

De Buurserbeek, terug naar vroeger

Een watersysteemanalyse en neerslagafvoermodellering met Sobek, van een plateaurandbeek in Oost-Nederland, ter voorbereiding op een effectenstudie van herstelmaatregelen



Oktober 2003
Door G.J. van den Houten
K150-717 (27 stp.)

Begeleiders:

- Ir. P.M.M. Warmerdam (WUR)
- Ing. R.J.C. Vink (WRIJ)
- Ir. C.M. Bollen-Weide (WRIJ)

De Buurserbeek, terug naar vroeger

Een watersysteemanalyse en neerslagafvoermodellering met Sobek, van een plateaurandbeek in Oost-Nederland, ter voorbereiding op een effectenstudie van herstelmaatregelen

Oktober 2003

Door G.J. van den Houten

K150-717 (27 stp.)

Begeleiders:

- Ir. P.M.M. Warmerdam (WUR)
- Ing. R.J.C. Vink (WRIJ)
- Ir. C.M. Bollen-Weide (WRIJ)

Titelfoto: dam 11 in de Buurserbeek, nabij de monding van de Zoddebeek bij een debiet van ongeveer 13 m³/s, februari 2003

Samenvatting

De Buurserbeek is onderdeel van een beek die verschillende benamingen kent: Ahauser Aa (Duitsland), de Buurserbeek (tot de monding van de Elsbeek) en Schipbeek (tot de IJssel). De beek is 86 km lang, stroomt in westelijke richting en heeft een stroomgebied van 345 km², waarvan zich 143 km² zich in Duitsland bevindt. Als gevolg van de intensivering van het landgebruik vanaf de 19^e eeuw is met name in de 20^e eeuw de afvoercapaciteit van de beek vergroot. Hiertoe werden in verschillende verbeteringsronden meanders afgesneden en werd de beek verdiept en verbreed. Om de resulterende erosie te stoppen en een minimale waterstand te garanderen zijn er daarna vele vaste overlaten aangelegd. De beek wordt over bijna de gehele lengte ingesnoerd tussen kaden van ongeveer een meter hoog. Door deze ingrepen is de natuurwaarde van de beek sterk achteruit gegaan en is de bedding deels gedaald door erosie. In het huidige perspectief wil Waterschap Rijn en IJssel de beek deels herstellen met herstelmaatregelen. Om de gevolgen van deze (ontwerp)maatregelen na te gaan wordt in deze studie het afwateringssysteem van de Buurserbeek bestudeerd en gemodelleerd met een neerslagafvoermodel. Het modelgebied bestaat uit de gehele Buurserbeek en een deel van de Schipbeek, tot het Twentekanaal. In totaal beslaat het modelgebied 32 km beektraject en 62,4 km² stroomgebied. De beek heeft een verval van 21 m (van 33 m+N.A.P. naar 12 m+N.A.P.). De eerste 12 km vanaf de Rijksgrens stroomt de beek over een 'plateau' met een dun freatisch pakket. Verder stroomafwaarts (westelijker) komt de beek in een lager en vlakker gebied en neemt de dikte van het freatische pakket toe.

In het modelgebied bevinden zich drie meetstuwen, waarvan er zich twee in de Buurserbeek bevinden (de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw) en één in de monding van de op de Buurserbeek uitmondende Elsbeek. De maatgevende uurafvoeren van de meetstuwen zijn respectievelijk: 20, 22 en 3,5 m³/s. De maatgevende uurafvoer komt overeen met de uurgemiddelde afvoer die gemiddeld eens per jaar voorkomt. De kwaliteit van de afvoermetingen is wisselend en de meetreeksen bevatten soms grote hiaten. De uursommen van de neerslag en de dagelijkse (potentiële) verdamping zijn beschikbaar van neerslagstation Hupsel (KNMI). Op basis van afvoer-, waterstands-, neerslag- en verdampingsgegevens is een aantal conclusies getrokken

- in de Buurserbeek en het stroomgebied van de Buurserbeek treedt wegzijging op. Waarschijnlijk bevindt het westelijk deel van het modelgebied zich in de infiltratiezone van het Twentekanaal of de IJssel. De Buurserbeek infiltreert relatief veel water (tot 0,5 m³/s), waarschijnlijk door zijn plaatselijk hoge ligging in het landschap.
- Uit de waterstanden blijkt de leidingweerstand als gevolg van de (water)plantengroei een cyclus door te maken. In de wintermaanden is de leidingweerstand minimaal en in augustus maximaal (tot 100% groter).
- De kwaliteit van de meetopstellingen van de meetstuwen en de verwerking van de gemeten gegevens is matig en behoeft daarom verbetering

Het neerslagafvoermodel wordt gemaakt in het programma Sobek, waarvan alleen de 'CHANNEL FLOW'- en de 'RAINFALL RUNOFF'-module worden gebruikt. De (neerslag)afvoer wordt door Sobek berekend met een model van parallelle lineaire reservoirs. De berekening van de vochtvoorraad in de wortelzone is buiten beschouwing gelaten en het neerslagafvoerproces is onafhankelijk van de waterstanden in de Buurserbeek gemodelleerd. De neerslagafvoermodellering van de Buurserbeek is verdeeld in drie fasen. In de eerste fase is alleen de beek als hydraulische waterloop gemodelleerd aan de hand van een ouder bestaand model van de Buurserbeek (model CF). Van dit model is de leidingweerstand gecalibreerd op basis van veldwaarnemingen tijdens een afvoerpiek. Daarna zijn de reactiefactoren van twee afwaterende gebieden (Elsbeek en Reinkstuw) gecalibreerd in een apart model (model RR). De afvoer wordt in dit model gesimuleerd met één neerslagafvoer-'knoop', die vier lineaire parallelle reservoirs hanteert om de afvoer te simuleren. De gemeten neerslag en verdamping van Hupsel zijn hierbij als model-invoer gebruikt en de gemeten afvoeren uit beide meetstuwen zijn gebruikt voor de calibratie. In de laatste fase van de neerslagafvoermodellering zijn de gecalibreerde waarden van de reactiefactoren toegepast op de verschillende afwaterende gebieden die op de

gemodelleerde Buurserbeek uitmonden. Het resultaat is het neerslagafvoergebied van de Buurserbeek (model CF+RR). De betrouwbaarheid van dit model getoetst aan de gemeten afvoer bij de Markveldse Molenstuw, de gemeten afvoer bij de Reinkstuw en de gemeten neerslag en verdamping. Voor de calibratie van de reactiefactoren en voor het test-scenario van het neerslagafvoermodel van de Buurserbeek zijn twee meetperioden gebruikt van 6 maanden, beide natte winters (okt '93 t/m maa '94 en okt '94 t/m maa '95)

Uit de calibratie van de reactiefactoren van de afwaterende gebieden (model RR) blijkt er gedurende een natte winterperiode een te hoge afvoersom wordt gesimuleerd. Dit wordt mede veroorzaakt door een onderschatting van de gesimuleerde bergingsverandering in de bodem. De gehanteerde wegzijging, stroomgebiedsgrootte en neerslagoverschot zijn ook mogelijke oorzaken voor de overschatte afvoersom. Het neerslagafvoermodel van de Buurserbeek (model CF+RR) simuleert juist een te lage afvoersom. Dit kan op twee manieren verklaard worden. In het neerslagafvoermodel is er wegzijging gemodelleerd in de Buurserbeek, die overeenkomt met de restterm van de waterbalans van de beek. Mogelijk is deze gesimuleerde wegzijging in (natte) winters niet aanwezig. Het is ook mogelijk dat de Buurserbeek en zijn zijwaterlopen in natte winters een groter gebied draineren dan in de gemiddelde situatie. De afvoer van de afwaterende gebieden van de Reinkstuw en de Elsbeek (model RR) kunnen redelijk goed worden gemodelleerd met de gecalibreerde reactiefactoren. In het neerslagafvoermodel van de Buurserbeek (model CF+RR) wordt er bijna geen afvlakking van de afvoerpieken gesimuleerd, terwijl deze in werkelijkheid wel optreedt. Hierdoor wordt de hoogte van de piekafvoeren overschat (bij de Markveldse Molenstuw). Het verschil tussen de gemeten en gesimuleerde afvoerpiek bij de Markveldse Molenstuw in het neerslagafvoermodel (model CF+RR) kan verklaard worden door de tijdelijke waterberging in de zijwatergangen tijdens een afvoerpiek. Het verdient aanbeveling om het Buurserbeekmodel (model CF+RR) te verbeteren op basis van de hiervoor genoemde afwijkingen, voordat de herstelmaatregelen in de Buurserbeek worden gesimuleerd. In een fictief scenario zijn de gezamenlijke effecten van enkele herstelmaatregelen gesimuleerd. Hieruit blijkt dat een stroombedverbreding bijna geen afvlakking van de afvoerpiek tot gevolg heeft. Ook blijkt dat de stroomsnelheden bij verwijdering van de vaste overlaten in de Buurserbeek sterk toeneemt, ondanks de hermeandering van de beek.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	2
Inhoudsopgave	4
Lijst van figuren en tabellen	6
Voorwoord	8
Hoofdstuk 1 Inleiding	10
1.1 Aanleiding.....	10
1.2 Methode	11
Hoofdstuk 2 Stroomgebiedsbeschrijving	12
2.1 Algemene stroomgebiedsbeschrijving	12
2.1.1 Topografie.....	12
2.1.2 Afwateringssysteem.....	13
2.1.3 Kunstwerken	14
2.1.4 Afwaterende oppervlakten	16
2.2 Geologie	16
2.2.1 Geologische geschiedenis	16
2.2.2 Beschrijving van de verschillende afzettingen	18
2.2.3 Hydrogeologische eigenschappen	18
2.2.4 Invloed van de geologie op de hydrologie	19
2.2.5 Grondwater.....	19
2.3 Huidige visie en de historie	20
2.3.1 Geschiedenis van de beek.....	20
2.3.2 Menselijke invloeden op het afvoerregime van de beek	21
2.3.3 Huidige visie en maatregelen	23
Hoofdstuk 3 Inventarisatie en bewerking van beschikbare gegevens	24
3.1 Neerslag en verdamping	24
3.1.1 Inventarisatie en bewerking neerslaggegevens	24
3.1.2 Van referentieverdamping naar actuele verdamping	26
3.2 Debieten	28
3.2.1 Inventarisatie debietgegevens.....	29
3.2.2 Verbetering van bruikbaarheid van de afvoergegevens	30
3.3 Grondwaterstanden	38
3.4 Waterstanden	38
3.5 Selectie meetreeks	39
3.6 Conclusies inventarisatie.....	39
Hoofdstuk 4 Analyse hydrologische gegevens en waterbalans.....	40
4.1 Neerslag en verdamping	40
4.2 Beekdebiet en afwatering van het landelijk gebied	40
4.2.1 Wegzijing uit de Buurserbeek.....	41
4.2.3 Piekafvoeren	42
4.2.4 Seizoensafhankelijke leidingweerstand.....	43
4.2.5 Relatie grondwaterstand en afvoer	44
4.3 Waterbalans maandtotalen	45
4.3.1 Waterbalans ‘beektraject’	46
4.3.2 Waterbalans ‘Elsbeek’	48
4.3.3 Totaalbeeld waterbalansen.....	49
Hoofdstuk 5 Beschrijving van Sobek.....	50
5.1 Hydraulica	50
5.2. Neerslagafvoer van onverhard oppervlak.....	51
5.2.1 Schematisatie van het neerslagafvoerproces.....	51
5.2.2 Toepassing van CAPSIM in de schematisatie van de neerslagafvoer	53
5.3 Discussie.....	54

5.3.1 Voor- en nadelen van het gebruik van CAPSIM	54
5.3.2 Simultaan en sequentieel simuleren.....	55
5.3.3 Calibratie.....	56
Hoofdstuk 6 Modelling van de Buuserbeek	58
6.1 Modelopzet	58
6.1.1 Uitgangspunten en modelopties	58
6.1.2 Aanpak modellering	59
6.2 Model CF: hydraulica van de Buuserbeek	60
6.2.1 Schematisatie van de beek	60
6.2.2 IJking van de hydraulische weerstand.....	62
6.2.3 Hydraulische eigenschappen van de gemodelleerde Buuserbeek.....	62
6.3 Model RR: neerslagafvoer	63
6.3.1 Modelbeschrijving (model RR).....	64
6.3.2 Calibratie en validatie reactiefactoren	64
6.3.3 Conclusies model RR.....	68
6.4 Model CF+RR: Buuserbeekmodel.....	68
6.4.1 Simulatieresultaten van het Buuserbeekmodel	69
6.4.2 Conclusies over het Buuserbeekmodel	69
6.4.3 Het gebruik van het Buuserbeekmodel.....	70
6.4 Scenario: beekherstelmaatregelen.....	71
Conclusies en aanbevelingen.....	74
Literatuurlijst.....	76
BIJLAGEN	
Bijlage 2-A Stroomgebied van de Schipbeek en de Buuserbeek	
Bijlage 2-B Hoogtekaart van het modelgebied	
Bijlage 2-C Geschematiseerd afwateringsysteem Buuser-/Schipbeek	
Bijlage 2-D Overzicht historische maatregelen in de Buuserbeek / Schipbeek van de Rijksgrens tot het Twentekanaal	
Bijlage 3-A Aanvulling neerslagreeks Recover	
Bijlage 3-B Stuwkarakteristieken Reinkstuw	
Bijlage 3-C Stuwkarakteristieken Markveldse Molenstuw	
Bijlage 3-D Stuwkarakteristieken Elsbeek Nieuwe Sluis	
Bijlage 4-A Maandtotalen neerslag en verdamping van station Hupsel periode 1992-1998	
Bijlage 4-B Frequentiecurves van de afvoeren van de meetstuwen	
Bijlage 4-C Cumulatieve procentuele afvoeren van de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw (1994 en 1995)	
Bijlage 4-D Seizoensafhankelijke hydraulische weerstand	
Bijlage 4-E Tabel maandelijkse waterbalans 'beektraject'	
Bijlage 4-F Verschil in maandtotaal afvoer tussen de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw voor de periode 1992-1998	
Bijlage 5-A Kunstwerken in Sobek	
Bijlage 5-B Neerslagafvoer-schematisatie in Sobek	
Bijlage 6-A Overzicht kunstwerken in het neerslagafvoermodel	
Bijlage 6-B Lengteprofiel van gemodelleerde Buuserbeek	
Bijlage 6-C Berekening van de opstuwing van een brug tijdens een afvoergolf	
Bijlage 6-D Oppervlakten afwaterende gebieden	
Bijlage 6-E Ingevoerde parameterwaarden model RR	
Bijlage 6-F Gebruikte kengetallen voor de modelkwaliteit	
Bijlage 6-G Calibratie en validatie neerslagafvoer Elsbeek	
Bijlage 6-H Calibratie en validatie neerslagafvoer Reinkstuw	
Bijlage 6-I Frequentiecurve van gemeten en gesimuleerde neerslagafvoer	
Bijlage 6-J Resultaten Buuserbeekmodel, tijdreeks A	
Bijlage 6-K Resultaten Buuserbeekmodel, tijdreeks B	
Bijlage 6-L Resultaten scenario herstelmaatregelen	

Lijst van figuren en tabellen

Figuren

Figuur 2.1 Topografische ligging van het modelgebied	12
Figuur 2.2 Bodemhoogte over het gehele beektraject	13
Figuur 2.3 Schematische afbeelding van de Buurserbeek bij de Oosterdorper watermolen.....	15
Figuur 2.4 Schematische afbeelding van aflatwerk Platerink	15
Figuur 2.5 Isohypsens in het projectgebied, berekend met een regionaal grondwatermodel [WRIJ]	19
Figuur 3.1 Geschematiseerde dwarsdoorsneden van verschillende regenmeters.....	25
Figuur 3.2 Meetperiode bovenstroomse waterhoogte HBH (A) en de benedenstroomse waterhoogte HOH (B) van de meetstuwen	29
Figuur 3.3 Foto van de Reinkstuw (A) met de dwarsdoorsnede (B) en het lengteprofiel (C) [bron: bouwtekening WRIJ]	31
Figuur 3.4 HBH/HOH-relatie op basis van meetgegevens uit 1992-1993	32
Figuur 3.5 HBH/HOH-relatie op basis van meetgegevens uit 1992, 1993 en 1999-2002	33
Figuur 3.6 Verschil H1 en H2 voor 2000-2002	34
Figuur 3.7 Markveldse Molenstuw: dwarsdoorsnede (A) en lengteprofiel (B) [bron: WRIJ]	34
Figuur 3.8 Verschillende typen verstoringen in het gemeten debiet van de Markveldse Molenstuw, uurwaarden op de x-as.....	35
Figuur 3.9 Aangenomen HBH/HOH-relatie van de Markveldse Molenstuw.....	37
Figuur 3.10 Relatie tussen de overstorthoogte (H1) en de verdrinkingsgraad (S) van Elsbeek Nieuwe Sluis (2000-2002)	38
Figuur 4.1 Neerslagsom grondregenmeter (7) te Hupsel van de jaren 1973 t/m 1998**	40
Figuur 4.2 Debiet van Reinkstuw, Markveldse Molenstuw en Elsbeek Nieuwe Sluis in 1993	41
Figuur 4.3 Lage afvoeren van Elsbeek Nieuwe Sluis en de Markveldse Molenstuw in 1996	42
Figuur 4.4 De benedenstroomse waterstand (HOH) bij de Reinkstuw tijdens enkele afvoergolven als functie van het debiet. De minimale waterstand wordt bepaald door de benedenstroomse dam die een kruinhoogte heeft van 30,26 m+N.A.P.	44
Figuur 4.5 Afvoer van de Elsbeek in relatie met de grondwaterstand van 34G-L01 (maaiveld: 18,0 m+N.A.P.).....	44
Figuur 4.6 Relatie tussen de maandsom van de afvoer van de Markveldse Molenstuw en de Reinkstuw	47
Figuur 4.7 Relatie tussen de restterm van de maandelijks waterbalansen (4.5 en 4.7) en de uit de grondwaterstanden afgeleide bergingsverandering per maand	48
Figuur 5.1 In- en uitvoer van het neerslagafvoermodel	50
Figuur 5.2 Reductiecoëfficiënt voor wateropname in de wortelzone, als functie van de matrische drukhoogte van het bodemvocht (afhankelijk van gewas). [Feddes et al, 1978].....	53
Figuur 5.3 Lengteprofiel van een zijwatergang: de toename van berging door peilverhoging bij het lozingspunt, voor een vlak (polder) en een hellend stroomgebied	55
Figuur 6.1 Opzet van de neerslagafvoer modellering.....	59
Figuur 6.2 Berekende waterstanden in de Buurserbeek, bij verschillende γ (Bos en Bijkerk: vgl 6.3)	62
Figuur 6.3 Gesimuleerde synthetische afvoergolf.....	63
Figuur 6.4 Schematisatie van model RR (figuur 6.1) in Sobek.....	64
Figuur 6.5 Frequentiecurve van gemeten en gesimuleerde afvoeren in de calibratie- en validatieperiode van de Elsbeek. (tijdsdeel (%) waarin het debiet hoger is als Q- uurgemiddeld)	65
Figuur 6.6 Huidige en aangepaste beekprofiel (dwarsdoorsnede met hoogte (m-mv.) en breedte (m)).....	71

Tabellen

Tabel 2.1 Stroomgebiedseigenschappen van deeltrajecten van de beek	12
Tabel 2.2 Periode waarin er water wordt afgelaten bij Platerink	15
Tabel 2.3 Oppervlakten stroomgebied [bron: afwateringsgebieden GIS WRIJ en Heidemij, 1995]	16
Tabel 2.4 Stratigrafisch overzicht van ondiepe afzettingen in het stroomgebied van de Buurserbeek	17
Tabel 2.5 Bergingscoëfficiënt van een podzol als functie van de grondwaterstandstijging [M. Meeuwissen et al, 2000]	19
Tabel 2.6 Statistieken van grondwaterstanden (1992-2002) in afwaterend gebied van de Buurserbeek. De locatie's van de peilbuizen staan in Bijlage 2-A	20
Tabel 3.1 Beschikbare neerslaggegevens	24
Tabel 3.2 Variatie in neerslagsom tussen Borculo, Rekken en Hupsel	25
Tabel 3.3 De jaarsommen van regenmeters te Hupsel (som van dagwaarden, 9-9 uur)	26
Tabel 3.4 Correlatie tussen dagtotalen van neerslag voor de periode 1991-2002 en de onderlinge afstand tussen de stations	26
Tabel 3.5 Gewasfactoren voor Makkink-verdamping [Feddes, 1987]	27
Tabel 3.6 Schatting Landgebruik van modelgebied	27
Tabel 3.7 Gewogen gemiddelde gewasfactoren (f) voor Makkink-verdamping	27
Tabel 3.8 Samenvatting van de beschikbare (debiet)meetstuwen	29
Tabel 3.9 Volledigheid (%) meetreeksen bovenstroomse waterstanden (HBH)	29
Tabel 3.10 Twee ijkpunten voor de lineaire HBH/HOH-relatie van de Markveldse Molenstuw. 36	
Tabel 4.1 Jaarsommen van neerslag (Grondregenmeter Hupsel) en verdamping te Hupsel (uitgebreid overzicht in bijlage 4-A).....	40
Tabel 4.2 Afvoercharacteristieken stuwen	41
Tabel 4.3 Overzicht van verschillende opgestelde waterbalansen	45
Tabel 4.4 Resultaten waterbalans 4.4 'beektraject' voor de periode 1992-1998.....	47
Tabel 4.5 Resultaten waterbalans 4.5 'beektraject' voor de periode 1992-1998.....	47
Tabel 4.6 Resultaten waterbalans Elsbeek (1992-1996).....	49
Tabel 6.1 Eindrandvoorwaarde Model CF: QH-relatie	62
Tabel 6.2 Resultaten calibratie reactiefactoren Elsbeek.....	65
Tabel 6.3 Gemeten neerslagoverschot en debieten Elsbeek voor calibratie- en validatieperiode 66	
Tabel 6.4 Toename van grondwaterstand en voorafgaande recente neerslag tussen het begintijdstip en eindtijdstip van de calibratie- en validatieperiode.....	66
Tabel 6.5 Resultaten calibratie reactiefactoren Reinkstuw	67
Tabel 6.6 Gemeten neerslagoverschot en debieten Reinkstuw voor calibratie- en validatieperiode	67
Tabel 6.7 Resultaten Buurserbeekmodel	69
Tabel 6.8 Geschatte onnauwkeurigheid van gesimuleerde waterstanden in het Buurserbeekmodel.....	71

Voorwoord

Na mijn studie hydrologie en waterbeheer aan de I.A.H.Larenstein ben ik voor een meer inhoudelijk achtergrond door gaan studeren aan de Wageningen Universiteit. Daar heb ik mijn eerste afstudeervak geohydrologie op de vakgroep gedaan, waarna ik het weer tijd vond om een tweede meer praktisch afstudeervak te gaan doen. Het waterschap Rijn en IJssel, afdeling Noord, had hierop een geschikte opdracht beschikbaar. Hier heb ik vanaf februari tot oktober 2003 aan de opdracht gewerkt. Ik ben grote vrijheid gehad in de precieze invulling van de opdracht door de het waterschap. Bovendien heb ik leren modelleren met het in de hydrologie veelgebruikte programma Sobek.

Graag wil ik Piet Warmerdam, Roy Vink en Ellen Bollen-Weide bedanken voor hun begeleiding van de afstudeeropdracht. Van Wageningen Universiteit wil ik verder bedanken: Jacques Kole voor het aanleveren van data, Anton Dommerholt voor zijn uitleg bij de ijking van de Reinkstuw en Paul Torfs voor het inhoudelijk begeleiden van de modellering. Mijn (inmiddels) collega's van afdeling Noord van Waterschap Rijn en IJssel, bedank ik voor de prettige werksfeer en hun behulpzaamheid.

Gert van den Houten
Oktober 2003

Hoofdstuk 1 Inleiding

De in dit rapport beschreven studie is uitgevoerd in het kader van het afstudeervak 'Stroomgebiedshydrologie', wat onderdeel is van de studie Hydrologie en Waterbeheer van Wageningen Universiteit (WUR). De opdrachtgever van het onderzoek is Waterschap Rijn & IJssel (WRIJ), Afdeling Noord. Het onderzoek is begeleid door Piet Warmerdam (WUR), Roy Vink (WRIJ) en Ellen Bollen (WRIJ). Het onderzoek betreft een watersysteemanalyse en een neerslagafvoermодellering van de Buurserbeek. De Ahauser Aa, de Buurserbeek en de Schipbeek zijn drie benamingen voor delen van dezelfde laagland- en plateaubeek. Deze beek ontspringt in Duitsland (Ahauser Aa) en stroomt in westelijke richting naar de IJssel, waar de beek bij Deventer in uitmondt. Stroomsafwaarts van de rijksgrens met Duitsland heet de beek 'Buurserbeek'. Deze naam gaat na 25,6 km over in Schipbeek. De beek is in totaal 86 km lang en heeft een stroomgebied van 345 km².

1.1 Aanleiding

Al sinds de middeleeuwen hebben mensen de beek naar hun behoefte gereguleerd. In deze tijd waren er met name belangen voor de scheepvaartverbindingen en de watermolens. In de eerste helft van de 20^e eeuw was de scheepvaart verdwenen en had men voornamelijk als doel de afvoercapaciteit van de beek te vergroten. Door de verbeterde ontwatering van het landelijk gebied was de piekafvoer van de beek namelijk flink toegenomen, waardoor er in de 19^e eeuw verscheidene overstromingen plaatsvonden. In de periode 1894 - 1968 vonden drie verbeteringsronden plaats die werden aangestuurd door de toenmalige waterschappen. Hierin werd het beekprofiel vergroot, werd de beek over grote delen verdiept en werden meanders afgesneden. Om de resulterende erosie tegen te gaan zijn ook vele vaste overlaten en stuwen aangelegd. Door al deze ingrepen kreeg de beek een grote afvoercapaciteit, die ervoor zorgde dat er sindsdien geen grote inundaties meer zijn geweest. De normalisatie van de beek zorgde er echter ook voor dat de natuurwaarde van de beek achteruit ging.

In het huidige perspectief is er meer aandacht voor een natuurlijke en duurzame inrichting van de beek. In 1999 en 2000 heeft het Waterschap Rijn en IJssel daarom de hydrologische en ecologische effecten van een aantal herstelmaatregelen laten onderzoeken door Tauw. Het beektraject waarin de herstelmaatregelen gepland zijn is 32 km lang en loopt van de rijksgrens tot het Twentekanaal. Aan de hand van deze studies is een 'Visie voor het herstel van de Buurserbeek' [Tauw, 2002] geschreven, waarin een aantal maatregelen wordt voorgesteld om de beek te verbeteren. Deze herstelmaatregelen komen hoofdzakelijk neer op het gedeeltelijk terugbrengen van de natuurlijke beekdynamiek. Om de kwantitatieve hydrologische effecten van deze ingrepen in te kunnen schatten heeft Waterschap Rijn en IJssel de opdracht gegeven om een neerslagafvoermodel te vervaardigen met Sobek van het genoemde beektraject. De probleem- en doelstelling die hieruit volgen zijn:

Probleemstelling:

De toekomstige herstelmaatregelen in de Buurserbeek zullen de stroming in de Buurserbeek en het neerslagafvoerproces van de stroomgebied van de beek op een grotendeels onbekende manier beïnvloeden

Doelstelling:

Het modelleren van een kwantitatief, niet-stationair neerslag-afvoermodel van de Buurserbeek in Sobek Rural, waarmee het effect van de herstelmaatregelen in de beek gesimuleerd kan worden

Om de neerslagafvoermодellering op een correcte wijze te kunnen uitvoeren is er in deze studie uitgebreid gekeken naar de nauwkeurigheid van de beschikbare gegevens. Daarnaast is het grond- en oppervlaktewatersysteem van het stroomgebied van de Buurserbeek geanalyseerd. De grondwaterstromingen zijn echter in deze studie niet (fysisch) gemodelleerd.

1.2 Methode

Alvorens met de modellering van de Buurserbeek te beginnen is het watersysteem waar de beek deel van uitmaakt, bestudeerd. Allereerst is voornamelijk aan de hand van literatuur een beschrijving opgesteld van het 'modelgebied'. Dit gebied beslaat het stroomgebied van de Buurserbeek / Schipbeek van de Rijksgrens tot aan het Twentekanaal. In de beschrijving van het modelgebied (Hoofdstuk 1) is de topografie, het afwateringssysteem, de geologie en de hydrologie opgenomen. Er wordt ook aandacht besteed aan de huidige visie op de Buurserbeek in relatie met de historie. De volgende stap in het onderzoek bestaat uit het beoordelen van de kwaliteit van de meetgegevens, die in de studie gebruikt gaan worden (Hoofdstuk 3). De meetgegevens bestaan uit debieten, waterstanden, neerslag, verdamping en grondwaterstanden. Waar mogelijk of nodig zijn de gegevens bewerkt om de kwaliteit van de reeksen te vergroten. De hydrologische gegevens zijn vervolgens gebruikt om de eigenschappen van het watersysteem te kwantificeren. Hiertoe zijn waterbalansen opgesteld en zijn de debieten van verschillende meetpunten vergeleken (Hoofdstuk 4). De resultaten hiervan zijn toegepast in de neerslagafvoermodellering van het modelgebied.

De neerslagafvoermodellering is uitgevoerd met het programma Sobek. Een beschrijving van dit model is te vinden in hoofdstuk 5. Bij aanvang van de modellering was er een model van de Buurserbeek beschikbaar in een oudere versie van Sobek (River). De schematisatie van de beek die in dit model is gehanteerd is in deze studie overgenomen, om tijd te besparen. De neerslagafvoermodellering (Hoofdstuk 6) is verdeeld in drie fasen:

1. Hydraulische modellering van de beek met calibratie van de leidingweerstand
2. Calibratie van reactiefactoren van de neerslagafvoer-module
3. Combinatie van 1 en 2: neerslagafvoermodel van de Buurserbeek

De kwaliteit van de simulatie van de neerslagafvoermodel van de Buurserbeek, wordt getest aan de hand van de gemeten debieten van twee meetstuwen in de Buurserbeek. Naar aanleiding van deze testsimulatie zijn conclusies getrokken over het gebruik en aanpassing van het model voor de simulatie van de herstelmaatregelen (zie doelstelling). De studie wordt afgesloten met een fictief scenario, waarmee de effecten van enkele mogelijke herstelmaatregelen wordt gesimuleerd.

