000 m³/s. Resultaten van berekeningen voor met Model Lobith (MLR), deelmodel voor afvoeren groter dan 2300 m³/s (versie Van den Eertwegh) zonder en met de residucorrectie (+net) door neurale netwerken, (Vos, 1997). Tussen haakjes staat het netwerk dat het beste resultaat leverde.

Zichttijd		twee dagen	drie dagen	vier dagen
Gewenste nauwkeurigheid, [cm]		15 cm	20 cm	40 cm
Afvoeren ≥ 2300 m ³ /s	MLR	81	60	74
	+net	76 (A)	56 (A)	67 (A)
Afvoeren ≥ 5000 m ³ /s	MLR	82	52	65
	+net	67 (A)	46 (C)	49 (C)

Resultaten deelmodel voor waterstanden bij Lobith kleiner dan NAP+10.00 m

Voor laagwatersituaties, waarin de stuwen in de Nederrijn in bedrijf zijn, is ook gekeken naar de mogelijkheden om de voorspellingen verder te verbeteren met neurale netwerken als residuenvoorspellers. Netwerken zijn getraind met vergelijkbare sets invoervariabelen als voor het deelmodel voor afvoeren zijn gebruikt. In tabel 6.4 zijn de resultaten weergegeven van Model Lobith en van het netwerk dat het beste resultaat opleverde, uitgedrukt in het percentage van de voorspellingen dat binnen de gewenste nauwkeurigheid valt. Het blijkt dat neurale netwerken, althans met de gebruikte invoervariabelen, geen verbetering opleveren voor de voorspelling van Lobith.

Tabel 6.4
Percentage voorspellingen dat voor de validatieperiode wordt berekend met de gewenste nauwkeurigheid voor waterstanden te Lobith kleiner dan NAP+10.00 m. Resultaten van berekeningen met Model Lobith (MLR), deelmodel waterstanden kleiner dan NAP+10.00 m (versie Van den Eertwegh) zonder en met de residucorrectie (+net) door neurale netwerken, (Vos, 1996a).

Zichttijd	één dag	twee dagen	drie dagen	vier dagen
Gewenste nauwkeurigheid, ln [cm]	5	15	20	25
MLR	84	96	85	78
+net	84	96	85	79

Discussie

Het gebruik van GRNN netwerken als residuenvoorspellers voor Model Lobith levert over het algemeen slechts een geringe verbetering van de voorspellingen op, althans met de gekozen invoervariabelen. Voor hoogwaters is geen verbetering te zien. Een neurale netwerk zoals hier toegepast, biedt niet echt meerwaarde ten opzichte van de MLR-techniek.

De selectie van invoervariabelen vormt het grootste probleem. De pragmatische aanpak met gecompriëerde data en een aantal intuïtief gekozen extra invoervariabelen, zoals weergegeven in tabel 6.1, is slechts een zeer kleine selectie uit alle mogelijke combinaties van invoervariabelen. De kans dat de optimale combinatie hierbij zit, is zeer klein. Dit is een mogelijke verklaring voor het feit dat de GRNN netwerken over het algemeen slechts een kleine verbetering of zelfs een verslechtering opleveren. Een betere selectie van invoervariabelen is een eerste vereiste om met neurale netwerken als residuenvoorspellers tot betere resultaten te komen.

6.4 Optimaliseren selectie van inputvariabelen

Het is niet duidelijk in hoeverre de juiste invoervariabelen zijn gebruikt om de neurale netwerken te trainen als residuvoorspeller. Het is daardoor ook niet duidelijk of de resultaten zouden kunnen verbeteren door een betere keuze van de invoervariabelen. Daarom is gezocht naar een bruikbare methode om een goede invoerselectie te maken.

Genetische algoritmen

Optimalisatie problemen waarbij een (met een bepaald criterium gemeten) beste deelverzameling moet worden gekozen, worden vaak opgelost met de daarvoor bijzonder geschikte methode van genetische algoritmen. Eerste tests met deze methode om invoervariabelen voor neurale netwerken te selecteren waren veelbelovend (Wójcik, 1995). Echter, praktisch gezien is de methode niet uitvoerbaar vanwege het grote aantal verklarende variabelen dat voor de voorspelling van Lobith beschikbaar is. De benodigde tijd om met genetische algoritmen een goede selectie te maken, neemt exponentieel toe met het aantal mogelijkheden. Met 50 variabelen rekende het door Wójcik ontwikkelde programma 28 uur. Bij 100 variabelen zou deze rekentijd met 2^{50} vermenigvuldigt moeten worden, wat neerkomt op meer dan $3 \cdot 10^{12}$ jaar. De mogelijkheden van deze methodiek zijn in deze studie niet verder onderzocht.

Niet Lineaire Principale Componenten Analyse

Een andere mogelijkheid om invoervariabelen te selecteren biedt de Principale Componenten Analyse. Bij deze techniek wordt geen selectie van variabelen gemaakt, maar worden de uit de bestaande gegevens nieuwe variabelen geconstrueerd, principale componenten genoemd, die geacht worden alle informatie samen te vatten en die onderling onafhankelijk zijn. Daarvoor wordt (in het lineaire geval) een lineaire combinatie van invoergegevens genomen die zoveel mogelijk variantie van deze invoergegevens reconstrueert. In theorie kunnen er net zoveel principale componenten gevonden worden als er variabelen zijn en dan is alle variantie verklaard. In de praktijk gaat het er juist om, het aantal variabelen te beperken. Daarom wordt aan de te verklaren variantie een maximum gesteld, en dus aan het aantal af te leiden componenten. In het lineaire geval is de bepaling van de principale componenten relatief eenvoudig. Ze kunnen worden vastgesteld op basis van de eigenwaarden en bijbehorende eigenvectoren van de covariantiematrix.

De methode van eigenwaarden en -vectoren is echter niet te gebruiken bij het vaststellen van de niet-lineaire principale componenten. Een algemeen aanvaarde niet-lineaire techniek is niet voorhanden (Diamantaras, 1996). In Vos (1996b) is daarom een methode gebruikt die gebaseerd is op een techniek om de belangrijkste niet-lineaire principale component te vinden door variantie maximalisatie. Door deze techniek steeds opnieuw toe te passen op de residuen van voorspellingen gebaseerd op de al gevonden componenten, kan er op iteratieve wijze telkens een nieuwe component bijgevoerd worden.

Met een theoretisch voorbeeld leverde de ontwikkelde methode goede resultaten. In de praktijk, met de invoergegevens zoals Model Lobith die gebruikt, leverde de methode echter geen goede resultaten. Er is geprobeerd om uit een invoerset van 126 verklarende variabelen de belangrijkste principale componenten af te leiden. De verklarende variabelen bestonden uit gegevens van 16 waterstands- en 8 neerslagstations tot en met vier dagen terug (120 variabelen) en gegevens van de neerslagverwachting voor

het noorden en het zuiden van het Rijnstroomgebied tot en met twee dagen vooruit (zes variabelen). Verschillende typen netwerken zijn getraind om de maximale variantie te berekenen en eveneens zijn verschillende netwerken getraind om te reconstrueren. De resultaten waren slecht. De eerste twee afgeleide principale componenten hadden beide betrekking op slechts één variabele, wat hoogst onwaarschijnlijk is. De oorzaak is onduidelijk. Mogelijk dat grotere netwerken en langere trainingstijden nodig zijn. Deze en andere vraagpunten moeten eerst opgelost worden voordat de methode in de praktijk toegepast kan worden (Vos, 1996b).

6.5 Conclusies

De bruikbaarheid van neurale netwerken als niet-lineaire residuen voorspelers voor Model Lobith is onderzocht. Met de gebruikte sets van invoervariabelen blijkt de niet-lineaire meerwaarde van neurale netwerken ten opzichte van de meervoudig lineaire regressietechniek niet aantoonbaar. Het is echter onwaarschijnlijk dat bij de gebruikte sets van invoervariabelen de optimale selectie zit. Een goede en bruikbare methode om de beste set met invoervariabelen te kiezen, is op dit moment echter niet voorhanden. Dit probleem zal eerst opgelost moeten worden, om daarna te onderzoeken of de conclusie dat neurale netwerken geen meerwaarde opleveren als residuenvoorspeller ook na een goede selectie van invoervariabelen overeind blijft. Een bruikbare methode kan wellicht gevonden worden door nader onderzoek naar de Niet Lineaire Principale Componenten Analyse of door de technieken van datacompressie en genetische algoritmen te combineren.

7 Samenvatting en conclusies

Voorspellingen van de waterstanden tijdens hoogwater zijn van groot belang voor het hoogwatermanagement. Ze zijn mede sturend voor de planning en inzet van maatregelen tijdens een hoogwater. Tijdige waarschuwing dat kritische niveaus overschreden kunnen worden, is een belangrijk middel om slachtoffers te voorkomen en schade zoveel mogelijk te reduceren. Accurate voorspellingen zijn dan ook een wezenlijk onderdeel van duurzame bescherming tegen hoogwaters. Tijdens laagwater situaties zijn de voorspellingen vooral van belang voor de scheepvaart om de belading zo goed mogelijk te kunnen inschatten.

In de huidige situatie worden de voorspellingen voor de Rijn met het statistische Model Lobith gemaakt. De voorspellingen voor de eerste en tweede dag vooruit zijn over het algemeen goed. Voor de derde en vierde dag is dat veel minder het geval. Zeker tijdens hoogwaters is er behoefte aan goede voorspellingen verder dan twee dagen vooruit. Verschillende mogelijkheden om dit doel te bereiken met de huidige opzet van Model Lobith zijn onderzocht :

- De bestaande deelmodellen van Model Lobith zijn opnieuw gecalibreerd met gegevens tot en met maart 1995. Het grootste verschil ten opzichte van de vorige calibratieset in 1991 zijn de recente hoogwaters. De hercalibratie levert geen significante verbetering op voor het deelmodel voor waterstanden lager dan NAP+10.00 m bij Lobith. Voor het deelmodel voor afvoeren boven 2300 m³/s leidt de hercalibratie voor het gemiddelde afvoerbereik ook niet tot een verbetering. Voor de hoge afvoeren, boven de 5000 m³/s, worden de resultaten wel beter, met name voor de eerste tot en met de derde dag voorspelling. De voorspellingen voor hoge afvoeren worden verder verbeterd door een apart deelmodel voor afvoeren groter dan 5000 m³/s te calibreren. Dit 5000+ model wordt als nieuw deelmodel aan Model Lobith toegevoegd. Het deelmodel gebaseerd op waterstanden groter dan NAP+10.00 m bij Lobith, levert, ten opzichte van de deelmodellen gebaseerd op afvoeren, geen toegevoegde waarde. Dit deelmodel wordt uit Model Lobith verwijderd.
- Een correctie van de afvoer bij Lobith voor het hysteresis effect, leidt niet tot betere resultaten. Vooralsnog is alleen de afvoer bij Lobith gecorrigeerd. Indien er meer inzicht in het hysteresis effect voor alle gebruikte meetpunten (inclusief Lobith) is, moeten de mogelijkheden van het corrigeren voor deze foutenbron opnieuw onderzocht worden. Aanbevolen wordt, in eerste instantie nader onderzoek te verrichten naar het hysteresis effect voor belangrijke waterstandsm Meetpunten langs de Rijn.
- Neurale netwerken om de fout van het lineaire Model Lobith te corrigeren, geven slechts een geringe of geen verbetering van de voorspellingen. Probleem bij de toepassing van neurale netwerken is de keuze van de invoervariabelen voor het netwerk. Het is onwaarschijnlijk dat bij de gebruikte sets van invoervariabelen de optimale set zit om de fouten van model Lobith mee te voorspellen. Bruikbare methodieken om een optimale invoerselectie te maken, zijn er nog niet. De verwachting is dat bij een goede set van invoervariabelen een neuraal netwerk wel meer-

waarde voor de voorspellingen zal hebben. Indien het invoerselektie probleem is opgelost, moet deze hypothese getoetst worden.

De verbeteringen door de hercalibratie en een apart model voor hoge afvoeren zijn voor de korte termijn, het volgende hoogwaterseizoen, het maximaal haalbare. Voor de wat langere termijn is het echter niet voldoende. De voorspellingen zijn nog steeds niet goed genoeg, zeker niet voor de derde en vierde dag. Daarbij komt dat de verbeteringen door bijvoorbeeld het 5000+ deelmodel, zich in de praktijk nog moeten bewijzen. Inherent aan een black-box model geven de calibratie successen voor de tijdreeks tot en met maart 1995 nog geen garantie voor goede prestaties bij volgende hoogwaters. Een eerste test van het 5000+ model tijdens een bijna-hoogwater leidde tot hoopgevende resultaten.

Een nog belangrijkere reden om voor een andere aanpak te kiezen is dat er op korte termijn veel veranderingen in het riviersysteem en het stroomgebied zijn te verwachten. Na de hoogwaters van 1993 en 1995 zijn plannen om de bescherming tegen hoogwater te verbeteren in een stroomversnelling geraakt. Voor het stroomgebied van de Rijn als geheel wordt een Hoogwater Actieplan opgesteld. Het bergend vermogen van het stroomgebied wordt vergroot en de rivier krijgt weer meer ruimte. Retentiegebieden, al dan niet gestuurd inzetbaar, worden langs de rivier gecreëerd, waardoor de hoogwatergolf significant beïnvloed zal worden. In een black-box model dat wordt gecalibreerd met gemeten afvoeren, kan met dit soort veranderingen pas achteraf, met nieuwe meetgegevens, rekening worden gehouden. Gezien het grote belang van goede voorspellingen kan daar niet op gewacht worden en moeten de veranderingen direct verwerkt kunnen worden. Hiervoor is een voorspelmodel met een meer fysische basis nodig. Een dergelijk model wordt dan ook ontwikkeld voor Lobith. Dit model, FLO-RIJN, bestaat uit een 1-dimensionaal hydrodynamische model (SOBEK), waaraan neerslag-afvoer modellen voor de relevante zijrivieren worden gekoppeld. Dit model moet het mogelijk maken om ondanks alle ingrepen in de rivier toch zo goed mogelijk te blijven voorspellen. Met goede voorspellingen voor drie dagen vooruit is FLORIJN naar verwachting eind 1998 operationeel.

Ondanks alle maatregelen om de veiligheid langs onze grote rivieren te vergroten, zal er altijd een restrisico blijven bestaan. Er kan altijd een hoogwater ontstaan dat hoger is dan waarop de veiligheid is gebaseerd. Zeker dat hoogwater moet goed voorspeld worden om slachtoffers te voorkomen en schade te beperken. Goede voorspellingen nu en in de toekomst en dus een up-to-date voorspel instrumentarium blijven dus belangrijk.

Literatuur

- Botma, H. en A.J. Struyk, 1973:
Errors in measurement of flow by velocity area methods. Publication no. 99, Vol. II, IAHS-Unesco-WMO.
- Diamantaras, K.I. en S.Y. Kung, 1996:
Principal Component Neural Networks. Theory and Applications. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Eertwegh, G.A.P.H van den, 1992:
Voorspellingen waterstand en afvoer Rijn. Een onderzoek naar inhoudelijke en instrumentele verbetering. Rijkswaterstaat RIZA Nota nr. 92.006. Lelystad, maart 1992.
- Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn tegen Verontreiniging - IRC, 1995:
Grundlagen und Strategie zum Aktionsplan Hochwasser. IKS, Koblenz, Dezember 1995.
- Parmet, B.W.A.H., 1995:
Wie is er bang voor water? Deel 3. Voorspellen. In Natuur & Techniek, 64^e jaargang deel 1 januari 1996.
- Parmet, B.W.A.H. en E. Sprokkereef, 1995:
Hoogwaterberichtgeving Rijn januari/februari 1995. RIZA werkdokument nr. 95.052x, Arnhem/Lelystad, mei 1995.
- Promes, P.M., 1987:
Waterstandsvoorspelling voor de Rijn te Lobith met behulp van een meervoudig lineair regressiemodel. Rijkswaterstaat RIZA Nota nr. 88.002.
- Ronde, J.G. de, 1982:
The forecasting and warning system of 'Rijkswaterstaat' for the river Rhine. Rijkswaterstaat Directie Waterhuishouding en Waterbeweging. Nota nr. 83.06.
- SPSS, 1996:
Base 7.0 Application Guide. SPSS Inc. ISBN 0-13-476318-1.
- TAW, 1995:
Druk op de dijken 1995. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Delft, december 1995, 2^e oplage, augustus 1996.
- Teuber, W. en A.J. Veraart, 1986:
La détermination des débits du Rhin dans la région frontalière germano-hollandaise. Abflußermittlung im deutsch-niederländischen Grenzbereich. Rapport no. I-5 de la CHR, Bericht Nr. I-5 der KHR. ISBN 9070980045.

Teuber, W., 1987:

Influence de l'étalonnage des moulinets hydrométriques sur l'incertitude des déterminations de débit. Résultats d'une étude comparative. Einfluß der Kalibrierung hydrometrischer Meßflügel auf die Unsicherheit der Abflußermittlung. Ergebnisse eines Ringversuchs. Rapport no. I-6 de la CHR, Bericht Nr. I-6 der KHR. ISBN 9070980053.

Sprokkereef, E. (1996):

Gebruik van vuistregels bij de afvoervoorspelling voor Lobith. RIZA werkdocument 96.138. Juli 1996.

Veen, R. van der, U. Pakes, J. van Essen en L. Schutte (1997):

Calibratie SOBEK-Rijntakken (versie 1996.0). Rijkswaterstaat RIZA Rapport nr. 97.034. ISBN-nr. 9036950805. Arnhem, 15 mei 1997.

Ven, van de G.P., A.M.A.J. Driessen, W. Wolters en J. Wasser (1995):

Niets is bestendig, de geschiedenis van de rivieroverstromingen in Nederland.

Veldkamp, A. 1992:

Voorspelling waterstand Rijn te Lobith m.b.v. een neurale netwerk. RIZA werkdocument nr. 92.170x. Oktober 1992.

Vos, J., 1996a:

Neurale netwerken als residuen-voorspellers voor Model Lobith. Verkennde studie.

Vos, J., 1996b:

Foutencorrector voor Model Lobith met behulp van neurale netwerken.

Vos, J., 1997:

Aanvullende berekeningen voor foutencorrector Model Lobith met gebruik van een compressie-dataset inclusief neerslaggegevens.

Wójcik, R., 1995:

Input selection for neural networks by genetic algorithms, TEMPUS Joint European Project nr. 4988, Landbouw Universiteit Wageningen, Vakgroep Waterhuishouding, Wageningen, 1995.

Bijlagen

Inhoudsopgave bijlagen

.....