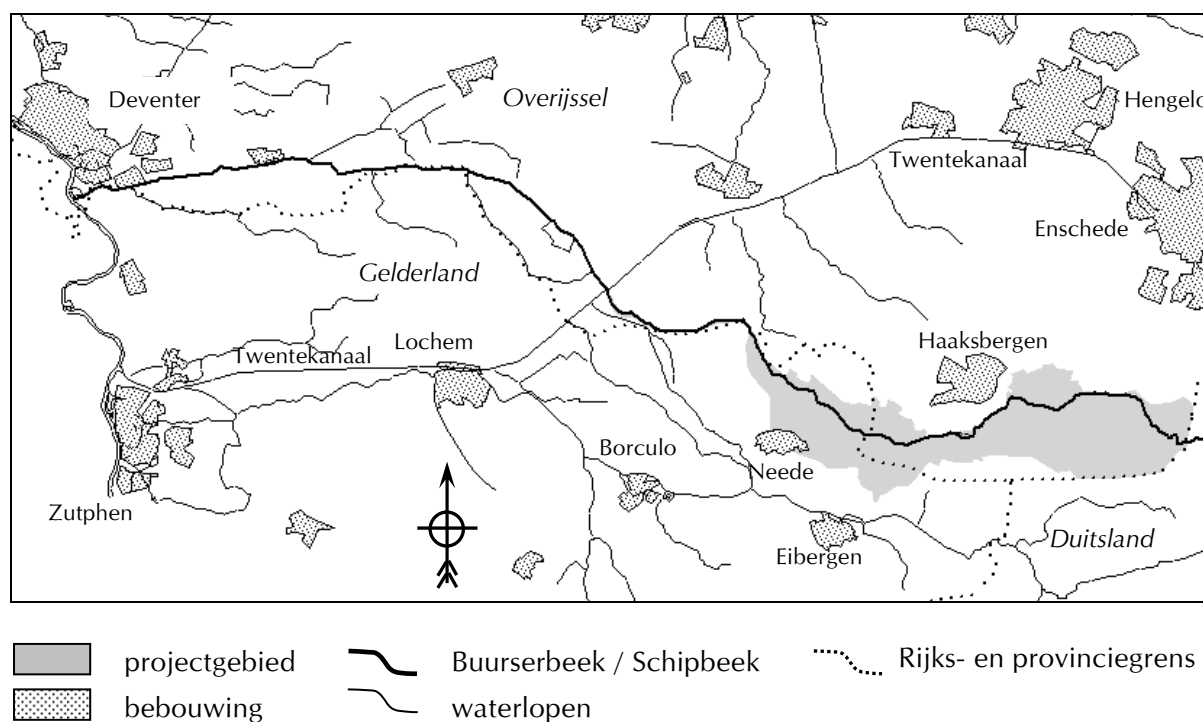
Hoofdstuk 2 Stroomgebiedsbeschrijving

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van het stroomgebied van de Buuserbeek/Schipbeek. Hierbij komt achtereenvolgens aan bod: het afwateringssysteem, de geologie en hydrologie en de menselijke invloeden op het stroomgebied.

2.1 Algemene stroomgebiedsbeschrijving

2.1.1 Topografie

De Buuserbeek is onderdeel van een 86 km lange beek die ontspringt in Duitsland nabij Ahaus en in Nederland uitmondt in de IJssel ten zuiden van Deventer (figuur 2.1). Het stroomgebied is relatief langgerekt en heeft een oppervlakte van ongeveer 345 km², waarvan circa 42% in Duitsland ligt (bijlage 2-A).



Figuur 2.1 Topografische ligging van het modelgebied

Deeltraject Ahauser Aa

Het Duitse deel van de waterloop, de Ahauser Aa, is 27 km lang en heeft verschillende zijbeken, zoals de Flörbach, de Moorbach, de Broekbach en de Vennbach. Het landgebruik in het Duitse deel van het stroomgebied is, net als in het Nederlandse deel, hoofdzakelijk wei- en bouwland. Het verhang in de Ahauser Aa is gemiddeld 0,9 ‰ (figuur 2.2) en het afwaterend oppervlak is in Duitsland relatief groot: 5,3 km² per km waterloop (tabel 2.1)

Tabel 2.1 Stroomgebiedseigenschappen van deeltrajecten van de beek

	Gemiddeld verhang (‰)	Gemiddeld afwaterend gebied (km ² /km beektraject)
Ahauser Aa	0,9	5,3
Rijksgrens - Twentekanaal	0,7	1,9
Twentekanaal - IJssel	0,2	5,2

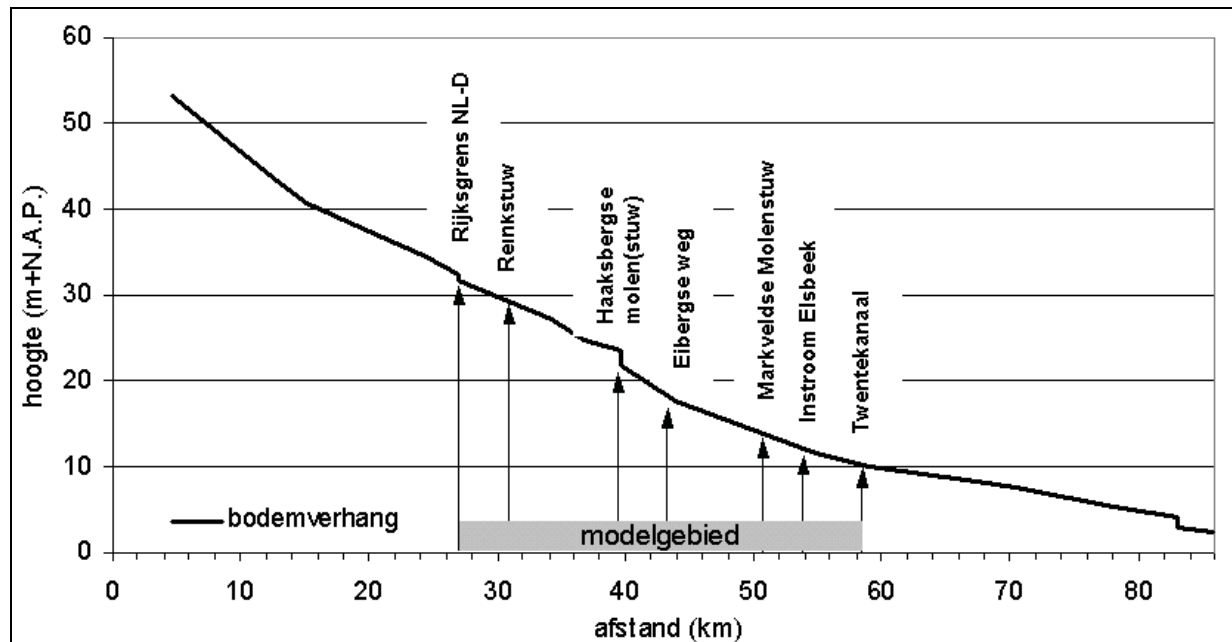
Deeltraject Rijksgrens-Twentekanaal

Dit beektraject tussen de Rijksgrens en het Twentekanaal (en de daarop afwaterende gebieden) is onderwerp van de neerslagafvoermmodellering in hoofdstuk 6. In dit rapport wordt naar dit gebied gerefereerd als het *modelgebied*. De Ahauser Aa stroomt bij de Haarmühle de grens over

en heet hier de Buurserbeek, naar het nabij gelegen dorpje Buurse. Vanaf de instroom van de Elsbeek bij de Nieuwe Sluis heet de beek 'de Schipbeek' (Bijlage 2-A). In het bovenstroomse deel van het modelgebied komt, naast veel grasland en bouwland, relatief veel bos en (hoog)veen voor. Het benedenstroomse deel wordt grotendeels voor de landbouw gebruikt. Verhard oppervlak komt in dit gebied weinig voor. De afwatering van het verhard oppervlak van het dorp Neede, gaat richting het zuiden en hoort dus niet bij het stroomgebied van de Buurserbeek. Ook wordt er in Nederland niet door riolen of zuiveringsinstallaties op dit beektraject geloosd.

Bodemverhang

In het traject van de Duitse grens tot het Twentekanaal van 32 km, heeft de beek een relatief klein afwaterend oppervlak: 1,9 km² per km waterloop (tabel 2.1). Het gemiddelde verhang van dit beektraject is lager dan het Duitse deel en bedraagt 0,7 ‰, maar op kleinere schaal varieert het verhang (Bijlage 2-B). In de 'Visie voor herstel van de Buurserbeek' wordt onderscheid gemaakt tussen het verhang van de beektrajecten Rijksgrens-Eibergse weg (traject A) en Eibergse weg - Twentekanaal (traject B). Hierbij heeft traject A een anderhalf keer zo groot verhang als traject B. (figuur 2.2). De beek heeft van nature een minder steil verhang gehad dan in de huidige situatie het geval is. Oorzaak hiervan is de afname van de beeklengte door 'bochtafsnijdingen', uitgevoerd in de 'verbeteringswerken' in de jaren '30 (zie §2.1.2).



Figuur 2.2 Bodemhoogte over het gehele beektraject

Deeltraject Twentekanaal - IJssel

Vanaf het Twentekanaal stroomt de Schipbeek in westelijke richting naar Deventer, waar de beek na 27 km in de IJssel uitmondt. In dit traject van de beek is het verhang kleiner geworden tot 0,2 ‰ en wateren enkele grote landbouwgebieden af op de Schipbeek (5,2 km² per km waterloop)

2.1.2 Afwateringssysteem

De Schip-/Buurserbeek heeft in de loop van de tijd vele nevenfuncties gehad, voor bijvoorbeeld de scheepvaart en graanmolens. Tegenwoordig wordt er veel aandacht gegeven aan de ecologische en recreatieve nevenfunctie van de beek, beschreven in de 'Visie voor herstel van de Buurserbeek' [Tauw, BügelHajema, 2002]. De hoofdfunctie van de Schip-/Buurserbeek is altijd de waterhuishouding van het overwegend landelijke afwateringsgebied gebleven. Om een effectieve waterafvoer in natte perioden en wateraanvoer in droge perioden te garanderen is er in het verleden flink ingegrepen in het afwateringssysteem. In deze paragraaf wordt de rol van de Buurserbeek en de Schipbeek en de kunstwerken die hierin liggen, op de waterhuishouding toegelicht.

Ontwatering en bewatering

Het bovenstroomse traject van de Buurserbeek is door bochtafsnijdingen en aanpassingen aan het dwarsprofiel van de beek in zijn bedding ingesneden. Hierdoor ligt de beek diep ten opzichte van zijn omgeving. Het gevolg hiervan is dat de omgeving beter wordt ontwaterd en dus droger is dan voor de aanpassingen. De belangrijkste zijbeek is in het bovenstroomse deel van de Buurserbeek is de Zoddebeek, die ook voor een deel Duits gebied afwatert. Verder stroomafwaarts (vanaf ongeveer de Eibergse weg) ligt de beek juist hoog in het landschap en wordt het omliggende land bij hoog water beschermd door kades van ongeveer een meter hoog. In een deel van dit beektraject lopen parallel aan de beek aan beide zijden zogenaamde ontwateringkanalen (Bijlage 2-A), zoals de Elsbeek en de Bornegoorsgoot. Deze waterleidingen zijn ongeveer 10 km lang en monden uit op de Buurserbeek. De Elsbeek en de Bornegoorsgoot hebben een grotendeels lagere ligging dan de Buurserbeek. Ook de watertoevoer in de zomer wordt met deze ontwateringkanalen geregeld. Aangezien deze waterlopen lager liggen dan de Buurserbeek kan water onder vrij verval worden afgelaten, ten behoeve van de landbouw. Dit gebeurt in het algemeen van mei t/m oktober via de aflaatwerk Platerink (zie: kunstwerken). Vanuit de Elsbeek wordt weer water afgelaten naar de lager gelegen Ravenhorsterveld leiding, die afwatert op het Twentekanaal en dus geen deel meer uitmaakt van het Buurserbeek-systeem. De Bornegoorsgoot die ten opzichte van de Elsbeek aan de andere kant van de Buurserbeek ligt, watert af op de Elsbeek via een onderdoorlaat bij Platerink.

2.1.3 Kunstwerken

In het modelgebied bevinden zich een aantal kunstwerken die in de neerslag-afvoermodellering (Hoofdstuk 6) van belang zijn. De ligging van specifieke kunstwerken is te vinden in Bijlage 2-A.

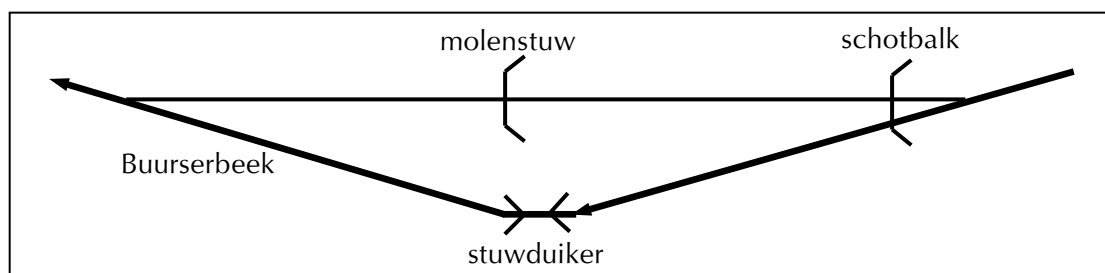
Bruggen: In het modelgebied bevinden zich vele bruggen die de beek overspannen. Bij normale afvoeren hebben deze bouwwerken geen invloed op de beek. Bij hoge afvoeren hebben de bruggen een licht opstuwende werking op de waterstanden in de beek. De mate van opstuwing die de bruggen hebben wordt in hoofdstuk 6 beschreven.

Vaste overlaten: In de Buurserbeek en de Schipbeek liggen in totaal 30 vaste overlaten (ook wel dammen genoemd) en 13 stuwen en schuiven. Met name de vaste overlaten zorgen ervoor dat er een minimumpeil wordt gehandhaafd. Ook verminderen de dammen het verhang en daarmee ook de stroomsnelheid en erosie in de beek. Bij hoge afvoeren en waterstanden verdrinken de dammen volledig, waardoor hun functie gedeeltelijk wegvalt. In deze situatie vindt er veel sedimenttransport plaats. In de praktijk is dit goed waar te nemen door de zandbanken die in de beek worden afgezet na hoogwater.

Meetstuwen: tot de meetstuwen in het modelgebied behoren de Reinkstuw, de Markveldse Molenstuw en de Elsbeek Nieuwe Sluis (locatie Bijlage 2-A). Deze meetstuwen worden automatisch om het kwartier bemeten. De beschrijving van deze stuwen komt in hoofdstuk 3 aan bod.

Stuwduiker en de Oosterdorper watermolen:

De uit de middeleeuwen stammende Oosterdorper watermolen nabij Haaksbergen ligt aan een aftakking van de Buurserbeek (figuur 2.3). De watermolen bestaat uit een stuw met een kruinhoogte van +/-25,05 m+N.A.P. en een verval van ruim 2 m. Er zijn ook vier schuiven in de stuw aanwezig, ten behoeve van de vier waterraderen. Bij grote afvoeren in de Buurserbeek gaat het grootste deel van de afvoer door de stuwduiker. De stuwduiker bestaat uit twee identieke duikers met een opening van 2,5 m hoog en 2,4 m breed en heeft een verval van 1,70 m. Het debiet van de stuwduiker wordt met behulp van twee regelbare klepstuwen afgestemd op een constante bovenstroomse waterstand (25,35 m+N.A.P.). Door het constante bovenstroomse peil is het debiet wat via de molenstuw stroomt ongeveer constant. In situaties waarbij het debiet van de molenstuw te groot wordt, worden de schuiven van de molenstuw handmatig geopend. De schotbalk aan het begin van de aftakking heeft tot doel zandafzetting in de aftakking tegen te gaan.



Figuur 2.3 Schematische afbeelding van de Buurserbeek bij de Oosterdorper watermolen

Aflaat van water uit de Buurserbeek

Met name in de zomer wordt er op twee plaatsen in de Buurserbeek water afgelaten, naar de Elsbeek (bij Platerink) en naar de Diepenheimse Molenbeek, welke in het beheersgebied ligt van Waterschap Regge en Dinkel (Bijlage 2-A). De verdeling van het water is vastgelegd in een waterafpraak tussen Waterschap Rijn en IJssel en Waterschap Regge en Dinkel. In deze waterafpraak is afgesproken dat:

- Er maximaal 50% van het debiet in de Buurserbeek (gemeten bij de Markveldse Molenstuw) mag worden afgelaten op de Diepenheimse Molenbeek
- Deze aflaat mag maximaal 1 m³/s bedragen
- De waterstand in de Buurserbeek ter hoogte van deze aflaat mag niet onder het streefpeil (14.70 m+N.A.P.) komen

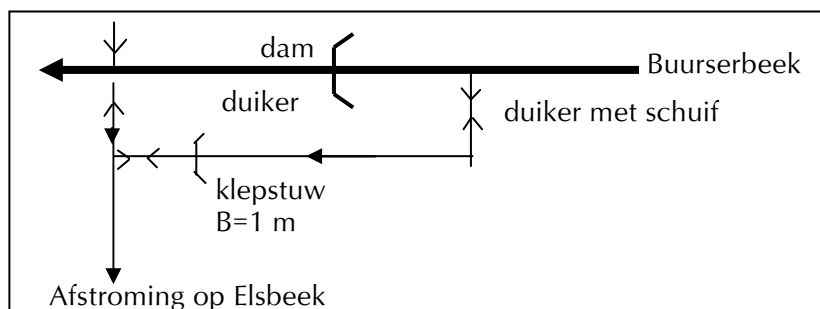
In de praktijk wordt er maximaal 0,5 m³/s afgelaten en in zeer natte perioden wordt er geen water afgelaten op de Diepenheimse Molenbeek, omdat het beekstelsel hiervoor te klein is. In droge perioden is het de bedoeling om 50% van het debiet in de Buurserbeek via Platerink af te laten op de Elsbeek en 50% op de Diepenheimse Molenbeek. Dit kan worden gecontroleerd door het debiet bij de Markveldse Molenstuw te vergelijken met het gemeten debiet van de aflaat op de Diepenheimse Molenbeek.

Bij aflaatwerk Platerink wordt water vanuit de Buurserbeek onder vrij verval afgelaten op de Elsbeek. Deze aflaat vindt gemiddeld plaats in de maanden mei-september (tabel 2.2).

Tabel 2.2 Periode waarin er water wordt afgelaten bij Platerink

Jaar	Aflaat-periode
1988	24 mei – 14 oktober
1989	18 mei – 17 oktober
1990	3 mei – 19 oktober
1991	13 mei – 27 september
1992	18 mei – 22 oktober
1993	29 april – 25 juli?
1994	20 mei – 14 september

Het debiet dat gedurende de zomer via de klepstuw wordt afgelaten is afhankelijk van de waterstand in de Buurserbeek (figuur 2.4), maar ligt meestal tussen de 5-100 l/s [bron: WRIJ]. Van het water wat vanuit de Buurserbeek op de Elsbeek wordt afgelaten komt ongeveer 75% weer in de Schipbeek terecht. De overige 25% wordt via een kleine onderdoorlaat afgelaten op de Ravenhorsterveldleiding, die op het Twentekanaal loost.



Figuur 2.4 Schematische afbeelding van aflaatwerk Platerink

De aflat op de Diepenheimse Molenbeek wordt sinds 2003 automatisch gestuurd en gemeten door een regelbare Rossum-stuw. Uit oudere metingen blijkt dat er 0 tot 540 l/s werd afgelaten.

Nieuwe Sluis:

De Nieuwe Sluis is een grote stuw in de Schipbeek, 100 m bovenstrooms van de monding van de Elsbeek. De stuw bestaat uit drie stuwen: twee stuwen met een vaste kruinhoogte met een totale breedte van 10 m en een regelbare klepstuw van 6 m breed. De stuw bevindt zich voor een klein gedeelte onder een brug. Het hoogteverschil tussen de onderkant van het brugdek en de vaste kruinhoogte bedraagt slechts 1,04 m. Bij extreem hoge afvoeren zal de brug enige opstuwing veroorzaken. Bij nog hogere afvoeren zal de brug niet nog meer opstuwing veroorzaken omdat dan de kaden aan weerszijden van de beek overlopen.

Zandvang: Op enige afstand benedenstrooms van de Nieuwe Sluis bevindt zich een zandvang in de Schipbeek. Door een toename van het doorstroomde profiel neemt de stroomsnelheid af en bezinkt het zwevend sediment. De sedimentvracht die hier jaarlijks neerslaat bedraagt ongeveer 500 m³ per jaar (§2.3.2). Het uitstroompunt van de zandvang bestaat uit een vaste stuw (B=5,6 m) en een regelbare schuif (B=4 m)

Grondduiker onder het Twentekanaal: De Schipbeek kruist het Twentekanaal via een grondduiker. Bij hoge afvoeren van de Schipbeek wordt een deel van het water op het Twentekanaal afgevoerd via een aflatwerk. Bij lage afvoeren van de Schipbeek wordt water vanuit het Twentekanaal ingelaten. De capaciteit van het inlaatwerk is ongeveer 2,8 m³/s.

2.1.4 Afwaterende oppervlakten

Het totale afwaterend oppervlak tussen de Rijksgrens en het Twentekanaal bedraagt ca. 6.350 ha. Het gebied dat afwatert in het beektraject tussen de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw is ca. 3.800 ha groot (tabel 2.3).

Tabel 2.3 Oppervlakten stroomgebied [bron: afwateringsgebieden GIS WRIJ en Heidemij, 1995]

Plaats	Afwaterend gebied	Locatie in beektraject km	Totale stroomgebied ha	Afwaterend gebied ha
Rijksgrens		27,0	14280	
	Algemeen	-		+346
Reinkstuw		31,0	14626	
	Zoddebeek	37,8		+1924
	Algemeen / overig	-		+1875
Markveldse Molenstuw		50,2	18425	
	Elsbeek	52,6		+2099
Twentekanaal		59,0	20524	

Er zijn in het stroomgebied van de Buuserbeek geen (grote) retentiegebieden

2.2 Geologie

De beschrijving van de geologie van het modelgebied begint met een beschrijving van de geologische geschiedenis, waarna de voorkomende formaties en afzettingen kort worden toegelicht. Deze beschrijving is grotendeels ontleent aan Aelmans [1973] en Smoor [1972]. Daarna worden de hydrogeologische eigenschappen van de bodem besproken en wordt de invloed van de huidige ondergrond op de hydrologie kort besproken.

2.2.1 Geologische geschiedenis

De oudste sedimenten die in het stroomgebied van de Buuserbeek nabij het maaiveld zijn te vinden stammen uit het Midden-Trias (tabel 2.4). In deze tijd hoort Noord-Nederland bij het Noordwest-Europese dalingsbekken. Vanuit het zuiden worden continentale sedimenten

aangevoerd vanuit het al sterk geërodeerde variscische gebergte, waarvan de huidige Ardennen deel uitmaakten. Het gebied van de huidige Buurserbeek bestaat tijdens het Trias en Krijt uit een ondiepe zee waarin kalk en mergel wordt afgezet. In het Boven-Krijt trad er vanuit het noorden een grote transgressie op, waardoor ook het zuiden van Nederland door de zee werd bedekt. In het Tertiair ontstaat een nieuw tektonisch bekken, het zogenaamde Noordzeebekken. Het centrum van dit bekken ligt ter hoogte van Schotland. Nederland ligt op de rand van het bekken. In het dalingsgebied worden Tertiair mariene sedimenten afgezet, voornamelijk in de vorm van klei en kleiige zanden. De dikte van deze afzettingen is in Nederland maximaal 1000 m, maar nemen naar het centrum van het bekken toe tot 3000 m. In het Kwartair zet de daling van de Noordzeebekken door. In deze periode worden er mariene en continentale sedimenten afgezet, voornamelijk bestaande uit zanden. Doordat de oostelijke rand van het Noordzeebekken in de regio van de Buurserbeek ligt, zijn de afzettingen uit het Kwartair en Tertiair dun, vergeleken met de kwartaire afzettingen in de rest van Nederland. De dikte van de Kwartaire afzettingen bedraagt hier maximaal 20 m. Ten gevolge van erosie in het Kwartair komen plaatselijk afzettingen uit het Tertiair, Onder-Krijt en het Midden-Trias aan het maaiveld voor. Met name de pleistocene (kwartaire) afzettingen zijn van invloed op het huidige landschap en worden daarom uitgebreider behandeld.

Tabel 2.4 Stratigrafisch overzicht van ondiepe afzettingen in het stroomgebied van de Buurserbeek

	Hoofdtijdvak	Periode	Tijdvak
2.10 ⁶ jaar	Kenozoïcum	Kwartair	Holoceen
			Pleistoceen
		Tertiair	Mioceen
			Oligoceen
			Eoceen
67.10 ⁶ jaar	Mesozoïcum	Krijt	Boven-Krijt
		Trias	Midden-Trias

Pleistoceen

Aan het einde van het Midden-Pleistoceen bestond Nederland uit een sedimentatiedelta, afgezet door de rivieren de Rijn, de Maas en Noord-Duitse rivieren. In de voorlaatste ijstijd (Saalien) bereikte het landijs Nederland tot de lijn Nijmegen-Hilversum en stuwde de plaatselijke afzettingen tot stuwwallen. Bij Neede werden de miocene kleien en zanden (Tertiair) opgestuwd tot de Needse berg. Het schuivende landijs vermorzelde ook de sedimenten onder zich, waardoor het slecht doorlatende en slecht gesorteerde keileem werd afgezet (Formatie van Drenthe). Ten oosten van Haaksbergen loopt een met zand opgevulde smeltwatergang (N-Z-richting) die in deze ijstijd is gevormd [Grondwaterkaart van Nederland, 1972]. Na de ijstijd volgde een warmere periode (Eemien), waarin de zeespiegel steeg en vegetatie zich ontwikkelde (veen). In deze periode zetten verwilderde rivieren kleiige sedimenten af (Formatie van Asten). De laatste ijstijd (Weichselien) wordt gekenmerkt door koudere (stadialen) en minder koude perioden (interstadialen). Tijdens de stadialen bereikt het landijs Nederland niet, maar heerste er wel een arctisch klimaat. Alleen in de zomers kwamen de temperaturen boven het nulpunt, waardoor de bovenste bodemlaag kon ontdooien. Samen met de deels ontdooide bodem zorgde smeltwaterstromen voor een nieuw systeem van beekdalen, die na het Weichselien hun zomerse afwaterende functie verloren en droogvielen. De niet-watervoerende dalen die achterbleven worden 'droge dalen' genoemd. Door het poolklimaat was de bodem tijdens het Weichselien schaars begroeid, waardoor de wind vat kon krijgen op de aanwezige sedimenten. In Nederland traden grootschalige zandverstuivingen op, die voornamelijk Oost-Nederland bedekten met een metersdikke deken van fijn zand (Formatie van Twente). Het dekzand verstoof plaatselijk tot dekzandruggen en duinen. In de interstadialen werden de zandverstuivingen tijdelijk onderbroken en ontstond er een toendra met open bos. In de laagten die als gevolg van de zandverstuivingen waren ontstaan ontwikkelde zich veen. Ook werden lokaal beeksedimenten afgezet (Formatie van Kreftenheye).

Holoceen

Na het Weichselien werd het klimaat definitief warmer en kwam Nederland in een gematigd klimaat terecht. Deze warmere periode deed 10.000 jaar gelden zijn intrede en wordt het Holoceen genoemd. Geologisch gezien is er in deze periode niet veel gebeurd. De beken in het gebied hebben plaatselijk zogenaamde beekklei en dunne veenlagen (Formatie van Singraven) afgezet. Op een aantal hoge natte plekken in het landschap ontwikkelde zich hoogveen (Formatie van Griendtveen). Deze veengebieden, waaronder het Buurserveen, zijn later deels vergraven. Onder invloed van menselijk activiteit zijn plaatselijk zandverstuivingen (Formatie van Kootwijk) ontstaan. Ten westen van Buurse is, waarschijnlijk ten gevolge van de verlegging van de Buurserbeek in de 14^e eeuw, een stuifzandgebied ontstaan.

2.2.2 Beschrijving van de verschillende afzettingen

Midden-Trias: de mariene afzettingen het Midden-Trias wordt ook wel Muschelkalk genoemd. Het gesteente bestaat uit mergelachtige gegolfde kalksteen, die in de omgeving van het instroompunt van de Buurserbeek uit Duitsland te vinden is.

Onder Krijt: de mariene afzettingen uit het Onder-Krijt bestaan uit mergelachtige klei en (zwak verkitten) zandsteen. Deze afzettingen komen 1-2 km ten zuidwesten van de afzettingen uit het Midden-Trias aan het maaiveld

Eoceen: de eocene afzettingen zijn afgezet in een relatief diepe zee. Het zijn de oudste tertiaire afzettingen in het gebied en ze liggen daardoor ook het meest oostelijk: 1 km ten noordwesten van het Midden-Trias.

Oligoceen: de oligocene sedimenten bestaan uit zware klei, waarin het groenkleurige mineraal glauconiet voorkomt. Enkele kilometers ten zuiden van Haaksbergen komt de afzettingen aan het maaiveld.

Mioceen: In het Mioceen is de toenmalige zee ondieper geworden, waardoor er naast klei ook zand wordt afgezet. Tijdens het Saalien is deze afzetting gestuwd tot de huidige 'Needse berg'. In deze stuwwal zijn haaiantanden en walvisbotten te vinden. Aangezien de latere afzettingen overwegend zandiger en beter doorlatend zijn, kunnen de Tertiaire afzettingen aangemerkt worden als hydrologische basis.

Formatie van Drenthe (Saalien, Pleistoceen): slecht doorlatend en slecht gesorteerd keileem

Formatie van Asten (Eemien, Pleistoceen): kleiige fluviatiele afzettingen (soms moerig)

Formatie van Kreftenheye (Weichselien, Pleistoceen): fluviatiele zandige afzettingen, soms grindhoudend

Formatie van Twente (Weichselien, Pleistoceen): dekzand, fijn lemig zand, naar het westen toe dikker wordende deken van zand, het jongste dekzand is minder lemig dan het oudere dekzand

2.2.3 Hydrogeologische eigenschappen

Uit de grondwaterkaarten van het gebied [Aelmans, 1973 en Smoor, 1972] blijkt dat de kwartaire afzettingen in het oostelijk deel van het stroomgebied van de Buurserbeek zeer dun zijn. Op veel plaatsen is het Kwartair dunner dan 5 m. Alleen ter plaatse van de kilometer brede smeltwatergang komen dichtere kwartaire afzettingen dan 10 m voor, tot ongeveer 40 m. Richting het Twentekanaal begint het Tertiair dieper weg te duiken en neemt de dikte van het Kwartair toe tot plaatselijk ongeveer 20 m. Uit (grove) metingen van het doorlatend vermogen is op een groot aantal plaatsen de gemiddelde doorlaatfactor van het Kwartair te schatten. De hieruit verkregen doorlaatfactoren variëren van 3 tot 24 m/d, met een mediaan van 11 m/d. Dit komt goed overeen met de gemiddelde doorlaatfactor van matig fijn zand (150-210 μ m) in de literatuur (=10 m/d) [van Lanen et al, 1999]. De totale porositeit van fijn zand is gemiddeld 46%, maar door het voorkomen van afgesloten poriën komt de effectieve porositeit op 30%. In een veldsituatie is een deel van de korrelmatrix verzadigd, waardoor de bergingscoëfficiënt kleiner is dan de effectieve porositeit. De voornaamste bodemsoorten die in het modelgebied voorkomen zijn: Veldpodzolen (Hn21), Enkeerd- en eerdgronden (zEZ21 en pZg23). De bodem bestaat voornamelijk uit leemarm en zwak lemig fijn zand (50-210 μ m), met plaatselijk lemig fijn zand. Voor een veldpodzol (Hn21) is de bergingscoëfficiënt afhankelijk van de grondwaterstandstijging (tabel 2.5).