1. Statistiek invoerdata hercalibratie.....	49
- gemeten waterstanden en afvoeren.....	50
- gemeten en voorspelde neerslagen	55
- autocorrelaties in waterstands- en afvoerreeksen invoerstations, periode 01-01-82 t/m 30-03-95	57
- lineaire correlaties tussen meetwaarden van stations, gemeten op hetzelfde tijdstip	58
2. Hecalibratie waterstandsmodel $H \leq 10$ m.....	61
- regressiecoëfficiënten.....	62
- residuen voor en na calibratie.....	69
- cumulatieve verdeling van de residuen	71
3. Hecalibratie waterstandsmodel $H > 10$ m.....	73
- regressiecoëfficiënten.....	74
- residuen voor en na calibratie.....	81
- cumulatieve verdeling van de residuen	83
4. Hecalibratie afvoermodeel $Q \geq 2300$ m ³ /s	85
- regressiecoëfficiënten.....	86
- residuen voor en na calibratie.....	93
- cumulatieve verdeling van de residuen	97
5. Karakteristieken residuen MLR model $Q \geq 2300$ m ³ /s bij verschillende afvoerbereiken voor en na hercalibratie	99
6. Modelleren afvoerbereik $Q \geq 5000$ m ³ /s	103
- cumulatieve verdeling residuen voor verschillende calibraties voor calibratie- en validatiereeksen	104
- regressiecoëfficiënten nieuwe 5000+ model	109
- residuen nieuwe 5000+ model.....	116
7. Karakteristieken residuen MLR modellen $Q \geq 2300$ m ³ /s en $Q \geq 5000$ m ³ /s na calibratie met hysteresis effect	119
- cumulatieve verdeling residuen $Q \geq 2300$ m ³ /s en $Q \geq 5000$ m ³ /s na calibratie met hysteresis effect	124
- resumé karakteristieken MLR model $Q \geq 2300$ m ³ /s voor en na hercalibratie, zonder en met hysteresis effect.....	125
8. Resultaten van de diverse deelmodellen voor hoge afvoeren voor de hoogwaters van 1983, 1988, 1993/94 en 1995, voor en na hercalibratie.....	127
9. Invoersselectie voor neurale netwerken die als foutencorrector zijn getraind voor het deelmodel van Model Lobith voor afvoeren ≥ 2300 m ³ /s, voor de eerste, tweede, derde en vierde dag voorspelling (Vos, 1997)	131

Statistiek invoerdata hercalibratie

Gemeten waterstanden en afvoeren

Maxau/ Rhein	waterstand (cm)					
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	505	483	493	1402	1212	1298
mediaan	495	473	483	1287	1110	1187
std.dev.	96	86	91	583	489	542
range	539	532	539	3894	3686	3894

Worms/ Rhein	waterstand (cm)			afvoer (m³/s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	239	206	221	1521	1379	1443
mediaan	224	186	200	1370	1250	1297
std.dev.	113	103	109	677	598	639
range	689	681	689	4779	4617	4779

Kaub/ Rhein	waterstand (cm)			afvoer (m³/s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	250	220	234	1855	1664	1750
mediaan	234	196	212	1698	1444	1549
std.dev.	109	108	110	819	830	831
range	684	752	761	5483	6483	6586

Koblenz/ Rhein	waterstand (cm)		
	periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837
gemiddeld	274	238	254
mediaan	257	206	227
std.dev.	117	122	121
range	809	888	888

Andernach/ Rhein	waterstand (cm)			afvoer (m ³ /s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	326	283	302	2328	2066	2185
mediaan	313	249	276	2089	1694	1836
std.dev.	134	141	139	1194	1221	1215
range	899	963	963	8801	9634	9654

Köln/ Rhein	waterstand (cm)			afvoer (m ³ /s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	363	319	339	2393	2135	2252
mediaan	342	280	305	2110	1739	1885
std.dev.	140	146	145	1227	1288	1267
range	879	960	960	9176	10145	10154

Plochingen/ Neckar	waterstand (cm)			afvoer (m ³ /s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	172	167	169	56	47	51
mediaan	163	160	161	41	35	36
std.dev.	27	27	27	54	51	52
range	317	348	348	753	695	755

Würzburg/ Main	waterstand (cm)			afvoer (m ³ /s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	193	170	181	125	118	121
mediaan	170	152	159	93	82	87
std.dev.	60	56	59	104	115	110
range	481	511	511	1118	1234	1234

Kalkofen/ Lahn	waterstand (cm)			afvoer (m ³ /s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	255	244	249	58	50	54
mediaan	227	203	214	41	25	32
std.dev.	88	91	90	64	65	65
range	674	615	722	726	571	730

Trier/ Mosel	waterstand (cm)			afvoer (m ³ /s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	344	319	330	345	296	318
mediaan	305	267	283	231	151	184
std.dev.	123	128	126	370	379	376
range	827	903	903	3236	3741	3784

Cochem/ Mosel	waterstand (cm)			afvoer (m ³ /s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	298	285	291	406	354	378
mediaan	263	241	250	284	199	232
std.dev.	98	105	102	394	429	414
range	712	802	802	3357	3976	3980

Hattingen/ Ruhr	waterstand (cm)			afvoer (m ³ /s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	210	197	203	78	76	77
mediaan	190	160	176	53	39	46
std.dev.	86	98	92	79	92	86
range	496	511	511	814	868	872

Lobith/ Bovenrijn	waterstand (cm)			afvoer (m³/s)		
	periode			periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	2191	2646	4837
gemiddeld	1036	971	1000	2551	2228	2374
mediaan	1011	921	957	2279	1785	1990
std.dev.	150	159	158	1241	1356	1315
range	840	941	941	8833	11042	11042

Gemeten en voorspelde neerslagen

Bocholt-Liedern	dagsom neerslag (mm)			Düsseldorf	dagsom neerslag (mm)		
	periode				periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95		01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	aantal data	2191	2646	4837
gemiddeld	2.17	1.78	1.96	gemiddeld	2.25	2.10	2.17
mediaan	0.10	0.00	0.00	mediaan	0.20	0.10	0.10
std.dev.	4.63	3.74	4.17	std.dev.	4.43	4.17	4.29
range	67.10	38.00	67.10	range	49.20	54.00	54.00

Frankfurt am Main	dagsom neerslag (mm)			Giessen- Liebigshöhe	dagsom neerslag (mm)		
	periode				periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95		01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	aantal data	2191	2646	4837
gemiddeld	1.75	1.57	1.65	gemiddeld	1.90	1.79	1.84
mediaan	0.00	0.00	0.00	mediaan	0.00	0.00	0.00
std.dev.	3.76	3.57	3.66	std.dev.	4.24	4.09	4.16
range	33.30	40.00	40.00	range	50.60	46.00	50.60

Nancy-Essey -Tomblaine	dagsom neerslag (mm)			Strasbourg- Entzheim	dagsom neerslag (mm)		
	periode				periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95		01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	aantal data	2191	2646	4837
gemiddeld	2.19	1.77	1.96	gemiddeld	1.94	1.47	1.68
mediaan	0.00	0.00	0.00	mediaan	0.00	0.00	0.00
std.dev.	4.59	3.48	3.97	std.dev.	4.48	4.42	3.97
range	49.20	53.60	56.60	range	56.60	55.00	56.60

Stuttgart-Echterdingen	dagsom neerslag (mm)			Trier-Petrisberg	dagsom neerslag (mm)		
	periode				periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95		01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	aantal data	2191	2646	4837
gemiddeld	2.08	1.83	1.94	gemiddeld	2.22	2.07	2.14
mediaan	0.00	0.00	0.00	mediaan	0.10	0.10	0.10
std.dev.	4.78	4.42	4.58	std.dev.	4.34	4.24	4.29
range	55.30	55.00	55.30	range	39.30	51.00	51.00

$$P_{\text{Noord}} = 1/3 * \Sigma [P_{\text{Düsseldorf}} (T) , P_{\text{Bocholt}} (T) , P_{\text{Giessen}} (T)]$$

$$P_{\text{Zuid}} = 1/3 * \Sigma [P_{\text{Stuttgart}} (T) , P_{\text{Strasbourg}} (T) , P_{\text{Nancy}} (T)]$$

Neerslagvoorspellingen voor noordelijk en zuidelijk gedeelte Rijnstroomgebied

Noord	dagsom neerslag (mm)			Zuid	dagsom neerslag (mm)		
	periode				periode		
	01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95		01-01-82 31-12-87	01-01-88 30-03-95	01-01-82 30-03-95
aantal data	2191	2646	4837	aantal data	2191	2646	4837
gemiddeld	2.11	1.89	1.99	gemiddeld	2.07	1.69	1.86
mediaan	0.40	0.30	0.30	mediaan	0.30	0.20	0.20
std.dev.	3.60	3.30	3.50	std.dev.	3.90	3.10	3.50
range	34.60	32.30	34.60	range	39.40	30.50	39.40

Autocorrelaties in waterstands- en afvoerreeksen invoerstations, periode 01-01-82 t/m 30-03-95

Lag [dag]	Station								
	Maxau		Worms		Kaub		Koblenz	Andernach	
	H	Q	H	Q	H	Q	H	H	Q
1	0,968	0,960	0,978	0,971	0,982	0,980	0,979	0,980	0,976
2	0,920	0,902	0,933	0,917	0,940	0,932	0,931	0,937	0,921
3	0,875	0,851	0,882	0,858	0,888	0,874	0,874	0,883	0,854
4	0,833	0,805	0,834	0,803	0,833	0,814	0,816	0,828	0,788
5	0,794	0,764	0,789	0,753	0,782	0,757	0,761	0,775	0,725

Lag [dag]	Station									
	Köln		Hattingen		Plochingen		Würzburg		Kalkofen	
	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
1	0,982	0,977	0,957	0,924	0,814	0,821	0,964	0,953	0,958	0,936
2	0,940	0,924	0,899	0,810	0,641	0,653	0,891	0,867	0,878	0,817
3	0,888	0,858	0,843	0,722	0,550	0,570	0,809	0,777	0,797	0,706
4	0,834	0,792	0,791	0,651	0,489	0,512	0,733	0,698	0,725	0,619
5	0,782	0,729	0,741	0,586	0,436	0,460	0,668	0,634	0,662	0,547

Lag [dag]	Station					
	Trier		Cochem		Lobith	
	H	Q	H	Q	H	Q
1	0,957	0,939	0,953	0,948	0,988	0,984
2	0,882	0,836	0,866	0,853	0,958	0,944
3	0,811	0,742	0,782	0,761	0,918	0,889
4	0,748	0,663	0,709	0,684	0,873	0,830
5	0,692	0,587	0,645	0,619	0,828	0,772

Lineaire correlaties tussen meetwaarden van stations, gemeten op hetzelfde tijdstip.
Periode 1-1-1982 tot en met 30-03-1995

Symbolen:

H : Waterstand
Q : Afvoer
P : Neerslag

Afkortingen stationsnamen (H, Q):

MAX	:	Maxau / Rhein
WOR	:	Worms / Rhein
KAU	:	Kaub / Rhein
KOB	:	Koblenz / Rhein
AND	:	Andernach / Rhein
KOL	:	Köln / Rhein
LOB	:	Lobith / Bovenrijn
PLO	:	Plochingen / Neckar
WUR	:	Würzburg / Main
KAL	:	Kalkofen / Lahn
HAT	:	Hattingen / Ruhr
TRI	:	Trier / Mosel
COC	:	Cochem / Mosel

Afkortingen stationsnamen (P):

BOC	:	Bocholt-Liedern
DUS	:	Düsseldorf
GIE	:	Giessen-Liebigshöhe
FRA	:	Frankfurt am Main
NAN	:	Nancy-Essey, -Tomblaine
TRI	:	Trier-Petrisberg
STU	:	Stuttgart-Echterdingen
STR	:	Strasbourg-Entzheim
NRD	:	Voorspelling Noordelijk gedeelte Rijnstroomgebied
ZUI	:	Voorspelling Zuidelijk gedeelte Rijnstroomgebied

Waterstanden H

Pearson correlation	HMAX	HWOR	HKAU	HKOB	HAND	HKOL	HLOB	HPLO	HWUR	HKAL	HHAT	HTRI	HCOC
HMAX	1.000	0.964	0.892	0.813	0.815	0.795	0.733	0.523	0.501	0.417	0.408	0.506	0.492
HWOR	0.964	1.000	0.969	0.906	0.907	0.893	0.837	0.573	0.630	0.517	0.495	0.601	0.594
HKAU	0.892	0.969	1.000	0.968	0.969	0.963	0.920	0.596	0.753	0.639	0.603	0.696	0.696
HKOB	0.813	0.906	0.968	1.000	0.998	0.994	0.944	0.639	0.794	0.779	0.721	0.840	0.841
HAND	0.815	0.907	0.969	0.998	1.000	0.996	0.953	0.624	0.785	0.772	0.720	0.829	0.827
HKOL	0.795	0.893	0.963	0.994	0.996	1.000	0.968	0.609	0.787	0.777	0.732	0.822	0.821
HLOB	0.733	0.837	0.920	0.944	0.953	0.968	1.000	0.533	0.746	0.727	0.721	0.752	0.738
HPLO	0.523	0.573	0.596	0.639	0.624	0.609	0.533	1.000	0.653	0.641	0.551	0.676	0.652
HWUR	0.501	0.630	0.753	0.794	0.785	0.787	0.746	0.653	1.000	0.760	0.673	0.719	0.726
HKAL	0.417	0.517	0.639	0.779	0.772	0.777	0.727	0.641	0.760	1.000	0.895	0.888	0.885
HHAT	0.408	0.495	0.603	0.721	0.720	0.732	0.721	0.551	0.673	0.895	1.000	0.796	0.774
HTRI	0.506	0.601	0.696	0.840	0.829	0.822	0.752	0.676	0.719	0.888	0.796	1.000	0.983
HCOC	0.492	0.594	0.696	0.841	0.827	0.821	0.738	0.652	0.726	0.885	0.774	0.983	1.000

Afvoeren Q

Pearson correlation	QMAX	QWOR	QKAU	QAND	QKOL	QLOB	QPLO	QWUR	QKAL	QHAT	QTRI	QCOC
QMAX	1.000	0.952	0.876	0.787	0.765	0.698	0.573	0.510	0.419	0.389	0.524	0.518
QWOR	0.952	1.000	0.963	0.894	0.878	0.817	0.611	0.649	0.511	0.472	0.612	0.616
QKAU	0.876	0.963	1.000	0.964	0.959	0.921	0.626	0.776	0.627	0.578	0.692	0.708
QAND	0.787	0.894	0.964	1.000	0.997	0.951	0.663	0.827	0.768	0.691	0.837	0.856
QKOL	0.765	0.878	0.959	0.997	1.000	0.968	0.641	0.828	0.767	0.698	0.820	0.844
QLOB	0.698	0.817	0.921	0.951	0.968	1.000	0.570	0.796	0.709	0.669	0.735	0.763
QPLO	0.573	0.611	0.626	0.663	0.641	0.570	1.000	0.649	0.636	0.567	0.684	0.660
QWUR	0.510	0.649	0.776	0.827	0.828	0.796	0.649	1.000	0.774	0.713	0.726	0.745
QKAL	0.419	0.511	0.627	0.768	0.767	0.709	0.636	0.774	1.000	0.886	0.858	0.869
QHAT	0.389	0.472	0.578	0.691	0.698	0.669	0.567	0.713	0.886	1.000	0.751	0.761
QTRI	0.524	0.612	0.692	0.837	0.820	0.735	0.684	0.726	0.858	0.751	1.000	0.989
QCOC	0.518	0.616	0.708	0.856	0.844	0.763	0.660	0.745	0.869	0.761	0.989	1.000

Neerslagen P

Pearson correlation	PBOC	PDUS	PFRA	PGIE	PNAN	PSTR	PSTU	PTRI	PNRD	PZUI
PBOC	1.000	0.623	0.380	0.411	0.278	0.168	0.140	0.390	0.821	0.237
PDUS	0.623	1.000	0.486	0.530	0.354	0.226	0.200	0.489	0.872	0.316
PFRA	0.380	0.486	1.000	0.714	0.487	0.385	0.352	0.611	0.637	0.497
PGIE	0.411	0.530	0.714	1.000	0.449	0.339	0.306	0.592	0.782	0.444
PNAN	0.278	0.354	0.487	0.449	1.000	0.569	0.426	0.595	0.436	0.807
PSTR	0.168	0.226	0.385	0.339	0.569	1.000	0.528	0.373	0.295	0.841
PSTU	0.140	0.200	0.352	0.306	0.426	0.528	1.000	0.310	0.260	0.810
PTRI	0.390	0.489	0.611	0.592	0.595	0.373	0.310	1.000	0.594	0.518
PNRD	0.821	0.872	0.637	0.782	0.436	0.295	0.260	0.594	1.000	0.402
PZUI	0.237	0.316	0.497	0.444	0.807	0.841	0.810	0.518	0.402	1.000

Hercalibratie waterstandsmodel $H \leq 10$ m

Regressiecoëfficiënten

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten waterstanden en neerslagen

H ≤ 10.00 m +NAP Zichttijd: 1 dag	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstep				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein					0,015
Worms / Rhein					-0,036
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					xxx
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein			-0,451		0,546
Lobith / Bovenrijn					0,932
Plochingen / Neckar					
Würzburg / Main				xxx	
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel					
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr		0,024	-0,052	-0,097	0,129
Strasbourg-Entzheim			-0,131		
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main					
Nancy-Essey, -Tomblaine					
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe				xxx	
Düsseldorf				0,219	
Bocholt-Liedern			-0,195		

Constante: 35,842

xxx : station/tijdstep combinatie komt na hercalibratie niet meer in de regressievergelijking voor

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten waterstanden en neerslagen

H ≤ 10.00 m +NAP Zichttijd: 2 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstap				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein					
Worms / Rhein				0,149	
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein			-0,370		0,682
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein			-0,339		
Lobith / Bovenrijn					0,891
Plochingen / Neckar					0,096
Würzburg / Main					
Kalkofen / Lahn					0,130
Trier / Mosel					0,130
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr				-0,259	0,263
Strasbourg-Entzheim			-0,152		
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main			xxx		
Nancy-Essey, -Tomblaine					
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf					
Bocholt-Liedern					

Constante: 24,915

xxx : station/tijdstap combinatie komt na hercalibratie niet meer in de regressievergelijking voor

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

H ≤ 10.00 m +NAP Zichttijd: 2 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,991		
	tijdstap		
	t	t+1	t+2
Noord	1,289	0,444	
Zuid	-0,165		

Constante: 4,719

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten waterstanden en neerslagen

H ≤ 10.00 m +NAP Zichttijd: 3 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstap				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein			-0,259		0,211
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein			-0,597	-0,297	1,265
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein					
Lobith / Bovenrijn					0,709
Plochingen / Neckar				-0,206	0,358
Würzburg / Main					
Kalkofen / Lahn			-0,349		0,470
Trier / Mosel					
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr					
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main					
Nancy-Essey, -Tomblaine				0,601	
Trier-Petrisberg				0,769	
Giessen-Liebigshöhe			-1,033		
Düsseldorf				0,841	
Bocholt-Liedern					

Constante: 166,101

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

H ≤ 10.00 m +NAP Zichttijd: 3 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,976		
	tijdstap		
	t	t+1	t+2
Noord	2,276	1,311	0,435
Zuid	xxx		

Constance: 14,324

xxx : station/tijdstap combinatie komt na hercalibratie niet meer in de regressievergelijking voor

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten waterstanden en neerslagen

H ≤ 10.00 m +NAP Zichttijd: 4 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstep				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein		-0,381			0,376
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein			-0,668		0,820
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein					
Lobith / Bovenrijn					0,769
Plochingen / Neckar					0,450
Würzburg / Main					
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel				-0,496	0,670
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr					
Strasbourg-Entzheim		-0,604			
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main					
Nancy-Essey, -Tomblaine			-0,697	1,012	
Trier-Petrisberg				0,973	
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf				1,541	
Bocholt-Liedern					

Constante: 64,681

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

H ≤ 10.00 m +NAP Zichttijd: 4 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,951		
	tijdstep		
	t	t+1	t+2
Noord	2,838	2,503	1,714
Zuid	1,257	0,440	

Constante: 28,266

Residuen MLR Model $H \leq 10.00$ m voor en na calibratie (cursieve waarden na hercalibratie)

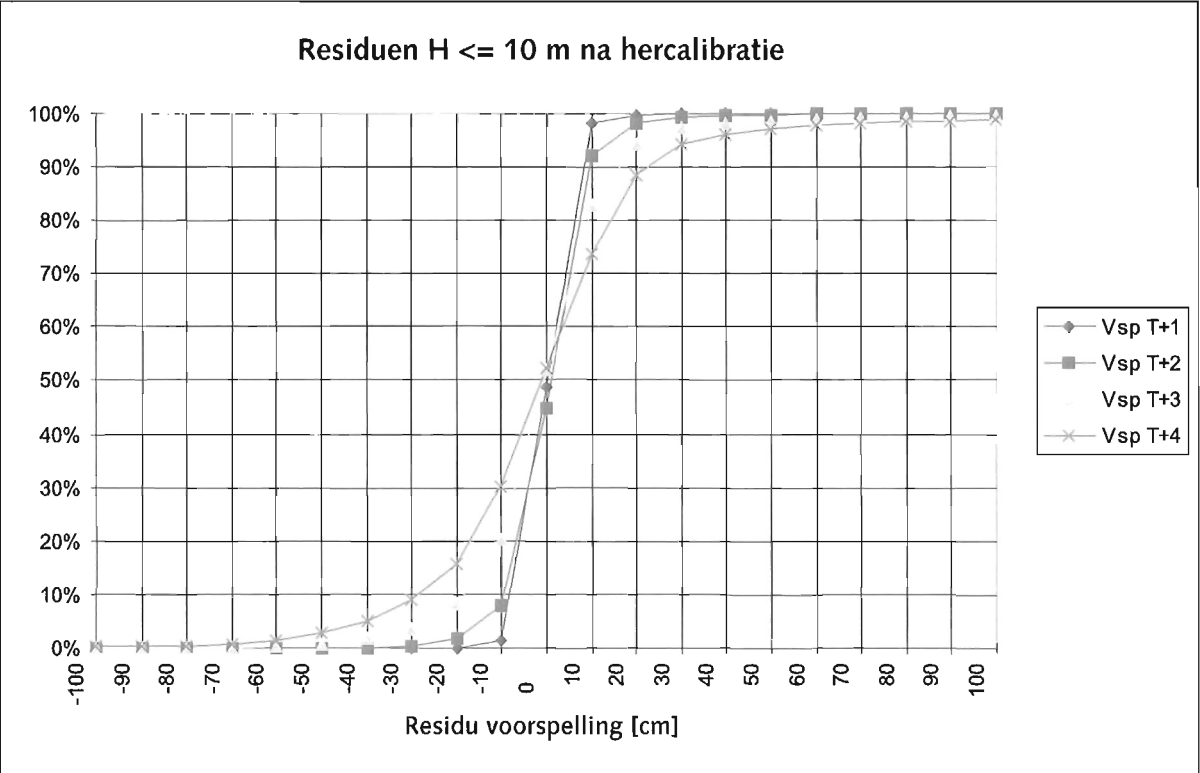
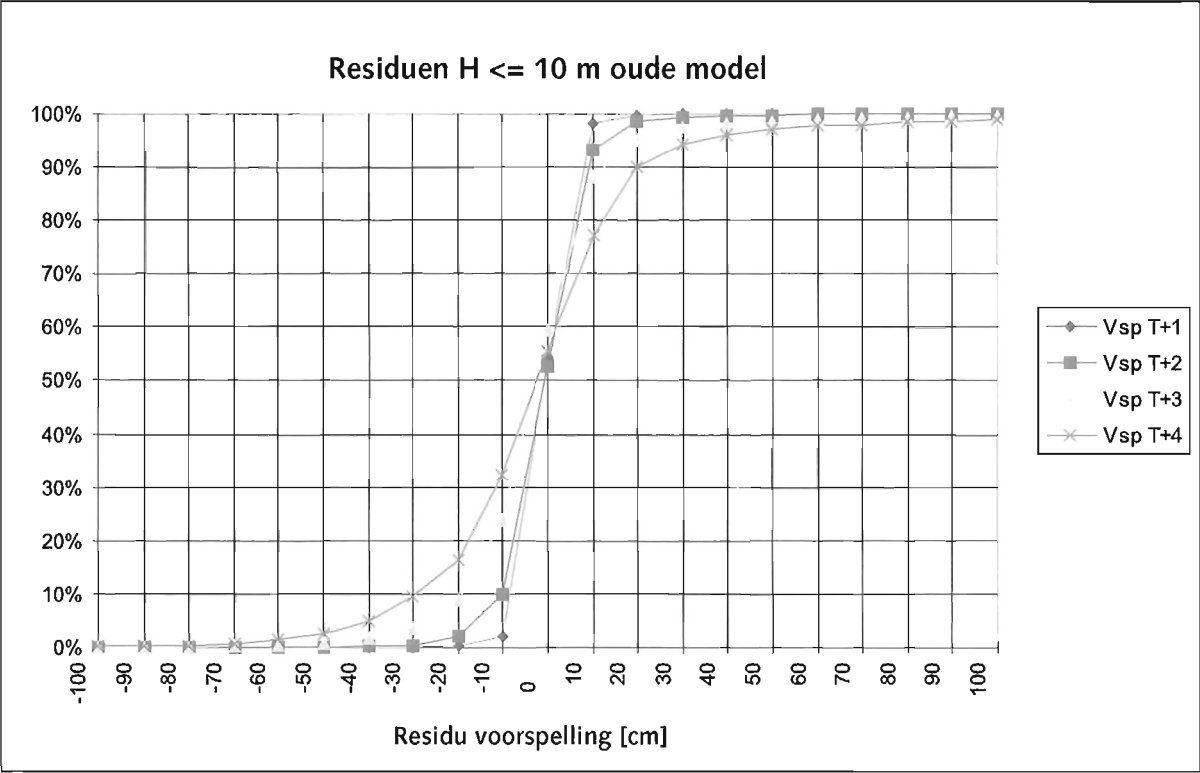
MLR-model $H \leq 10.00$ m Zichttijd: 1 dag		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		15 <i>12</i>		15 <i>12</i>		15 <i>12</i>	
Residuen	aantal	1022		1838		2860	
	gemiddelde (cm)	0,5 <i>0,8</i>		-0,8 <i>-0,2</i>		-0,3 <i>0,2</i>	
	abs. gemiddeld (cm)	2,9 <i>3,0</i>		3,3 <i>3,1</i>		3,1 <i>3,0</i>	
	mediaan (cm)	1 <i>1</i>		-1 <i>0</i>		0 <i>0</i>	
	abs. mediaan (cm)	2 <i>2</i>		3 <i>2</i>		2 <i>2</i>	
	std. dev. (cm)	4,2 <i>4,3</i>		4,6 <i>4,4</i>		4,5 <i>4,4</i>	
	abs. std. dev. (cm)	3,1 <i>3,2</i>		3,3 <i>3,2</i>		3,2 <i>3,2</i>	
	percentage ≤ 5 cm	85 <i>85</i>		82 <i>84</i>		83 <i>84</i>	
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[0-9] <i>[0-9]</i>		[0-9] <i>[0-8]</i>		[0-9] <i>[0-9]</i>	
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-15] <i>[0-17]</i>		[0-16] <i>[0-15]</i>		[0-15] <i>[0-16]</i>	
	max. - (cm)	23 <i>22</i>		23 <i>22</i>		23 <i>22</i>	
	max. + (cm)	26 <i>29</i>		48 <i>50</i>		48 <i>50</i>	

MLR-model $H \leq 10.00$ m Zichttijd: 2 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		12 <i>11</i>	4 <i>4</i>	12 <i>11</i>	4 <i>4</i>	12 <i>11</i>	4 <i>4</i>
Residuen	aantal	1022		1838		2860	
	gemiddelde (cm)	0,6 <i>1,1</i>	0,6 <i>1,5</i>	-1,0 <i>-0,3</i>	-1,0 <i>0,1</i>	-0,4 <i>0,2</i>	-0,5 <i>0,6</i>
	abs. gemiddeld (cm)	6,3 <i>6,3</i>	5,9 <i>6,1</i>	6,8 <i>6,7</i>	6,2 <i>6,1</i>	6,6 <i>6,5</i>	6,1 <i>6,1</i>
	mediaan (cm)	0 <i>1</i>	1 <i>2</i>	-1 <i>-1</i>	-1 <i>0</i>	-1 <i>0</i>	0 <i>1</i>
	abs. mediaan (cm)	4 <i>4</i>	4 <i>5</i>	5 <i>5</i>	4 <i>4</i>	5 <i>5</i>	4 <i>4</i>
	std. dev. (cm)	9,5 <i>9,5</i>	8,5 <i>8,4</i>	10,8 <i>10,7</i>	9,7 <i>9,4</i>	10,4 <i>10,3</i>	9,3 <i>9,1</i>
	abs. std. dev. (cm)	7,1 <i>7,2</i>	6,2 <i>6,1</i>	8,4 <i>8,4</i>	7,5 <i>7,2</i>	8,0 <i>7,9</i>	7,1 <i>6,8</i>
	percentage ≤ 15 cm	91 <i>91</i>	94 <i>94</i>	91 <i>92</i>	94 <i>95</i>	91 <i>92</i>	94 <i>94</i>
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[0-20] <i>[0-20]</i>	[0-17] <i>[0-16]</i>	[0-18] <i>[0-19]</i>	[0-16] <i>[0-16]</i>	[0-19] <i>[0-19]</i>	[0-17] <i>[0-16]</i>
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-40] <i>[0-39]</i>	[0-37] <i>[0-32]</i>	[0-45] <i>[0-45]</i>	[0-35] <i>[0-36]</i>	[0-41] <i>[0-41]</i>	[0-36] <i>[0-34]</i>
	max. - (cm)	44 <i>45</i>	43 <i>44</i>	63 <i>57</i>	60 <i>53</i>	63 <i>57</i>	60 <i>53</i>
	max. + (cm)	64 <i>60</i>	58 <i>53</i>	119 <i>116</i>	114 <i>111</i>	119 <i>116</i>	114 <i>111</i>

MLR-model H ≤ 10.00 m Zichttijd: 3 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		14 14	5 4	14 14	5 4	14 14	5 4
Residuen	aantal	1022		1838		2860	
	gemiddelde (cm)	1,3 2,7	1,3 2,4	-4,0 -1,9	-3,9 -2,0	-2,1 -0,2	-2,1 -0,4
	abs. gemiddeld (cm)	11,6 12,0	10,4 11,1	13,2 12,3	11,6 11,2	12,6 12,2	11,1 11,2
	mediaan (cm)	0 1	1 3	-6 -4	-4 -2	-4 -2	-2 -1
	abs. mediaan (cm)	7 7	7 8	9 8	8 7	8 8	7 7
	std. dev. (cm)	20,2 20,5	17,2 17,7	21,8 21,5	19,1 18,8	21,4 21,2	18,6 18,6
	abs. std. dev. (cm)	16,6 16,8	13,7 13,9	17,8 17,7	15,7 15,3	17,4 17,4	15,0 14,8
	percentage ≤ 20 cm	85 83	87 86	85 86	86 86	85 85	86 86
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[1-38] [1-39]	[1-30] [1-32]	[1-39] [1-38]	[1-34] [1-34]	[1-39] [1-38]	[1-33] [1-33]
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-84] [0-85]	[0-71] [0-73]	[0-84] [0-86]	[0-68] [0-67]	[0-84] [0-86]	[0-71] [0-68]
	max. - (cm)	71 75	93 101	111 103	99 92	111 103	99 101
	max. + (cm)	199 198	169 174	302 301	267 261	302 301	267 261

MLR-model H ≤ 10.00 m Zichttijd: 4 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		13 13	6 6	13 13	6 6	13 13	6 6
Residuen	aantal	1022		1838		2860	
	gemiddelde (cm)	1,7 3,2	2,4 2,9	-4,7 -2,3	-3,7 -2,2	-0,4 -0,3	-1,5 -0,4
	abs. gemiddeld (cm)	20,8 20,9	17,4 17,8	20,7 19,7	17,7 17,4	20,8 20,1	17,6 17,6
	mediaan (cm)	-3 -2	1 2	-9 -7	-5 -3	-7 -5	-3 -1
	abs. mediaan (cm)	12 12	11 12	15 13	12 12	14 13	11 12
	std. dev. (cm)	36,9 37,2	29,2 29,7	33,6 33,3	28,3 28,0	35,0 34,8	28,7 28,5
	abs. std. dev. (cm)	30,5 30,9	23,5 23,9	26,9 27,0	22,4 22,0	28,2 28,7	22,8 22,7
	percentage ≤ 25 cm	78 77	82 82	76 79	80 81	77 78	80 81
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[1-73] [1-75]	[1-50] [1-53]	[1-58] [1-57]	[1-50] [1-52]	[1-63] [1-62]	[1-50] [1-52]
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-167] [0-172]	[0-129] [0-131]	[0-143] [0-138]	[0-109] [0-102]	[0-158] [0-160]	[0-118] [0-123]
	max. - (cm)	133 152	112 130	142 148	121 124	142 152	121 130
	max. + (cm)	292 289	252 258	344 346	285 283	344 346	285 283

Figuur bijlage 2 A-B
Cumulatieve verdeling van de residuen



Hercalibratie waterstandsmodel $H > 10$ m

Regressiecoëfficiënten

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten waterstanden en neerslagen

H > 10.00 m +NAP Zichttijd: 1 dag	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstap				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein					
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein			-0,330		0,472
Lobith / Bovenrijn					0,854
Plochingen / Neckar			-0,031		
Würzburg / Main					
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel					
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr				-0,146	0,172
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main					
Nancy-Essey, -Tomblaine					
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf				0,250	
Bocholt-Liedern		xxx			

Constante: 99,451

xxx : station/tijdstap combinatie komt na hercalibratie niet meer in de regressievergelijking voor

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten waterstanden en neerslagen

H > 10.00 m +NAP Zichttijd: 2 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstep				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein		-0,122			
Worms / Rhein					0,157
Kaub / Rhein					0,493
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein		-0,208			
Köln / Rhein				-0,254	
Lobith / Bovenrijn					0,810
Plochingen / Neckar			-0,159		
Würzburg / Main					
Kalkofen / Lahn				-0,147	0,243
Trier / Mosel					0,200
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr				-0,250	0,296
Strasbourg-Entzheim				xxx	
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main				xxx	
Nancy-Essey, -Tomblaine					
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf					
Bocholt-Liedern					

Constante: 186,409

xxx : station/tijdstep combinatie komt na hercalibratie niet meer in de regressievergelijking voor

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

H > 10.00 m +NAP Zichttijd: 2 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,995		
	tijdstap		
	t	t+1	t+2
Noord	1,509	0,450	
Zuid			

Constante: 1,739

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten waterstanden en neerslagen

H > 10.00 m +NAP Zichttijd: 3 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstep				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein		0,069			
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					0,684
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein					
Lobith / Bovenrijn			0,055		
Plochingen / Neckar					0,453
Würzburg / Main	xxx				
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel					0,123
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr				-0,360	0,584
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main					
Nancy-Essey, -Tomblaine				1,403	
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe				1,396	
Düsseldorf					
Bocholt-Liedern					

Constante: 596,535

xxx : station/tijdstep combinatie komt na hercalibratie niet meer in de regressievergelijking voor

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

H > 10.00 m +NAP Zichttijd: 3 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,981		
	tijdstep		
	t	t+1	t+2
Noord	3,172	1,715	0,583
Zuid	0,490	0,775	

Constante: 7,885

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten waterstanden en neerslagen

H > 10.00 m +NAP Zichttijd: 4 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstap				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein		-0,296			0,540
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein					0,154
Köln / Rhein					
Lobith / Bovenrijn					0,330
Plochingen / Neckar					0,458
Würzburg / Main					
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel					0,183
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr				-0,600	0,781
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main				2,060	
Nancy-Essey, -Tomblaine				1,929	
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf					
Bocholt-Liedern					

Constante: 341,559

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

H > 10.00 m +NAP Zichttijd: 4 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,957		
	tijdstep		
	t	t+1	t+2
Noord	4,157	3,493	1,869
Zuid	1,630	1,615	

Constante: 21,647

Residuen MLR Model H > 10.00 m voor en na calibratie (cursieve waarden na hercalibratie)