Tabel 2.5 Bergingscoëfficiënt van een podzol als functie van de grondwaterstandstijging
[M. Meeuwissen et al, 2000]

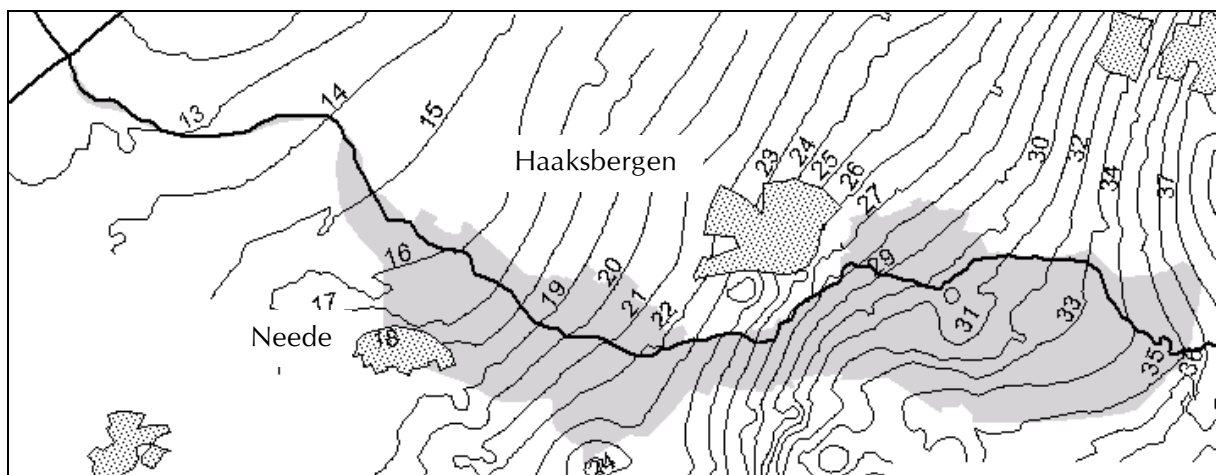
g.w.s. stijging (cm)	20	40	60	80	100	120	150
Bergingscoëfficiënt	0,07	0,10	0,13	0,14	0,15	0,15	0,17

2.2.4 Invloed van de geologie op de hydrologie

De voornaamste gevolgen van de geologische geschiedenis op de hydrologie van het gebied zijn de aanwezigheid van een ondiepe hydrologische basis, met daarop een dunne watervoerende laag met een redelijke doorlatendheid. Dit heeft tot gevolg dat het gebied een snel reagerend watersysteem bezit. Hierdoor zijn de afvoerpieken hoog en kort durend en is basisafvoer in de zomer laag. De dunne watervoerende laag heeft ook tot gevolg dat het grondwatervlak in het algemeen evenwijdig loopt aan het maaiveld.

2.2.5 Grondwater

Het grondwaterniveau wordt in het westelijke deel van het stroomgebied van de Buurserbeek bepaald door de ligging van het Twentekanaal. Dit kanaal heeft een constant peil van ongeveer 10 m+N.A.P. en snijdt de goeddoorlatende kwartaire afzettingen aan. Hierdoor lopen de isohypsen tot enkele kilometers vanaf het Twentekanaal parallel aan het kanaal (NO-ZW) en oefent het Twentekanaal een drainerende werking uit [Stichting voor bodemkartering, 1979]. De Needse berg bestaat uit gestuwde tertiaire afzettingen en heeft een slecht doorlatend vermogen. Hierdoor ligt het grondwaterpeil ter plaatse ongeveer 3 m hoger dan in de omgeving [Stichting voor bodemkartering, 1979]. De stuwwal vormt tevens een waterscheiding tussen de Buurserbeek en de zuidelijker gelegen Berkel. Verder naar het oosten worden de isohypsen voornamelijk bepaald door de helling van het maaiveld, aangezien de aquifer naar het oosten toe steeds dunner wordt (figuur 2.5 en Bijlage 2-B). Ter hoogte van Haaksbergen lopen de isohypsen ongeveer noord-zuid. Dit is vermoedelijk het gevolg van de goed doorlatende smeltwatergang in de ondergrond. In het oostelijke deel van het stroomgebied van de Buurserbeek worden de isohypsen duidelijk beïnvloed door de drainerende werking van de beek. In het westelijke deel ontbreekt dit patroon door de hoge ligging van de beek. Uit de isohypsen van het ondiepe grondwater blijkt zelfs dat er, vanuit de laatste kilometers Schipbeek voor het Twentekanaal, water wegzijgt naar het Twentekanaal. De meest voorkomende grondwatertrap is VI [Stichting voor bodemkartering, 1979]. Dit betekent dat de grondwaterstand in de zomer vaak dieper ligt dan 1,20 m-mv. en dat de wintergrondwaterstand dieper dan 0,40 m-mv. ligt



Figuur 2.5 Isohypsen in het projectgebied, berekend met een regionaal grondwatermodel [WRIJ]

In het afwaterend gebied van de Buurserbeek bevinden zich vier peilbuizen die om de 14 dagen worden of zijn bemeaten. Deze meetinterval is te groot om de reactie van het grondwater op de neerslag te bestuderen, maar geeft wel inzicht in het bereik waarin de grondwaterstand voorkomt (tabel 2.6).

Tabel 2.6 Statistieken van grondwaterstanden (1992-2002) in afwaterend gebied van de Buuserbeek. De locaties van de peilbuizen staan in Bijlage 2-A

Peilbuis Nr.	GWS-gem (m-mv.)	GHG* (m-mv.)	GLG* (m-mv.)	Grondwatertrap
34G-L01	1,10	0,79	1,54	VI
34G-L03	0,64	0,35	1,25	IV
34G-L04	1,63	1,29	2,08	VII
34B-L45	1,10	0,57	1,68	VI
34H-L02	0,91	0,51	1,28	VI

*GHG/GLG = gemiddelde van 10% hoogste/laagste grondwaterstanden

2.3 Huidige visie en de historie

2.3.1 Geschiedenis van de beek

In deze paragraaf worden de menselijke invloeden op het stroomgebied van de Buuserbeek, Schipbeek en de Ahauser Aa beschreven. De beschrijving is onderverdeeld in drie tijdvakken: tot 1800, 1800 tot 1945 en na het jaar 1945. De feiten zijn grotendeels ontleend aan Driessen [2000] en Wittgen [1986].

Het Nederlandse deel van het stroomgebied

Periode voor 1800: Vanaf 2.800 v. Chr. vestigen zich de eerste landbouwers in het gebied. Zij werken kleinschalig en hebben beperkte invloed op het landschap. Pas in de middeleeuwen (rond 900 n. Chr.) werd op grote schaal bos gekapt voor (roof)bouwland, als gevolg van het gebrek aan mest. De afwatering werd verzorgd door verschillende beken, behorende bij het Regge-systeem. In de periode 1350 t/m 1650 werd de Buuserbeek bij Buurse en bij Diepenheim afgetakt van het Regge-systeem en aangesloten op de Schipbeek, die uitmondt bij Deventer [Wittgen 1986]. Hiervoor werd vanaf de Markveldse Molen tot voorbij het huidige Twentekanaal een nieuwe waterloop gegraven. Deze nieuwe waterloop zorgde voor een economisch betere verbinding met het Duitse achterland en de beekverlegging kwam ook de watermolens ten goede. Het landschap bestond tot noch toe vooral uit heide, veen en arme landbouwgronden. Tot de invoering van nieuwe, meer productieve gewassen in de periode 1560-1800, bleven de landbouwopbrengsten laag.

Periode 1800-1945: Vanaf 1800 werd echter in toenemende mate de woeste grond ontgonnen voor agrarisch gebruik, zowel in het Nederlandse deel van het stroomgebied als het Duitse deel. Het hydrologische gevolg van de ontginningen van de bufferende woeste gronden was dat het gebied sneller ging reageren op neerslag. Mede door de ontginningen als door slecht onderhoud van de beken waren er in de 19^e eeuw verschillende overstromingen in de regio. Hierop werden door waterschappen de beken genormaliseerd in 'verbeteringsprojecten' (Bijlage 2-C), waardoor de afvoercapaciteit en de ontwatering van de landbouwgronden toenam. Onderdeel van de normalisatie van de beek was het afsnijden van meanders. De Buuserbeek werd in de periode 1849 t/m 1909 een km verkort door het afsnijden van meanders. De Schipbeek werd bijna 3 km verkort. Ongeveer de helft van het traject van de beek werd verdiept en verbreed ten behoeve van de afwatering. Door de verlaging van de beekbodem en door de toename van het verhang daalde de waterstand en werden ook de hogere gronden droger.

In de jaren '30 en met name rond 1937 werden verder gaande verbeteringsprojecten gepland door het waterschap 'De Schipbeek', ten behoeve van de ontwatering van het gebied. Deze plannen werden door voornamelijk landeigenaren van aangrenzende percelen, natuurbeschermers en zelfs door de Minister van Waterstaat afgekeurd [Dirks, 1998]. Zij beklagden zich over het feit dat met het verbeteringsproject veel natuurschoon zou verdwijnen en dat de verdroging zou toenemen, net zoals dat na de maatregelen van 1907 was gebeurd. Ook voerden zij aan dat er sinds 1907 er geen wateroverlast meer was ondervonden door de landeigenaren. De plannen gingen echter door, maar het waterschap 'De Schipbeek' werd door een sterke lobby van de Vereniging van behoud van natuurmonumenten door het Rijk verplicht ruimte voor natuurontwikkeling in de plannen op te nemen. In de verbeteringsprojecten (bijlage 2-C) werden ten behoeve van de ontwatering van de lagere landbouwgronden ontwateringskanalen [Driessen, 2000] aangelegd, parallel aan de Buuserbeek, die nog steeds in

het landschap te vinden zijn (Elsbeek). Deze kanalen liggen grotendeels wat lager ten opzichte van de Buuserbeek, zodat er onder vrijverval water uit de Buuserbeek kan worden afgelaten. De beek zelf werd verder genormaliseerd en de nieuwe afmetingen en hoogten van de gehele beek zijn om de 100 m ingemeten.

In het begin van de 20^e eeuw werden in de regio verschillende kanalen gegraven om scheepvaartverbindingen tussen de steden mogelijk te maken. Tussen 1930 en 1938 werd het Twentekanaal gegraven dat Enschede en Almelo met de IJssel verbindt [Wittgen 1986]. Het Twentekanaal heeft over het hele traject een constant peil van 10,0 m+N.A.P, waarmee het kanaal veelal een drainerende werking heeft op de omgeving.

Periode 1945-heden: Na W.O. II werden in vele ruilverkavelingen de kleinschalige bouwlanden en afwateringssystemen heringericht. Er werden vele honderden kilometers watergangen bij gegraven met aan weerszijden maaipaden, waarover het intussen gemechaniseerde onderhoud werd uitgevoerd. Ook werden er vele nieuwe stuwen en gemalen gebouwd, waaronder het aflatgemaal bij het Twentekanaal (Bijlage 2-C). Het gevolg van de toegenomen afwateringscapaciteit in het Nederlandse en het Duitse deel van het stroomgebied waren hogere afvoerpieken. De waterschappen in de regio worden na W.O II professioneler. Dit uitte zich in intensiever onderhoud van de waterlopen en kaden. Ook werden er hydrologische metingen verricht en werd het begrip 'herhalingsstijd' ingevoerd. Bij het ontwerp van 'verbeteringswerken' werd een grote overstroming met een herhalingsstijd van 100 jaar toegestaan. In de jaren zestig en zeventig wordt de sterk toegenomen vervuiling aangepakt. Na 1985 wordt er meer hydrologisch onderzoek gedaan en is er meer aandacht voor droogtebestrijding en natuurontwikkeling.

Het Duitse deel van het stroomgebied

Het stroomgebied van de Ahauser Aa heeft een soortgelijke historie als het gebied van de Buuser- / Schipbeek. Met name in de 19^e en 20^e eeuw is het gebied grootschalig ontgonnen voor de landbouw en is de afvoercapaciteit van de beek sterk vergroot. Evenals in Nederland wil men hier tegenwoordig delen van de beek herstellen in de vroegere staat en deze natuurvriendelijk herinrichten. In een Duitse studie [Flick, 2001] is een aanzet gegeven voor de locatie van enkele potentiële retentiegebieden. Als deze plannen uitgevoerd gaan worden zullen de extreem hoge afvoeren van de Ahauser Aa dus afnemen. In deze studie worden eventuele toekomstige Duitse maatregelen buiten beschouwing gelaten.

2.3.2 Menselijke invloeden op het afvoerregime van de beek

In de loop van de tijd hebben menselijke activiteiten veel invloed gehad op de beek. De eerste menselijke activiteiten die invloed hadden op het beekregime waren voornamelijk economische voordelige ingrepen ten behoeve van bijvoorbeeld de scheepvaart, watermolens en vooral de landbouw. Deze ingrepen zijn:

- Ontginningen en fijnmazige ontwatering agrarisch gebied
- Buuserbeek afgekoppeld van het Regge-systeem en aangesloten op Schipbeek
- Afsnijden meanders en beekverleggingen

Deze ingrepen hadden tot gevolg dat het watersysteem sneller ging reageren, waardoor de piekafvoeren hoger werden. In de eerste helft van de 20^e eeuw is hierop getracht actief in het beekstelsel in te grijpen door:

- uitdiepen en verbreden van de beek (normalisatie)
- aanleggen van kaden (tot 1 m hoog)
- aanleg vaste overlaten en stuwen
- intensief beheer van alle watergangen

Door deze maatregelen is de kans op inundatie sterk gereduceerd, maar deze maatregelen hadden ook gevolgen voor de netto erosie, vochtvoorziening in aangrenzende percelen en de natuur. In de onderstaande tekst wordt de invloed van de maatregelen op de erosie, verdroging en de natuurwaarden geschetst.

Erosie

Van nature vindt er in een laaglandbeek, zoals de Buurserbeek, netto erosie plaats. Door erosie bovenstrooms en aanzanding benedenstrooms zou er na lange tijd een vlak landschap ontstaan. De dynamiek van de Buurserbeek wordt daarnaast al sinds de middeleeuwen door de mens beïnvloed. Ingrepen in het watersysteem resulteren in een extra verandering van de plaatselijk aanzanding of erosie. Doordat de Buurserbeek in eerste en tweede verbeteringsronde (bijlage 2-C) grote schaal werd vergaafd werd ook de beekdynamiek weer verstoord. Door het toegenomen verhang en een nieuw, genormaliseerd profiel is de stroomsnelheid toegenomen en daarmee ook de bodemerosie. Rond 1946 werd de sedimentvracht berekend op 16.000 m³/j [Driessen, 2000]. Uit veldmetingen van bodemhoogten blijkt dat in elk geval de eerste 16 km beektraject stroomsafwaarts van de Rijksgrens in de periode 1937-1994/1995 een kleine meter is gedaald. In de huidige situatie is de netto erosie over een lange periode ongeveer in evenwicht [Mondelinge mededeling: WRIJ]. Door de aanleg van vele betonnen overlaten (derde verbeteringsronde) slijt de bodem tussen de overlaten niet verder uit. Hiermee is dus ook de natuurlijke netto erosie een halt toe geroepen.

Het sedimenttransport treedt hoofdzakelijk op bij grote afvoergolven, wanneer de stroomsnelheid maximaal is. Bij hoge afvoeren ligt de stroomsnelheid in de Buurserbeek gemiddeld op 0,8 m/s. De bodem waar de bedding van de Buurserbeek in ligt bestaat gemiddeld uit fijn zand, dat al bij stroomsnelheden van 0,02 m/s wordt getransporteerd. Bij stroomsnelheden van groter dan 0,19 m/s vindt er theoretisch uitschuring plaats [Tauw, 1999]. Dit is in het veld echter niet waargenomen, waaruit geconcludeerd kan worden dat de beekbedding uit grover materiaal bestaat. Uit de praktijk blijkt dat het afgezette sediment uit grof, goed gesorteerd zand bestaat. De goede sortering van het zand is het gevolg van de verschillende bezinksnelheden voor verschillende zandkorreldiameters. Naar schatting is er de afgelopen 10 jaar 5.000 m³ sediment afgezet in de zandvang, nabij de Nieuwe Sluis [mondelinge mededeling: WRIJ]. Dit sediment is grof geschat voor ongeveer de helft afkomstig uit Duitsland. De andere helft is afkomstig van de zijbeken van de Buurserbeek die over het algemeen een groot verhang hebben [Mondelinge mededeling: WRIJ].

Verdroging

De waterstand in de Buurserbeek is in de 20^e eeuw gemiddeld genomen gedaald door het kunstmatig uitdiepen van de bedding en door erosie. In de huidige situatie voorkomen vaste overlaten verder uitschuring en handhaven de overlaten tevens de minimale waterstand bovenstrooms. Er kan dus geconcludeerd worden dat het ontwateringsniveau in het bovenstroomse deel van Buurserbeek (0-16 km van Rijksgrens) gedaald is. De invloed hiervan op de grondwaterstand in het omliggende gebied zal gezien de beperkte dikte van de watervoerende laag echter relatief klein. Alleen het land dat direct aan de beek grenst is vermoedelijk droger geworden, ten gevolge van de daling van de waterstand.

Met name de verbeterde ontwatering ten behoeve van de landbouw heeft voor een daling van de gemiddelde grondwaterstand gezorgd. De veelal van nature natte natuurgebieden zijn daardoor ook droger geworden. Uit de verdrogingkaarten van de provincies Gelderland en Overijssel [www.prv-overijssel.nl] en [www.gelderland.nl] blijkt dat de gebieden die als (natte) natuurgebieden zijn aangewezen als licht tot ernstig verdroogd worden aangemerkt.

Natuurwaarden

De habitat die de beek vormt voor flora en fauna is sinds de normalisatie van de beek sterk veranderd. Het natuurlijke profiel is vervangen door een onnatuurlijke diepe waterloop met steile kanten, die in de meeste gevallen regelmatig worden gemaaid. De meeste meanders zijn verdwenen en overstromingsvlakten zijn in cultuur gebracht. De vele overlaten en stuwen vormen onnatuurlijk barricaden tussen de stuwpannen. Samenvattend biedt de beek als habitat dus veel minder variatie en dus ook minder biodiversiteit, vergeleken met een natuurlijke beek.

2.3.3 Huidige visie en maatregelen

In de huidige visie voor de Buurserbeek zijn naast de agrarische functie van de beek, ook de recreatie en natuur belangrijk. De visie voor het herstelplan van de Buurserbeek [Tauw, 2002] baseert zich op de natuurlijke laaglandbeek. Veel van de in de visie voorgestelde herstelmaatregelen zijn daarom gericht op het gedeeltelijk ongedaan maken de normalisatie van de beek, die in de loop van de tijd heeft plaats gevonden. Voorgestelde doelen en maatregelen zijn:

1. verminderen van de piekafvoer door:
 - in het verleden afgesneden meanders weer aansluiten
 - gecontroleerde inundatie in retentiegebieden
2. vergroten van de hydrologische relatie van de beek met de omgeving door
 - ophoging bodemhoogte van bovenloop van de Buurserbeek (sub-doel: tegengaan verdroging van natte natuur)
 - hoofdbeek laten vervlechten met parallelle waterlopen (zoals de Elsbeek)
3. reductie erosie en sedimentatie door
 - verminderen piekafvoer (zie doel 1)
 - handhaven van de in de beek aanwezige stuwen
4. verhoging van de biodiversiteit en natuurwaarden door
 - verhogen van te lage stroomsnelheden (door accoladeprofielen)
 - stuwen vervangen door vistrappen
 - in het verleden afgesneden meanders weer aansluiten
5. faciliteren recreatie door
 - aanleg wandel- en fietspaden en toestaan van kleinschalige oeverrecreatie

Er kunnen echter een aantal kanttekeningen bij deze visie worden gemaakt:

- Bij verdrogingsbestrijding zal een verhoging van de waterlijn in de bovenloop van de Buurserbeek een beperkt effect hebben op de grondwaterstanden, door de beperkte dikte van het bodemprofiel (§2.3.2, verdroging). De lokale ontwatering (sloten en drainage) heeft een veel grotere invloed op de grondwaterstanden in het gebied.
- In de huidige situatie zijn de erosie en aanzanding gemiddeld in evenwicht. Het sediment wat via de Buurserbeek wordt afgevoerd is afkomstig uit Duitsland (zie zandbanken bij de Haarmühle) en de zijbeken in Nederland. Wil men het sedimenttransport in de Buurserbeek terugbrengen, dan moeten deze bronnen worden aangepakt.

Hoofdstuk 3 Inventarisatie en bewerking van beschikbare gegevens

In deze paragraaf worden de beschikbare hydrologische gegevens geïnventariseerd en indien nodig bewerkt, met het oog op de modelleringfase (Hoofdstuk 6) en de watersysteemanalyse in hoofdstuk 4. Op basis van deze inventarisatie wordt een keuze gemaakt voor een periode, die als uitgangspunt zal dienen voor analyse van de hydrologische gegevens in hoofdstuk 4.

3.1 Neerslag en verdamping

De neerslag- en verdampinggegevens worden in dit onderzoek gebruikt voor de neerslagafvoermodellering en de waterbalansen. Uit de afvoergegevens van de meetstuwen blijkt dat de afvoerpieken over het algemeen maar 1 tot 2 dagen duren. In een neerslagafvoermodellering van een afvoergolf zijn dagsommen van de neerslag dus te onnauwkeurig. Het is daarom gewenst om in de modellering *uursommen van de neerslag* te gebruiken. De verdamping bedraagt afhankelijk van het seizoen 0 tot 5 mm/d en is daarmee veel constanter dan neerslag. Hierdoor zijn *dagsommen van de verdamping* voldoende nauwkeurig zijn voor de neerslag-afvoermodellering. In deze paragraaf wordt, op basis van de beschikbare gegevens, de gewenste nauwkeurigheid van de gebiedsgemiddelde neerslag en verdamping benadert.

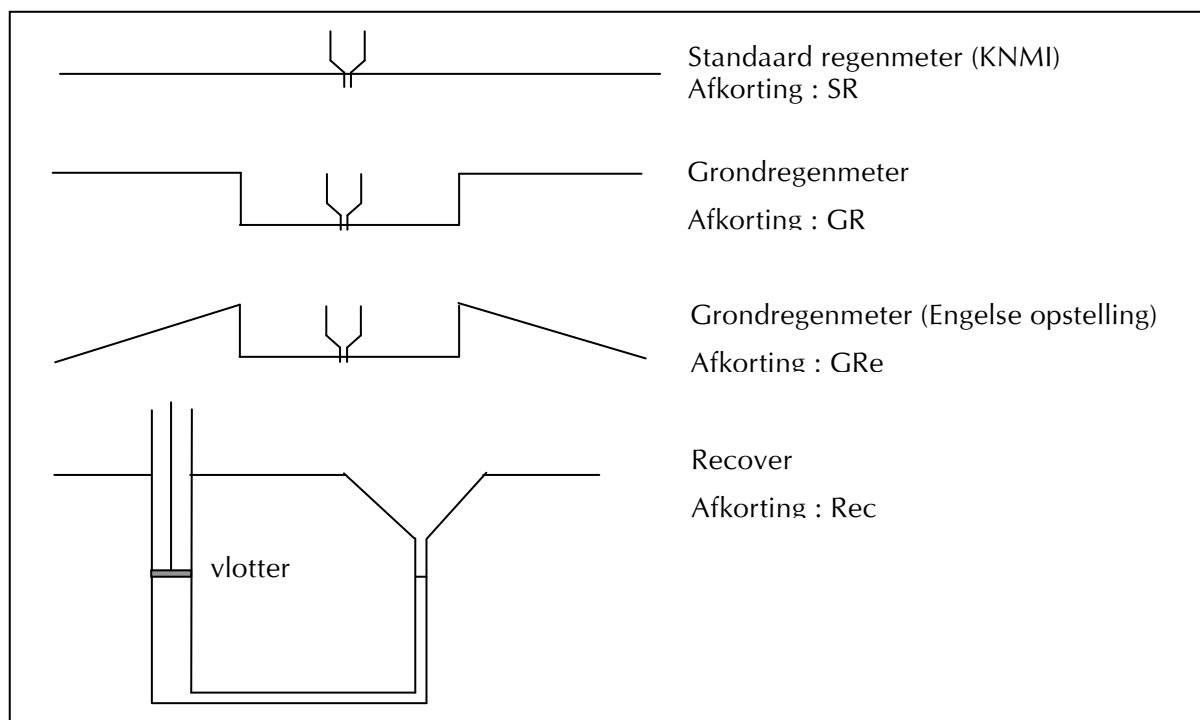
3.1.1 Inventarisatie en bewerking neerslaggegevens

In het modelgebied zijn geen neerslagstations aanwezig, maar enkele kilometers ten zuiden hiervan bevinden zich de dichtstbijzijnde stations: Rekken, Borculo, Hupsel (locatie: Bijlage 2-A). In het gebied van het Waterschap Regge en Dinkel (ten noorden van het modelgebied), zijn geen geschikte neerslagstations aanwezig. Het neerslagstation Hupsel wordt door het KNMI beheerd. De stations Rekken en Borculo zijn lokale neerslagmeetpunten, die door vrijwilligers worden onderhouden. Op alle neerslagstations wordt de neerslag dagelijks (± 8 -8 uur) gemeten met de standaard regenmeter (figuur 3.1). Op station Hupsel wordt daarnaast ook gemeten met verschillende andere meetopstellingen zoals de grondregenmeter, de grondregenmeter in de engelse opstelling en met de Recover [bron: KNMI]. Een overzicht van de beschikbare gegevens is weergegeven in tabel 3.1.

Tabel 3.1 Beschikbare neerslaggegevens

Plaats	Type (figuur 3.17)	frequentie	Complete jaren vanaf '91
Borculo	SR	dag	1991-2002
Rekken	SR	dag	1991-2002
Hupsel	SR	dag	1997-2001
Hupsel	GR	dag	1992-1995 en 1998
Hupsel	GRe	uur	1994-2001
Hupsel	Rec	20 min	1992-1999

De standaard regenmeter heeft een oppervlak van 2 dm² en bevindt zich op een hoogte van 40 cm boven het maaiveld. De grondregenmeter bevindt zich in een cirkelvormige verlaging, met een bodem van grind ter voorkoming van plasvorming en daarmee van het opsprengen van regen. De engelse versie van de grondregenmeter bestaat uit een regenmeter die is omgeven met een lage aarden wal. De recover-neerslagmeter bestaat uit een grote trechter die weggewerkt is in het maaiveld.



Figuur 3.1 Geschematiseerde dwarsdoorsneden van verschillende regenmeters

Meetkwaliteit

De gemeten hoeveelheid neerslag wordt naast de ruimtelijke variatie van de neerslag bepaald door omgevingsfactoren van de meetopstelling. Bij neerslagmetingen moet men in het algemeen rekening houden met een variabele onnauwkeurigheid. Twee gelijke regenmeters vangen nooit precies dezelfde hoeveelheid neerslag, ook niet als deze op dezelfde locatie staan. Daarnaast kan er nog een systematisch verschil bestaan tussen de opgevangen neerslag van verschillende typen regenmeters. Hierbij speelt het reducerend effect van de wind op de gemeten neerslagsom (windfout) een belangrijke rol. In deze paragraaf worden de neerslaggegevens van de verschillende regenmeters vergeleken. Als eerste worden de standaard regenmeter (SR) van Rekken, Borculo en Hupsel vergeleken, waarna de verschillende meetopstelling op station Hupsel worden bekeken.

Vergelijking standaard regenmeter van Borculo, Rekken en Hupsel

De verschillen tussen de dagelijkse neerslagsommen van station Borculo, Rekken en Hupsel, kunnen worden veroorzaakt door de ruimtelijke variatie in de neerslag en door verschillen in omgevingsfactoren. De lokale SR van het KNMI bevinden zich vaak bij particulieren in de tuin, waardoor de kans groot is dat er nabije hoge objecten aanwezig zijn die de metingen beïnvloeden.

Tabel 3.2 Variatie in neerslagsom tussen Borculo, Rekken en Hupsel

	Borculo SR	Rekken SR
Vershil van alle gemeten neerslagen in de meetperiode 1991-2002 met Hupsel (SR)	-0,6 %	-4,5 %

De neerslagsom van Hupsel en Borculo (locatie: Bijlage 2-A) komt nagenoeg overeen, maar het verschil tussen Hupsel en Rekken is aanzienlijk en waarschijnlijk deels het gevolg van de omgeving van de lokale meetopstelling.

Vergelijking van de regenmeters van station Hupsel

Om een vergelijking te maken tussen kwaliteit van de verschillende regenmeters van station Hupsel zijn de jaarsommen voor de periode 1992-2001 berekent (tabel 3.20). In het algemeen ziet men de windfout als de belangrijkste mogelijke fout van een neerslagmeting, mits inspatting

van neerslag kan worden voorkomen. Hierdoor kan aangenomen worden dat de regenmeter met de hoogste neerslagsom kwalitatief de beste regenmeter is. Het blijkt dat de standaard regenmeter en de grondregenmeter in de engelse opstelling de laagste neerslagsommen hebben. De GRe heeft gemiddeld ongeveer een 90 mm kleinere jaarsom dan de GR. De afwijking van de SR ligt is ongeveer 60 mm. Deze verschillen zijn zeer waarschijnlijk het gevolg van de relatief grote windfout van deze SR en de GRe.

Tabel 3.3 De jaarsommen van regenmeters te Hupsel (som van dagwaarden, 9-9 uur)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
GRe			883	704		707	1063	826	870	817
SR				*	*	706	1086	817	931	903
Rec	755	982	963	779	725	787	1072	919	*	*
GR	775	1011	969	796	*	*	1149			

*missende gegevens in jaarreeks

De Recover meet gemiddeld 39 mm/j minder dan de GR. Deze afwijking kan deels verklaard worden uit de fout meetfout die wordt gemaakt wanneer de Recover volraakt. De inhoud van de buis onder trechter (figuur 3.1) bedraagt namelijk slechts ca. 150 mm, waardoor de Recover tijdig geleegd moet worden. Als dit niet gebeurt gaat er namelijk water in de trechter staan waardoor de relatie tussen de waterstand in de vlotter buis de gemeten hoeveelheid neerslag niet meer klopt. De buis wordt gemiddelde eens per maand geleegd, wat gedurende natte maanden dus te weinig is.

De te gebruiken meetreeks

Aangezien het voor de neerslagafvoermodellering gewenst is uursommen van de neerslag te gebruiken zijn alleen de gegevens van de Recover en de GRe bruikbaar. De waarnemingen van de GRe zijn echter structureel lager dan die van de Recover, waardoor de gegevens van de Recover het meest geschikt zijn. Maar ook de gegevens van de Recover bevatten fouten, door het vol raken van de buis onder de trechter. Om een correcte tijdreeks van de neerslag te krijgen worden de tijdreeksen van de Recover daarom gecorrigeerd voor deze fout met de dagsommen van de GR. Uit de vergelijking van de meetreeksen van Recover en GR blijkt dat in 1996 en 1998, respectievelijk minimaal 68 en 36 mm neerslag niet wordt gemeten door de Recover doordat de trechter vol staat. In totaal wordt er 104 mm aan de tijdreeks van de Recover toegevoegd (Bijlage 3-A)

Het resterende verschil tussen de jaarsommen van de Recover en de GR bedraagt 24 mm/j, wat overeenkomt met 2,7% van de gemiddelde neerslag van de Recover. Dit restverschil wordt verder verwaarloosd omdat de kwaliteit van de Recover-gegevens niet veel verbetert als deze simpelweg vermenigvuldigd worden met 102,7%. De resulterende reeks is vergeleken met de neerslaggegevens van Rekken en Borculo (tabel 3.4). Uit tabel 3.4 blijkt dat de neerslagreeks van de Recover te Hupsel een hoge correlatie heeft met Rekken en Borculo. Hieruit is te concluderen dat de gegevens van de Recover geschikt zijn als bron voor de gebiedsgemiddelde neerslagreeksen van het modelgebied.