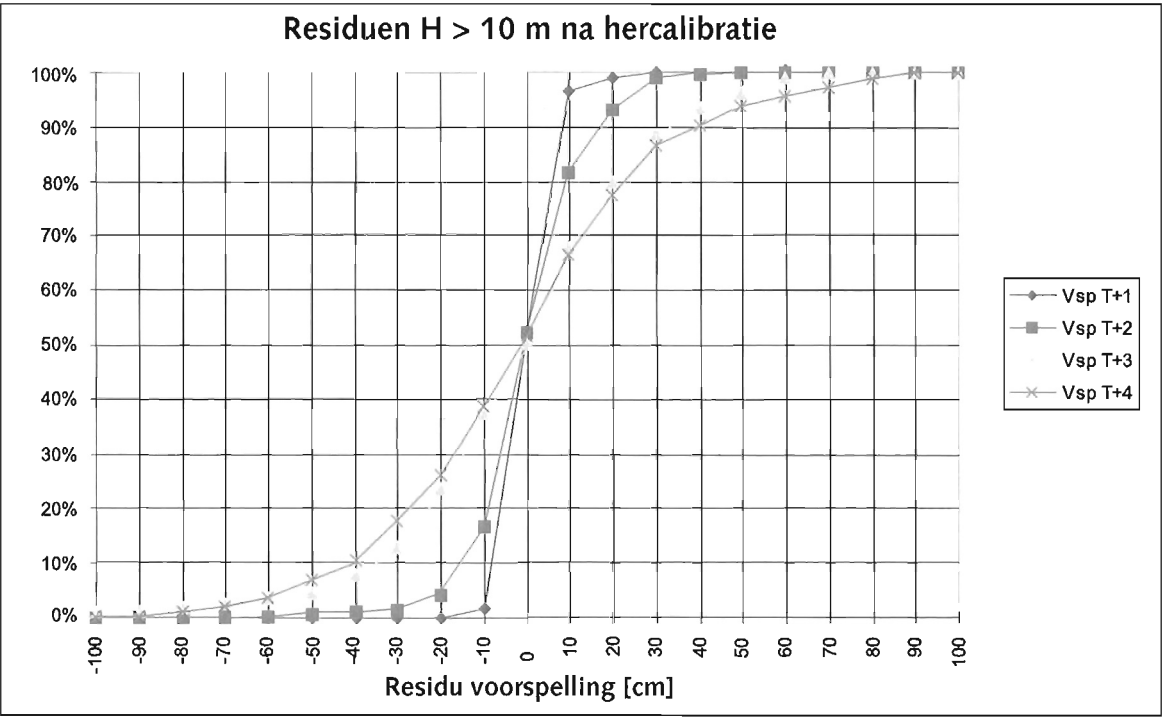
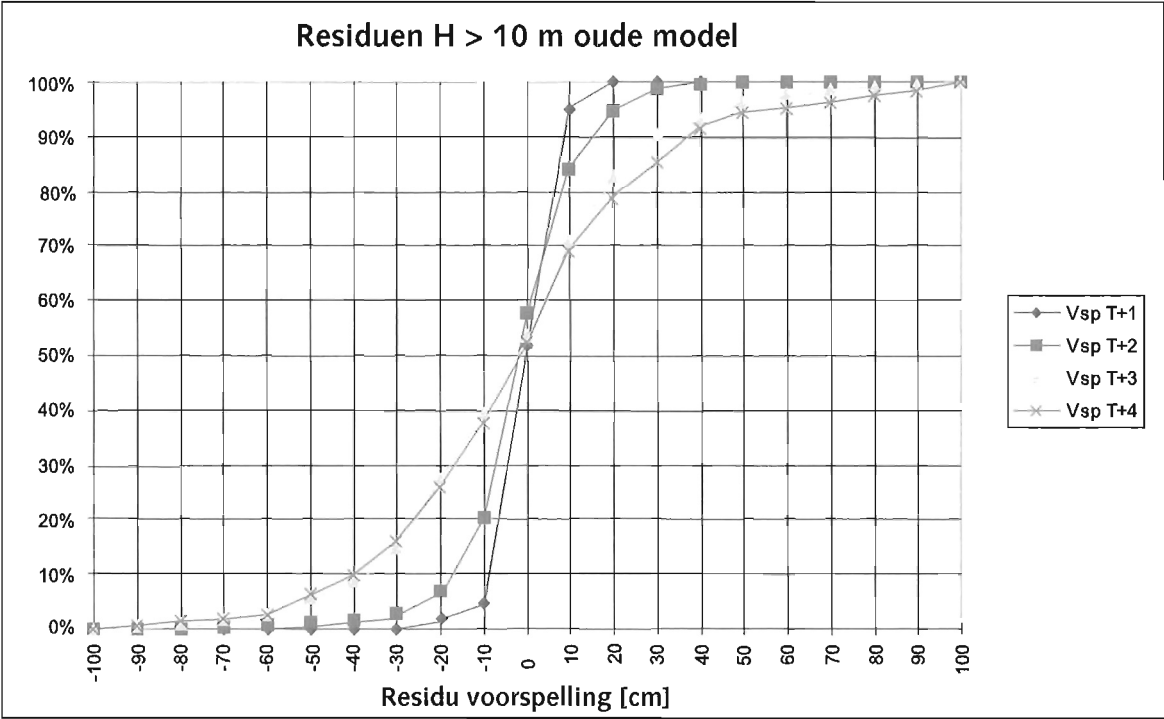
MLR-model H > 10.00 m Zichttijd: 1 dag		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		8 7		8 7		8 7	
Residuen	aantal	1169		808		1977	
	gemiddelde (cm)	1,0 0,5		-1,8 -1,8		-0,1 -0,4	
	abs. gemiddeld (cm)	3,7 3,8		5,4 5,4		4,4 4,5	
	mediaan (cm)	1 0		-2 -2		0 -1	
	abs. mediaan (cm)	3 3		4 4		3 3	
	std. dev. (cm)	5,3 5,4		8,0 7,7		6,7 6,5	
	abs. std. dev. (cm)	3,9 3,8		6,2 5,8		5,0 4,8	
	percentage ≤ 10 cm	95 95		96 96		95 95	
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[0-11] [0-12]		[0-15] [0-14]		[0-13] [0-13]	
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-18] [0-18]		[0-32] [0-28]		[0-22] [0-23]	
	max. - (cm)	33 31		72 64		72 64	
	max. + (cm)	30 29		40 40		40 40	

MLR-model H > 10.00 m Zichttijd: 2 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		14 12	3 3	14 12	3 3	14 12	3 3
Residuen	aantal	1169		808		1977	
	gemiddelde (cm)	0,5 1,7	0,5 1,3	-4,5 -1,8	-4,2 -1,9	-1,6 0,3	-1,4 0
	abs. gemiddeld (cm)	9,6 9,9	8,8 9,1	12,5 11,7	11,3 10,6	10,8 10,6	9,8 9,7
	mediaan (cm)	0 0	0 1	-6 -4	-5 -3	-3 -1	-2 -1
	abs. mediaan (cm)	7 7	6 6	10 9	8 8	8 8	7 7
	std. dev. (cm)	13,7 14,0	12,5 12,7	17,0 16,3	15,9 15,2	15,4 15,1	14,1 13,8
	abs. std. dev. (cm)	9,8 10,0	8,8 8,9	12,3 11,5	11,9 11,0	11,0 10,7	10,3 9,8
	percentage ≤ 15 cm	82 80	83 83	73 73	76 79	78 77	80 81
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[1-30] [1-30]	[1-26] [1-27]	[1-35] [1-32]	[1-32] [1-29]	[1-31] [1-31]	[1-28] [1-28]
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-46] [0-45]	[0-42] [0-42]	[0-68] [0-60]	[0-63] [0-59]	[0-54] [0-51]	[0-47] [0-46]
	max. - (cm)	72 60	73 61	127 106	128 108	127 106	128 108
	max. + (cm)	73 76	58 63	87 89	76 81	87 89	76 81

MLR-model H > 10.00 m Zichttijd: 3 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		10 9	6 6	10 9	6 6	10 9	6 6
Residuen	aantal	1169		808		1977	
	gemiddelde (cm)	1,7 3,8	1,2 2,6	-10,8 -7,6	-9,7 -7,1	-3,4 -0,8	-3,2 -1,4
	abs. gemiddeld (cm)	21,4 21,9	19,0 19,7	29,2 28,0	25,7 24,8	24,6 24,4	21,7 21,8
	mediaan (cm)	0 2	2 4	-12 -9	-11 -9	-4 -2	-3 -1
	abs. mediaan (cm)	16 16	15 15	24 24	21 20	18 19	17 17
	std. dev. (cm)	29,9 30,2	25,5 25,8	37,0 36,3	32,6 31,8	33,5 33,3	29,1 28,8
	abs. std. dev. (cm)	21,0 21,1	17,1 16,9	25,1 24,2	22,2 21,1	23,1 22,6	19,6 18,9
	percentage ≤ 20 cm	61 58	63 62	41 43	47 49	53 52	56 57
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[1-60] [2-59]	[2-50] [2-52]	[2-74] [2-69]	[2-64] [2-61]	[2-67] [2-65]	[2-57] [2-56]
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-103] [0-100]	[0-84] [0-77]	[1-119] [0-113]	[0-109] [1-99]	[0-114] [0-106]	[0-97] [0-90]
	max. - (cm)	116 100	102 92	151 143	146 160	151 143	146 160
	max. + (cm)	179 182	128 124	261 266	206 203	261 266	206 203

MLR-model H > 10.00 m Zichttijd: 4 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		10 10	6 6	10 10	6 6	10 10	6 6
Residuen	aantal	1169		808		1977	
	gemiddelde (cm)	0,4 1,2	0,2 0	-4,9 -3,7	-1,9 -1,4	-1,7 -0,8	-0,7 -0,6
	abs. gemiddeld (cm)	28,5 28,5	23,4 24,1	37,6 36,9	28,0 27,4	32,3 32,0	25,2 25,4
	mediaan (cm)	-5 -4	0 1	-13 -13	-4 -5	-7 -6	-2 -2
	abs. mediaan (cm)	19 19	17 18	30 30	21 21	24 24	19 19
	std. dev. (cm)	42,4 42,4	33,0 33,2	50,6 49,9	38,8 37,8	46,0 45,7	35,5 35,2
	abs. std. dev. (cm)	31,3 31,4	23,3 22,9	34,1 33,7	26,9 26,1	32,7 32,6	24,9 24,3
	percentage ≤ 40 cm	78 78	84 84	65 67	78 77	73 73	81 81
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[2-86] [2-86]	[1-67] [2-68]	[2-96] [3-97]	[2-78] [2-73]	[2-92] [2-89]	[2-72] [2-70]
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[1-164] [0-163]	[0-110] [0-108]	[1-169] [1-162]	[0-120] [1-118]	[1-166] [0-163]	[0-114] [0-110]
	max. - (cm)	131 137	121 127	171 155	138 129	171 155	138 129
	max. + (cm)	288 289	225 223	360 363	287 278	360 363	287 278

Figuur bijlage 3 A-B
Cumulatieve verdeling van deresiduen



Hercalibratie afvoermodel $Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$

Regressiecoëfficiënten

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten afvoeren en neerslagen

Q ≥ 2300 m ³ /s Zichttijd: 1 dag	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstep				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein					
Worms / Rhein		-0,098			
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein					0,542
Lobith / Bovenrijn					0,520
Plochingen / Neckar					
Würzburg / Main		-0,109			
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel				0,062	
Cochem / Mosel		-0,160			
Hattingen / Ruhr				-0,613	1,276
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main					
Nancy-Essey, -Tomblaine					
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe				xxx	
Düsseldorf				4,410	
Bocholt-Liedern					

Constate: 74,043

xxx : station/tijdstep combinatie komt na hercalibratie niet meer in de regressievergelijking voor

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten afvoeren en neerslagen

Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 2 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstap				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein		-0,208			
Worms / Rhein					0,316
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein		-0,150			0,424
Köln / Rhein					
Lobith / Bovenrijn					0,554
Plochingen / Neckar					
Würzburg / Main					
Kalkofen / Lahn				-1,075	1,845
Trier / Mosel					0,489
Cochem / Mosel			-0,266		
Hattingen / Ruhr				-1,526	2,109
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main					
Nancy-Essey, -Tomblaine	-3,384	-2,565			
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf				11,062	
Bocholt-Liedern					

Constante: 158,709

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 2 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,996		
	tijdstep		
	t	t+1	t+2
Noord	15,064	4,343	
Zuid			

Constante: -26,577

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten afvoeren en neerslagen

Q ≥ 2300 m ³ /s Zichttijd: 3 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstep				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein					0,524
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein					
Lobith / Bovenrijn					0,238
Plochingen / Neckar					2,358
Würzburg / Main					1,598
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel					1,072
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr				-1,461	2,937
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main					
Nancy-Essey, -Tomblaine					
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe				12,629	
Düsseldorf				14,509	
Bocholt-Liedern					

Constante: 405,679

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

Q ≥ 2300 m ³ /s Zichttijd: 3 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,984		
	tijdstap		
	t	t+1	t+2
Noord	35,032	15,993	3,686
Zuid			

Constante: -63,581

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten afvoeren en neerslagen

Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 4 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstap				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein		-0,149			0,553
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein		xxx			
Köln / Rhein					
Lobith / Bovenrijn					0,254
Plochingen / Neckar					3,966
Würzburg / Main				-1,496	2,361
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel					0,879
Cochem / Mosel					xxx
Hattingen / Ruhr				-1,905	3,326
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main					
Nancy-Essey, -Tomblaine				20,889	
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf				24,106	
Bocholt-Liedern					

Constante: 591,690

xxx : station/tijdstap combinatie komt na hercalibratie niet meer in de regressievergelijking voor

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

Q ≥ 2300 m ³ /s Zichttijd: 4 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,959		
	tijdstep		
	t	t+1	t+2
Noord	45,845	34,416	15,436
Zuid	15,468	11,015	

Constante: -119,977

Residuen MLR Model $Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$: Afvoerbereik $Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$ (cursieve waarden na hercalibratie)

MLR-model $Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$ Zichttijd: 1 dag		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		10 9		10 9		10 9	
Q Residuen	aantal	1073		823		1896	
	gemiddelde (m^3/s)	5 5		-11 -11		-2 -2	
	abs. gemiddeld (m^3/s)	49 43		50 45		49 44	
	mediaan (m^3/s)	0 2		-12 -11		-5 -4	
	abs. mediaan (m^3/s)	32 30		36 32		34 31	
	std. dev. (m^3/s)	72 61		69 64		71 62	
	abs. std. dev. (m^3/s)	53 43		49 47		51 45	
	95% interval (m^3/s) (abs. residuen)	[3-151] [3-125]		[4-136] [3-125]		[3-147] [3-125]	
	99% interval (m^3/s) (abs. residuen)	[1-248] [0-211]		[1-278] [1-248]		[1-265] [0-224]	
	max. - (m^3/s)	269 242		304 287		304 287	
	max. + (m^3/s)	530 476		376 371		530 476	

MLR-model $Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$ Zichttijd: 1 dag		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		10 9		10 9		10 9	
H Residuen	aantal	1073		823		1896	
	gemiddelde (cm)	0,9 0,7		-1,2 -1,5		0,0 -0,2	
	abs. gemiddeld (cm)	5,6 5,0		5,3 4,8		5,5 4,9	
	mediaan (cm)	0 0		-2 -1		-1 0	
	abs. mediaan (cm)	4 4		4 4		4 4	
	std. dev. (cm)	7,7 6,7		6,7 6,2		7,3 6,6	
	abs. std. dev. (cm)	5,3 4,5		4,3 4,1		4,9 4,3	
	percentage $\leq 10 \text{ cm}$	87 90		90 91		88 90	
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[0-16] [0-13]		[1-13] [0-13]		[0-15] [0-13]	
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-25] [0-23]		[0-21] [0-19]		[0-23] [0-21]	
	max. - (cm)	22 30		25 27		25 30	
	max. + (cm)	50 45		32 23		50 45	

MLR-model Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 2 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		14 14	3 3	14 14	3 3	14 14	3 3
Q Residuen	aantal	1073		823		1896	
	gemiddelde (m³/s)	23 -4	21 -7	22 -1	22 -1	23 -3	21 -4
	abs. gemiddeld (m³/s)	90 81	85 75	91 86	84 78	91 83	84 76
	mediaan (m³/s)	18 -9	26 1	17 -8	28 0	18 -8	27 1
	abs. mediaan (m³/s)	54 50	57 49	53 52	53 50	54 51	55 49
	std. dev. (m³/s)	146 132	130 116	140 135	126 122	143 133	128 119
	abs. std. dev. (m³/s)	117 104	101 89	108 104	96 94	113 104	99 91
	95% interval (m³/s) (abs. residuen)	[4-298] [4-267]	[4-263] [5-251]	[6-323] [3-279]	[5-268] [5-243]	[5-302] [3-274]	[5-265] [5-246]
	99% interval (m³/s) (abs. residuen)	[0-594] [1-546]	[1-511] [1-423]	[1-527] [1-521]	[1-501] [1-459]	[1-563] [1-537]	[1-510] [1-451]
	max. - (m³/s)	546 432	553 445	594 635	574 608	594 635	574 608
	max. + (m³/s)	1014 1061	938 966	996 973	946 907	1014 1061	946 966

MLR-model Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 2 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		14 14	3 3	14 14	3 3	14 14	3 3
H Residuen	aantal	1073		823		1896	
	gemiddelde (cm)	3,5 -0,3	3,3 -0,5	2,7 -0,7	2,7 -0,6	3,1 -0,5	3,0 -0,5
	abs. gemiddeld (cm)	10,3 9,3	9,8 8,7	9,6 9,2	8,9 8,3	10,0 9,2	9,4 8,5
	mediaan (cm)	2 -1	3 0	2 -1	3 0	2 -1	3 0
	abs. mediaan (cm)	7 6	7 6	7 7	7 6	7 7	7 6
	std. dev. (cm)	15,3 14,2	13,5 12,6	13,7 13,1	12,0 11,6	14,6 13,7	12,9 12,2
	abs. std. dev. (cm)	11,8 10,7	9,8 9,2	10,2 9,4	8,6 8,1	11,1 10,2	9,3 8,7
	percentage ≤ 15 cm	80 83	82 85	80 81	85 86	80 82	83 85
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[0-30] [0-27]	[1-26] [1-25]	[1-30] [1-26]	[1-25] [1-23]	[1-30] [0-26]	[1-26] [1-24]
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-60] [0-50]	[0-50] [0-47]	[0-47] [0-42]	[0-38] [0-39]	[0-55] [0-45]	[0-46] [0-42]
	max. - (cm)	57 50	54 56	53 48	58 54	57 50	58 56
	max. + (cm)	123 114	100 96	91 89	74 65	123 114	100 96