Tabel 3.4 Correlatie tussen dagtotalen van neerslag voor de periode 1991-2002 en de onderlinge afstand tussen de stations

	Borculo SR	Rekken SR	Hupsel SR	Hupsel Rec
Borculo SR	X	13,4 km	13,0 km	13,0 km
Rekken S	0,89	X	4,8 km	4,8 km
Hupsel SR	0,85	0,92	X	0 km
Hupsel Rec	0,90	0,94	0,98	X

3.1.2 Van referentieverdamping naar actuele verdamping

De beschikbare verdampingsgegevens bestaan uit de referentieverdamping voor station Hupsel, die zijn afgeleid uit de gemeten inkomende straling en de temperatuur (methode Makkink). In tegenstelling tot de neerslag heeft de verdamping een beperkte ruimtelijk variatie, waardoor de verdampingsgegevens van Hupsel prima toegepast kunnen worden op het modelgebied. In dit

rapport wordt voor de waterbalans de *actuele* verdamping bepaald en voor de neerslagafvoermmodellering dient de *referentieverdamping* als invoer. De bepaling van de actuele verdamping in deze paragraaf is dus alleen van toepassing op de waterbalans die in §4.3 aan de orde komt.

Theorie potentiële, referentie- en actuele verdamping

De verdampingsgegevens van station Hupsel bestaan uit tijdreeksen van de referentieverdamping ter plaatse. De referentieverdamping is de verdamping van standaard gras, 8 tot 15 cm hoog, dat de grond volledig bedekt en goed van water is voorzien. In de praktijk zijn er verschillende soorten begroeiing, waarvan de potentiële verdamping afwijkt van die van gras. Daarom zijn er aan de hand van veldexperimenten [Feddes, 1987] gewasfactoren opgesteld, waarmee de potentiële verdamping voor verschillende gewassen kan worden berekend uit de referentieverdamping (tabel 3.5 en vgl. 3.1).

$$ET_p = f * ET_r \tag{3.1}$$

ET_p potentiële verdamping (mm d⁻¹)
 f gewasfactor (-)
 ET_r referentieverdamping (d⁻¹)

Tabel 3.5 Gewasfactoren voor Makkink-verdamping [Feddes, 1987]

Maand Decade	April			Mei			Juni			Juli			Augustus			September		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Gras	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Bouwland*	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9
Loofbos	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
Naaldbos	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20

* Gemiddelde gewasfactoren van de gewassen: maïs, aardappelen en granen

De werkelijk optredende verdamping kan van de referentieverdamping afwijken als gevolg van watertekort. De referentieverdamping is namelijk berekend voor een goed van water voorzien gewas, terwijl in de werkelijkheid de bodemvochtvoorraad uitgeput kan raken. De afname van de verdamping door watertekort wordt uitgedrukt met de reductie-factor α (vgl. 3.2).

$$ET = ET_p * \alpha \tag{3.2}$$

ET = actuele verdamping
 α = droogte-factor

Gewasfactor

Voor het modelgebied wordt de gemiddelde gewasfactor berekend op basis van een schatting van de percentages van het oppervlak van de verschillende landgebruiktypen (tabel 3.6). De schatting is gemaakt op basis van kaartmateriaal en een veldbezoek. Er wordt aangenomen dat ongeveer tweederde deel van het bos bestaat uit naaldbomen (tabel 3.7)

Tabel 3.6 Schatting Landgebruik van modelgebied

Landgebruik	Oppervlak (%)
Grasland	55
Bouwland	20
Loofbos	5
Naaldbos	10
Natte heide / veen	10

Tabel 3.7 Gewogen gemiddelde gewasfactoren (f) voor Makkink-verdamping

Maand Decade	April			Mei			Juni			Juli			Augustus			September		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
f-gemiddeld	0,94	0,96	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,06	1,08	1,08	1,06	1,04	1,01	1,01	1,01	1,01	0,99	0,99

Het blijkt dat de potentiële verdamping in de zomer tot 8% ($f=1,08$) groter is dan de referentieverdamping. Dit wordt voornamelijk door de landbouwgewassen veroorzaakt. Aan het begin van het groeiseizoen is de potentiële verdamping 6% lager dan de referentieverdamping doordat het bouwland dan nog braak ligt. De gemiddelde toename van de potentiële verdamping bedraagt 2%, wat overeenkomt met 8 mm per jaar.

Reductiefactor

De actuele verdamping kan van de potentiële verdamping afwijken, doordat de potentiële verdamping geldt voor een 'goed van water voorzien gewas'. In werkelijkheid raakt de vochtvoorraad in de wortelzone, gedurende droge (zomer)maanden uitgeput, waardoor de actuele verdamping achter blijft bij de potentiële verdamping. Het is echter moeilijk in te schatten wanneer dit gebeurt. In deze studie wordt daarom aangenomen dat het procentuele verschil tussen de actuele en potentiële verdamping constant is. Over een lange periode gezien zal deze aanname redelijk goed zijn, maar de 'gecorrigeerde' maandelijkse verdamping kunnen een relatief grote fout bevatten.

Uit een studie naar het verschil tussen de actuele en potentiële verdamping voor de zomerhalfjaren van 1976-1978 voor het Hupselse beek gebied [Stricker en Brutseart, 1978], blijkt dat dit verschil gemiddeld ongeveer 80 mm bedraagt. Dit komt overeen met 18% van de potentiële verdamping in het zomerhalfjaar en met 15% gemiddeld per jaar. De periode 1976-1978 is echter een droge periode, waardoor de genoemde reductie van 15% aan de hoge kant is ten opzichte van de gemiddelde situatie. In deze studie wordt de relatief natte periode 1992-1998 bestudeerd aan de hand van waterbalansen. Voor deze periode wordt aangenomen dat de jaargemiddelde actuele reductie 10% bedraagt.

Toegepaste verdamping

Uit het voorgaande blijkt de maandelijkse actuele verdamping moeilijk te schatten is, doordat deze niet overeenkomt met de potentiële verdamping als gevolg van de verdampingsreductie, die ook niet altijd hoeft voor te komen. De mogelijke fout die wordt gemaakt door aan te nemen dat de reductie constant is, is groter dan de aanpassing van de verdamping met de gewasfactor, waardoor de toepassing van de gewasfactor achterwege wordt gelaten. Alleen de jaargemiddelde reductie van 10% wordt toegepast in de waterbalans.

3.2 Debieten

Het debiet is één van de belangrijkste hydrologische gegevens voor zowel het neerslagafvoermodel als voor de waterbalans. In de neerslagafvoermodellering zullen de debietgegevens worden gebruikt voor de ijking van het model. In §3.2.1 zullen de beschikbare meetreeksen van enkele meetstuwen worden samengevat en worden beoordeeld op kwaliteit. In de volgende paragraaf wordt een algemene methode besproken voor het verbeteren van kwaliteit van de debietsgegevens. Per meetstuw wordt daarna indien nodig de verbetering beschreven. In deze paragraaf worden de waterhoogte gedefinieerd als:

- HBH: waterstand bovenstrooms van de meetstuw in m+N.A.P.
- HOH: waterstand benedenstrooms van de meetstuw in m+N.A.P.
- H1: waterstand bovenstrooms van de meetstuw t.o.v. de stuwkruin in m
- H2: waterstand benedenstrooms van de meetstuw t.o.v. de stuwkruin in m

3.2.1 Inventarisatie debietgegevens

Ten behoeve van monitoring en onderzoek van het watersysteem zijn er in het stroomgebied van de Buurser-/Schipbeek 3 meetstuwen aanwezig (tabel 3.8), waarvan met een interval van 15 minuten de overstorthoogte automatisch geregistreerd wordt.

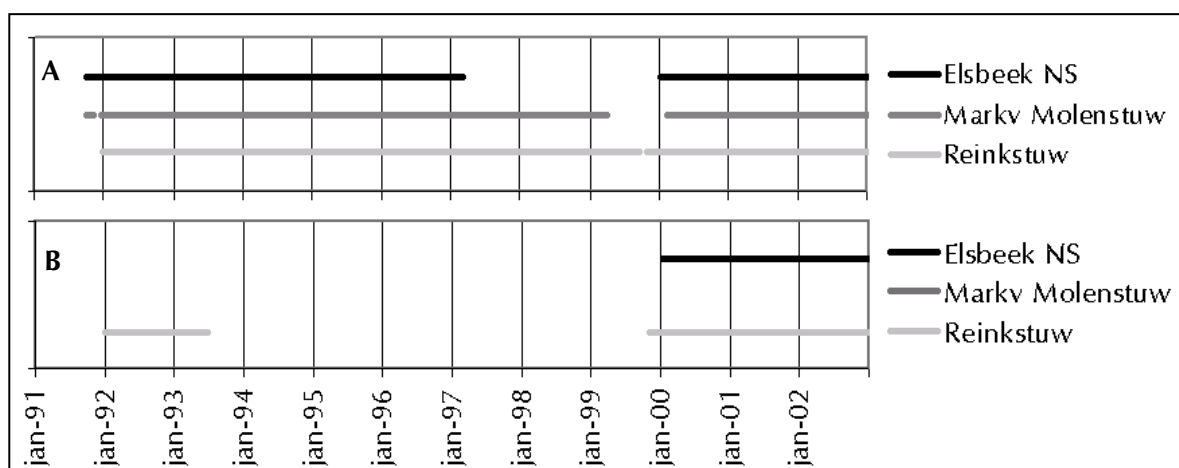
Tabel 3.8 Samenvatting van de beschikbare (debiet)meetstuwen

Stuw	Beek	Afwaterend oppervlak (ha)	Lengte bovenstroomse deel van waterloop
Reinkstuw	Buurserbeek	14.626	4,0 km van grens
Markveldse molenstuw	Schipbeek	19.147	23,2 km van grens
Nieuwe sluis	Elsbeek	1.384	25,6 km van grens

Van alle stuwen wordt het debiet, met behulp van een QH-relatie, berekend uit de bovenstroomse waterstand (HBH) bij de stuw. Hierbij is geen rekening gehouden met de mogelijke verdrinking van de stuwen bij hoge afvoeren. De bovenstroomse waterstand van de Reinkstuw wordt al sinds 1978 automatisch gemeten en de andere stuwen worden sinds 1991 automatisch bemeten. Voor de ijking van het neerslagafvoermodel en de waterbalans, is het noodzakelijk dat de afvoerreksen van de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw beide beschikbaar zijn. Aangezien de meetperioden van beide meetstuwen vanaf 1991 overlappen, zijn alleen de afvoergegevens vanaf 1991 relevant in deze studie. Deze meetreeksen vormen helaas geen ononderbroken tijdreeks. Door storingen in de apparatuur en door het ontbreken gegevens zijn er hiaten in de gegevens variërend in grootte van enkele uren tot ongeveer een jaar (figuur 3.2a en tabel 3.10). Naast de HBH worden bij de Reinkstuw en de Elsbeek, sinds 2000 ook de benedenstroomse waterstanden (HOH) permanent gemeten (figuur 3.2b). Deze HOH-gegevens zijn nodig om de uit de HBH berekende debiet te corrigeren als de stuw bij piekafvoeren verdrongen is. Voor de Reinkstuw en de Elsbeek Nieuwe Sluis kunnen de korte HOH-reeksen ook gebruikt worden om hoge debieten (globaal) te corrigeren voor perioden waarin de HOH niet is gemeten (§3.1.2).

Tabel 3.9 Volledigheid (%) meetreeksen bovenstroomse waterstanden (HBH)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Reinkstuw	0	100	99	93	98	100	100	100	87	100	99	99
Markv Molenstuw	9	97	88	95	96	100	99	91	25	96	99	100
Elsbeek Nieuwe Sluis	19	93	84	94	95	99	18	0	0	70	73	73



Figuur 3.2 Meetperiode bovenstroomse waterhoogte HBH (A) en de benedenstroomse waterhoogte HOH (B) van de meetstuwen

3.2.2 Verbetering van bruikbaarheid van de afvoergegevens

De betrouwbaarheid van de afvoergegevens is afhankelijk van de kwaliteit van de meetstuwen en de gebruikte stuwkarakteristieken. Beiden worden in deze paragraaf per stuw nader bestudeerd en beschreven.

Een belangrijke verbetering van de afvoergegevens wordt bereikt door voor alle stuwen het effect van verdrinking van de stuwen op het debiet mee te nemen. In de huidige situatie wordt het debiet berekend uit alleen de bovenstroomse waterstand (HBH). Wanneer bij hoge afvoeren de stuwkruin onder water komt te staan, wordt de bovenstroomse waterstand opgestuwd. Hierdoor wordt een te hoge HBH gemeten, waaruit dus ook een te hoog debiet wordt berekend. Deze overschatting van de maatgevende uurafvoer is over het algemeen 20-100%. Deze overschatting zorgt voor een overschatting van enkele procenten op het totale jaardebiet van een stuw. De hoge afvoeren met herhalingstijden van 1 jaar en groter, die van belang zijn voor de dimensionering van kunstwerken en waterlopen, worden echter ruim overschat. Voor een correcte werking van het neerslagafvoermodel is het dus van belang dat de afvoergegevens voor verdrinking worden gecorrigeerd. Hiervoor moet de benedenstroomse waterstand (HOH) worden gemeten. Uit §3.1.1 blijkt echter dat de HOH voor maar een beperkte periode is gemeten voor de Reinkstuw en de Elsbeek Nieuwe Sluis. Bij de Markveldse Molenstuw is de HOH nooit automatisch gemeten. Om de overschatting van het debiet bij piekafvoeren te beperken worden de HOH-reeksen aangevuld op basis van een relatie tussen HBH en HOH (vgl. 3.3). Met de HOH kan in combinatie met de HBH de verdrinkingsgraad (S) van de stuw worden bepaald (vgl. 3.4). De verdrinkingsgraad heeft, afhankelijk van het stuwtype, een (aangenomen) vaste relatie met de correctiefactor voor het debiet (Cdr)(vgl. 3.5): Met behulp van de Cdr kan daarna het 'gestuwde' debiet berekend worden (vgl. 3.6) [Boiten, 2000].

$$HOH = f(HBH) \quad (3.3) \qquad S = \frac{H_2}{H_1} \quad (3.4)$$

$$Cdr = f(S) \quad (3.5) \qquad Q = Cdr * Q_{ong} \quad (3.6)$$

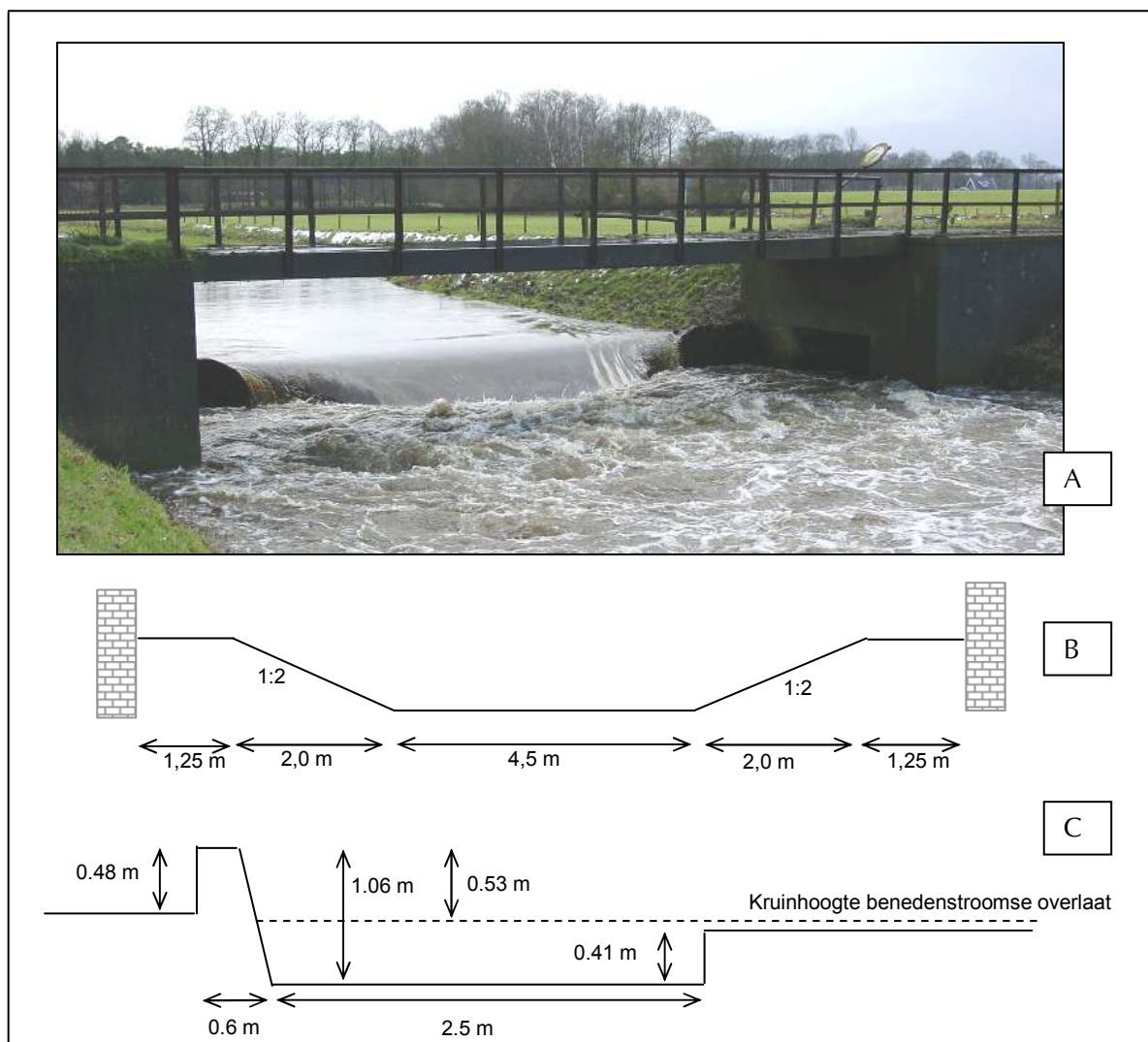
S	verdrinkingsgraad (-), verdrongen toestand als HBH en HOH ≥ H _k
H ₁	= HBH - H _k : bovenstroomse waterstand t.o.v. de kruinhoogte (m)
H ₂	= HOH - H _k : bovenstroomse waterstand t.o.v. de kruinhoogte (m)
Cdr	correctiefactor debiet
f(S)	functie van S, afhankelijk van stuwtype
f(HBH)	functie van HBH, lineaire relatie gebaseerd op beschikbare metingen van HOH en HBH
Q	debiet (m ³ /s)
Q _{ong}	ongestuwd debiet (m ³ /s)

Reinkstuw

Het ontwerp van de Reinkstuw stamt uit 1937 en is gebouwd door het toenmalige waterschap 'De Schipbeek'. Het is een trapeziumvormige stuw (figuur 3.3) met een ondiepe woelbak. Op een afstand van 9 m bovenstrooms van de stuwkruin wordt de waterstand (HBH) gemeten. De benedenstroomse waterstand (HOH) wordt op een onbekend punt in het landhoofd van de stuw gemeten. In figuur 3.3 zijn de dwarsdoorsnede en het lengteprofiel van de Reinkstuw gegeven.

Afmetingen:

Kruinbreedte : 11,0 m
 Kruinhoogte : 30,785 m+N.A.P

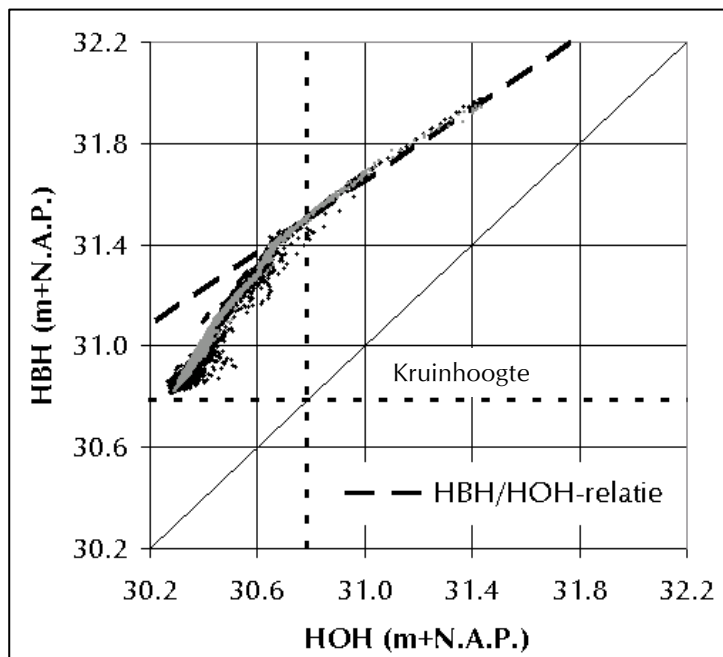


Figuur 3.3 Foto van de Reinkstuw (A) met de dwarsdoorsnede (B) en het lengteprofiel (C) [bron: bouwtekening WRI]

Ongeveer 450 m benedenstrooms van de Reinkstuw bevindt zich een vaste overlaat in de beek, die de minimale benedenstroomse waterstand bij de Reinkstuw bepaald (figuur 3.3c). De gemiddelde bodemhelling over dit traject bedraagt 0,55 %. Deze vaste overlaat is trapeziumvormig met een breedte van 9,60 m en zijvleugels met een helling van ongeveer 1:1 en een kruinhoogte van 30,26 m+N.A.P.

Nauwkeurigheid van de meetgegevens

De Reinkstuw is vanuit hydraulisch oogpunt geen ideale meetopstelling. Met name de positie van het benedenstroomse waterstandsm Meetpunt is ongunstig door de vermoedelijk grote turbulentie ter plaatse. Om deze reden is de HOH van de Reinkstuw in de periode 1993-1998 niet gemeten, in afwachting van de verplaatsing van het HOH-meetpunt. In plaats daarvan is een lineaire relatie tussen boven- en benedenstroomse waterstanden aangenomen om de tijdreeksen van HOH aan te vullen. De gebruikte relatie is: $HOH = 1,39 * HBH - 13,00$ (figuur 3.4). Op de toepassing van deze relatie wordt in deze paragraaf nog terug gekomen. In 1999 is weer begonnen met het meten van HOH en daaruit blijkt dat de meetkwaliteit niet zo slecht is als eerder gedacht. De gemeten waterstand (per kwartier) bestaat uit het gemiddelde van de waterstanden die elke paar minuten wordt gemeten. Deze gemiddelde 'kwartierwaterstand' blijkt bij extreem hoge afvoeren ongeveer 1 cm te schommelen. Schommelingen in de gemiddelde 'uurwaterstanden' (gemiddelde van 4 'kwartierwaterstanden') zullen slechts enkele millimeters bedragen. Het is wel mogelijk dat de benedenstroomse waterstand structureel te laag wordt gemeten door turbulentie.



Figuur 3.4 HBH/HOH-relatie op basis van meetgegevens uit 1992-1993

De kwaliteit van de HBH-meetreeksen is goed. De enige waarschijnlijke storing of meetfout die in de meetreeks is te herkennen zijn kleinschalige fluctuaties bij lage debieten ($<1,0 \text{ m}^3/\text{s}$). Deze onverklaarbare schommelingen hebben een amplitude van $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ en treden maximaal enkele malen per dag op, terwijl er ook perioden zijn met lage debieten waar de schommelingen niet voorkomen. De piekjes treden blijken zowel bovenstrooms als benedenstrooms op te treden, waaruit geconcludeerd kan worden dat het niet om een meetfout gaat. De oorzaak van deze schommelingen is niet bekend. Gedacht wordt aan lozingen van een Duitse rioolwaterzuiveringsinstallatie of een fout in automatische registratie. De laatste jaren (2000-2002) vertonen de meetreeksen geen schommelingen meer, maar treedt er een nieuwe fenomeen op: bij $Q > 15,5 - 16,0 \text{ m}^3/\text{s}$ worden er geen HBH meer geregistreerd.

Ijking

De laatste ijking van de stuw is tijdens het schrijven van dit rapport nog in uitvoering, maar op basis van voorlopige resultaten kan al een goede QH-relatie worden opgesteld (Bijlage 3-A). De ondergrens van de ijkingsmetingen komt overeen met de werkelijke overstorthoogte van $0,06 \text{ m}$ ($Q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}$). Het traject van de nieuwe QH-relatie met de laagste debieten is daarom geïnterpoleerd. Deze nieuwe QH-relatie wijkt gemiddeld 1% af van de ijkings-metingen. Het verschil tussen de ijkingsresultaten en de door Rijkswaterstaat gehanteerde QH-relatie uit 1983 is gemiddeld 2,4%. (Bijlage 3-B). Alleen de lage afvoeren werden door de QH-relatie overschat.

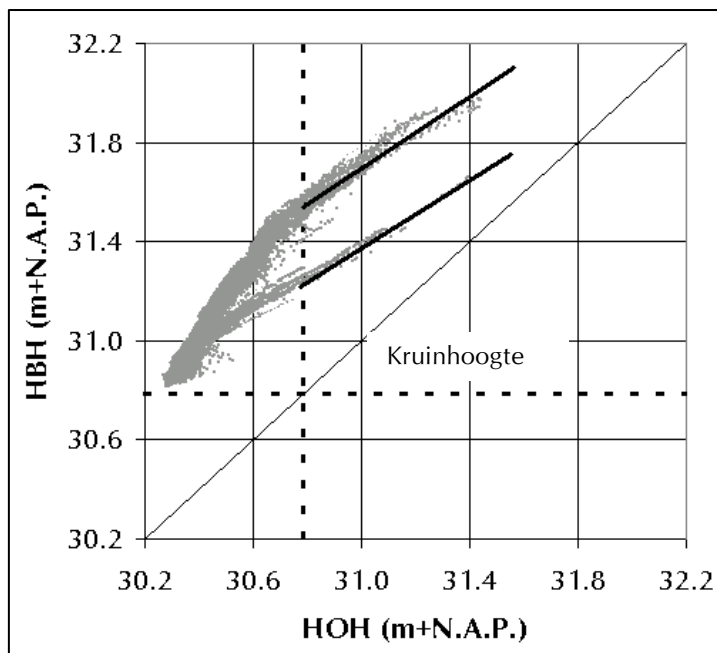
De reductie van het debiet door verdrinking van de Reinkstuw bij hoge afvoeren is in de ijking van 1983 niet gekoppeld aan de HOH, maar direct in de QH-relatie verwerkt. De QH-relatie uit 1983 heeft hierom bij hoge afvoeren een relatief 'kleine' afwijking. Uit de recente ijking en uit meetgegevens blijkt dat het debiet van de Reinkstuw zeker wordt beïnvloed door hoge benedenstroomse waterstanden.

Voor de ijking van de Reinkstuw is in het laboratorium een hydraulische schaalopstelling gemaakt, waaraan metingen kunnen worden verricht [Dommerholt, 2003]. De verdrinking van de stuw is bepaald door bij verschillende constante debieten de hoogte van de benedenstroomse opstuwing te variëren. Door bij deze experimenten de waterstanden voor en achter de stuw te meten, zijn hieruit voor individuele debieten relaties tussen de verdrinkingsgraad (S) en de correctiefactor voor de afvoer (Cdr) gevonden. Deze relaties vallen echter niet exact samen, maar bevinden zich in binnen een bepaalde bandbreedte. De S-Cdr curves van individuele debieten die wel zijn gebruikt zijn: $Q = 5,5, 8,0, 9,2$ en $12,2 \text{ m}^3/\text{s}$ voor het traject $0,00 < S < 0,60$ gebruikt, en $Q = 16,8, 22,3, 28,6, 34,3$ en $39,6$ voor het traject $0,50 < S < 0,90$ (bijlage 3-B). De

hoogste gemeten verdrinkingsgraad, in de periode waarin de HOH en de HBH zijn gemeten, is 0,70. In dit geval wordt het berekende debiet van de Reinkstuw met 25% overschat.

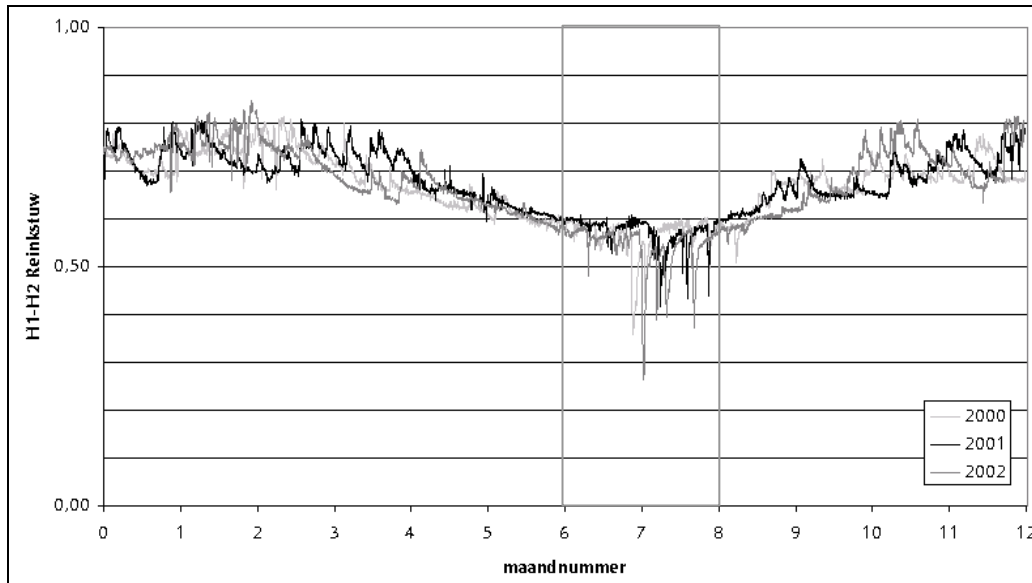
Verdrinking van de stuw

In de periode 25-6-1993 t/m 27-9-1999 is bij de Reinkstuw alleen de bovenstroomse waterstand gemeten. Zonder HOH is het niet mogelijk de verdrinkinggraad en de reductiefactor voor het debiet te berekenen. Omdat de Reinkstuw bij hoge afvoeren wel verdrinkt wordt het debiet dan overschat. Het is dus noodzakelijk voor de periode waarin HOH niet is gemeten, HOH bij hoge afvoeren goed te schatten met behulp van een HOH/HBH-relatie. In het verleden is dit gedaan op basis van een meetreeks van HOH en HBH voor de periode 1-1-1992 t/m 24-6-1993 (figuur 3.4). Vanaf 27-10-1999 tot het heden is de HOH weer gemeten en is de eerder opgestelde HBH/HOH-relatie aangevuld met nieuwe meetreeksen uit de jaren 1999 t/m 2002 (figuur 3.5)



Figuur 3.5 HBH/HOH-relatie op basis van meetgegevens uit 1992, 1993 en 1999-2002

Er is een duidelijk verschil te zien tussen figuur 3.4 en 3.5. Na het aanvullen van de HOH-gegevens uit 1992 en 1993 met gegevens uit 1999-2002 blijkt dat er een tweede HBH/HOH-relatie te bestaan. Uit figuur 3.6 blijkt dat deze tweede relatie wordt veroorzaakt door afvoergolven die ongeveer in de periode van 1-juli tot 1-september voorkomen. In de eerdere (droge) meetperiode 1992-1993 komen namelijk geen hoge zomerse afvoeren voor. De mogelijk verklaring voor deze 'tweede' HBH/HOH-relatie is de invloed van (water)plantengroei in de waterleiding en op de oevers. Dit heeft tot gevolg dat de leidingweerstand toeneemt, waardoor in de zomer bij hoge debieten de beneden-stroomse waterstand bij de Reinkstuw relatief hoog is.