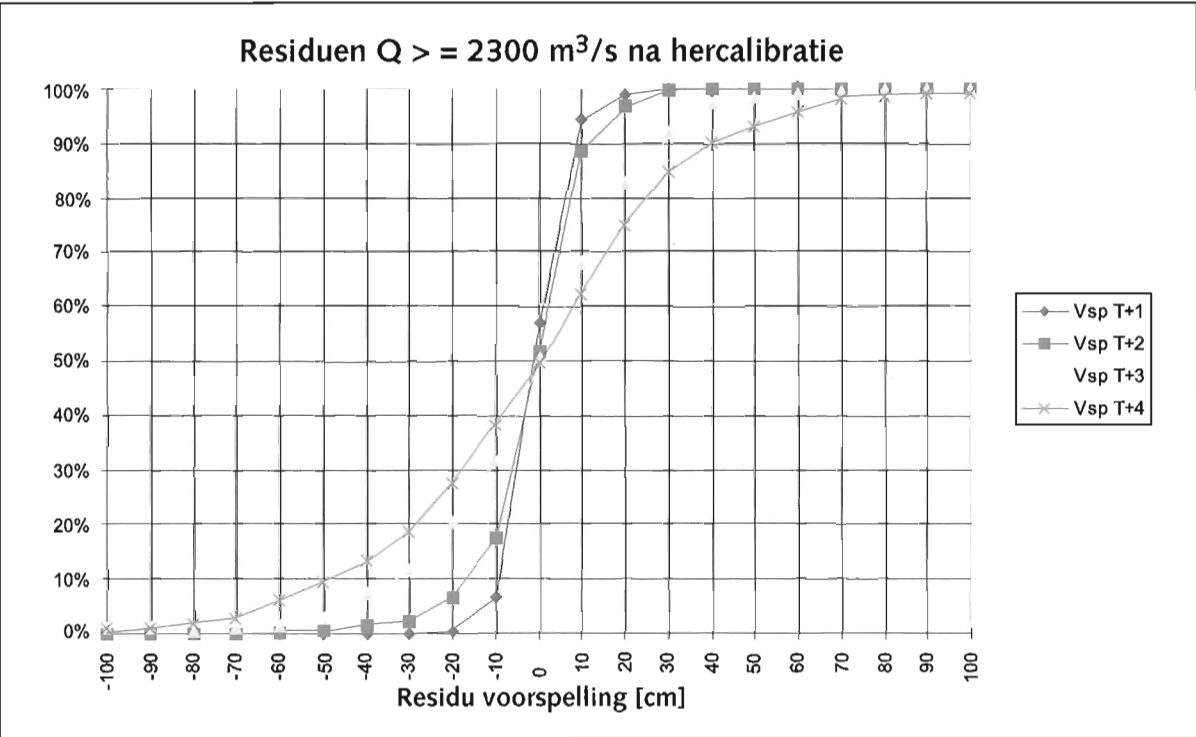
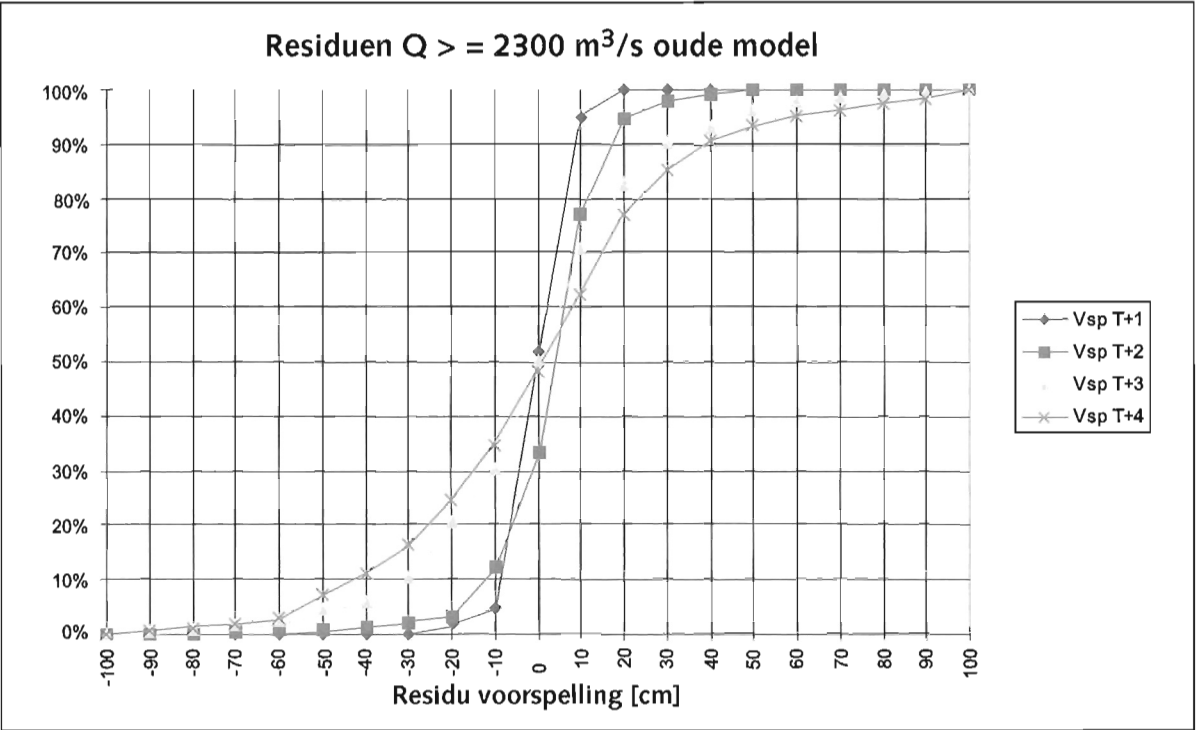
MLR-model Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 3 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		14 14	3 3	14 14	3 3	14 14	3 3
Q Residuen	aantal	1073		823		1896	
	gemiddelde (m³/s)	-31 -29	-32 -32	32 34	39 40	-4 -1	-1 -1
	abs. gemiddeld (m³/s)	171 170	149 157	206 204	182 183	186 185	163 186
	mediaan (m³/s)	-46 --32	-22 -13	-4 1	26 38	-30 -20	-1 8
	abs. mediaan (m³/s)	101 106	95 108	127 125	112 130	113 113	104 116
	std. dev. (m³/s)	271 268	224 225	331 322	288 277	300 294	256 251
	abs. std. dev. (m³/s)	213 208	171 164	260 252	226 211	235 229	197 187
	95% interval (m³/s) (abs. residuen)	[8-550] [7-543]	[10-459] [11-462]	[10-691] [11-670]	[9-592] [11-555]	[8-614] [8-601]	[9-512] [11-498]
	99% interval (m³/s) (abs. residuen)	[2-985] [1-985]	[2-866] [2-862]	[2-1069] [2-1085]	[2-1041] [1-967]	[2-1091] [1-1075]	[2-966] [1-899]
	max. - (m³/s)	792 885	866 900	1886 1637	1782 1521	1886 1637	1782 1521
	max. + (m³/s)	2547 2520	1615 1421	2868 2891	2322 2222	2868 2891	2322 2222

MLR-model Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 3 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		9 9	4 4	9 9	4 4	9 9	4 4
H Residuen	aantal	1073		823		1896	
	gemiddelde (cm)	-4,4 -3,9	-4,1 -3,9	2,4 2,6	3,5 3,7	-1,4 -1,1	-0,8 -0,6
	abs. gemiddeld (cm)	19,4 19,5	17,2 18,5	21,7 21,7	19,1 19,5	20,4 20,4	18,0 19,0
	mediaan (cm)	-6 -4	-3 -2	0 0	3 4	-4 -3	0 1
	abs. mediaan (cm)	13 14	12 14	16 16	15 16	14 15	13 15
	std. dev. (cm)	28,1 28,1	23,7 24,9	31,5 31,2	26,5 26,4	29,8 29,7	25,3 25,9
	abs. std. dev. (cm)	20,7 20,6	16,8 17,1	23,0 22,7	18,8 18,2	21,8 21,5	17,7 17,6
	percentage ≤ 20 cm	66 65	70 68	61 61	65 63	64 63	68 66
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[1-55] [1-57]	[1-47] [1-51]	[1-64] [1-63]	[1-50] [1-50]	[1-58] [1-60]	[1-49] [1-50]
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-98] [0-94]	[0-81] [0-87]	[0-106] [0-105]	[0-88] [0-88]	[0-103] [0-102]	[0-86] [0-87]
	max. - (cm)	77 94	93 108	125 111	119 133	125 111	119 133
	max. + (cm)	195 196	133 124	300 303	225 213	300 303	225 213

MLR-model Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 4 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		14 14	3 3	14 14	3 3	14 14	3 3
Q Residuen	aantal	1073		823		1896	
	gemiddelde (m³/s)	-43 -42	-47 -54	89 58	112 76	14 1	22 2
	abs. gemiddeld (m³/s)	276 271	225 240	328 326	270 266	298 295	244 251
	mediaan (m³/s)	-87 -75	-41 -31	-19 -40	63 55	-64 -57	5 9
	abs. mediaan (m³/s)	168 170	145 168	184 191	159 171	173 177	150 169
	std. dev. (m³/s)	442 428	338 342	548 524	441 411	495 475	394 379
	abs. std. dev. (m³/s)	347 334	257 249	448 415	366 323	395 372	310 284
	95% interval (m³/s) (abs. residuen)	[14-863] [12-839]	[13-685] [15-724]	[14-1129] [21-1081]	[11-860] [17-813]	[14-1008] [16-929]	[12-792] [16-752]
	99% interval (m³/s) (abs. residuen)	[2-1735] [3-1683]	[3-1176] [4-1131]	[2-2032] [6-1944]	[1-1821] [4-1580]	[2-1925] [3-1890]	[2-1581] [4-1355]
	max. - (m³/s)	1602 1278	1252 1340	2306 1890	2008 1580	2306 1890	2008 1580
	max. + (m³/s)	3480 3421	2509 2425	4413 4399	3685 3469	4413 4399	3685 3469

MLR-model Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 4 dagen		1982-1987		1988-1995		1982-1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		13 11	6 6	13 11	6 6	13 11	6 6
H Residuen	aantal	1073		823		1896	
	gemiddelde (cm)	-7,0 -6,6	-6,4 -6,5	6,4 3,2	10,1 6,7	-1,2 -2,4	0,7 -0,8
	abs. gemiddeld (cm)	31,2 30,6	25,8 28,1	34,4 34,3	27,9 28,0	32,6 32,2	26,7 28,1
	mediaan (cm)	-12 -10	-5 -4	-3 -6	9 7	-9 -8	1 1
	abs. mediaan (cm)	23 23	19 22	24 24	20 21	23 24	19 22
	std. dev. (cm)	44,6 43,4	35,3 37,4	50,6 48,9	38,6 37,5	47,8 46,1	37,7 38,0
	abs. std. dev. (cm)	32,6 31,5	24,9 25,4	37,7 35,1	28,5 25,8	35,0 33,1	26,5 25,6
	percentage ≤ 40 cm	75 74	81 78	71 71	79 76	74 72	80 77
	95% interval (cm) (abs. residuen)	[2-88] [2-84]	[2-74] [2-75]	[2-107] [3-96]	[2-79] [2-72]	[2-94] [2-91]	[2-75] [2-74]
	99% interval (cm) (abs. residuen)	[0-167] [0-156]	[0-116] [0-116]	[0-169] [0-152]	[0-131] [1-109]	[0-169] [0-154]	[0-121] [0-115]
	max. - (cm)	124 142	118 148	147 125	145 173	147 142	145 173
	max. + (cm)	325 304	243 213	398 396	302 278	398 396	302 278

Figuur bijlage 4, A-B
Cumulatieve verdeling van de residuen



**Karakteristieken residuen MLR Model $Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$
bij verschillende afvoerbereiken voor en na hercalibratie**

Datareeks 1982-1995, voorspellingen inclusief neerslagvoorspelling
Cursieve getallen, rechts in elke kolom zijn residuen na hercalibratie.

Voorspelling 1 dag vooruit

afvoerbereik	aantal	gemiddelde absolute waarde [cm]	std. dev. absolute waarde [cm]	maximum (-) [cm]	maximum (+) [cm]
$2300 \leq Q < 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	840	5,1 4,9	5,0 4,3	22 30	35 26
$3000 \leq Q < 3500 \text{ m}^3/\text{s}$	380	5,4 5,3	4,4 4,4	14 27	31 26
$3500 \leq Q < 4000 \text{ m}^3/\text{s}$	216	5,9 5,2	5,7 5,4	25 26	50 45
$4000 \leq Q < 4500 \text{ m}^3/\text{s}$	147	6,3 5,1	4,6 4,4	17 21	25 23
$4500 \leq Q < 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	90	5,8 4,5	4,5 3,6	17 15	24 15
$Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	223	5,8 4,3	4,5 3,6	21 16	23 15

Voorspelling 2 dagen vooruit

afvoerbereik	aantal	gemiddelde absolute waarde [cm]	std. dev. absolute waarde [cm]	maximum (-) [cm]	maximum (+) [cm]
$2300 \leq Q < 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	840	9,0 8,5	8,8 8,5	40 52	100 83
$3000 \leq Q < 3500 \text{ m}^3/\text{s}$	380	9,8 8,8	9,8 9,6	58 56	73 65
$3500 \leq Q < 4000 \text{ m}^3/\text{s}$	216	10,5 9,3	11,4 10,3	54 39	93 96
$4000 \leq Q < 4500 \text{ m}^3/\text{s}$	147	9,4 7,7	9,3 7,8	45 35	76 60
$4500 \leq Q < 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	90	9,6 8,1	8,3 6,3	41 33	30 23
$Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	223	9,2 8,3	8,5 7,5	33 29	54 44

Voorspelling 3 dagen vooruit

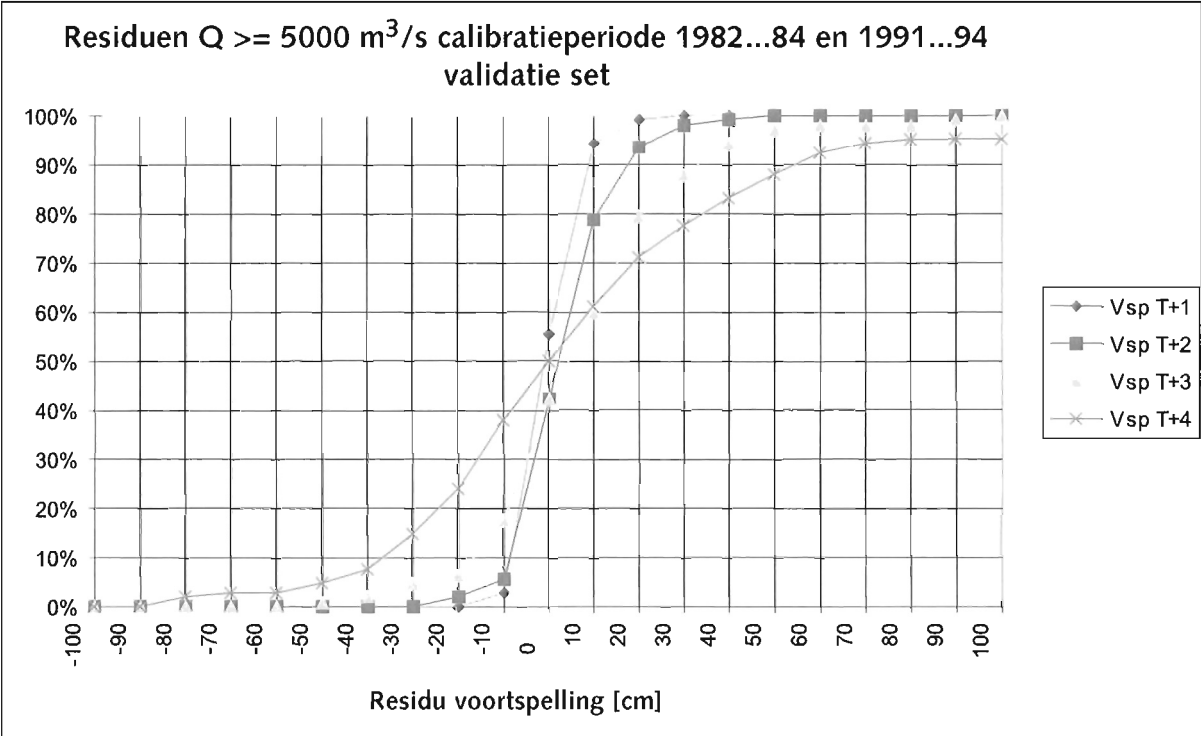
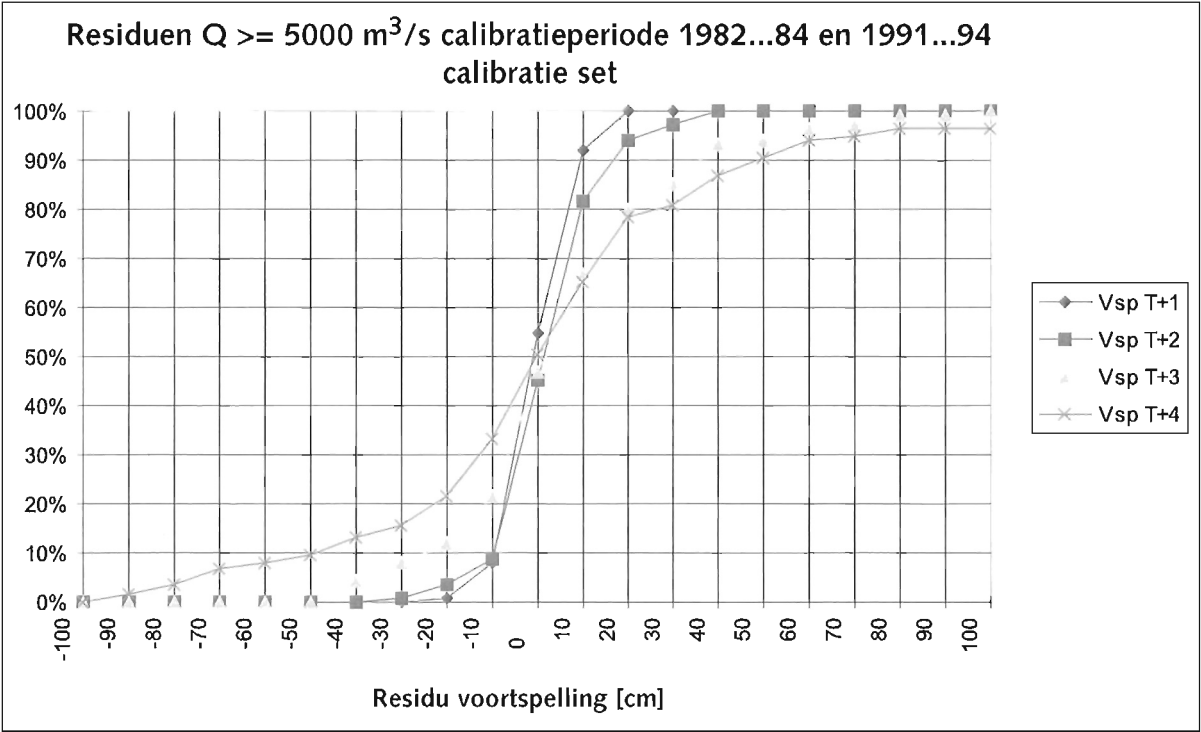
afvoerbereik	aantal	gemiddelde absolute waarde [cm]	std. dev. absolute waarde [cm]	maximum (-) [cm]	maximum (+) [cm]
$2300 \leq Q < 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	840	17,7 19,6	18,4 19,0	112 133	225 213
$3000 \leq Q < 3500 \text{ m}^3/\text{s}$	380	18,3 19,8	19,0 17,8	119 108	113 105
$3500 \leq Q < 4000 \text{ m}^3/\text{s}$	216	18,7 18,6	16,3 16,4	79 84	109 96
$4000 \leq Q < 4500 \text{ m}^3/\text{s}$	147	18,5 18,7	18,8 17,8	80 80	111 101
$4500 \leq Q < 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	90	17,4 16,2	15,7 14,1	47 42	103 87
$Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	223	18,0 17,0	14,3 13,0	54 45	76 73

Voorspelling 4 dagen vooruit

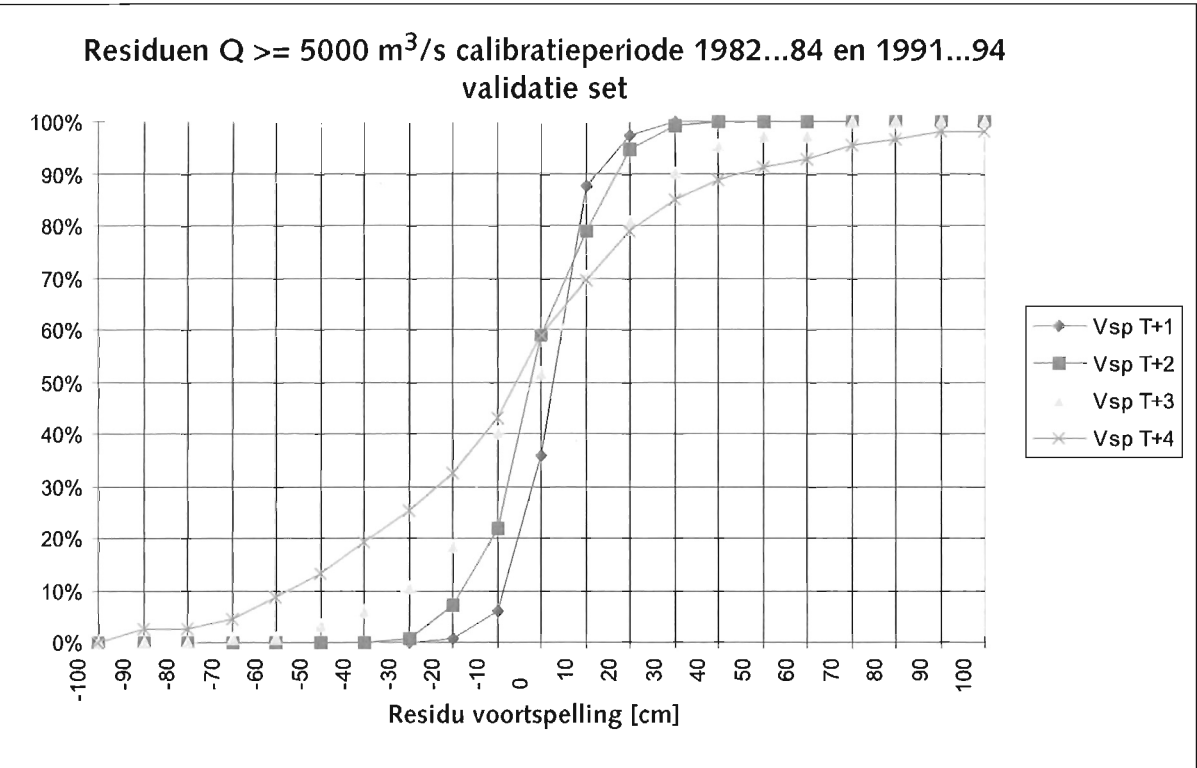
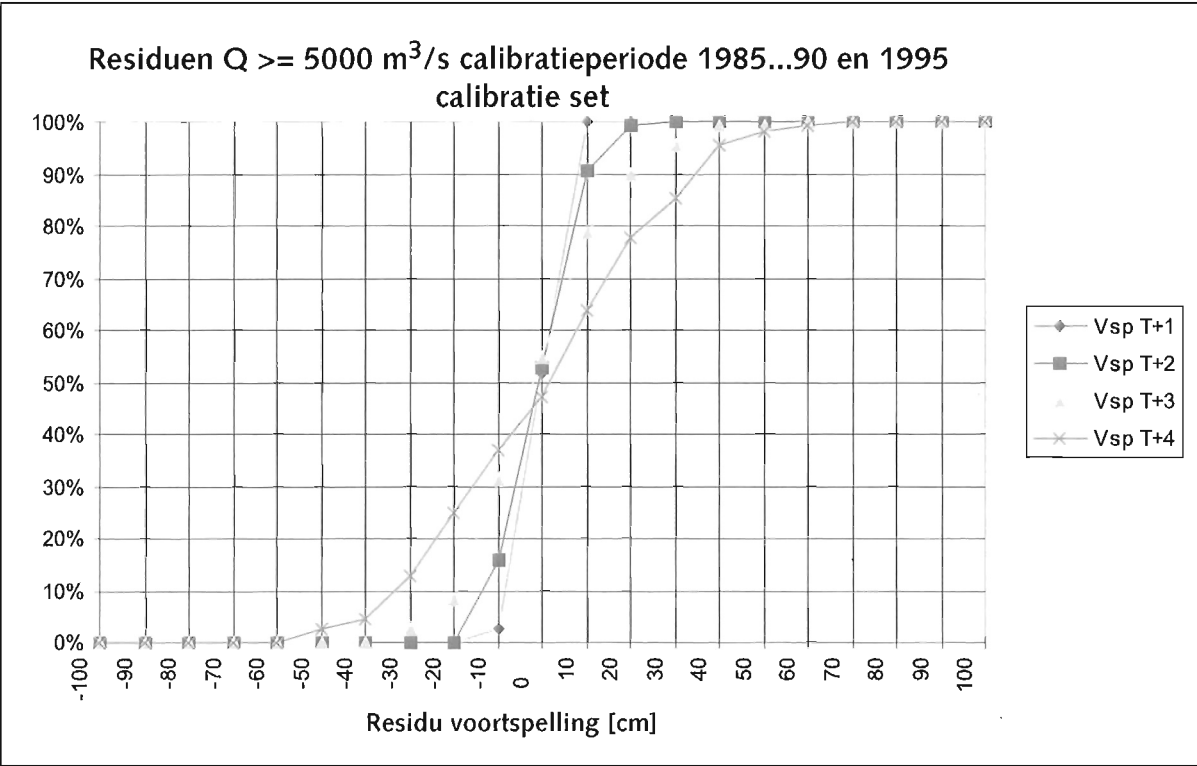
afvoerbereik	aantal	gemiddelde absolute waarde [cm]		std. dev. absolute waarde [cm]		maximum (-) [cm]		maximum (+) [cm]	
$2300 \leq Q < 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	840	25,3	28,8	27,6	28,1	142	173	302	278
$3000 \leq Q < 3500 \text{ m}^3/\text{s}$	380	27,4	29,5	27,2	26,5	145	146	213	203
$3500 \leq Q < 4000 \text{ m}^3/\text{s}$	216	27,7	26,9	23,6	21,2	106	101	107	94
$4000 \leq Q < 4500 \text{ m}^3/\text{s}$	147	30,2	26,7	27,9	24,0	111	97	134	105
$4500 \leq Q < 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	90	30,1	26,0	23,1	19,4	86	63	118	93
$Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$	223	26,3	25,6	24,0	20,5	75	66	185	119

Modellering afvoerbereik $Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$

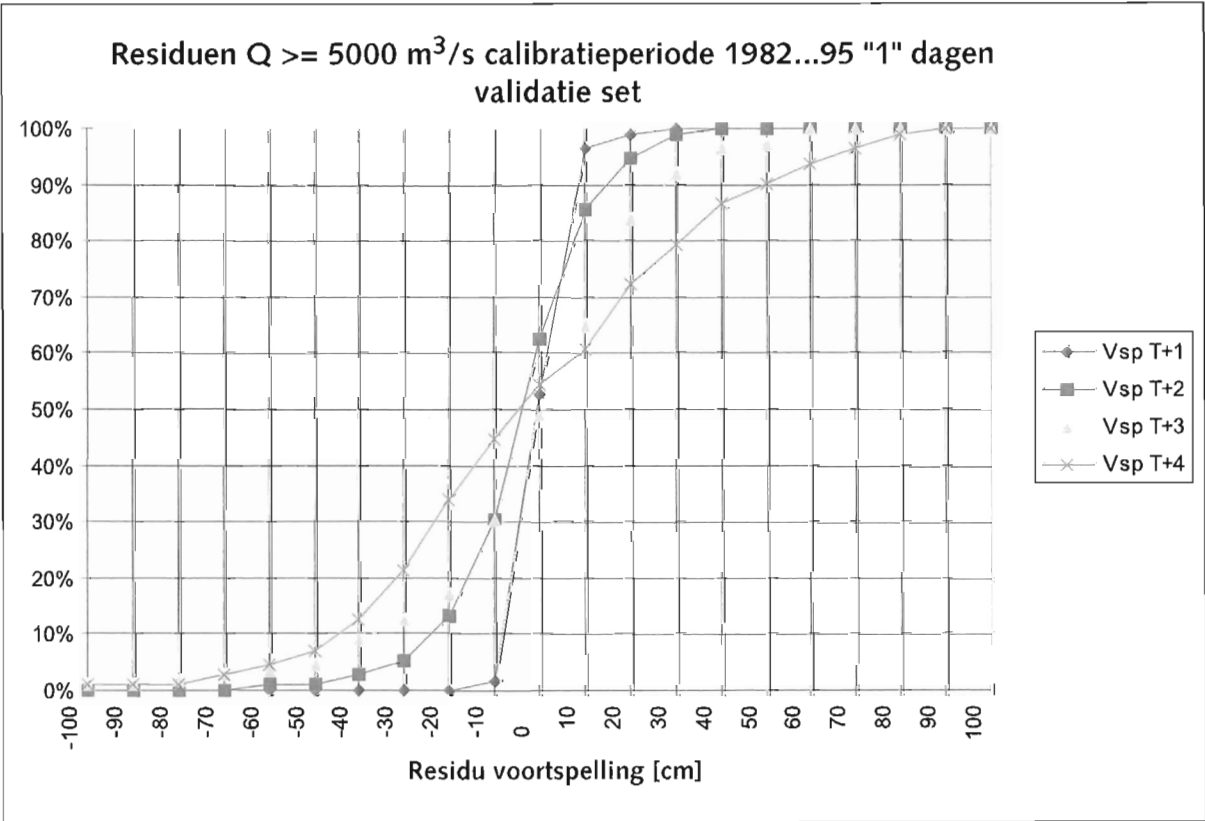
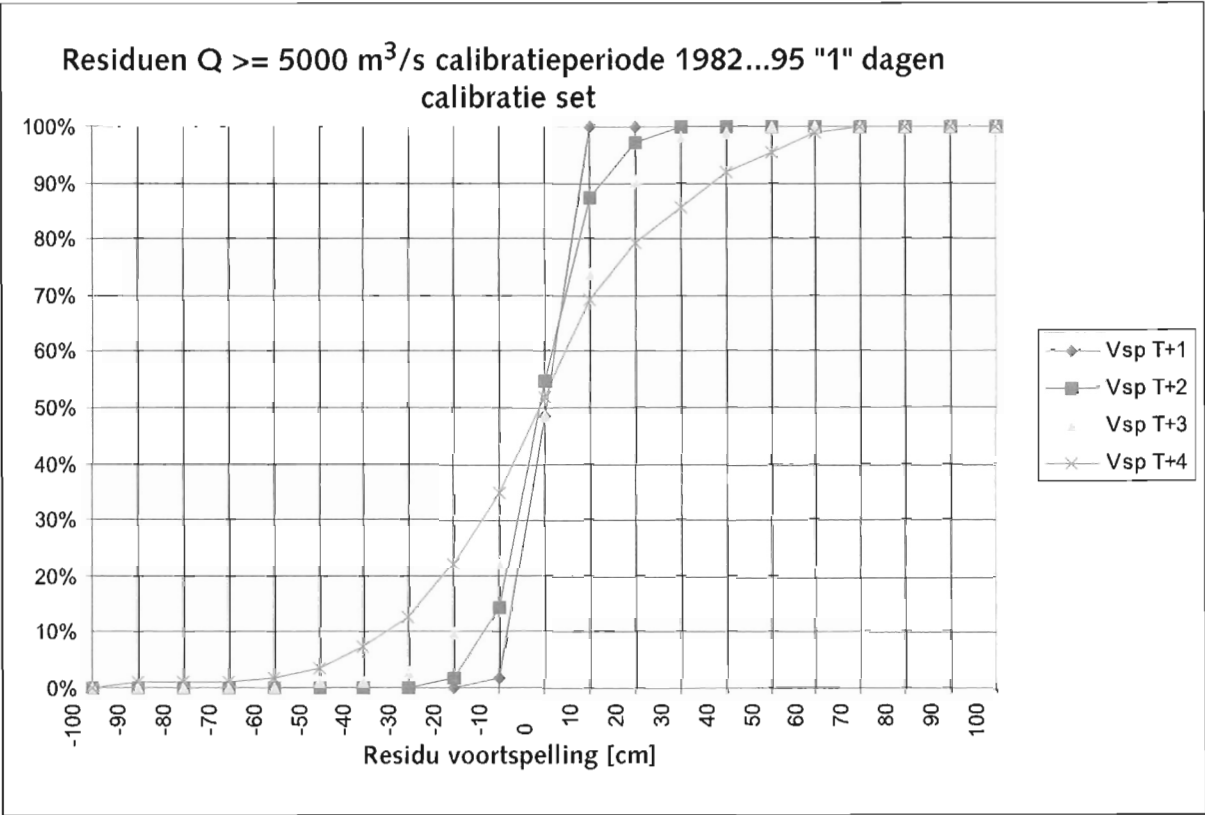
.....
Figuur bijlage 6, 1 A-B
 Cumulatieve verdeling residuen calibratie (a): periode 1982...1984 en 1991...1994



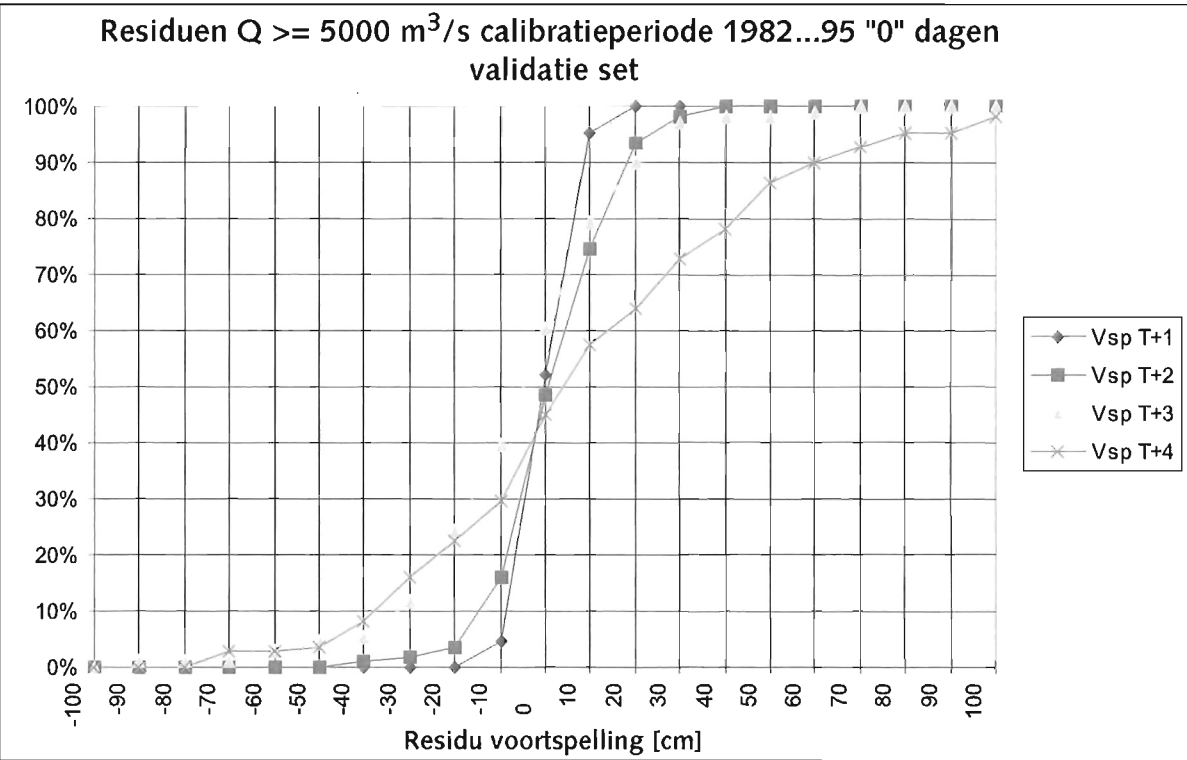
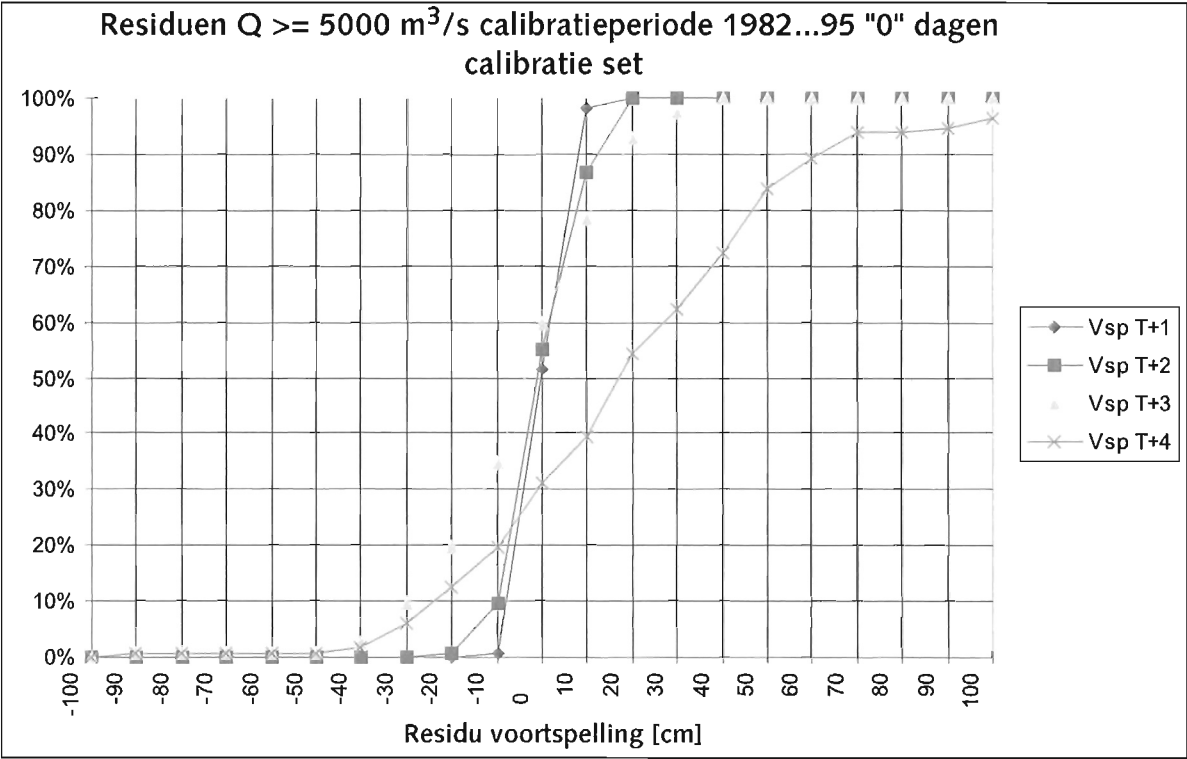
Figuur bijlage 6, 2 A-B
Cumulatieve verdeling residuen calibratie (b): periode 1985...1990 en 1995