Figuur 3.6 Verschil H1 en H2 voor 2000-2002

Op basis van figuur 3.5 worden de HOH-gegevens van de Reinkstuw aangevuld, gebruik makend van de volgende relaties:

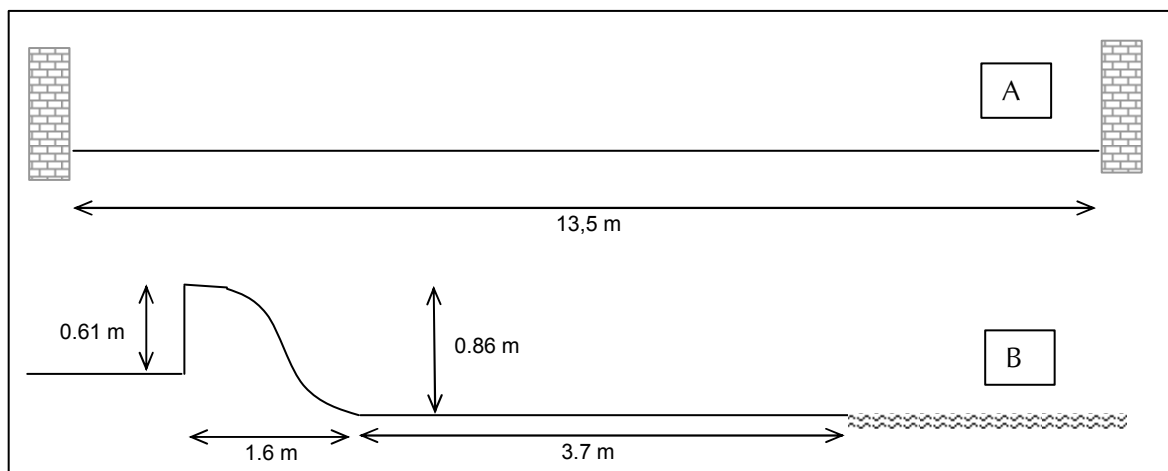
$$16\text{-sept t/m } 30\text{-juni} : \text{HOH} = 1,393 * \text{HBH} - 13,15$$

$$1\text{-juli t/m } 1\text{-sept} : \text{HOH} = 1,471 * \text{HBH} - 15,15$$

In §4.2.4 wordt dieper ingegaan op de blijkbaar seizoensafhankelijke leidingweerstand.

Markveldse Molenstuw

De Markveldse Molenstuw (figuur 3.7) is rond 1937 gebouwd en heeft een rechte overlaat van 13,5 m breed met een parabool-vormige kruin. De stuw is van oorsprong waarschijnlijk niet bedoeld als meetstuw en heeft daarom geen standaard stuwkruin. In de bouwtekeningen is te vinden dat er een brug over de stuw liep, die waarschijnlijk werd gesteund door een pijler halverwege de stuwkruin. In de huidige situatie is de pijler verwijderd, waardoor dat deel van de kruin onregelmatig is en iets ondieper (1-3 cm) ligt dan de rest van de kruin. Hierdoor zullen lage afvoeren (iets) onderschat worden. De stuwkruin is verder voor de helft uitgevoerd in beton en voor de helft met baksteen. De woelkom achter de stuwkruin is ondiep (86 cm lager dan de kruin) en ongeveer vier meter lang (figuur 3.7). Verder stroomafwaarts blijft de waterloop ondiep met een bodem van steenblokken, bedoeld tegen erosie. Ongeveer 850 m benedenstrooms van de stuw ligt een lage overlaat in de Buurserbeek (Kappenstuw), die bij hoge afvoeren de benedenstroomse waterstanden van de Markveldse Molenstuw opstuwt.



Figuur 3.7 Markveldse Molenstuw: dwarsdoorsnede (A) en lengteprofiel (B) [bron: WRI]

Afmetingen:

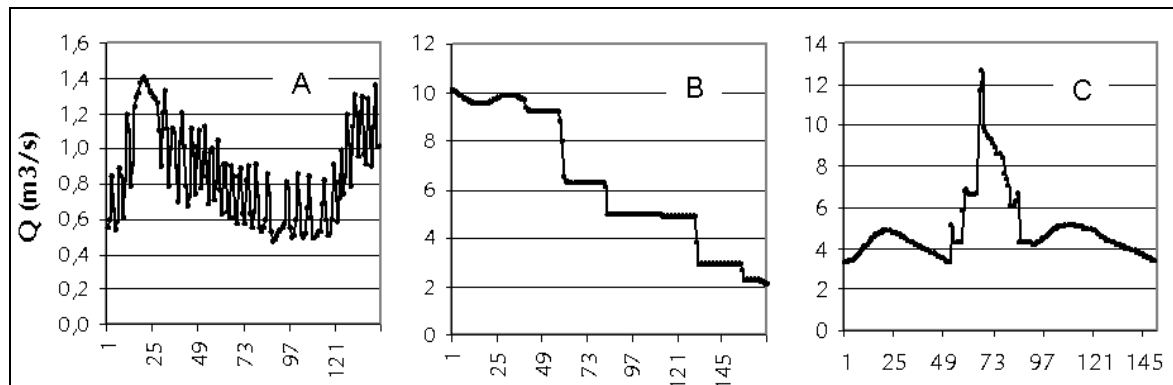
Kruinbreedte : 13,50 m
 Kruinhoogte : 15,46 (op het beton, meting in 2000)
 Kruinhoogte Kappenstuw : 14,53 m+N.A.P

Het debiet van de Markveldse Molenstuw wordt afgeleid uit de bovenstroomse waterhoogte. Deze waterstand wordt om het kwartier automatisch gemeten met een vlotter ('stilling well') en opgeslagen in een geheugen. Het bovenstroomse meetpunt bevindt zich ongeveer 13 m van de stuwkruin. De QH-relatie is bepaald met behulp van literatuur [Bos, 1976]. Aangezien de stuw geen standaardafmetingen en -kruinvorm heeft is de QH-relatie bepaald voor het meest overeenkomende stuwtype: cilindervormige stuwkruin. Het effect van verdrinking van de stuw is in deze berekeningen niet meegenomen.

Meetkwaliteit

Van de Markveldse Molenstuw is een nagenoeg ononderbroken tijdreeks gemeten van oktober 1991 t/m maart 1999. Vanaf maart 2000 wordt er weer continue gemeten. De meetgegevens in de tussenliggende periode zijn deels van zeer slechte kwaliteit of ontbreken. Er zijn drie verschillende verstoringen in de meetreeksen opgetreden:

- kleinschalige snelle fluctuaties (figuur 3.8 A), in orde grootte van gemiddeld 0,3 m³/s, vooral bij afvoeren lager dan 5 m³/s in de periode 1992-1994. Deze fluctuaties komen ook voor bij de Reinkstuw, waar de fluctuaties tegelijkertijd in zowel de HBH- als in de HOH-metingen voorkomen. Dit duidt erop dat de snelle fluctuaties in de afvoer in werkelijkheid voorkomen. De oorzaak hiervan is onbekend.
- tijdelijk vastgelopen vlotter (figuur 3.8 B). Dit fenomeen wordt in de meetreeksen gekenmerkt door een schoksgewijze afname van de waterstand na een afvoergolf. Aangezien dit patroon vooral in de maanden januari en december voorkomt is het aannemelijk dat de vlotter vast komt te zitten door ijsvorming in de vlotterbuis.
- grootschalige snelle fluctuaties (figuur 3.8 C), optredend bij hoge en lage afvoeren. Deze verstoring begint in november 1997 op te treden en treedt daarna steeds vaker op, totdat het laatste halve jaar van de meetreeks zelfs onbruikbaar wordt (april t/m oktober 1999). Een vergelijking met het debiet van de Reinkstuw en neerslagmetingen, sluiten een natuurlijke oorzaak uit.



Figuur 3.8 Verschillende typen verstoringen in het gemeten debiet van de Markveldse Molenstuw, uurwaarden op de x-as

Verdrinking van de stuw

De QH-relatie die is afgeleid voor de Markveldse Molenstuw (Bijlage 3-C) geldt voor een ongestuwde afvoer. Maar gezien het beperkte verval van de stuw (0,86 m) is het te verwachten dat de stuw bij hoge afvoeren verdrinkt waardoor het debiet wordt overschat. Om overschatting van de hoge afvoeren te beperken is het mogelijk de relatie tussen de boven- en benedenstroomse waterstand op basis van een enkele handmatige meting en berekeningen te schatten. Met een opgestelde relatie tussen de boven- en benedenstroomse waterstand kan dan de verdrinking in alle afvoersituaties worden berekend. De relatie tussen de verdrinkingsgraad (S) van de Markveldse Molenstuw en de correctiefactor voor het debiet (Cdr) (Bijlage 3-B) is ontleend aan dezelfde literatuur waarmee ook de QH-relatie is opgesteld [Bos, 1976].

Aangenomen dat relatie tussen de boven- en benedenstroomse waterstand lineair is, kan op basis van twee bekende punten een relatie worden opgesteld. Een van die punten wordt gevormd door een handmatige meting die tijdens een extreme afvoergolf in december 1988 is gedaan. Bij gebrek aan meer handmatige gegevens is het tweede punt geschat op basis van (grove) eenvoudige berekeningen voor een *situatie waarin de stuw bijna begint de verdrinken*. Hierbij is de HOH gelijk aan de kruinhoogte.

HOH = kruinhoogte = 15,46 m+N.A.P, dan is H2 = 0,86 m

Door aan te nemen dat deze waterdiepte (0,86 m) ongeveer overeenkomt met de evenwichtswaterdiepte, kan met behulp van vgl. 3.7 het debiet worden geschat:

$$Q = d_n \cdot C \cdot S_0^{1/2} \cdot B \quad \text{met} \quad (3.7)$$

Q	debiet (m ³ s ⁻¹)	
d _n	evenwichtswaterdiepte	0,86 m
S ₀	bodemverhang	0,0005
B	bodembreedte	13,5 m
En		

$$C = 18 \cdot \log \left(\frac{12D}{k} \right) \quad \text{met} \quad (3.9)$$

C	Chézy-coëfficiënt (m ^{1/2} s ⁻¹)	
D	waterdiepte	0,86 m
k	ruwheidsfactor bodem	0,02 m

Resultaat:

$$C = 48,8 \text{ m}^{1/2}\text{s}^{-1}$$

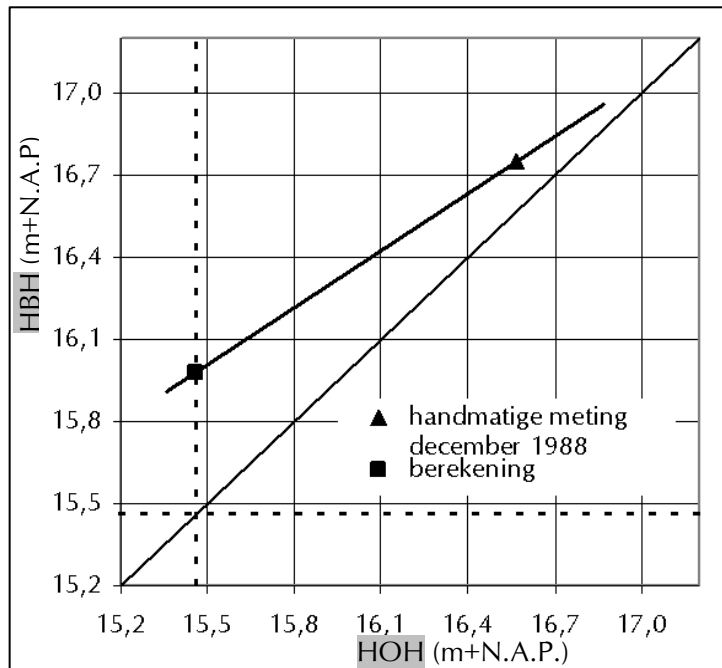
$$Q = 12,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$$

De (ongestuwde) overstorthoogte van de Markveldse Molenstuw die bij dit debiet hoort bedraagt 0,52 m (= 15,98 m+N.A.P.)

Hieruit volgt een tweede punt (tabel 3.10), waaruit een lineaire relatie tussen de HBH en de HOH kan worden opgesteld: 1,442 * HBH - 7,576 (figuur 3.9), die redelijk overeenkomt met de HBH/HOH-relatie van de Reinkstuw. Bij gebrek aan betere gegevens wordt deze relatie uit figuur 3.9 gebruikt om de hoge afvoeren van de Markveldse molenstuw te corrigeren voor de verdrinking van de stuw.

Tabel 3.10 Twee ijkpunten voor de lineaire HBH/HOH-relatie van de Markveldse Molenstuw

	Berekening	Meting 1988
HBH	15,98	16,75
HOH	15,46	16,57



Figuur 3.9 Aangenomen HBH/HOH-relatie van de Markveldse Molenstuw

Elsbeek Nieuwe Sluis

De stuw in de Elsbeek bevindt zich nabij de monding van de beek in de Schipbeek. De stuw heeft een beweegbare rechthoekige stuwklep met een kruinbreedte van 3,00 m. De bovenstroomse waterhoogte (HBH) wordt op ongeveer 8 m van de kruin gemeten. Stroomafwaarts van de stuw is de beekbodem en -oever in beton uitgevoerd om erosie te voorkomen. Enkele meters stroomafwaarts van de stuw maakt de waterleiding een haakse bocht en gaat via een duiker onder de weg door de Schipbeek in. Het beneden peil (HOH) wordt bij de betonnen duiker gemeten, enkele meters van de stuwkruin. Het HOH-meetpunt bevindt zich hierdoor op een ongunstige plaats in verband met de turbulentie bij hoge afvoeren. De ingang van de vlotterbuis (HOH) ligt direct op de bodem, waardoor deze bovendien gevoelig is voor verzanding. De HOH is sterk afhankelijk van de waterstand in de Schipbeek. De meetnauwkeurigheid van de stuw bij lage afvoeren kunnen worden beïnvloed door drijvend vuil.

Kruinhoogte : variabel (in de praktijk: 14,10 tot 14,80 m+N.A.P)
 Kruinbreedte : 3,00 m

Meetkwaliteit

De bovenstroomse waterstand wordt sinds 1991 gemeten. De tijdreeks is compleet tot 5-3-1997. Daarna sloeg de bliksem in en is de schade niet hersteld vanwege een aanstaande renovatie van de stuw. Pas in 2000 worden er weer waterstanden gemeten, dit keer ook de benedenwaterstand (HOH). Uit meetgegevens blijkt dat de meetstuw in de Elsbeek bij afvoeren van 15-20 ³/s in de Schipbeek door opstuwning vanuit de Schipbeek sterk verdrinkt. De precieze afvoer van de Elsbeek is in zo'n situatie niet af te leiden uit de waterstands gegevens.

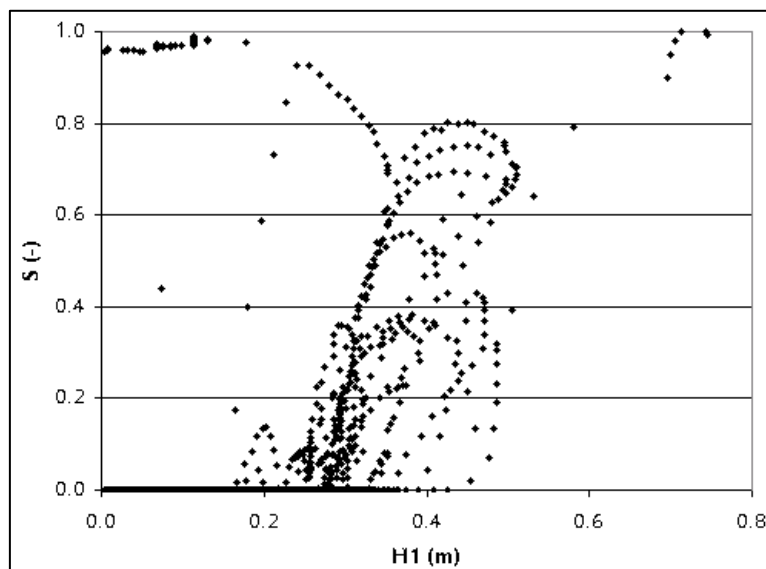
In 2001 bleek dat de stuwklep enigszins verzakt was, waardoor het verschil in hoogte tussen beide zijden van de stuwkruin was toegenomen tot 2,1 cm verschil. Tevens bleken de rubbers van de klepstuw in slechte staat te verkeren, waardoor de stuw sterk onderloops was. De rubbers zijn in december 2001 vervangen en de stuwklep is in de tweede helft van 2002 gerepareerd. De meetreeksen van de klepstuw in de Elsbeek bevatten voor de jaren 2000-2002 dus een extra onnauwkeurigheid. Uit de meetreeksen van de jaren 1992 en 1993 blijkt ook dat de HBH bij lage afvoeren soms licht 'schommelt' op dagbasis (afname debiet overdag). De oorzaak van dit gedrag is niet bekend, maar is zeer waarschijnlijk als gevolg van menselijke handelingen (berekening). De tijdreeks van afvoeren en waterstanden wordt ook verstoord door

een verlaging van de beweegbare stuwklep, wat een kortstondige kunstmatige piekafvoer tot gevolg heeft.

Stuwkarakteristieken

De QH-relatie die het WRIJ hanteert is opgesteld aan de hand van standaard QH-relaties van een klepstuw. De correctie voor de klepstand is niet meegenomen. De QH-relatie van Elsbeek Nieuwe Sluis is: $Q = 5,865 * H^{3/2}$ (Bijlage 3-D). Net als bij de eerder besproken stuwen is de mogelijke verdrinking niet meegenomen in de stuwkarakteristieken. Dit is onterecht, blijkt uit meetreeksen van HBH, HOH en de kruinhoogten uit 2001 en 2002. In deze twee jaar verdrinkt de stuw 6 keer tot minimaal een verdrinkingsgraad van 0,50 (>10% overschatting, bijlage 3-D).

Om de overschatting van de piekafvoeren te reduceren kan daarom, net als bij de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw is gedaan, een HBH/HOH-relatie worden opgesteld. Aangezien de kruinhoogte van de stuw variabel is moet HBH in deze relatie vervangen worden door de overstorthoogte (H1). Uit meetgegevens blijkt echter dat de verdrinkingsgraad niet duidelijk is gerelateerd aan H1 (figuur 3.10), doordat het benedenstroomse peil sterk afhankelijk is van de waterstand in de Schipbeek. De (gemeten) extreem hoge debieten van de Elsbeek kunnen dus worden overschat.



Figuur 3.10 Relatie tussen de overstorthoogte (H1) en de verdrinkingsgraad (S) van Elsbeek Nieuwe Sluis (2000-2002)

3.3 Grondwaterstanden

In het modelgebied staan 5 peilbuizen (locatie: Bijlage 2-A) die met een meetinterval van twee weken worden of zijn bemeaten. De meetonauwkeurigheid van een peilbuismeting is ongeveer 1 cm, wat ruim voldoende is om de jaarlijkse trends waar te nemen. De grondwaterstanden geven een algemeen inzicht in de relatie tussen de berging in de bodem (grondwaterstand) en de afvoer naar de beek. De gemiddelde grondwaterstanden van de 5 peilbuizen geven een benadering van de waterberging in het modelgebied. De gegevens worden in de waterbalansen gebruikt.

3.4 Waterstanden

In het modelgebied worden alleen bij de stuwen automatisch waterstanden gemeten. In het stroomgebied van de Elsbeek wordt op 1 plaats de waterstand handmatig genoteerd (Mallemsse veengoot). Deze meetreeksen zijn analoog beschikbaar, maar worden in deze studie niet gebruikt.

3.5 Selectie meetreeks

De afvoer-, neerslag- en verdampingsgegevens worden verderop dit onderzoek gebruikt voor de neerslagafvoermodellering en voor het opstellen van een waterbalans. Voor de *waterbalans* is het van belang dat de 'ononderbroken' tijdreeks zo lang mogelijk is, zodat de relatieve foutenmarge van de bergingsverandering zo klein mogelijk wordt. Voor de tijdreeks die toegepast wordt in de ijking van het *neerslagafvoermodel* is het belangrijk dat ook hoge afvoeren in de reeks voorkomen. De afvoerreeks van de Reinkstuw moet compleet zijn en de tijdreeks van de Markveldse Molenstuw (waarop wordt gecalibreerd) mag hiaten bevatten. Ten behoeve van de simulatie van de neerslagafvoerprocessen is het noodzakelijk dat er minimaal een heel hydrologisch jaar wordt doorgerekend. Hydrologisch extreme jaren / gebeurtenissen in de periode 1992-1998 zijn:

- hoogste afvoer 31-12-1993 (T=50 jaar)
- extreem nat jaar: 1998
- nat jaar: 1993 en 1994
- Matig droog tot gemiddeld jaar 1992, 1995, 1996, 1997

De meetreeks die voldoet aan bovenstaande eisen moet ook voldoende nauwkeurigheid hebben. De onnauwkeurigheid van de debiet- en de neerslaggegevens wordt hieronder samengevat:

- Debiet: het gemeten debiet van Elsbeek Nieuwe Sluis bevat een hiaat in de periode 1997-1999 en is onbetrouwbaar in periode 2000-2002
- Debiet: het gemeten debiet van de Markveldse Molenstuw bevat een hiaat in 1999 en heeft in de periode 1996-1999 een sterk afnemende kwaliteit
- Debiet: de debietscorrectie voor verdrinking van de Elsbeek Nieuwe Sluis (1991-1996) is vrij onnauwkeurig
- Debiet: de debietscorrectie voor verdrinking van de Reinkstuw (1991-1999) en de Markveldse Molenstuw (1991-2002) zijn wel redelijk nauwkeurig
- Neerslag: De neerslaggegevens van de Recover (uursommen) zijn in de periode 2000-2002 niet compleet.

Afgaande op de beschikbare gegevens zijn de waarnemingen uit de periode 1992-1996 het meest geschikt voor het opstellen van een waterbalans. Als de afvoer van Elsbeek Nieuwe Sluis niet gebruikt hoeft te worden, is de langere periode 1992-1998 beschikbaar, mits het gemiddelde debiet tijdens de hiaten in de afvoerreeks van de Markveldse Molenstuw worden geschat. Voor de ijking van het neerslagafvoermodel lijken de jaren 1992 t/m 1995 geschikt. Deze periode bevat droge en natte jaren en de kwaliteit van de meetreeksen is goed en vrijwel volledig.

3.6 Conclusies inventarisatie

Een van de voornaamste conclusies die uit dit hoofdstuk is te trekken is dat de waarde van de debietgegevens wordt beperkt doordat er geen rekening wordt gehouden met de situatie waarin de meetstuwen verdrinken (uitleg §3.1.2). Uit de meetgegevens blijkt namelijk dat alle stuwen bij hoge afvoeren verdrinken. Hierdoor worden de hoge afvoeren, waaronder de maatgevende afvoer, consequent overschat met enkele tientallen procenten, terwijl deze getallen worden gebruikt om allerlei 'water-projecten' op te dimensioneren. Deze situatie is te verbeteren door:

1. de verdrinking situatie mee te nemen in de QH-relaties van meetstuwen en
2. de HOH altijd te meten bij meetstuwen

Tevens is het zo dat de meetopstellingen die er zijn, vanuit hydraulisch oogpunt niet erg geschikt zijn. Oorzaak hiervoor is natuurlijk dat de meeste (grote) kunstwerken uit de jaren '30 t/m '70 stammen. Bij nieuwe ontwerpen van kunstwerken is het aan te raden meer aandacht te schenken aan de geschiktheid van het kunstwerk als meetopstelling.

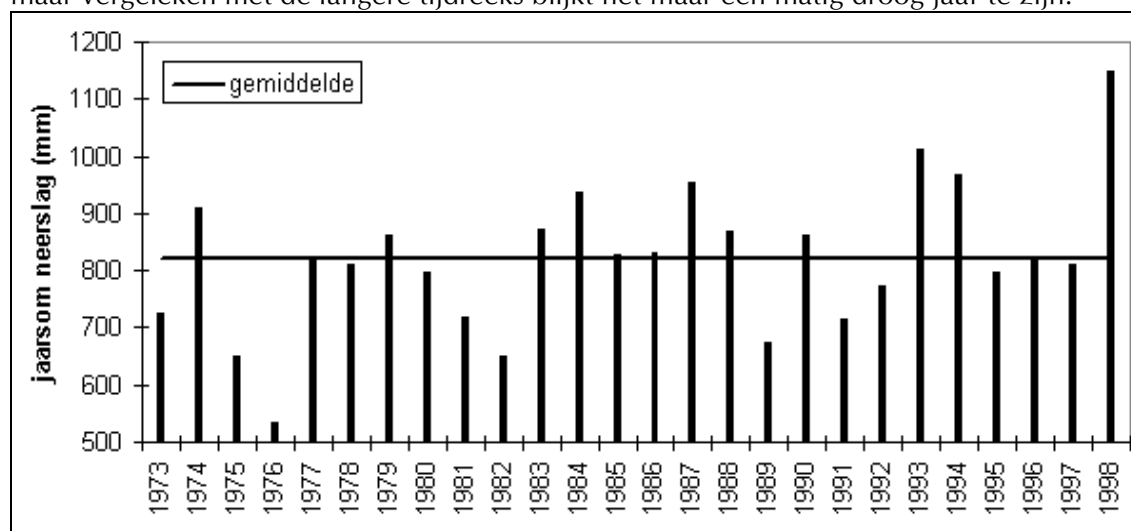
Bij het gebruik van neerslaggegevens van de lokale regenmeters, die verspreid in het waterschap staan, moet men rekening houden met een *onderschatting* van de neerslag. De standaard regenmeter die wordt gebruikt heeft een voor de onderzochte periode gemiddelde windfout van ongeveer 60 mm/j en lokale verschillen in meetopstelling kunnen voor een extra reductie van 40 mm zorgen.

Hoofdstuk 4 Analyse hydrologische gegevens en waterbalans

In dit hoofdstuk zal aan de hand van de debiet-, neerslag-, verdamping- en grondwaterstandgegevens, uit voornamelijk de periode 1992-1998, het watersysteem worden onderzocht. Ten eerste wordt aan de hand van neerslag en verdampingsgegevens van Hupsel bepaald welke jaren binnen de geselecteerde tijdreeks extreem nat of droog waren. In de volgende paragraaf worden afvoerstatistieken en grondwaterstanden besproken, waarna in §4.3 een waterbalans wordt opgesteld.

4.1 Neerslag en verdamping

De periode 1992 t/m 1998 blijkt deel uit te maken van een relatief natte periode, vergeleken met de droge jaren '70 (figuur 4.1). De jaren 1998, 1993 en 1994 blijken respectievelijk zelfs de natste jaren in de periode 1973-1998. Het droogste jaar van de periode 1992-1998 is 1992, maar vergeleken met de langere tijdreeks blijkt het maar een matig droog jaar te zijn.



Figuur 4.1 Neerslagsom grondregometer (7) te Hupsel van de jaren 1973 t/m 1998**

Tabel 4.1 Jaarsommen van neerslag (Grondregometer Hupsel) en verdamping te Hupsel (uitgebreid overzicht in bijlage 4-A)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Neerslag (mm)	775	1011	969	796	817**	812**	1149
Actuele verdamping* (mm)	521	465	486	544	485	523	452
Neerslagoverschot (mm/d)	254	546	483	252	332	289	697

* $ET = E_{Tr} \cdot 0,9$

** incomplete neerslagreeks van 1996 en 1997 aangevuld met neerslaggegevens Recover

De hoogste afvoer van de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw in de periode 1992-1998 vond plaats op 31 december 1993. De maand december van het jaar 1993 was de natste maand uit de meetreeks met een totaal van 186 mm gemeten in Hupsel. Hierdoor was in deze maand de grondwaterstand hoog, zodat de waterberging in de bodem beperkt was. Directe oorzaak van de extreem hoge afvoer was echter een bui van 38 mm in 13 uur (31 dec 1993). Vergeleken met de extreme winterneerslagen van de Bilt, heeft deze neerslag een herhalingstijd van ongeveer 50 jaar [Meeuwissen et al, 2000]

4.2 Beekdebiet en afwatering van het landelijk gebied

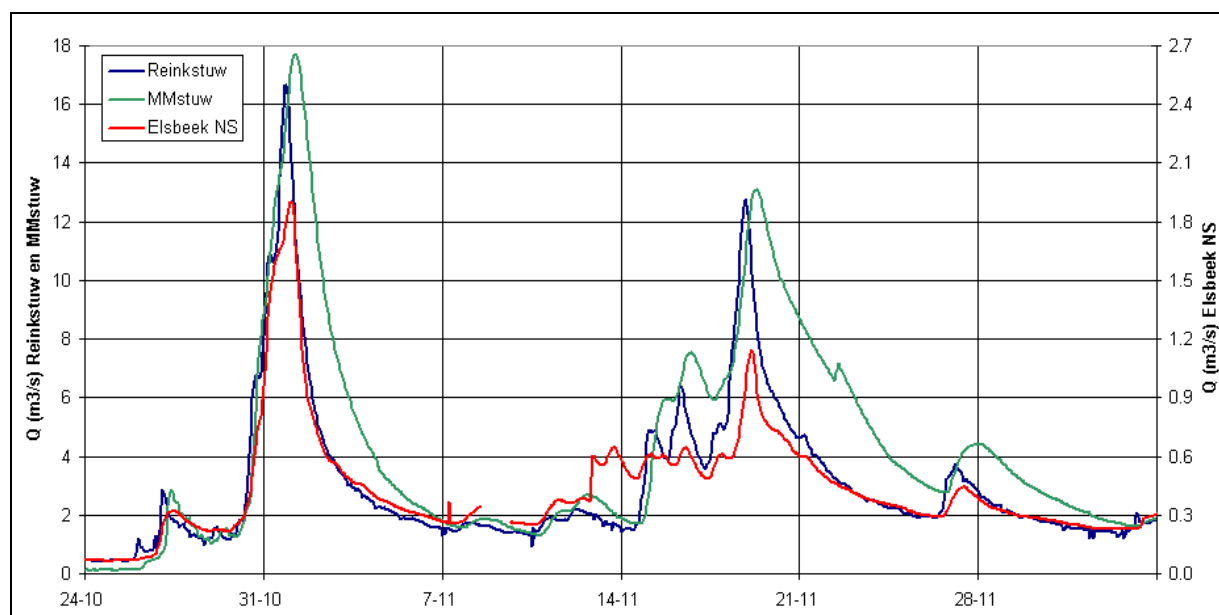
In deze paragraaf wordt aan de hand van de tijdreeksen en statistieken van het debiet, de waterstanden en de grondwaterstanden een beeld geschetst van het afvoerregime van de Buurserbeek. De statistische eigenschappen van de afvoeren in het modelgebied zijn samengevat in tabel 4.2. De herhalingstijd van extreem hoge afvoeren is afgeleid van frequentiecurves van afvoeren (Bijlage 4-B). In deze paragraaf worden, o.a. aan de hand van de

resultaten uit tabel 4.2, verschillende onderwerpen besproken. In figuur 4.2 zijn de afvoeren van de meetstuwen met elkaar vergeleken. Het blijkt dat de afvoergolven bij de Markveldse Molenstuw hoger en vlakker zijn dan bij de Reinkstuw. De afvoergolven die de Reinkstuw passeren komen wat betreft vorm goed overeen met de afvoergolven van Elsbeek, zij het dat de Elsbeek minder hoge afvoerpieken heeft. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het stroomgebied van de Elsbeek en het stroomgebied van de Ahauser Aa vergelijkbare afvoercharacteristieken hebben.

Tabel 4.2 Afvoercharacteristieken stuwen

	Reinkstuw	Markveldse Molenstuw	Elsbeek Nieuwe Sluis
Oppervlakte stroomgebied (ha)	14.626	18.425	2.099
Gemiddelde afvoer 1992-1996 (m ³ /s)	1,63	1,92	0,223*
Gemiddelde afvoer 1992-1996 (mm/d)	0,96	0,87	0,92*
Gemiddelde afvoer gehele meetreeks (m ³ /s)	1,67	1,95	0,221*
Tijdsdeel zonder afvoer (%)	0	16	5
Hoogst gemeten uurgemiddelde afvoer (m ³ /s)	30,2	30,5	4,4*
Maximale uurafvoer (T=1 jaar) (m ³ /s)	20,0	22,3	3,5*
Maximale dagafvoer (T=1 jaar) (m ³ /s)	15,8	18,7	2,4*
Maatgevende uurafvoer (T=1 jaar) (l/s.ha)	1,37	1,21	1,67*
Maatgevende dagafvoer (T=1 jaar) (l/s.ha)	1,08	1,01	1,15*

*mogelijke overschatting door verlopen van verdrinking van de stuw



Figuur 4.2 Debiet van Reinkstuw, Markveldse Molenstuw en Elsbeek Nieuwe Sluis in 1993

4.2.1 Wegzijing uit de Buurserbeek

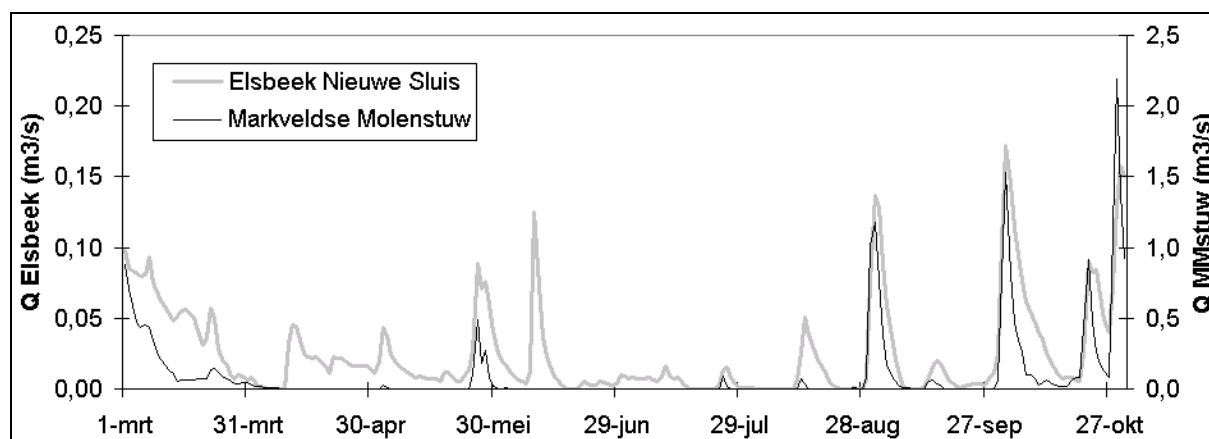
Wat opvalt in tabel 4.2 is dat de gemiddelde afvoer van de stuwen, uitgedrukt in waterschijf per dag, niet met elkaar overeenkomen. De Markveldse molenstuw heeft een 11% lagere gemiddelde afvoer dan de Reinkstuw. Er zijn enkele mogelijke oorzaken voor dit verschil:

1. *Ruimtelijke variatie in neerslag*: deze oorzaak is echter niet aannemelijk, omdat het de neerslagsom van 5 jaar (tabel 4.3) van de twee aan elkaar grenzende, lokale gebieden niet veel kan verschillen.
2. *Fouten in de meetreeks*: Het is mogelijk dat de (uit de literatuur verkregen) QH-relatie van de Markveldse Molenstuw verantwoordelijk is voor enkele procenten onnauwkeurigheid. Zonder ijking van de stuw is het niet mogelijk deze onnauwkeurigheid te schatten. De

gehanteerde kruinhoogte is in 2000 nog ingemeten en kan dus geen grote meetfouten veroorzaken.

Er wordt aangenomen dat het lage gemiddelde debiet (mm/d) van de Markveldse Molenstuw niet het gevolg is van meetfouten of de ruimtelijk variatie in neerslag, maar werkelijk optreedt door aflat van water en/of infiltratie.

3. *Aflat van water bij aflatwerk Platerink:* Op basis van de aflat van water uit de Buurserbeek naar de Elsbeek, bij aflatwerk Platerink, is het te verwachten dat de Buurserbeek water verliest. Deze aflat vindt plaats gedurende gemiddeld 5 maanden in het groeiseizoen. Het debiet van Platerink bedraagt naar schatting 5 tot 100 l/s [bron: WRIJ], met een gemiddelde van ongeveer 25 l/s. Dit is echter maar 0,5% van de jaarafvoer van de Markveldse Molenstuw, waarmee slechts een fractie van het waterverlies uit de Buurserbeek verklaard kan worden.
4. *Infiltratie naar het grondwater:* Uit bovenstaande opsomming blijkt dat het waterverlies uit de Buurserbeek grotendeel toe te schrijven is aan infiltratie uit de beektraject tussen de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw. Deze stroming kan niet direct gemeten worden, maar moet indirect worden afgeleid met een waterbalans (§4.3). Het is wel aannemelijk dat er infiltratie optreedt (naar bijvoorbeeld de Elsbeek) gezien de relatief hoge ligging van de Buurserbeek in het landschap en de goede doorlatendheid van de ondergrond. Figuur 4.3 laat zien dat gedurende de droge zomer van 1996 de Markveldse Molenstuw lange tijd geen afvoer had, terwijl de Elsbeek incidenteel water afvoerde (via Platerink). Dit versterkt het vermoeden er water infiltreert uit de Buurserbeek, maar ook uit de Elsbeek).



Figuur 4.3 Lage afvoeren van Elsbeek Nieuwe Sluis en de Markveldse Molenstuw in 1996

In bijlage 4-C zijn de cumulatieve procentuele afvoeren van de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw per jaar vergeleken. In deze grafieken is te zien dat de Reinkstuw altijd een basisafvoer heeft, terwijl de Markveldse Molenstuw in droge perioden bijna geen water afvoert. Hieruit blijkt dat de Buurserbeek in elk geval in de zomermaanden water verliest.

4.2.3 Piekafvoeren

De waarden voor de extreme afvoeren zijn sterk afhankelijk van de gebruikte S/Cdr-relatie's en in deze studie ook de HBH/HOH-relatie's (§3.1.2). De berekende piekafvoeren van de Elsbeek bevatten een extra onnauwkeurigheid, doordat de HOH (en de HBH/HOH-relatie) hier bepaald wordt door de waterstand in de Schipbeek. De maatgevende afvoer van de Elsbeek is hierdoor waarschijnlijk overschat. De frequentiecurves van afvoeren per stuw, waaruit de maatgevende afvoeren zijn ontleend, zijn weergegeven in bijlage 4-B.

Uit tabel 4.2 valt te concluderen dat de maatgevende (dag)afvoeren van de Reinkstuw lager zijn dan die van de Markveldse Molenstuw, maar dat de specifieke uurafvoer ($T=1$ jaar) van de Reinkstuw juist hoger ligt. Dit is te verklaren uit de demping van de afvoergolven in het beektraject tussen de stuwen. De debieten met een herhalingsstijd van 100 jaar ($T=100$) zijn op basis van een relatief korte tijdreeks slecht te schatten. Vaak wordt aangenomen dat: $Q_{T=100} = 2 * Q_{T=1}$. Hiermee komen de dagdebieten die gemiddeld eens per 100 jaar optreden voor

de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw op 32 en 38 m³/s. De hoogste uurgemiddelde debieten worden respectievelijk 40 en 44 m³/s

4.2.4 Seizoensafhankelijke leidingweerstand

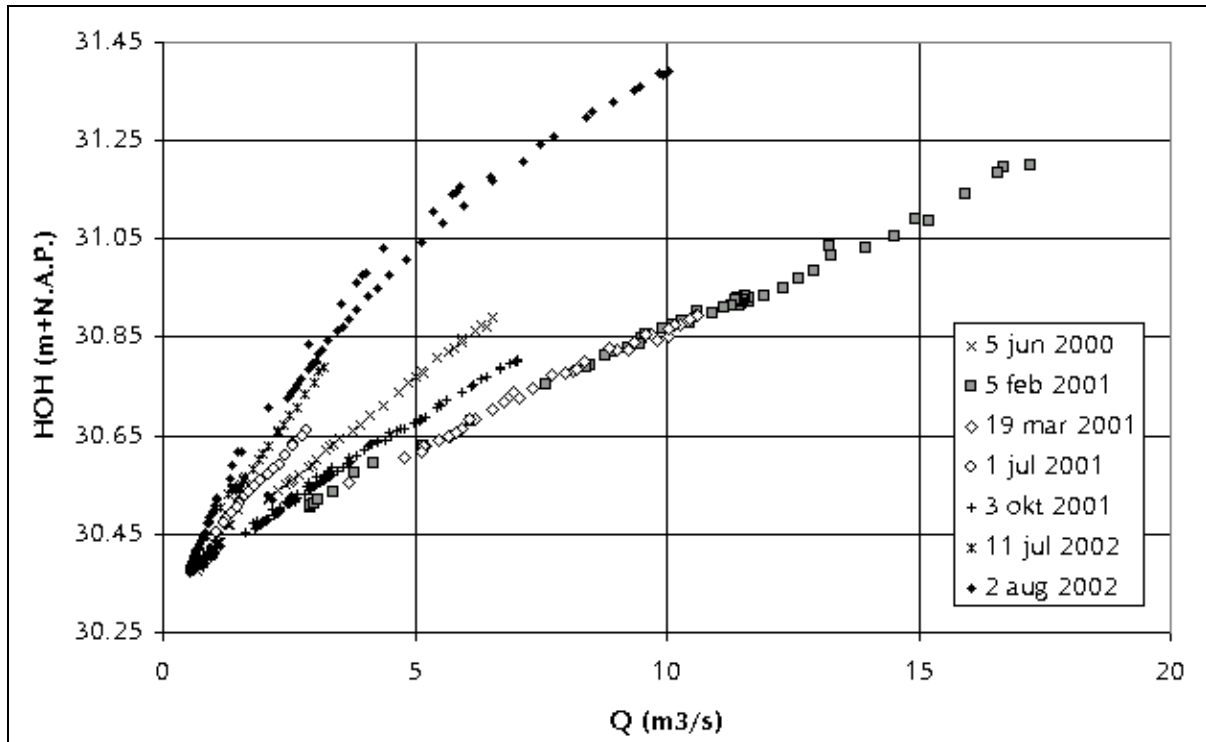
In §3.1.2 werd voor de Reinkstuw een HBH/HOH-relatie opgesteld, waaruit bleek dat deze relatie voor de maanden juli en augustus anders was dan voor de rest van het jaar. Aangezien de relatie tussen de Q en HBH van de Reinkstuw vrijwel constant is, houdt dit in dat de HOH van de Reinkstuw bij *hetzelfde debiet* in juli en augustus hoger is dan in andere maanden. Omdat de afmetingen van de waterloop en van de kunstwerken benedenstrooms van de Reinkstuw niet veranderen in de tijd, is dit fenomeen toe te schrijven aan de hydraulische weerstand van het doorstroomde profiel. Dit is nauwkeuriger onderzocht door de HOH, behorende bij afvoeren van 2-3 m³/s, uit te zetten in de tijd (Bijlage 4-D). Hieruit blijkt dat de leidingweerstand geleidelijk toeneemt in de zomer tot een maximum in juli en augustus, waarna deze weer afneemt. In de maanden november t/m april is de leidingweerstand constant en minimaal. Dit patroon kan verklaard worden door de groei van water- en oeverplanten onder invloed van de toename van licht en de temperatuur in de zomer. Bij de Buurserbeek komt Liesgras met name voor als oeverbegroeiing. In oktober neemt de leidingweerstand snel af, doordat in die maand de oevers en een deel van de waterbodembodem worden geschoond. In het najaar sterven daarnaast de meeste de water- en oeverplanten af.

De water- en oeverbegroeiing heeft tot gevolg dat de stroomsnelheid in een deel van de waterloop reduceert, waardoor het doorstroomde profiel wordt verkleind. Uit een veldexperiment [Querner, 1995] blijkt dat de bij aanpassing van A en R (vgl 4.1) voor obstructie in de waterloop door begroeiing, de hydraulische weerstand ongeveer constant blijft.

$$Q = C \cdot A \cdot R^{1/2} \cdot S_0^{1/2} \quad (4.1)$$

- A nat oppervlakte van de waterloop
- C hydraulische Chézy-weerstand
- R hydraulische straal
- S₀ bodemverhang (=waterlijnverhang, bij eenparige stroming)

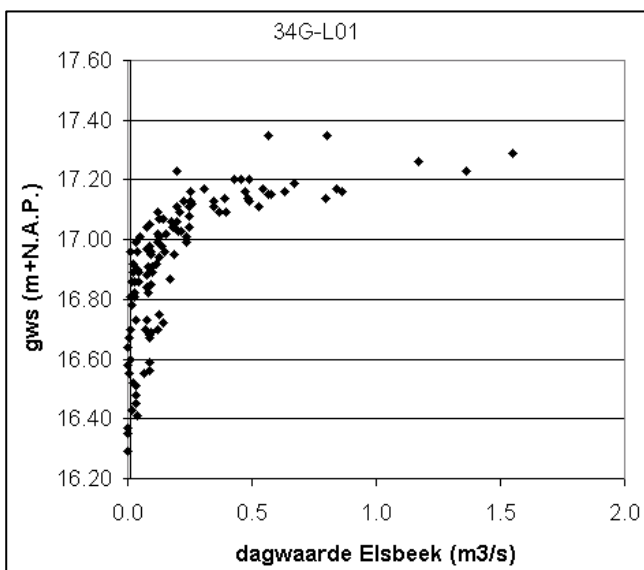
In een afvoermodellering is het echter handiger om de seizoensverschillen in de begroeiing te definiëren met de hydraulische weerstand C. Het verschil tussen de zomerse en winterse C wordt hierna aan de hand van metingen afgeleid. In figuur 4.4 is voor enkele afvoergolven de relatie tussen de HOH bij de Reinkstuw en het debiet uitgezet. Bij een constante waterhoogte is er een theoretische lineaire relatie tussen het debiet en de hydraulische weerstand (Q ~ C), aangezien A, R, en S₀ dan constant zijn. Het verschil tussen de maximale en minimale begroeiing in de Buurserbeek bij dezelfde waterstand, uitgedrukt in C, blijkt ongeveer een factor 2,0-3,0 te zijn (figuur 4.4). Aan het einde van de zomer is de waterstand bij afvoeren groter dan 5 m³/s meer dan 0,4 m hoger ten opzichte van een zelfde situatie in de winter. Bij zeer grote afvoeren (>15 m³/s) in de zomer zullen de water- en oeverplanten waarschijnlijk weggespoeld of platgeslagen worden, waardoor hun weerstand bij een toenemend debiet afneemt. Het is te verwachten dat de genoemde peilverhoging van 0,4 m kilometers benedenstrooms van de Reinkstuw minder groot zal zijn, omdat de breedte van de waterloop daar toeneemt. Hierdoor wordt de invloed van oeverbegroeiing op de totale hydraulische weerstand minder groot.



Figuur 4.4 De benedenstroomse waterstand (HOH) bij de Reinkstuw tijdens enkele afvoergolven als functie van het debiet. De minimale waterstand wordt bepaald door de benedenstroomse dam die een kruinhoogte heeft van 30,26 m+N.A.P.

4.2.5 Relatie grondwaterstand en afvoer

In het modelgebied zijn een aantal peilbuizen aanwezig. Theoretisch moet er een relatie zijn tussen de grondwaterstand in het afwaterende gebied en de afvoer van dit gebied naar het oppervlaktewater. De Markveldse Molenstuw meet behalve de afvoer uit het Nederlandse deel van het stroomgebied, waar de peilbuizen staan, ook afvoer uit Duitsland. Het heeft daarom geen zin de afvoer van deze stuw te vergelijken met de grondwaterstanden in het modelgebied. De Elsbeek heeft daarentegen een klein stroomgebied, waarin ook een twee peilbuizen staan. Een daarvan heeft een lange serie waarnemingen die gecombineerd kan worden met de afvoer van de Elsbeek Nieuwe Sluis (figuur 4.5)



Figuur 4.5 Afvoer van de Elsbeek in relatie met de grondwaterstand van 34G-L01 (maaiveld: 18,0 m+N.A.P.)

In figuur 4.5 is te zien dat alle lage afvoeren (<200 l/s) plaats vinden bij grondwaterstanden van dieper dan 1,0 m-mv. Bij ondiepere grondwaterstanden neemt de afvoer snel toe, waarschijnlijk ten gevolge van een drainagesysteem met een ontwateringsdiepte van ongeveer 1,0 m-mv. Aangezien het modelgebied grotendeels uit agrarisch gebied bestaat, zal de afvoer snel toenemen als de gemiddelde grondwaterstand na een grote neerslag de ontwateringsdiepte heeft bereikt.

In de neerslagafvoermodule van Sobek (§5.2.1) wordt de bodem geschematiseerd met bodemlagen met elk een reactiefactor (Hellinga - de Zeeuw). Deze reactiefactoren zullen met behulp van de neerslagafvoermodule van Sobek worden geijkt. De beginwaarden van de reactiefactoren van deze ijking worden geschat met de theoretische vergelijking van de reactiefactor (vgl 4.2):

$$\alpha = \frac{10kD}{SL^2} \quad (4.2)$$

De gemiddelde Bergingscoëfficiënt (S) blijkt uit §4.3 ongeveer 0,13 te zijn. Er wordt tevens uitgegaan van een gemiddeld 5 m dikke watervoerende zone met een gemiddelde doorlaatfactor (k) van 10 m/d.

Zone 1: maaiveld tot ontwateringsdiepte drains (0,0-1,0 m-mv.)

$kD=45 \text{ m}^2/\text{d}$, $L=\text{afstand tussen drains}=50 \text{ m}$,

$\alpha = 1,4 \text{ d}^{-1}$

Zone 2: ontwateringsdiepte drains tot ontwateringsdiepte waterlopen (1,0-1,5 m-mv.) $kD=35 \text{ m}^2/\text{d}$, $L=\text{afstand tussen sloten}=300 \text{ m}$,

$\alpha = 0,03 \text{ d}^{-1}$

Zone 3: ontwateringsdiepte waterlopen tot hydrologische basis (>1,5 m-mv.)

$kD=25 \text{ m}^2/\text{d}$, $L=\text{afstand tussen de hoofdwaterlopen (beken)}=2000 \text{ m}$

$\alpha = 0,0005 \text{ d}^{-1}$

Deze indicatie-waarden (reactiefactoren) zijn als gebruikt in de neerslagafvoermodellering in Sobek (§6.3)

4.3 Waterbalans maandtotalen

In deze paragraaf worden twee verschillende waterbalansen besproken waarnaar in de tekst wordt verwezen als:

- Waterbalans 'beektraject' van het afwaterend gebied van het beektraject tussen de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw voor de periode 1992-1998 (§4.3.1)
- Waterbalans 'Elsbeek' van het stroomgebied van de Elsbeek voor de periode (1992-1996) (§4.3.2)

Van beide gebieden worden twee waterbalansen opgesteld: een langjarige waterbalans en een maandelijkse waterbalans. Beide waterbalansen beslaan dezelfde periode (tabel 4.3)

Tabel 4.3 Overzicht van verschillende opgestelde waterbalansen

waterbalans	gebied	periode	interval	Opmerking
beektraject A	beektraject	1992-1998	7 jaar	ΔV verwaarloosd (vgl 4.3)
beektraject B	beektraject	1992-1998	1 maand	
Elsbeek A	Elsbeek	1992-1996	5 jaar	ΔV verwaarloosd (vgl 4.3)
Elsbeek B	Elsbeek	1992-1996	1 maand	

Per waterbalans wordt een aparte waterbalansvergelijking gegeven. In de langjarige waterbalansen wordt de bergingsverandering verwaarloosd. Een volledige waterbalansvergelijking bestaat uit de volgende componenten:

$$Q_{in} + P + G_{in} - (Q_{uit} + ET + G_{uit}) = \Delta V + F \quad (4.3)$$

G_{in}	grondwateraanvoer: kwel (LT^{-1})
G_{uit}	grondwaterafvoer: wegzijging (LT^{-1})
P	neerslag (LT^{-1})
ET	evopotranspiratie (LT^{-1})
Q_{in}	oppervlaktewateraanvoer (LT^{-1})
Q_{uit}	oppervlaktewaterafvoer (LT^{-1})
ΔV	bergingsverandering (LT^{-1})
F	restfout (LT^{-1})

Aangezien de grondwaterstromen en de bergingsverandering niet direct kunnen worden gemeten of worden afgeleid, behoren deze tot de restterm van de waterbalans. Ook de restfout is onderdeel van de restterm. Voor een stroomgebied waarin G_{in} en G_{uit} kleine waterbalans termen zijn wordt de langjarige waterbalansvergelijking eenvoudig (vgl. 4.4)

$$Q_{uit} \approx P - ET \quad (4.4)$$

4.3.1 Waterbalans 'beektraject'

Gezien de ondiepe hydrologische basis in het modelgebied lijken de waterbalans termen G_{in} en G_{uit} uit vgl. 4.3 te kunnen worden verwaarloosd. Uit §4.2.1 blijkt echter dat er waarschijnlijk wegzijging optreedt uit de Buurserbeek. Daarom wordt alleen G_{in} verwaarloosd. De restterm in vgl. 4.3 is de bergingsverandering (ΔV), plus de wegzijging (G_{uit}) en de som van de fout die wordt gemaakt bij de overige waterbalans termen. De afvoeren worden verondersteld de meest nauwkeurige waterbalans termen te zijn, maar de verdamping bevat per individuele maand waarschijnlijk fouten. De som van alle fouten in de balans termen wordt de restfout (F) genoemd. De bergingsverandering (ΔV) wordt over de gehele waterbalans periode gezien nagenoeg gelijk gesteld aan nul. De resulterende waterbalans ziet er als volgt uit:

$$Q_R - Q_{MM} - Q_{Pl} + P - ET = G_{uit} + F \quad (\text{periode 1992-1998}) \quad (4.5)$$

$$Q_R - Q_{MM} - Q_{Pl} + P - ET = R_1 = \Delta V + G_{uit} + F \quad (\text{maandtotalen}) \quad (4.6)$$

Q_{MM}	oppervlaktewaterafvoer Markveldse Molenstuw (mm)
Q_{Pl}	oppervlaktewaterafvoer Platerink: schatting (mm)
Q_R	oppervlaktewateraanvoer Reinkstuw (mm)
R_1	restterm waterbalans beektraject (mm)

De waterbalans termen (4.6) zijn berekend voor de 28^e t/m 27^e van elke maand, zodat een vergelijking met de grondwaterstanden, die meestal op de 28^e worden gemeten kan worden gemaakt.

Resultaten: totaalsommen van waterbalans 'beektraject'

De resultaten van de gehele waterbalans (4.5) zijn samengevat in tabel 4.4. Wanneer vgl. 4.4 wordt toegepast blijkt dat de gemiddelde afvoerbare neerslag uitkomt op 386 mm/j. De gemeten afvoeren bij de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw zijn gemiddeld 372 en 334 mm/j en wijken dus respectievelijk -14 en -51 mm/j af van de afvoerbare neerslag. De gemeten afvoer van de Reinkstuw komt zeer goed overeen met het neerslagoverschot, waaruit blijkt dat restfout en de grondwaterstromingen bovenstrooms van de Reinkstuw van beperkte invloed zijn op de waterbalans. De afvoer van de Markveldse Molenstuw is duidelijk te laag. Dit komt overeen met de eerdere constatering dat de Buurserbeek tussen de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw water verliest, onder andere door aflat van water.

Tabel 4.4 Resultaten waterbalans 4.4 'beektraject' voor de periode 1992-1998.

In (mm/j)	P	880	P-ET	386	P-ET	386
Uit (mm/j)	ET	494	Q_R	372	Q_{MM}	338
Rest (mm/j)	P-ET	386	$G_{uit}+F$	14	$G_{uit}+F$	48

Wanneer de afvoeren van de Reinkstuw, Markveldse Molenstuw en Platerink absoluut vergeleken worden, blijkt dat het tussenliggende gebied $8,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{j}$ afwatert. Er wordt aangenomen dat de aflat bij Platerink gemiddeld $0,34 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{j}$ bedraagt. Uit tabel 4.5 blijkt dat er gemiddeld per jaar een waterverlies optreedt van 171 mm (44% van het neerslagoverschot) in het deeltraject van de Buuserbeek. Aangenomen dat de restfout ongeveer nul is, komt het waterverlies overeen met $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit is 11% van het gemiddelde debiet van de Markveldse Molenstuw.

Tabel 4.5 Resultaten waterbalans 4.5 'beektraject' voor de periode 1992-1998.

Waterbalansterm (4.5)		Som 1992-1998 ($10^6 \text{ m}^3/\text{j}$)	Waterschijf (mm/j)
In	P-ET		+386
Uit	$Q_{MM} + Q_P - Q_R$	$62,33 + 0,34 - 54,44 = 8,2$	-215
Rest	$G_{uit}+F$		+171

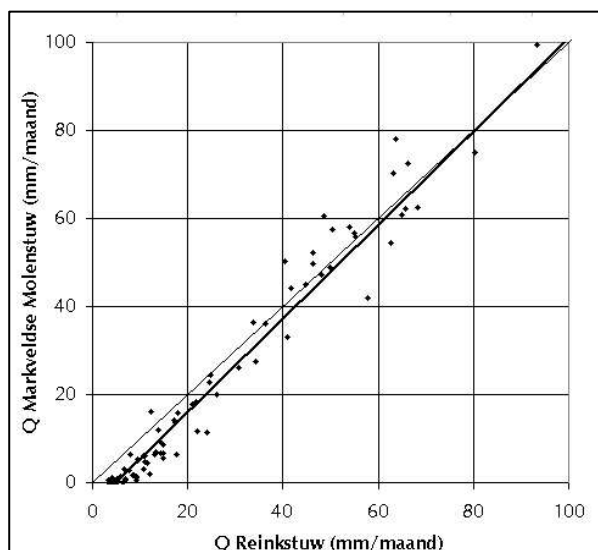
Resultaten: maandsommen van waterbalans 'beektraject'

De resultaten van de maandwaterbalans zijn in tabelvorm weergegeven in bijlage 4-E.

stuwaafvoeren

In deze paragraaf wordt het verschil in afvoer van de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw (bijlage 4-F) bestudeerd. In deze vergelijking moet rekening worden gehouden met de onbekende toestroom uit het afwaterende gebied van het beektraject tussen de stuwen (zijdellingse toestroom). Uit bijlage 4-F blijkt dat de zijdelingse toestroom in een wintermaand meer dan 150 mm kan bedragen, terwijl in de zomermaanden de zijdelingse toestroom zeer beperkt is. Aangenomen dat de zijdelingse toestroom gedurende droge zomers reduceert tot nul, blijkt dat de Buuserbeek bovenstrooms van de Markveldse Molenstuw maximaal $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$ (gemiddeld per maand) verliest. Het gemiddelde waterverlies over de hele waterbalansperiode bedraagt $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$. Uit bijlage 4-F is te concluderen dat met name in droge (zomer) perioden een groot gedeelte van de wateraanvoer uit Duitsland uit de beek verdwijnt.

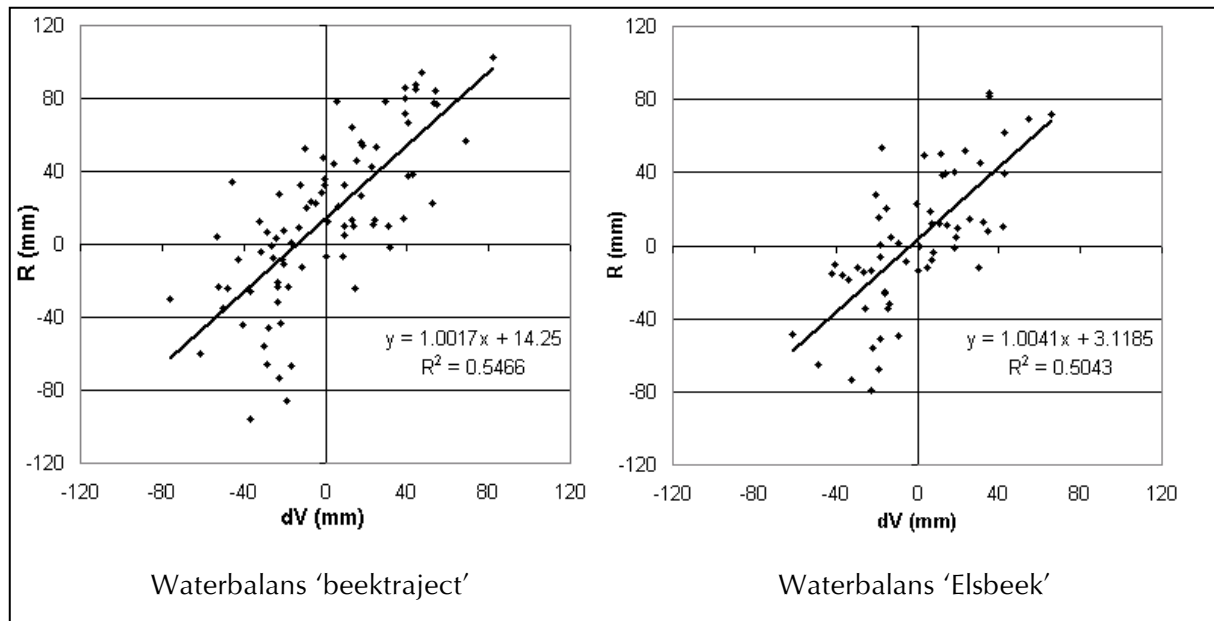
De relatie tussen de maandsommen van de afvoeren van de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw laat zien dat er in het tussenliggende traject water verloren gaat (figuur 4.6). Bij maandaafvoeren van minder dan 40 mm van de Reinkstuw is de afvoer van de Markveldse molenstuw lager.



Figuur 4.6 Relatie tussen de maandsom van de afvoer van de Markveldse Molenstuw en de Reinkstuw

Restterm

De restterm van de gehele waterbalans (vgl. 4.5) kan, zoals uit het voorgaande conclusies blijkt, voornamelijk worden toegeschreven aan de wegzijging van water uit de Buurserbeek. De restterm van de maandelijkse waterbalans (4.6) wordt naast de wegzijging en de restfout ook bepaald door de bergingsverandering. Om deze relatie aan te tonen is in figuur 4.7 de restterm (vgl. 4.6) vergeleken met de uit de grondwaterstand afgeleide bergingsverandering. De bergingsverandering is afgeleid van de gemiddelde grondwaterstand van de 5 peilbuizen in het modelgebied. De hoogste correlatie tussen deze twee gegevensreeksen werd gehaald bij een gemiddelde Bergingscoëfficiënt van 0,13.