Figuur bijlage 6, 3 A-B
Cumulatieve verdeling residuen calibratie (c): periode 1982...1995 met "1" dagen

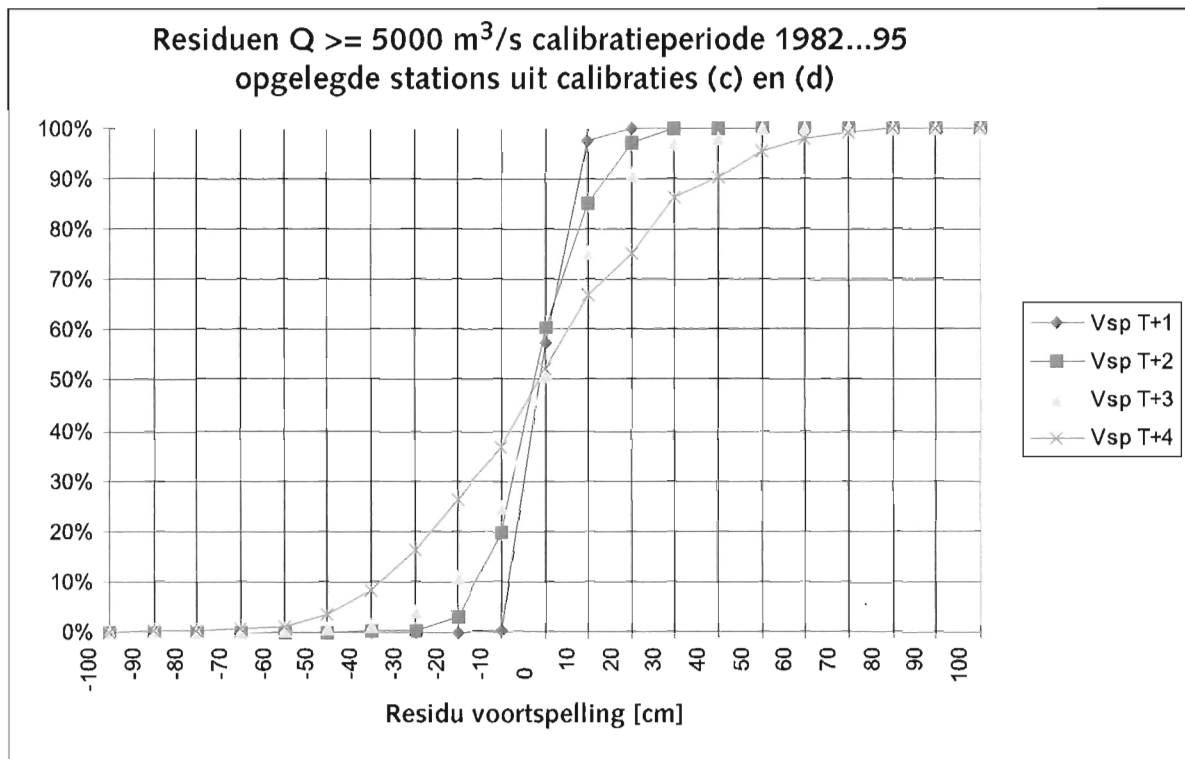


Figuur bijlage 6, 4 A-B
Cumulatieve verdeling residuen calibratie (d): periode 1982...1995 met "0" dagen



Figuur bijlage 6, 5

Cumulatieve verdeling residuen calibratie periode: 1982...1995 met opgelegde stations uit calibratie (c) en (d)



Regressiecoëfficiënten nieuw Model voor $Q \geq 5000$, gecalibreerd met dataset 1982...1995 (opgelegde stations uit calibraties met “0” en “1” dagen)

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten afvoeren en neerslagen

$Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ Zichttijd: 1 dag	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstep				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein					-0,036
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein				-0,286	0,638
Lobith / Bovenrijn				-0,135	0,770
Plochingen / Neckar					
Würzburg / Main					0,115
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel					
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr				-0,391	0,876
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen					
Frankfurt am Main	4,083				
Nancy-Essey, -Tomblaine					
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf					
Bocholt-Liedern				7,706	

Constate: 50,263

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten afvoeren en neerslagen

Q ≥ 5000 m ³ /s Zichttijd: 2 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstap				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein					
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein					0,913
Köln / Rhein					
Lobith / Bovenrijn	0,042				
Plochingen / Neckar					0,822
Würzburg / Main					
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel					
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr					2,153
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen				-24,418	
Frankfurt am Main				35,261	
Nancy-Essey, -Tomblaine					
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf					
Bocholt-Liedern				25,086	

Constante: -102,030

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

Q ≥ 5000 m³/s Zichttijd: 2 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,994		
	tijdstap		
	t	t+1	t+2
Noord	20,823		
Zuid			-10,006

Constante: 6,375

Stap 1 hercalibratie: regressie met gemeten afvoeren en neerslagen

Q ≥ 5000 m³/s Zichttijd: 3 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstep				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein					
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					0,776
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein					
Lobith / Bovenrijn	0,058				
Plochingen / Neckar					2,370
Würzburg / Main					
Kalkofen / Lahn	-0,685				1,716
Trier / Mosel					0,964
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr					1,706
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen				-37,426	
Frankfurt am Main				40,672	
Nancy-Essey, -Tomblaine					
Trier-Petrisberg					
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf					
Bocholt-Liedern				45,124	

Constante: 138,163

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

Q ≥ 5000 m ³ /s Zichttijd: 3 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,971		
	tijdstap		
	t	t+1	t+2
Noord	50,504	18,867	
Zuid			

Constante: 14,499

Stap I hercalibratie: regressie met gemeten afvoeren en neerslagen

Q ≥ 5000 m³/s Zichttijd: 4 dagen	Regressiecoëfficiënten				
	tijdstep				
Station	t-4	t-3	t-2	t-1	t
Maxau / Rhein					0,770
Worms / Rhein					
Kaub / Rhein					
Koblenz / Rhein					
Andernach / Rhein					
Köln / Rhein					
Lobith / Bovenrijn	0,056				
Plochingen / Neckar					4,766
Würzburg / Main					1,305
Kalkofen / Lahn					
Trier / Mosel					1,122
Cochem / Mosel					
Hattingen / Ruhr					2,248
Strasbourg-Entzheim					
Stuttgart-Echterdingen				-35,228	
Frankfurt am Main					
Nancy-Essey, -Tomblaine		-25,477	-25,235		
Trier-Petrisberg				35,061	
Giessen-Liebigshöhe					
Düsseldorf					
Bocholt-Liedern				47,980	

Constance: 344,495

Stap 2 hercalibratie: bijstellingsprocedure met behulp van neerslagvoorspellingen

Q ≥ 5000 m³/s Zichttijd: 4 dagen	Regressiecoëfficiënten		
Voorspeld na stap 1	0,932		
	tijdstep		
	t	t+1	t+2
Noord	81,499	62,022	
Zuid			

Constante: 62,751

Residuen nieuwe MLR Model: Afvoerbereik $Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ (calibratieset 1982-1995)

MLR-model $Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ Zichttijd: 1 dag	Q residuen (m^3/s)		H residuen (cm)	
	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen	10		10	
aantal	223		223	
gemiddelde	-4		0	
abs. gemiddelde	59		4	
mediaan	-8		0	
abs. mediaan	44		3	
std. dev.	79		4,5	
abs. std. dev.	53		2,8	
95% interval (abs. residuen)	[0-151]		[0-8]	
99% interval (abs. residuen)	[0-239]		[0-12]	
max. -	244		16	
max. +	352		14	
percentage $\leq 10 \text{ cm}$			97	

MLR-model $Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ Zichttijd: 2 dagen	Q residuen (m^3/s)		H residuen (cm)	
	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen	7	3	7	3
aantal	223		223	
gemiddelde	-20	-20	-1	-1
abs. gemiddelde	141	132	9	9
mediaan	-31	-24	-2	-2
abs. mediaan	117	108	7	7
std. dev.	182	168	11,7	10,9
abs. std. dev.	116	106	7,2	6,8
95% interval (abs. residuen)	[0-378]	[0-328]	[0-23]	[0-21]
99% interval (abs. residuen)	[0-508]	[0-407]	[0-34]	[0-26]
max. -	510	472	44	43
max. +	650	530	35	26
percentage $\leq 15 \text{ cm}$			83	84

MLR-model Q ≥ 5000 m ³ /s Zichttijd: 3 dagen	Q residuen (m ³ /s)		H residuen (cm)	
	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen	10	3	10	3
aantal	223		223	
gemiddelde	2	2	0	0
abs. gemiddelde	220	185	15	13
mediaan	-37	-1	-3	0
abs. mediaan	156	139	12	10
std. dev.	315	253	20,8	16,8
abs. std. dev.	225	172	14,3	10,8
95% interval (abs. residuen)	[0-606]	[0-524]	[0-37]	[0-36]
99% interval (abs. residuen)	[0-1091]	[0-681]	[0-66]	[0-48]
max. -	1000	757	48	60
max. +	1522	1313	118	49
percentage ≤ 20 cm			75	82

MLR-model Q ≥ 5000 m ³ /s Zichttijd: 4 dagen	Q residuen (m ³ /s)		H residuen (cm)	
	stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen	11	3	117	3
aantal	223		223	
gemiddelde	3	1	-1	0
abs. gemiddelde	390	318	28	23
mediaan	-83	-22	-7	-1
abs. mediaan	268	246	22	20
std. dev.	560	426	37,6	29,3
abs. std. dev.	400	283	25,2	17,9
95% interval (abs. residuen)	[0-1006]	[0-836]	[0-70]	[0-54]
99% interval (abs. residuen)	[0-2095]	[0-1171]	[0-133]	[0-76]
max. -	1571	1046	77	99
max. +	2628	1682	175	80
percentage ≤ 15 cm			79	83

**Karakteristieken residuen MLR Modellen $Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$
en $Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ na calibratie met hysteresis effect**

Residuen deelmodel Q ≥ 2300 m³/s na calibratie met hysteresis effect

MLR-model met hysteresis effect Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 1 dag		Q-residuen [m³/s] 1990-maart 1995		H-residuen [cm] 1990-maart 1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		10		10	
	aantal	514		514	
	gemiddelde	-28		0	
	abs. gemiddeld	88		6	
	mediaan	-33		0	
	abs. mediaan	65		5	
	std. dev.	112		8	
	abs. std. dev.	75		5	
	percentage ≤ 10 cm			82	
	95% interval (abs. residuen)	[0-213]		[0-15]	
	99% interval (abs. residuen)	[0-308]		[0-23]	
	max. -	277		41	
	max. +	614		24	

MLR-model met hysteresis effect Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 2 dagen		Q-residuen [m³/s] 1990-maart 1995		H-residuen [cm] 1990-maart 1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		14	4	14	4
	aantal	514		514	
	gemiddelde	-12	-10	3	3
	abs. gemiddeld	140	125	12	12
	mediaan	-30	-23	2	4
	abs. mediaan	103	90	9	9
	std. dev.	201	181	17	15
	abs. std. dev.	144	131	12	10
	percentage ≤ 10 cm			70	73
	95% interval (abs. residuen)	[0-393]	[0-353]	[0-32]	[0-31]
	99% interval (abs. residuen)	[0-684]	[0-601]	[0-53]	[0-46]
	max. -	615	583	54	52
	max. +	1126	1058	95	75

MLR-model met hysteresis effect Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 3 dagen		Q-residuen [m³/s] 1990-maart 1995		H-residuen [cm] 1990-maart 1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		9	5	9	5
	aantal	514		514	
	gemiddelde	24	26	6	7
	abs. gemiddeld	268	226	25	23
	mediaan	-45	6	4	8
	abs. mediaan	176	152	18	19
	std. dev.	411	344	35	30
	abs. std. dev.	311	261	25	20
	percentage ≤ 10 cm			55	53
	95% interval (abs. residuen)	[0-791]	[0-660]	[0-75]	[0-56]
	99% interval (abs. residuen)	[0-1414]	[0-1251]	[0-110]	[0-90]
	max. -	1619	1476	125	145
	max. +	3299	2547	308	208

MLR-model met hysteresis effect Q ≥ 2300 m³/s Zichttijd: 4 dagen		Q-residuen [m³/s] 1990-maart 1995		H-residuen [cm] 1990-maart 1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		11	7	11	7
	aantal	514		514	
	gemiddelde	53	74	7	11
	abs. gemiddeld	406	305	36	31
	mediaan	-91	16	4	11
	abs. mediaan	268	177	26	24
	std. dev.	638	492	53	40
	abs. std. dev.	494	393	39	28
	percentage ≤ 10 cm			68	71
	95% interval (abs. residuen)	[0-1231]	[0-966]	[0-106]	[0-76]
	99% interval (abs. residuen)	[0-2983]	[0-2019]	[0-160]	[0-129]
	max. -	1776	1486	118	177
	max. +	4597	3618	398	274

Residuen deelmodel Q ≥ 5000 m³/s na calibratie met hysteresis effect

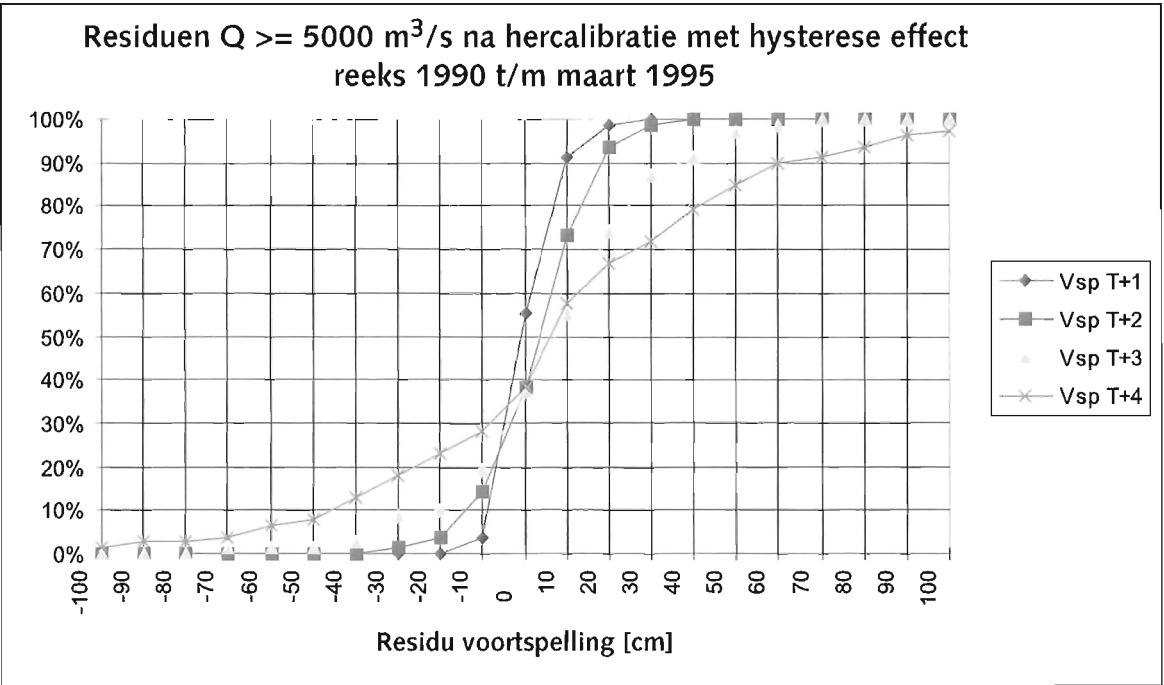
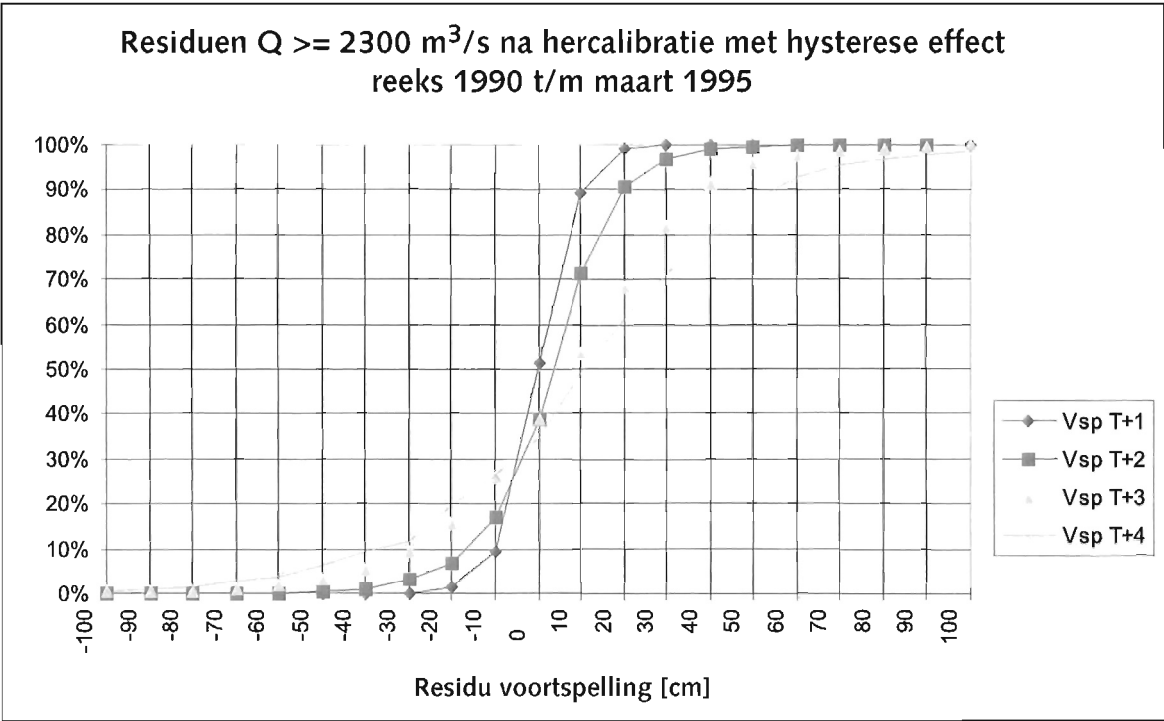
MLR-model met hysteresis effect Q ≥ 5000 m³/s Zichttijd: 1 dag		Q-residuen [m³/s] 1990-maart 1995		H-residuen [cm] 1990-maart 1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		11		11	
	aantal	78		78	
	gemiddelde	-24		1	
	abs. gemiddeld	66		5	
	mediaan	-25		0	
	abs. mediaan	43		5	
	std. dev.	96		7	
	abs. std. dev.	73		4	
	percentage ≤ 10 cm			87	
	95% interval (abs. residuen)	[0-209]		[0-12]	
	99% interval (abs. residuen)	[0-307]		[0-19]	
	max. -	257		17	
	max. +	477		25	

MLR-model met hysteresis effect Q ≥ 5000 m³/s Zichttijd: 2 dagen		Q-residuen [m³/s] 1990-maart 1995		H-residuen [cm] 1990-maart 1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		10	2	10	2
	aantal	78		78	
	gemiddelde	-19	-18	3	3
	abs. gemiddeld	136	137	10	10
	mediaan	-35	-33	3	4
	abs. mediaan	107	103	8	9
	std. dev.	183	187	12	12
	abs. std. dev.	123	127	8	7
	percentage ≤ 10 cm			77	77
	95% interval (abs. residuen)	[0-341]	[0-393]	[0-22]	[0-23]
	99% interval (abs. residuen)	[0-534]	[0-543]	[0-32]	[0-31]
	max. -	732	655	34	31
	max. +	475	434	31	31

MLR-model met hysteresis effect $Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ Zichttijd: 3 dagen		Q-residuen [m ³ /s] 1990-maart 1995		H-residuen [cm] 1990-maart 1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		14	2	14	2
	aantal	78		78	
	gemiddelde	25	30	6	7
	abs. gemiddeld	271	295	17	19
	mediaan	-32	-1	5	7
	abs. mediaan	175	202	16	15
	std. dev.	376	434	22	24
	abs. std. dev.	261	318	14	16
	percentage $\leq 10 \text{ cm}$			68	64
	95% interval (abs. residuen)	[0-824]	[0-1016]	[0-49]	[0-49]
	99% interval (abs. residuen)	[0-1156]	[0-1443]	[0-54]	[0-64]
	max. -	981	1422	49	70
	max. +	1241	1515	64	62

MLR-model met hysteresis effect $Q \geq 5000 \text{ m}^3/\text{s}$ Zichttijd: 4 dagen		Q-residuen [m ³ /s] 1990-maart 1995		H-residuen [cm] 1990-maart 1995	
		stap 1	stap 2	stap 1	stap 2
aantal variabelen		11	3	11	3
	aantal	78		78	
	gemiddelde	66	60	8	9
	abs. gemiddeld	472	534	31	33
	mediaan	-65	-53	7	5
	abs. mediaan	330	275	26	28
	std. dev.	650	792	40	44
	abs. std. dev.	449	585	25	30
	percentage $\leq 10 \text{ cm}$			69	67
	95% interval (abs. residuen)	[0-1432]	[0-1993]	[0-69]	[0-92]
	99% interval (abs. residuen)	[0-1936]	[0-2168]	[0-133]	[0-120]
	max. -	1124	1640	76	117
	max. +	2012	2357	133	128

.....
Figuur bijlage 7 A-B
Cumulatieve verdeling residuen calibratie (d): periode 1982...1995 met "0" dagen



**Resumé karakteristieken residuen MLR Model $Q \geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$
voor en na hercalibratie, zonder en met hysteresis effect**

1. voor hercalibratie
2. na hercalibratie op dataset 1982-1995
3. na hercalibratie met hysteresis effect

Residuen		1 dag vooruit		2dagen vooruit		3dagen vooruit		4 dagen vooruit	
		Q	H	Q	H	Q	H	Q	H
aantal	1	223							
	2	223							
	3	119							
gemiddelde absolute waarde in $[\text{m}^3/\text{s}]$ en $[\text{cm}]$	1	93	5,8	142	9,2	270	18,0	374	26,3
	2	72	4,3	130	8,3	255	16,9	370	25,6
	3	85	5,2	156	9,9	269	18,1	398	27,8
std.dev. absolute waarde in $[\text{m}^3/\text{s}]$ en $[\text{cm}]$	1	78	4,5	142	8,5	263	14,3	429	24,0
	2	70	3,6	138	7,5	245	13,0	362	20,5
	3	82	4,3	163	8,7	261	14,2	383	22,1
maximum waarde (-) in $[\text{m}^3/\text{s}]$ en $[\text{cm}]$	1	304	21	475	33	1011	54	1252	75
	2	249	16	552	29	810	45	988	66
	3	342	22	700	36	930	49	1022	68
maximum waarde (+) in $[\text{m}^3/\text{s}]$ en $[\text{cm}]$	1	376	23	946	54	1998	76	3685	185
	2	371	15	907	44	1925	73	2598	119
	3	467	19	936	48	2019	77	2755	118
voldoet aan gestelde eis in [%]	1		85		83		61		81
	2		93		85		72		81
	3		89		79		66		76

**Resultaten van de diverse deelmodellen voor hoge afvoeren
voor de hoogwaters van 1983, 1988, 1993/94 en 1995
voor en na hercalibratie**

Voorspelling één dag vooruit

	Q ≥ 2300 oud				Q ≥ 2300 her				Q ≥ 5000			
Hoogwater	83	88	93	95	83	88	93	95	83	88	93	95
aantal	20	25	23	14	20	25	23	14	20	25	23	14
gemiddeld [cm]	-2	4	-1	-1	0	2	0	0	1	1	1	0
gemiddeld abs. [cm]	6	5	4	8	3	5	4	6	4	4	4	4
mediaan [cm]	-3	5	0	-4	-1	2	-1	-3	2	1	2	1
std. dev. abs. [cm]	3	4	4	5	3	4	3	4	2	3	3	2
95 % [cm]	10	14	12	15	8	14	10	12	7	8	9	8
99 % [cm]	11	15	15	16	10	15	13	14	10	9	13	9
max. - [cm]	10	6	12	11	7	9	10	9	6	6	9	9
max. + [cm]	11	15	16	16	10	15	14	14	11	9	14	8
voldoet aan eis [%]	95	88	87	71	100	88	96	86	95	100	96	100

Voorspelling twee dagen vooruit

	Q ≥ 2300 oud				Q ≥ 2300 her				Q ≥ 5000			
Hoogwater	83	88	93	95	83	88	93	95	83	88	93	95
aantal	20	25	23	14	20	25	23	14	20	25	23	14
gemiddeld [cm]	-1	5	3	5	-3	5	1	7	-2	5	0	-3
gemiddeld abs. [cm]	6	8	9	11	6	8	8	10	8	10	7	9
mediaan [cm]	-1	4	2	3	-4	4	1	4	-2	7	1	-5
std. dev. abs. [cm]	5	6	9	9	5	7	8	10	4	6	5	5
95 % [cm]	13	17	32	25	15	21	23	28	17	19	15	17
99 % [cm]	13	22	35	35	15	29	24	34	20	20	17	18
max. - [cm]	13	8	16	10	15	10	23	5	21	15	17	18
max. + [cm]	11	24	35	37	15	31	24	36	17	20	15	14
voldoet aan eis [%]	100	92	83	79	100	88	78	79	85	80	96	86

Voorspelling drie dagen vooruit

	Q ≥ 2300 oud				Q ≥ 2300 her				Q ≥ 5000			
Hoogwater	83	88	93	95	83	88	93	95	83	88	93	95
aantal	20	25	23	14	20	25	23	14	20	25	23	14
gemiddeld [cm]	1	12	4	4	5	9	6	10	0	5	2	3
gemiddeld abs. [cm]	9	18	27	23	8	16	26	20	9	12	12	14
mediaan [cm]	-1	13	8	3	4	10	6	6	-1	9	-2	3
std. dev. abs. [cm]	12	11	16	18	13	11	16	22	7	7	12	12
95 % [cm]	21	33	52	53	20	33	54	67	20	23	41	33
99 % [cm]	24	44	61	68	26	44	61	72	24	26	45	46
max. - [cm]	15	25	53	42	8	33	38	21	20	26	20	21
max. + [cm]	25	48	63	72	27	48	63	73	25	24	46	49
voldoet aan eis [%]	90	56	43	50	95	72	48	71	95	92	87	79

Voorspelling vier dagen vooruit

	Q ≥ 2300 oud				Q ≥ 2300 her				Q ≥ 5000			
Hoogwater	83	88	93	95	83	88	93	95	83	88	93	95
aantal	20	25	23	14	20	25	23	14	20	25	23	14
gemiddeld [cm]	-1	20	21	26	2	23	12	26	2	15	9	3
gemiddeld abs. [cm]	13	27	37	39	12	32	36	36	17	22	28	25
mediaan [cm]	-4	23	22	21	-1	20	11	21	0	13	13	-1
std. dev. abs. [cm]	15	15	29	34	16	20	25	34	11	17	16	23
95 % [cm]	23	53	92	107	27	72	83	107	32	48	51	67
99 % [cm]	30	56	115	119	46	79	101	117	39	73	63	73
max. - [cm]	32	46	51	41	19	46	47	27	27	27	45	47
max. + [cm]	22	57	121	122	51	80	106	119	41	80	66	74
voldoet aan eis [%]	100	84	65	64	95	68	70	71	95	92	74	79

**Invoerselectie voor neurale netwerken die als foutencorrector zijn
getraind voor het deelmodel van Model Lobith voor
afvoeren $\geq 2300 \text{ m}^3/\text{s}$, voor de eerste, tweede,
derde en vierde dag voorspelling.
(Vos, 1997)**

Tabel 1^a Invoer voor de netwerken A, B en C welke zijn gebruikt om residuen die zijn ontstaan na gebruik van het MLR-model voor de eerste dag en hoog water te voorspellen. Hierbij geldt : t+1 = morgen; t-1 = gisteren enzovoorts.

Net	L_t	L_{t-1}	L_t-L_{t-1}	L_{t+1}	$R_{t-1,t}$	Comp	VSPN	VSPZ	# inputs
A	x	x	x	x	x				5
B						x			48
C	x		x	x	x	x	x	x	54

Tabel 2^a Invoer voor de netwerken A, B en C welke zijn gebruikt om residuen die zijn ontstaan na gebruik van het MLR-model voor de tweede dag en hoog water te voorspellen. Hierbij geldt : t+1 = morgen; t-1 = gisteren enzovoorts.

Net	L_t	L_{t-1}	L_t-L_{t-1}	L_{t+2}	$R_{t-2,t}$	$R_{t-1,t}$	Comp	VSPN	VSPZ	# inputs
A	x	x	x	x	x					5
B							x			48
C	x		x	x	x	x	x	x	x	55

Tabel 3^a Invoer voor de netwerken A, B en C welke zijn gebruikt om residuen die zijn ontstaan na gebruik van het MLR-model voor de derde dag en hoog water te voorspellen. Hierbij geldt : t+1 = morgen; t-1 = gisteren enzovoorts.

Net	L_t	L_{t-1}	L_t-L_{t-1}	L_{t+3}	$R_{t-3,t}$	$R_{t-2,t}$	$R_{t-1,t}$	Comp	VSPN	VSPZ	# inputs
A	x	x	x	x	x						5
B								x			48
C	x		x	x	x	x	x	x	x	x	56

Tabel 4^a Invoer voor de netwerken A, B en C welke zijn gebruikt om residuen die zijn ontstaan na gebruik van het MLR-model voor de vierde dag en hoog water te voorspellen. Hierbij geldt : t+1 = morgen; t-1 = gisteren enzovoorts.

Net	L_t	L_{t-1}	L_t-L_{t-1}	L_{t+4}	$R_{t-4,t}$	$R_{t-3,t}$	$R_{t-2,t}$	$R_{t-1,t}$	Comp	VSPN	VSPZ	# inputs
A	x	x	x	x	x	x						5
B										x		48
C	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	57

a) Waarbij de invoer kan bestaan uit :

L_t : De gemeten waterstand te Lobith op tijdstip t;

L_t-L_{t-1} : Het verschil tussen de gemeten afvoeren te Lobith op de tijdstippen t en t-1;

L_{t+3} : De waterstand te Lobith, berekend met Model Lobith met een zichttijd van 3 dagen;

$R_{t-3,t}$: Het verschil tussen de drie dagen geleden (t-3) met Model Lobith voorspelde waterstand met een zichttijd van drie dagen en de gemeten waterstand op tijdstip t;

$R_{t-2,t}$: Het verschil tussen de twee dagen geleden (t-2) met Model Lobith voorspelde waterstand met een zichttijd van twee dagen en de gemeten waterstand op tijdstip t;

$R_{t-1,t}$: Het verschil tussen de een dag geleden (t-1) met Model Lobith voorspelde waterstand met een zichttijd van een dag en de gemeten waterstand op tijdstip t;

Comp : De gecompriëerde data;

VSPN : De neerslagvoorspelling voor het noordelijk stroomgebied van de Rijn;

VSPZ : De neerslagvoorspelling voor het zuidelijk stroomgebied van de Rijn.

Tabel 5.1 De statistieken (in m³/s) van de de residuen van Model Lobith, deelmodel voor afvoeren groter dan 2300 m³/s (MLR) en na correctie met netwerken (+net A, B, C, voor invoer zie tabel 1 - 4), voor de eerste, tweede, derde en vierde dag voorspelling. De tabel bevat alle dagen uit de verificatieset waarop de gemeten afvoer groter is dan 2320 m³/s. Het aantal dagen in de verificatie dataset is 895.

Residuen van de eerste dag voorspelling met MLR en MLR + voorspelde residuen				
	MLR	Net A	Net B	Net C
Minimum	-302.80	-252.83	-413.52	-239.94
Maximum	363.01	487.40	455.86	455.82
Gemiddelde	-1.03	2.63	4.26	5.03
Mediaan	1.78	6.49	6.51	8.14
Std. afw.	66.62	53.77	70.24	64.77
% $\leq \pm 5$ cm	56.54	72.63	53.52	55.53
% $\leq \pm 10$ cm	87.71	92.51	83.13	84.25

Residuen van de tweede dag voorspelling met MLR en MLR + voorspelde residuen				
	MLR	Net A	Net B	Net C
Minimum	-526.77	-514.91	-771.49	-604.53
Maximum	996.19	1284.44	1224.81	1247.23
Gemiddelde	16.94	-15.82	-15.56	-15.79
Mediaan	24.94	0.83	-1.80	-0.12
Std. afw.	132.17	149.75	150.47	147.44
% $\leq \pm 15$ cm	81.01	76.20	75.31	75.08

Residuen van de derde dag voorspelling met MLR en MLR + voorspelde residuen				
	MLR	Net A	Net B	Net C
Minimum	-820.52	-808.42	-2206.42	-864.89
Maximum	2867.93	2729.95	2883.51	2991.93
Gemiddelde	-21.39	-17.97	-28.80	-29.68
Mediaan	5.96	11.24	3.99	9.50
Std. afw.	306.28	311.99	352.74	342.82
% $\leq \pm 20$ cm	60.22	56.31	54.75	55.20

Residuen van de vierde dag voorspelling met MLR en MLR + voorspelde residuen				
	MLR	Net A	Net B	Net C
Minimum	-1395.12	-1914.97	-3588.80	-1587.96
Maximum	4413.38	4158.59	4785.37	4878.53
Gemiddelde	-41.87	-38.19	-50.55	-54.41
Mediaan	30.16	24.63	6.30	15.03
Std. afw.	499.63	536.94	565.68	551.64
% $\leq \pm 25$ cm	55.08	50.61	49.61	49.83
% $\leq \pm 40$ cm	73.85	66.82	66.14	66.48

Tabel 5.2 De statistieken (in m³/s) van de de residuen van Model Lobith, deelmodel voor afvoeren groter dan 2300 m³/s (MLR) en na correctie met netwerken (+net A, B, C, voor invoer zie tabel 1 - 4) voor de eerste, tweede, derde en vierde dag voorspelling. De tabel bevat alle dagen uit de verificatieset waarop de gemeten afvoer groter is dan 5000 m³/s. Het aantal dagen in de verificatie dataset is 98.

Residuen van de eerste dag voorspelling met MLR en MLR + voorspelde residuen				
	MLR	Net A	Net B	Net C
Minimum	-302.80	-252.83	-236.81	-239.94
Maximum	363.01	487.40	455.86	455.82
Gemiddelde	-19.34	28.02	44.48	43.30
Mediaan	-2.72	45.03	49.74	50.54
Std. afw.	121.88	119.79	123.12	119.54
% ≤ ± 5 cm	45.92	60.20	41.84	45.92
% ≤ ± 10 cm	83.67	84.69	76.53	79.59

Residuen van de tweede dag voorspelling met MLR en MLR + voorspelde residuen				
	MLR	Net A	Net B	Net C
Minimum	-526.77	-386.65	-628.54	-604.53
Maximum	996.19	1256.04	1224.81	1247.23
Gemiddelde	28.65	55.22	50.30	54.86
Mediaan	32.30	85.95	77.16	77.89
Std. afw.	242.83	265.43	267.49	269.73
% ≤ ± 15 cm	81.63	67.35	65.31	64.29

Residuen van de derde dag voorspelling met MLR en MLR + voorspelde residuen				
	MLR	Net A	Net B	Net C
Minimum	-731.86	-786.76	-934.33	-798.65
Maximum	2867.93	2729.95	2883.51	2991.97
Gemiddelde	31.83	74.06	80.14	81.68
Mediaan	128.19	167.55	217.14	225.04
Std. afw.	624.45	630.57	709.62	716.91
% ≤ ± 20 cm	52.04	41.84	43.88	45.92

Residuen van de vierde dag voorspelling met MLR en MLR + voorspelde residuen				
	MLR	Net A	Net B	Net C
Minimum	-1395.12	-1914.97	-1535.15	-1587.91
Maximum	4413.38	4158.59	4785.37	4878.57
Gemiddelde	255.64	210.77	187.97	192.73
Mediaan	410.99	404.75	403.70	412.00
Std. afw.	1055.13	1146.07	1155.26	1179.58
% ≤ ± 25 cm	41.84	31.63	31.63	30.61
% ≤ ± 40 cm	65.31	47.96	47.96	48.98