Figuur 4.7 Relatie tussen de restterm van de maandlijks waterbalansen (4.5 en 4.7) en de uit de grondwaterstanden afgeleide bergingsverandering per maand

4.3.2 Waterbalans 'Elsbeek'

Het stroomgebied van de Elsbeek is een van de afwaterende gebieden binnen het modelgebied dat op de Buurserbeek / Schipbeek loost. Het stroomgebied van de Elsbeek is tevens het enige stroomgebied waarvan het debiet automatisch gemeten wordt. Hierdoor kunnen de afwaterende eigenschappen van het modelgebied in principe direct uit de waterbalans van de Elsbeek worden afgeleid. De waterbalans van de Elsbeek bevat helaas een aantal onbemeten termen, zoals de invoer van Platerink en de afvoer van de Elsbeek op de Ravenhortserveld leiding. Daarnaast vindt er wellicht nog drainage vanuit de Buurserbeek naar de Elsbeek plaats, gezien de lage ligging van de Elsbeek. De waterbalans bevat daarom veel moeilijk te kwantificeren termen:

$$P + Q_{Pl} - (ET + Q_E + Q_B) = R_3 = G_{in} + G_{uit} \quad (\text{periode 1992-1996}) \quad (4.7)$$

$$P + Q_{Pl} - (ET + Q_E + Q_B) = R_2 = \Delta V + F - G_{in} + G_{uit} \quad (\text{mei t/m september}) \quad (4.8)$$

- Q_E oppervlaktewaterafvoer Elsbeek Nieuwe Sluis (mm).
- Q_B oppervlaktewaterafvoer aflaat op Ravenhortserveldleiding (mm).
- Q_{Pl} oppervlaktewateraanvoer Platerink (mm), alleen periode mei-september
- R_2 restterm maandwaterbalans Elsbeek (mm)
- R_3 restterm gehele waterbalansperiode Elsbeek (mm)

Er wordt aangenomen dat er gedurende de maanden mei t/m september per maand gemiddeld 25 l/s wordt aangevoerd bij Platerink, waarvan 25% in de Bornegoorsgoot terecht komt. Alle waterbalanstermen worden uitgedrukt in mm waterschijf op het stroomgebied van de Elsbeek (2.099 ha).

Resultaten: totaalsommen waterbalans 'Elsbeek'

De resultaten van de waterbalans van de Elsbeek zijn samengevat in tabel 4.6

Tabel 4.6 Resultaten waterbalans Elsbeek (1992-1996)

Waterbalansterm (8)		Som 1992-1996 (10 ⁶ m ³ /j)	Waterschijf (mm/j)
In	P	17,93	+854
	Q _P -Q _B	0,25	+12
Uit	ET	10,44	-497
	Q _E	7,03	-335
Rest	G _{in} -G _{uit} +F	0,71	-34

Uit tabel 4.6 blijkt dat de waterbalanstermen Q_P en Q_B klein zijn ten opzichte van de andere termen. De restfout is klein, maar duidt op wegzijging uit het stroomgebied van de Elsbeek, 23 l/s (10% van de gemiddelde afvoer van de Elsbeek).

Resultaten: maandsommen waterbalans 'Elsbeek'

Net als de resultaten van de waterbalans 'beektraject' heeft de restterm van waterbalans 'Elsbeek' een goede correlatie met de bergingsverandering (Figuur 4.7). De correlatie is het hoogste bij een gemiddelde bergingscoëfficiënt van 0,13.

4.3.3 Totaalbeeld waterbalansen

De resttermen van de waterbalansen 4.4 en 4.6 zijn:

Elsbeek : 0,7 * 10⁶ m³/jaar = 34 mm/jaar (wegzijging)
 Buurserbeek : 6,5 * 10⁶ m³/jaar = 171 mm/jaar (wegzijging)

Conclusies in dit hoofdstuk betreffende het waterverlies in het stroomgebied:

- In de waterbalans van de gebieden 'beektraject' en 'Elsbeek' treedt een waterverlies op
- Het waterverlies in het gebied 'beektraject' is beduidend groter dan in het gebied 'Elsbeek'
- De Buurserbeek verliest in droge perioden meer dan de gemiddelde hoeveelheid water per maand
- De afluut bij Platerink bedraagt slechts een fractie van het totale waterverlies uit de Buurserbeek en biedt dus geen verklaring voor het waterverlies uit de beek
- In droge perioden zijgt de gehele wateraanvoer uit Duitsland weg, in het beektraject tussen de Markveldse Molenstuw en de Reinkstuw

Uit de vergelijking van de afvoeren bij de meetstuwen blijkt dat er water wegzijgt uit de Buurserbeek. Uit de waterbalansen blijkt tevens dat er een verliesterm overblijft. Dit kan naast een werkelijk optredende wegzijging ook (deels) het gevolg zijn van een overschatting van de actuele verdamping. Een netto wegzijging in het modelgebied is te verklaren aan de hand regionale infiltratie naar het Twentekanaal en de IJssel (§2.2.5). Gezien de naar het westen toenemende dikte van het watervoerend pakket ondervindt met name het westelijk deel van het modelgebied een infiltrerende werking. Het oostelijk deel van het modelgebied en het Duitse deel van het stroomgebied hebben een dunne freatische aquifer en maken dus geen deel uit van een regionaal infiltratiegebied. Het verschil in infiltratie tussen de gebieden 'Elsbeek' en 'beektraject', kan verklaard worden door een verschil in hoogteligging tussen de beken. Waarschijnlijk stroomt een deel van het infiltrerende water uit de Buurserbeek naar de Elsbeek. Netto vindt er in beide gebieden infiltratie plaats. De Buurserbeek verliest in droge perioden, met lage grondwaterstanden, meer water dan gemiddeld.

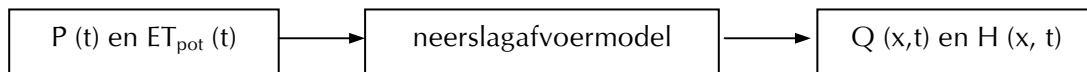
Hoofdstuk 5 Beschrijving van Sobek

In dit hoofdstuk wordt het pakket besproken, waarmee in deze studie de neerslagafvoerprocessen zullen worden gemodelleerd. Er is gekozen voor het pakket Sobek Rural (versie 2.07), meer op grond van praktische overwegingen dan op grond van wetenschappelijke overwegingen. Veel waterschappen werken namelijk met dit pakket voor het modelleren van oppervlaktewater stromingen en neerslagafvoerprocessen, zo ook waterschap Rijn & IJssel.

Sobek bestaat uit verschillende modules, waarmee stroming door (open)leidingen en rioleringen, neerslagafvoerprocessen, waterkwaliteitsberekeningen en sedimenttransport gesimuleerd kan worden. In deze studie worden twee modules gebruikt:

- CHANNEL FLOW
- RAINFALL RUNOFF

De modules zijn aan elkaar gekoppeld, zodat er een neerslagafvoermodel van de Buurserbeek kan worden gemodelleerd. Het programma berekent aan de hand van de ingevoerde neerslag en verdamping de waterstanden en debieten in de Buurserbeek (figuur 5.1).



Figuur 5.1 In- en uitvoer van het neerslagafvoermodel

In §5.1 wordt CHANNEL FLOW-module van Sobek Rural besproken, waarna in §5.2 de RAINFALL RUNOFF-module wordt beschreven.

5.1 Hydraulica

De stroming door de waterlopen wordt berekend door een fysisch model: de CHANNEL FLOW-module. Sobek maakt gebruik van een discretisatie van de continuïteitsvergelijking (vgl. 5.1) en van de bewegingsvergelijking (vgl. 5.2) om de niet-stationaire waterhoogten en de debieten 1-dimensionaal (x-richting) op te lossen.

Continuïteitsvergelijking (behoud van massa):

$$\frac{\partial A_t}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (5.1)$$

A_t	oppervlakte doorstroomde dwarsdoorsnede waterloop (L^2)
q_{lat}	lateraal debiet per lengte-eenheid (L^2T^{-1})
Q	debiet (L^3T^{-1})
t	tijd (T^1)
x	afstand (L^1)

Bewegingsvergelijking (behoud van impuls), zonder windeffecten en dichtheidsverschillen:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_B \frac{Q^2}{A_f} \right) + gA_f \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2RA_f} = 0 \quad (5.2)$$

1
2
3
4

- 1) versnellingsterm
- 2) convectieterm
- 3) waterhoogteverhang
- 4) bodemwrijvingsterm

α_B Boussinesq-constante (verrekenet niet-uniforme snelheidsverdeling in A_t) (-)

g	zwaartekrachtsversnelling (L^1T^{-2})
h	waterhoogte ten opzichte van een referentieniveau (L^1)
C	Chézy-coëfficiënt ($L^{1/2}T^{-1}$)
R	Hydraulische straal (L^1)

Het 1-dimensionale karakter van Sobek heeft tot gevolg dat het model alleen in staat is de stroming door een relatief smalle waterloop te berekenen. Voor bredere waterlopen zoals een verwilderde rivier moet gemodelleerd worden met een 2-dimensionaal stromingsprogramma. De stromingsvergelijkingen die Sobek hanteert gaan uit van een geleidelijke verandering van de geometrie van de waterloop. Veranderingen in de geometrie van de waterloop moeten daarom plaatsvinden over lengten die vele malen groter zijn dan de waterbreedte of -diepte. Ook het verhang van de bodem mag niet te steil zijn. Kunstwerken hebben sterke gradiënten tot gevolg, waardoor Sobek deze apart schematiseert als QH-relatie. De lengte van een leiding waarin zich een kunstwerk bevindt moet vele malen groter zijn dan afmetingen van het kunstwerk.

De berekening van de waterstanden en de debieten in een Sobek-stromingnetwerk worden gedaan met het 'Delft-schema' [WL I Delft Hydraulics, 2001]. Dit schema lost de stromingsvergelijkingen op door gebruik te maken van een 'staggered grid'. In een 'staggered grid' worden de waterstanden gedefinieerd op de knooppunten en de debieten op de tussenliggende segmenten. Objecten (kunstwerken) die door een QH-relatie worden beschreven (bijlage 5-A) worden daarom in segmenten gedefinieerd. De Dirichlet-randvoorwaarde (constante H) wordt dus exact op het grensknooppunt gedefinieerd, maar de Neumann- en de Cauchy-randvoorwaarde (respectievelijk QH-relatie en een constante Q) worden in het aan het grensknooppunt liggende segment gedefinieerd. Het 'Delft-schema' is tevens ontworpen om een gesloten waterbalans te genereren en is daarnaast sterk gericht op het genereren van oplossingen. Hierdoor zal Sobek ondanks eventuele complicaties door het droogvallen van segmenten of de overgang van super- naar subkritische stroming niet snel vastlopen. Indien nodig verkleint de procedure tijdelijk de rekentijdstap om instabiliteit te voorkomen. In deze studie wordt een over het algemeen een tijdstap van 15 min gebruikt en een maximale knooppuntafstand van 100 m.

De gegevensinvoer van de CHANNEL FLOW-module bestaat uit de geometrie van de waterloop, de kunstwerken en de Chézy-weerstand. Alleen de Chézy-weerstand is niet direct te meten en is niet altijd bekend en moet daarom gecalibreerd worden.

5.2. Neerslagafvoer van onverhard oppervlak

De neerslagafvoer-module in Sobek (RAINFALL RUNOFF-module, afkorting 'RR') berekent de grondwaterafvoer naar het oppervlaktewater door middel van lineaire (tot de maximale vulling) reservoirs. Deze reservoirs simuleren de gebiedsgemiddelde afvoerreactie op neerslag goed, maar geven fysisch een beperkte voorstelling van het hydrologisch systeem (conceptueel model). De nauwkeurigheid van gesimuleerde grondwaterstanden dient dan ook in dit perspectief gezien te worden. In de 'RR-module' kan de berekening van de grondwaterafvoer uitgebreid worden met de berekening van de stroming in de onverzadigde zone (CAPSIM). Dit houdt in dat de capillaire opstijging, de percolatie en de verdamping afhankelijk van de hoeveelheid bodemvocht in de wortelzone, worden berekend. In §5.2.1 wordt de schematisering van het neerslagafvoerproces met behulp van CAPSIM beschreven en in §5.2.2 wordt het neerslagafvoerproces zonder CAPSIM beschreven. Afsluitend worden de voor- en nadelen van de toepassing van CAPSIM besproken. De beschrijving van de neerslagafvoer-schematisatie is grotendeels ontleend aan de WL I Delft Hydraulics [2001] en Koomen [2001].

5.2.1 Schematisatie van het neerslagafvoerproces

Reservoirmodel

De afvoer van een gebied (Rainfall Runoff area) wordt door Sobek berekend met maximaal vijf lineaire, parallelle reservoirs, waarvan één de oppervlakte-afvoer simuleert en de andere vier de afvoer uit verschillende bodemlagen simuleren (bijlage 5-B). Door deze schakeling van reservoirs wordt de ruimtelijke variatie van de bodemopbouw, de grondwaterstand, de neerslag en de

verdamping ('lumped model') niet in rekening gebracht. Het is wel mogelijk een afwaterend gebied nauwkeuriger te modelleren door het gebied in meerdere RRA's (rainfall runoff area's) te splitsen.

Sobek gebruikt voor de berekening van de reservoir-afvoer de methode van De Zeeuw - Hellinga, die uitgaat van een lineaire relatie tussen de afvoer en het stijghoogteverschil (Δh). Deze aanname leidt tot vgl. 5.3, waarin R de som is van neerslag, verdamping, kwel en wegzijging. R wordt gedurende de te berekenen tijdstap constant verondersteld. De grootte van de rekenstap is theoretisch van invloed op de rekenresultaten. Hierdoor kan de gecalibreerde waarde van parameters zoals de reactiefactor (α) afhankelijk zijn van de tijdstapgrootte. In deze studie is veelal een tijdstapgrootte van 15 minuten aangehouden en is de eerder genoemde invloed van de tijdstapgrootte op de calibratie verwaarloosd. Sobek berekent de totale afvoer van een afwaterend oppervlak als de som van de afvoeren van de verschillende bodemlagen en de oppervlakte-afvoer.

$$q_t = q_{t-\Delta t} \cdot e^{-\alpha \Delta t} + R(1 - e^{-\alpha \Delta t}) \quad (5.3)$$

- α reactiefactor (T^{-1})
- R neerslagoverschot (LT^{-1})
- t tijd (T)
- q_t afvoer naar het oppervlaktewater (LT^{-1})

Kwel of wegzijging kan constant en niet-constant worden gemodelleerd. De niet-constante kwel of wegzijging wordt berekend door een niet-constante h_r en een constante c te definiëren (vgl. 5.4):

$$K = -W = \left(\frac{h_r - h_g}{c} \right) \quad (5.4)$$

- c weerstand van de slecht doorlatende laag (T^{-1})
- h_g stijghoogte van het freatische grondwater boven de slecht doorlatende laag (L)
- h_r referentiestijghoogte in het grondwater onder de slecht doorlatende laag (L)
- K kwel (LT^{-1})
- W wegzijging (LT^{-1})

Infiltratiecapaciteit

Bij een grote hoeveelheid neerslag in korte tijd vindt er berging op het maaiveld plaats. In extreme situatie kan er zelfs water direct van het maaiveld naar het oppervlaktewater stromen. Dit zorgt voor een zeer snelle afvoerreactie. In Sobek worden deze processen geschematiseerd door een maximale infiltratiesnelheid (I_{max}) van de neerslag in de bodem (vgl. 5.5 en 5.6) en de maximale berging van water op het maaiveld (B) te definiëren (figuur 5.1). Als de berging (B) wordt overschreden vindt er oppervlakte-afvoer plaats (§5.1.1)

$$N = I \quad (\text{als } N \leq I_{max}) \quad (5.5)$$

$$N = I_{max} \quad (\text{als } N \geq I_{max}) \quad (5.6)$$

- I infiltratie (LT^{-1})
- I_{max} maximale infiltratiecapaciteit bodem (LT^{-1})
- N werkelijke neerslag (LT^{-1})

Drainage en infiltratie

Wanneer de grondwaterstand (h_g) van een neerslagafvoergebied onder het aanliggende oppervlaktewaterpeil (h_o) komt, berekent Sobek in plaats van de normale draineerende flux een infiltrerende flux (q_1). Sobek berekent de infiltratie met een enkel reservoirmodel (1 reactiefactor).

$h_o - h_g < 0$: draineerende waterloop $5 \times \alpha$ (vier bodemzones en oppervlakte afvoer)
 $h_o - h_g > 0$: infiltrerende waterloop $1 \times \alpha$

h_g grondwaterstand (L)
 h_o oppervlaktewaterpeil (L)

5.2.2 Toepassing van CAPSIM in de schematisatie van de neerslagafvoer

In Sobek is het mogelijk de processen in de onverzadigde zone nauwkeuriger te berekenen met CAPSIM. CAPSIM berekent aan de hand van veelal getabelleerde bodemeigenschappen de vochtvoorraad in de wortelzone (V) van de neerslagafvoer-module (Bijlage 5-B). Er zijn vier processen die V beïnvloeden (vgl. 5.7). Deze processen worden in deze paragraaf toegelicht:

$$I - ET + C - P = \Delta V \tag{5.7}$$

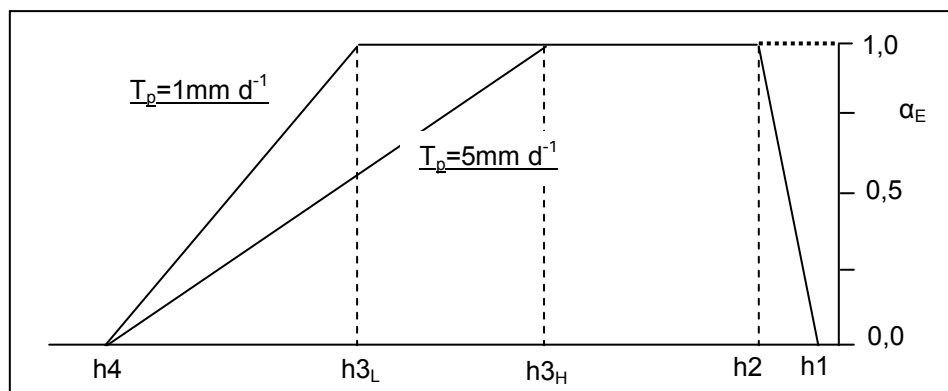
ET actuele verdamping (LT^{-1})
 C Capillaire opstijging (LT^{-1})
 P Percolatie (LT^{-1})
 V berging van bodemvocht in de wortelzone (-)

verdamping

Sobek heeft standaard de dagsommen van de KMNI-referentie-verdamping van De Bilt beschikbaar (1950 t/m 1995 in versie 2.07 van Sobek). Ook kan gebruik worden gemaakt van de langjarig gemiddelde dagsommen. Sobek berekent de potentiële verdamping door gebruik te maken van gewasfactoren (WL I Delft Hydraulics, 1999). Bij een gemengd areaal wordt de gewasfactor van het gewas met het grootste sub-areaal gebruikt. De actuele verdamping wordt berekend door CAPSIM, op basis van de relatieve vochtvoorraad in de wortelzone (V/V_{eq}) (vgl. 5.8 en Bijlage 5-B).

$$ET = \alpha_E ET_{pot} \tag{5.8}$$

$\alpha_E = f(V/V_{eq}) =$ relatieve verdampingsfactor (-)
 ET actuele verdamping (LT^{-1})
 ET_{pot} potentiële verdamping (LT^{-1})
 V_{eq} berging van bodemvocht in de wortelzone bij veldcapaciteit (-)



Figuur 5.2 Reductiecoëfficiënt voor wateropname in de wortelzone, als functie van de matrische drukhoogte van het bodemvocht (afhankelijk van gewas). [Feddes et al, 1978]

De waarden van de relatieve verdampingsfactor (α_E) zijn berekend door het stationaire 1D-model CAPSEV (Wesseling, 1991) en getabelleerd opgeslagen in CAPSIM. In figuur 5.2 komt de

wateropname door een gewas boven h_1 (zuurstoftekort) en onder h_4 (verwelkingspunt) overeen met nul. Sobek past echter de wateropname-reductie tussen h_1 en h_2 niet toe, maar hanteert in dit traject $\alpha_E=1$. De wateropname tussen h_3 en h_4 varieert met de potentiële verdampingssnelheid (T_p)

capillaire opstijging

De capillaire opstijging beschrijft de stroming door de onverzadigde zone van het grondwater naar de wortelzone. De capillaire fluxen (vgl. 5.9 en 5.10) zijn berekend met het model CAPSEV en getabelleerd opgeslagen in Sobek. De capillaire opstijging begint, wanneer de vochtvoorraad in de wortelzone afneemt tot onder veldcapaciteit. De capillaire opstijging neemt toe naarmate de wortelzone verdroogt. Bij $pF=3$ en lager is de capillaire opstijging maximaal.

$$q_{Cact} = q_{Cpot} = f_1(s, d_g, d_r) \quad (\text{als } V_{act} < V_{pF3}) \quad (5.9)$$

$$q_{Cact} = q_{Cpot} \frac{V_{eq} - V_{act}}{V_{eq} - V_{pF3}} \quad (\text{als } V_{act} > V_{pF3}) \quad (5.10)$$

$$V_{eq} = f_2(s, d_g, d_r) \quad (5.11)$$

d_g	diepte grondwaterstand (L)
d_r	dikte wortelzone (L)
f_1	functie: getabelleerde resultaten CAPSEV
f_2	functie: getabelleerde gegevens
s	eigenschappen van het gekozen bodemtype (-)
q_{Cpot}	potentiële capillaire opstijging (LT^{-1})
V_{act}	actuele berging van bodemvocht in de wortelzone (-)
V_{pF3}	berging van bodemvocht in de wortelzone bij $pF=3$ (-)

De dikte van de wortelzone wordt door Sobek bepaald op basis van het landgebruiktype en het bodemtype. Er is aangenomen dat de wortelzone constant van dikte is en dat een gemengd areaal een gemiddelde worteldiepte heeft.

Percolatie

Percolatie bestaat uit de waterstroming van de wortelzone naar het grondwater. Percolatie vindt plaats als de actuele bodemvochtvoorraad de bodemvochtvoorraad in veldvochtige toestand overschrijdt. Er wordt aangenomen dat de hoeveelheid water $V - V_{eq}$ in 1 tijdstap naar het grondwater stroomt (vgl. 5.12)

$$q_p = \frac{V_{eq} - (V_{t-\Delta t} + \Delta V)}{\Delta t} \quad (5.12)$$

q_p percolatie (LT^{-1})

5.3 Discussie

5.3.1 Voor- en nadelen van het gebruik van CAPSIM

Het gebruik van CAPSIM als onderdeel van de neerslagafvoer-gebieden in Sobek heeft voor- en nadelen. Ten eerste maakt CAPSIM gebruik van veel parameters die vaak uit interne tabellen afkomstig zijn ('black box' model). Dit gaat ten koste van het overzicht over het model. Wanneer CAPSIM echter niet wordt toegepast grijpt de verdamping direct aan op het grondwater, waardoor er bij diepe grondwaterstanden evenveel water verdampt als bij ondiepe grondwaterstanden het geval is. Hierdoor kan de gesimuleerde g.w.s. bij een hoge verdamping diep weg zakken, terwijl in werkelijkheid de actuele verdamping zou afnemen (§3.1.2), waardoor de g.w.s minder snel daalt. Aangezien de actuele verdamping niet bekend is voor het

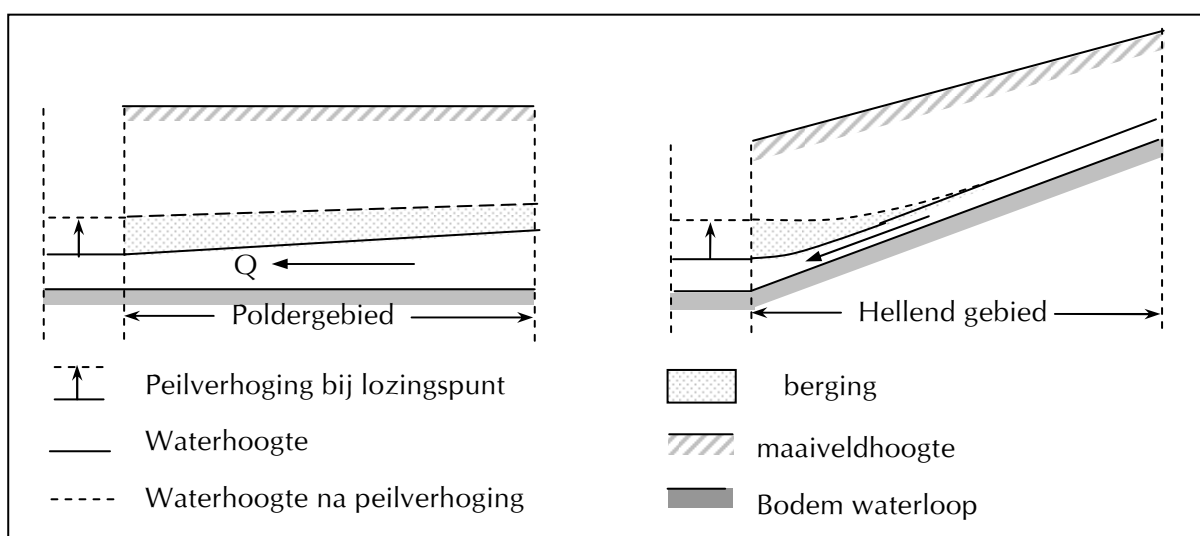
projectgebied wordt aangenomen dat de potentiële verdamping gelijk staat aan de actuele verdamping ($ET \approx ET_{pot}$). Deze aanname geldt alleen als de potentiële verdamping veel kleiner is dan de neerslag ($ET \ll P$), waardoor er voldoende water aanwezig is in de wortelzone van de bodem. Deze situatie doet zich vooral voor in de winter.

Wanneer CAPSIM wel wordt toegepast, worden de actuele verdamping, de capillaire opstijging en de percolatie berekend aan de hand van de hoeveelheid bodemvocht in de wortelzone. Het is onbekend hoe nauwkeurig hiermee de gecompliceerde stromingen in de onverzadigde zone worden gesimuleerd. De schematisatie van de percolatie is bijvoorbeeld zeer vereenvoudigd. Bij de huidige schematisatie treedt er alleen percolatie op als een bepaald watervolume wordt overschreden. In werkelijkheid is de grens waarop percolatie plaats vindt niet zo scherp. Door het voorkomen van preferente stroombanen (door wortelholten, wormgangen etc) vindt er lange tijd langzame nalevering van water plaats naar het grondwatervlak. Wanneer de hoeveelheid bodemvocht beperkt is zal de door Sobek berekende afvoerpiek ten gevolge van nieuwe neerslag worden onderschat

5.3.2 Simultaan en sequentieel simuleren

In Sobek zijn het oppervlaktewater (CHANNEL FLOW) en het grondwater (RAINFALL RUNOFF) geschematiseerd in verschillende modules. Het is mogelijk deze modules apart te laten rekenen (sequentieel). In dat geval wordt eerst de grondwaterafvoer berekend, uitgaande van een constant ontwateringsniveau, waarna deze grondwaterafvoer in de berekening van de stroming in de waterleidingen wordt gebruikt. Het is ook mogelijk beide modules tegelijkertijd te laten rekenen (simultaan). In dat geval wordt het niet-constante waterniveau in de waterloop gelijk aan de ontwateringsdiepte van de grondwaterafvoer, waardoor de het waterniveau in de waterloop de grondwaterafvoer beïnvloed. Dit heeft tot gevolg dat de piekafvoeren (van het grondwater) lager worden, aangezien bij hoge waterstanden in de waterloop het stijghoogteverschil met het grondwater afneemt.

Met name in vlakke poldergebieden is de waterstand op het lozingspunt van invloed op de waterstand in zijwaterlopen en is daardoor ook van invloed op de grondwaterafvoer van het afwaterende gebied van de zijwaterloop. Bij een peilstijging op het lozingspunt zal in de gehele polder berging plaatsvinden, waardoor de (grondwater)afvoerpiek ook wordt afgevlakt. In hellende gebieden ligt een groot deel van de waterlopen hoger dan het lozingspunt, waardoor de waterstand bij het lozingspunt maar beperkt van invloed is op de waterstanden in de zijwatergang en op de grondwaterafvoer. De berging in de zijwaterloop als gevolg van een peilstijging bij het lozingspunt is relatief klein, vergeleken met een polder (figuur 5.3).



Figuur 5.3 Lengteprofiel van een zijwatergang: de toename van berging door peilverhoging bij het lozingspunt, voor een vlak (polder) en een hellend stroomgebied

Samenvattend:

- in hellende gebieden heeft de waterstand in de hoofdwaterloop weinig invloed op de grondwaterafvoer (drains) van het afwaterende gebied, vergeleken met een vlak gebied
- in hellende gebieden vindt weinig berging plaats in de zijwaterlopen als gevolg van een peilstijging in de hoofdwaterloop, vergeleken met een vlak gebied

5.3.3 Calibratie

Het is in Sobek niet mogelijk automatisch te calibreren. Er bestaan wel programma's die een automatische calibratie via Sobek kunnen aansturen, maar deze zijn niet gebruikt. In deze studie zijn enkele calibraties visueel uitgevoerd. Hierbij zijn de resultaten van een simulatie in Sobek in tabelvorm in een dataverwerkingsprogramma ingelezen, waarna deze visueel in een grafiek zijn vergeleken met de meetwaarden. De resultaten van de calibratie zijn vergeleken aan de hand van kengetallen.

Hoofdstuk 6 Modelling van de Buurserbeek

De neerslagafvoermodellering van de Buurser- en Schipbeek heeft tot doel het voorspellen van de gevolgen van mogelijke herstelmaatregelen in de Buurserbeek (Hoofdstuk 1). Uit deze doelstelling blijkt dat zowel de extreem hoge als de extreem lage afvoeren moeten kunnen worden gesimuleerd.

- De extreem lage afvoeren zijn nagenoeg constant en kunnen dus stationair worden gesimuleerd. Uit §4.2 blijkt dat er in droge zomers vrijwel geen afvoer plaatsvindt uit het stroomgebied van de Buurserbeek. De neerslagafvoer-module van Sobek hoeft dus niet gebruikt te worden om extreem lage afvoeren te simuleren. De stroming in de Buurserbeek wordt in extreem droge perioden bepaald door de basisafvoer uit Duitsland en aflat en wegzijging van water uit de Buurserbeek.
- De extreem hoge afvoeren treden op wanneer een afvoergolf passeert. Over het algemeen zijn afvoergolven kortdurend (1-2 dagen), zodat deze niet-stationair moeten worden gesimuleerd. Een simulatieperiode van enkele weken is daarom goed bruikbaar om de gevolgen van herstelmaatregelen in de Buurserbeek te beoordelen. Van de rekenresultaten zijn met name de waterhoogten en stroomsnelheden van belang, in verband met inundatie, erosie en de ecologie.

6.1 Modelopzet

De modelopzet bestaat uit de uitgangspunten die worden gehanteerd en de keuzen voor bepaalde modelopties in deze studie. Daarna volgt een beschrijving van de aanpak van de neerslagafvoermodellering.

6.1.1 Uitgangspunten en modelopties

Overzicht

Het uitgangspunt bij het modelleren is het zo overzichtelijk mogelijk houden van de schematisatie. In het gebruikte neerslagafvoer-pakket is het namelijk mogelijk zeer veel parameters in te voeren. De nauwkeurigheid van de neerslagafvoersimulatie wordt echter op de eerste plaats bepaald door de nauwkeurigheid van de beschikbare (meet)gegevens, waarmee het model gecalibreerd kan worden. Er zal dus niet gedetailleerder worden gesimuleerd dan de (meet)gegevens toelaten. Daarnaast neemt het over- en inzicht in het te simuleren afvoerproces af, naarmate het model gedetailleerder wordt. Vanuit praktische oogpunt is het ook zaak een model relatief eenvoudig te houden ten behoeve van de rekentijd tijdens de handmatige calibratie.

Modeloptie: CAPSIM

In §5.1.3 is de Rainfall-Runoff module besproken waarin het mogelijk is de stroming in de onverzadigde zone (CAPSIM) in de berekening te betrekken. Uit deze beschrijving blijkt dat CAPSIM toegevoegde waarde heeft aan het neerslagafvoermodel als er sprake is van verdampingreductie door een vochttekort (§3.1.2). In deze studie is een niet-stationaire simulatie van een zeer droge periode echter niet van belang. Om deze reden wordt CAPSIM in deze studie niet toegepast.

Modeloptie: Simultaan of sequentieel simuleren

In §5.3 zijn de verschillen tussen de simultane en sequentiële simulatie besproken. Bij een simultane simulatie is de waterstand in de waterloop gelijk aan het ontwateringsniveau van het op dat punt afwaterende neerslagafvoergebied. In een hellend gebied, zoals het modelgebied, heeft de waterstand in de waterloop echter geen of weinig invloed meer op de waterstanden in de afwaterende zijwatergang. Wanneer er simultaan gesimuleerd wordt moet de zijwaterlopen dus ook in de modelschematisatie worden opgenomen, inclusief neerslagafvoergebieden. Deze mate van gedetailleerdheid heeft als nadeel:

- dat de kwaliteit van de schematisatie van de zijwatergangen niet te controleren is doordat hier geen meetgegevens van zijn;
- dat het model door de omvangrijkere schematisatie en door het simultaan rekenen veel trager wordt.

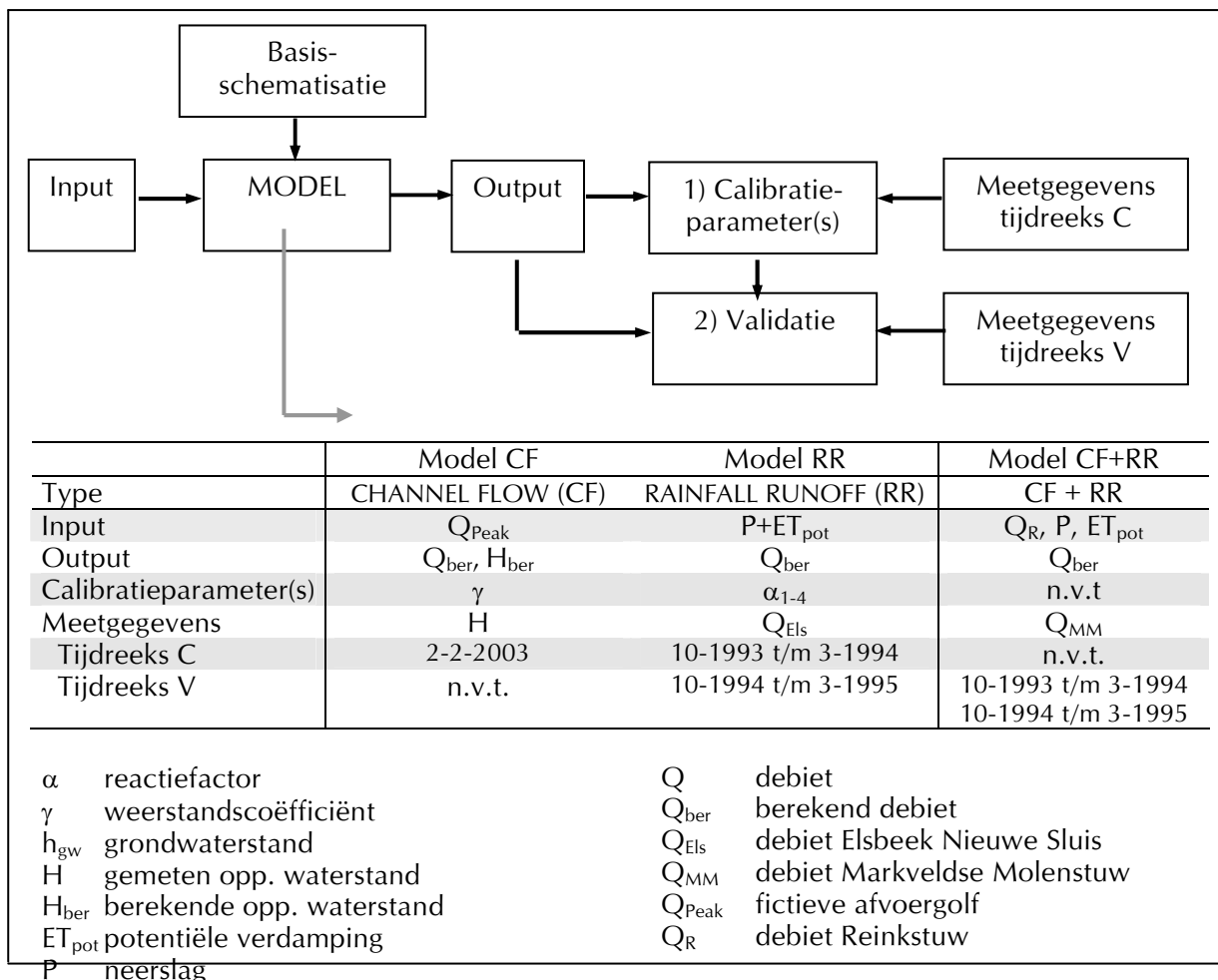
Samenvattend vereist een simultane rekenwijze een gedetailleerde modelschematisatie die niet gewenst is in verband met de overzichtelijkheid en de calibratiesnelheid van het model. In deze studie wordt daarom alleen sequentieel gesimuleerd.

6.1.2 Aanpak modellering

De neerslagafvoermmodellering van de Buuserbeek is opgebouwd uit drie onderdelen (figuur 6.1):

1. hydraulisch model (CHANNEL FLOW: model CF)
2. neerslagafvoermodel (RAINFALL RUNOFF: model RR)
3. hydraulisch model met neerslagafvoer gebieden (combinatie van RR en CF: model CF+RR)

Ten eerste is het hydraulische deel van het uiteindelijke neerslagafvoermodel van de Buuserbeek gemodelleerd (figuur 6.1, model CF). De hydraulische weerstand wordt op een grove manier gecalibreerd aan de hand van waterstandgegevens. Daarna is met een apart, klein model de neerslagafvoerprocessen geschematiseerd en gecalibreerd op basis van afvoergegevens van de Elsbeek en de Reinkstuw (figuur 6.1, model RR). De schematisatie van de neerslagafvoer wordt vervolgens toegepast op het hydraulische model, zodat er een neerslagafvoermodel van de Buuserbeek ontstaat (figuur 6.1, model CF+RR). De drie onderdelen van de neerslagafvoermmodellering zijn in §6.1 t/m §6.3 beschreven.



Figuur 6.1 Opzet van de neerslagafvoer modellering

6.2 Model CF: hydraulica van de Buurserbeek

6.2.1 Schematisatie van de beek

De basis voor het huidige Buurserbeekmodel in Sobek Rural is een geconverteerde versie van het Buurserbeekmodel dat door Tauw is gemaakt, in het oudere pakket Sobek River [Tauw, 2000]. Dit model bevat alle dwarsprofielen en kunstwerken (bijlage 6-A) van de Buurserbeek. De zijbeken en -sloten zijn niet in het model opgenomen, behalve de mondingen van de Zodde- en de Elsbeek.

In het hydraulische model wordt gebruik gemaakt van de (synthetische) afvoergolf die ook in het Tauw-model is gebruikt. Deze afvoergolf wordt gesimuleerd door op verschillende plaatsen in het beektraject laterale fluxen te hanteren. Deze fluxen komen overeen met de afvoeren vanuit Duitsland en met afvoeren uit zijsloten en -beken van de Buurserbeek. Deze afvoergolven zijn door de Heidemij [1995] bepaald aan de hand van reactiefactoren (§5.2.1), die zijn afgeleid uit debietmetingen. De randvoorwaarde in de 'begin node' bestaat dus uit een opgelegd niet-constant debiet.

Aanpassingen aan het River-model

Er zijn op een aantal punten aanpassingen gedaan aan het bestaande model (Tauw, 2000):

Vorm van de vaste overlaten

De vele vaste overlaten zijn in het River-model gesimuleerd als twee samengestelde rechthoekige overlaten (broad crested weir), terwijl de beide zijden van de vaste overlaten in werkelijkheid een talud hebben van 1:1. Dit is in het Rural-model wel zo gesimuleerd, met behulp van de "universal weir".

Samengestelde kunstwerken

Brede stuwen met twee verschillende kruinhoogten kunnen in Sobek Rural geschematiseerd worden door de kruinvorm van een stuw aan te passen. Het is in Sobek Rural echter niet mogelijk twee verschillende typen van kunstwerken, zoals een stuw en een schuif, in één kunstwerk te combineren, zoals in Sobek River nog wel kon. Het is wel mogelijk (met behulp van een 'Boundary point') een samengesteld kunstwerk samen te vatten in een QH-relatie. De meeste samengestelde kunstwerken zijn in werkelijkheid echter ook nog regelbaar, waardoor een schematisatie met een vaste QH-relatie niet meer voldoet. Daarom is voor het Buurserbeek-model gekozen om samengestelde kunstwerken te schematiseren met behulp van een 'omleiding' (bijlage 6-B, figuur I). Deze 'omleiding' bestaat uit twee (parallele) waterlopen die beide dezelfde afmetingen als de hoofdwaterloop krijgen. Het voordeel hiervan is dat de debieten die via de verschillende delen van het kunstwerk stromen eenvoudig in de 'output' op te roepen zijn. Een nadeel van deze methode is dat de waterstanden in het gesplitste traject in beide parallele waterlopen kunnen verschillen. Ook wordt er met (iets) teveel berging gerekend doordat de lengte van de waterloop effectief toeneemt. Kunstwerken die met behulp van een 'omleiding' worden geschematiseerd zijn: Oosterdorper Watermolen (bij Haaksbergen), Nieuwe Sluis (=stuw) en de stuw bij de zandvang. De omleidingen kunnen in combinatie met regelbare kunstwerken zorgen voor numerieke oscillaties. Dit kan worden voorkomen door de maximale verandering, van de kruinhoogte van de regelbare kunstwerken, per tijdstap te verkleinen.

Verwaarlozing opstuwning door bruggen

In het bestaande afvoermodel van de Buurserbeek in Sobek River zijn 16 bruggen gesimuleerd. De bruggen zijn in dit model opgenomen omdat deze de waterstand bovenstrooms kunnen opstuwten, doordat het doorstroomde profiel plaatselijk verkleind wordt. Het brugdek zelf hindert in de meeste gevallen de afvoer niet. Slechts bij vier bruggen is in het River-model ook de (mogelijke) afvoer over de brug gesimuleerd door de brug te combineren met een stuw (samengesteld kunstwerk). De afmetingen van alle bruggen die in het River-model zijn geschematiseerd zijn samengevat in bijlage 6-B. De meeste bruggen hebben een doorstroombaar oppervlak van 30 tot 65 m². De grensbrug heeft met 12 m² het kleinste doorstroombare oppervlak. Om de (ir)relevantie van de schematisatie van de bruggen aan te tonen is de opstuwning die optreedt bij de Grensbrug bij een extreem hoge afvoer (30 m³/s) gesimuleerd (Bijlage 6-B).

Uit bijlage 6-B blijkt dat:

1. Sobek een (incorrecte) opstuwung berekent, wanneer de waterstand nog geen weerstand ondervindt van het brugdek of de landhoofden
2. de opstuwung door bruggen zeer klein is (< 5 cm bij $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$)

In het Buurserbeek-model wordt het effect van de opstuwung van de bruggen verwaarloosd.

De Hydraulische weerstand

De hydraulische weerstand (C) van open waterleidingen is vaak empirisch afgeleid van metingen aan laboratoriumopstellingen onder stationaire omstandigheden. De werkelijke hydraulische weerstand is echter afhankelijk van lokale, veranderlijke omstandigheden in de waterloop en kan dus niet exact benaderd worden. Uit §4.2.4 blijkt dat de leidingweerstand in de Buurserbeek gedurende de periode november tot april vrijwel constant is (bijlage 4-D). Hieruit blijkt dat de leidingweerstand tijdens de calibratie- en validatieperioden (figuur 6.1) vrijwel constant is.

Met behulp van veldexperimenten zijn empirische relaties gevonden tussen de gemiddelde hydraulische weerstand en de afmetingen van het doorstroomde beekprofiel. Met name zijn er veel metingen gedaan naar de Manning-weerstand (k_M). Een nadeel van de k_M -waarde is echter dat deze onafhankelijk is van de waterdiepte. In de jaren '70 werd er door de Bos en Bijkerk een benadering afgeleid die de verminderde stromingsweerstand bij een toename van de waterdiepte wel in rekening bracht:

$$k_M = \gamma \cdot d^\delta \quad (6.1)$$

δ, γ coëfficiënten
 d waterdiepte (m)
 k_M weerstandscoefficiënt van Manning ($\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$)

In neerslagafvoermodel van de Buurserbeek is gekozen voor de methode van de Bos en Bijkerk om de weerstandscoefficiënt te berekenen. Hierbij is $\delta=1/3$ en γ (s^{-1}) is variabel:

$$k_M = \gamma \cdot d^{1/3} \quad (6.2) \quad \text{en aangezien}$$

$$C = k_M \cdot R^{1/6} \quad (6.3) \quad C = \gamma \cdot d^{1/3} \cdot R^{1/6} \quad (6.4)$$

C weerstandscoefficiënt van Chézy ($\text{m}^{1/2}\text{s}^{-1}$)
R Hydraulische straal (m)

De waarde van γ wordt op basis van een (grove) calibratie in Sobek bepaald.

Wegzijinging en aflat

In §4.2.1 is geconstateerd dat de Buurserbeek tussen de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw gemiddeld $0,21 \text{ m}^3/\text{s}$ water verliest naar het Twentekanaal. Er wordt aangenomen dat dit verlies hoofdzakelijk optreedt in de eerste 10 km bovenstrooms van de Markveldse Molenstuw. Hier is het watervoerende pakket dikker dan verder stroomopwaarts, waardoor de grondwaterstroming hier ook het grootst is. In het model is het verlies gedefinieerd als een constante zijdelingse toevoer op een segment 1,0 km bovenstrooms van de Markveldse Molenstuw

De aflat van water uit de Buurserbeek (bij Platerink) en op de Diepenheimse Molenbeek wordt in de neerslagafvoermodellering buiten beschouwing gelaten omdat:

- de aflat geen rol speelt bij extreem hoge afvoeren
- het debiet van de aflat niet wordt gemeten. De aflat op de Diepenheimse Molenbeek wordt pas sinds begin 2003 nauwkeurig gemeten

Een overzicht van de gemodelleerde kunstwerken is te vinden in bijlage 6-A

Eind-randvoorwaarde

De eind-modelrand bevindt zich bij de kruising van de Schipbeek en het Twentekanaal (bijlage 2-A). De waterstand in de Schipbeek heeft op deze plaats een duidelijke relatie met het debiet,

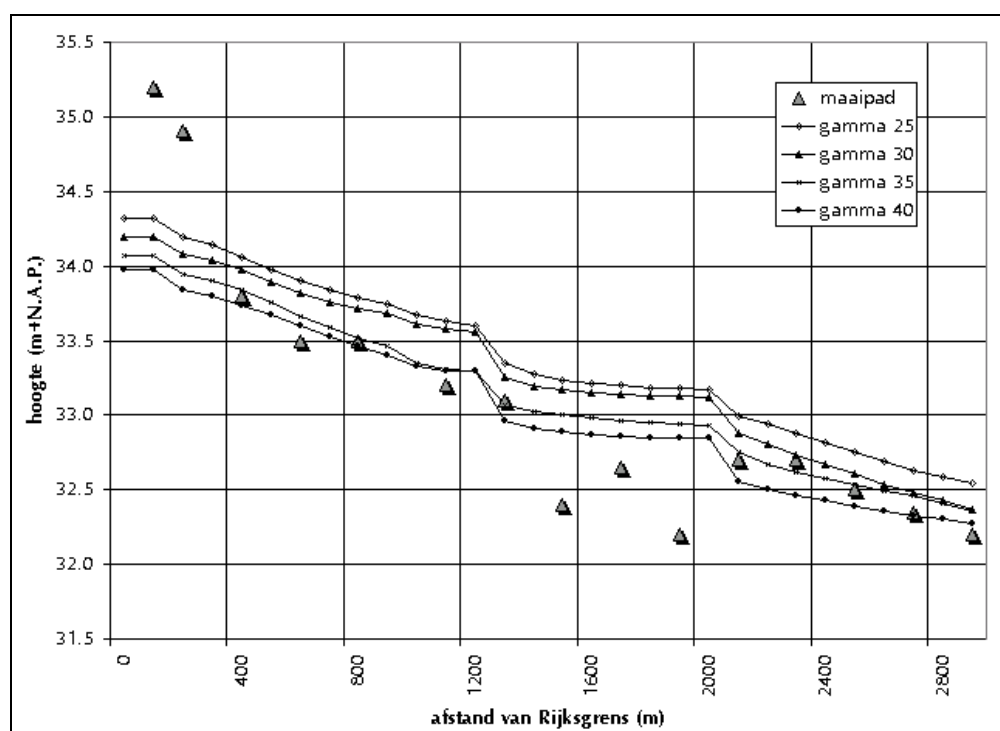
die samen te vatten is in twee lineaire trajecten (11,880-12,400 m+N.A.P. en 12,400-12,865 m+N.A.P.). Deze QH-relatie (tabel 6.1)) is als eindrandvoorwaarde opgenomen in het model.

Tabel 6.1 Eindrandvoorwaarde Model CF: QH-relatie

Q (m ³ /s)	H (m+N.A.P.)
0,00	11,880
11,82	12,400
25,00	12,865

6.2.2 IJking van de hydraulische weerstand

De weerstandcoëfficiënt van Bos en Bijkerk (vgl. 6.4) is geschat op basis van een veldbezoek aan de eerste 3 kilometer van de Buurserbeek, stroomafwaarts van de Rijksgrens. Het veldbezoek vond plaats in februari 2003 tijdens een afvoerpiek. Uit debietgegevens van de nabij gelegen Reinkstuw bleek dat de afvoer ongeveer 12,5 m³/s bedroeg. De waterstand in de beek bevond zich op dat moment rond de hoogte van het maaipad. De hoogte van het maaipad tussen 1,4 en 2,0 km vanaf de Rijksgrens in figuur 6.2, komen niet overeen met wat er tijdens het veldbezoek is waargenomen. Deze punten zijn daarom genegeerd.



Figuur 6.2 Berekende waterstanden in de Buurserbeek, bij verschillende γ (Bos en Bijkerk: vgl 6.3)

In figuur 6.2 zijn de waterstanden stationair berekend met Sobek, met verschillende waarden voor γ . Het blijkt dat $\gamma=35$ het meest overeenkomt met de veldsituatie, maar een grote nauwkeurigheid is uit de figuur niet af te leiden. Dit resultaat komt goed overeen met de γ die het waterschap gebruikt. Voor de grotere waterleidingen in de wintersituatie neemt men $\gamma=33$ of 34 (vgl. 6.4).

6.2.3 Hydraulische eigenschappen van de gemodelleerde Buurserbeek

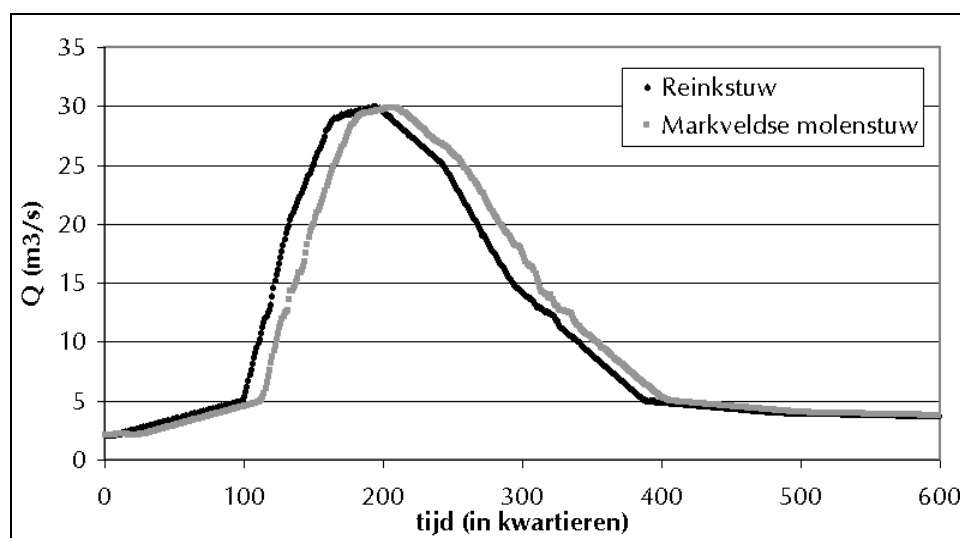
In bijlage 6-B is een lengteprofiel van de gemodelleerde beek opgenomen. Hierin is duidelijk te zien dat het minimumpeil in de beek in stand wordt gehouden door stuwen. De gemiddelde waterdiepte is in deze situatie ongeveer een meter. Bij de maatgevende afvoer staat de waterstand gemiddeld een meter onder de kadehoogte.

Op basis van afvoergegevens van de Reinkstuw en de Markveldse molenstuw lijkt er demping op te treden wanneer een afvoergolf de stuwen passeert (figuur 4.2). Met het hydraulische model van de Buurserbeek is na te gaan of er een afvoergolf uitdempt, door een fictieve afvoergolf te simuleren. Om de afvoergolf niet kunstmatig te vervormen zijn de laterale fluxen verwijderd en zijn de regelbare stuwen vast gezet. In figuur 6.3 is de gesimuleerde synthetische afvoergolf van $30 \text{ m}^3/\text{s}$ te zien. De looptijd van de afvoergolf tussen de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw bedraagt 4.00 uur. Dit komt overeen met een verplaatsingssnelheid van de afvoergolf van $1,33 \text{ m/s}$. Uitgaande van de vuistregel (vgl 6.5) [Warmerdam, 2001] blijkt de gemiddelde stroom snelheid in het beektraject tussen de stuwen tijdens een afvoergolf ongeveer $0,89 \text{ m/s}$.

$$\bar{v} \approx \frac{2}{3} \cdot v_w \quad (6.5)$$

\bar{v} gemiddelde stroomsnelheid in het dwarsprofiel (m/s)

v_w golfsnelheid (m/s)



Figuur 6.3 Gesimuleerde synthetische afvoergolf

Uit de vergelijking van de vorm van de afvoergolf aan het begin en aan het einde van het model blijkt dat de demping van de afvoergolf nihil is. De schijnbare demping van de afvoergolf die in de meetreeksen te zien is, blijkt volledig te worden veroorzaakt door laterale fluxen (zijdelingse afstroming) die aan de afvoergolf 'toegevoegd' worden.

6.3 Model RR: neerslagafvoer

Om van het hydraulische model van de Buurserbeek (§ 6.2) een neerslagafvoermodel te maken moet de afvoerreactie van het stroomgebied kunnen worden gesimuleerd. In Sobek gebeurt dat door Rainfall-Runoff area's (RRA), ofwel neerslagafvoergebieden, toe te voegen aan het hydraulische model. De RRA's berekenen aan de hand van opgegeven parameters de grondwaterafvoer als gevolg van neerslag en verdamping (§5.2).

Schematisatie van de neerslagafvoer

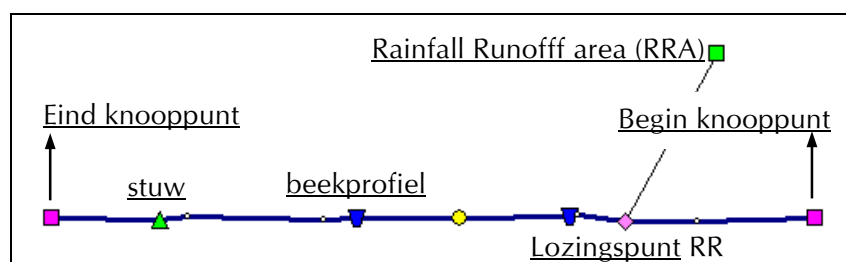
In het hydraulische model zijn de zijwatergangen van de Buurserbeek niet gemodelleerd. De RR die aan het model worden toegevoegd lozen dus direct in de beek. Er is voor gekozen om de afvoer van de zijwatergangen te modelleren met 1 RRA per zijwatergang, omdat de handmatige calibratie bij meer RRA's per zijwatergang / afwaterend gebied te tijdrovend is. In totaal wordt de afvoer van het Nederlandse stroomgebied van de Buurserbeek gesimuleerd met 11 RRA's. De oppervlaktegrootte van deze RRA's variëren van 109 tot 2099 ha (bijlage 6-D). De afvoer uit het Duitse stroomgebied wordt gemodelleerd met 1 RRA van 14.280 ha.

Calibratie neerslagafvoer

Een aantal parameters van de RRA's worden aan de hand van aannamen constant verondersteld (bijlage 6-E). De reactiefactoren van de RRA's zijn daarentegen niet bekend en worden daarom gecalibreerd. De calibratie en de validatie worden gedaan op basis van de afvoer van de Elsbeek en de Reinkstuw, gedurende twee natte winterperioden (figuur 6.1). De neerslag- en verdampinggegevens die hierbij zijn gebruikt zijn gemeten in Hupsel.

6.3.1 Modelbeschrijving (model RR)

Het model RR bestaat uit een korte watergang (600 m) waarop het neerslagafvoergebied afwatert (figuur 6.4). Voor het uitstroompunt bevindt zich een stuw, die overeenkomt met Elsbeek Nieuwe Sluis of de Reinkstuw. De variabele klephoogte van de Elsbeek Nieuwe Sluis is toegepast in het model. De afstand tussen de reken-knooppunten zijn 100 m en de gebruikte rekentijdstep is 15 min. De modelresultaten (uitvoer) bestaan uit uur-gemiddelde gegevens (van 4 rekentijdstappen).



Figuur 6.4 Schematisatie van model RR (figuur 6.1) in Sobek

Op basis van afvoergegevens en gebiedskennis zijn aan een aantal parameters van de RR constante waarden toegekend:

1. *Er wordt geen oppervlakte-afvoer gesimuleerd.* Uit de gemeten afvoeren van de Elsbeek en de Reinkstuw blijkt dat er geen oppervlakte-afvoer optreedt. De infiltratie capaciteit en de berging op het maaiveld zijn daarom dermate groot gekozen dat er geen oppervlakte-afvoer gesimuleerd wordt: berging op het maaiveld: 30 mm en infiltratiecapaciteit: 30 mm/d (bijlage 6-E).
2. *Er wordt geen infiltratie van de Buurserbeek naar het aanliggende gebied gesimuleerd.* In hoofdstuk 4 blijkt dat er in de beek en in het Nederlandse stroomgebied van de Buurserbeek gemiddeld wegzijging plaatsvindt. Dit wordt gemodelleerd met een constante laterale flux in de beek (§6.2.1). De infiltratie vanuit de beek naar de RRA's wordt daarom achterwege gelaten. In de modellering van de neerslagafvoer wordt daarom de reactiefactor van de infiltratie (horizontal inflow) zeer klein gemaakt ($=10^{-10}$).
3. *Er wordt geen basisafvoer gesimuleerd voor de Elsbeek.* Uit de gemeten afvoer van de Elsbeek blijkt dat er in droge perioden geen afvoer meer is. In de modellering van de Elsbeek wordt dit meegenomen door de onderste bodemlaag (>1,5 m-mv.) een zeer lage reactiefactor (10^{-10}) toe te kennen.

De begingrondwaterstand in het model is voor de calibratie- en validatieperiode verschillend (bijlage 6-E). Deze initiële grondwaterstand is zo gekozen, dat de gesimuleerde afvoer van de RRA, overeenkomt met de gemeten afvoer op de eerste tijdstep.

6.3.2 Calibratie en validatie reactiefactoren

De resultaten van de calibratie en validatie van de RRA van de Elsbeek en van de Reinkstuw zijn in deze paragraaf toegelicht met tabellen en figuren. De gemeten en gesimuleerde tijdreeksen van de afvoer zijn in de bijlagen verwerkt.

Elsbeek

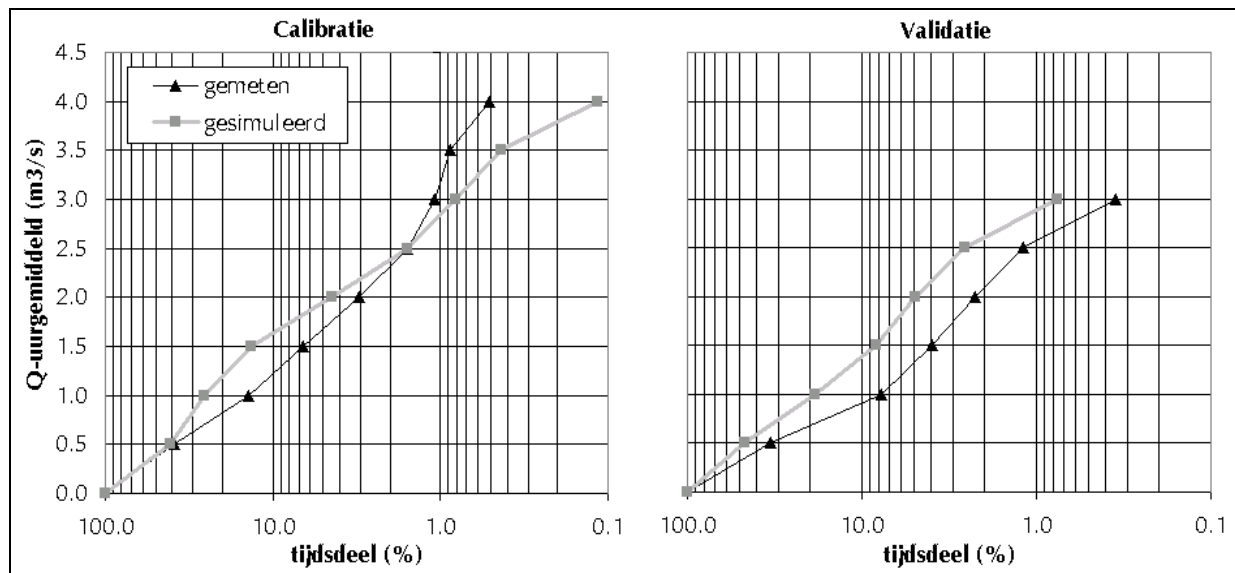
De resultaten van de handmatige calibratie van de Elsbeek zijn weergegeven in tabel 6.2 en de waterbalansgegevens van de calibratie- en de validatieperiode zijn in tabel 6.3 gegeven. De gevoeligheid van de gecalibreerde reactiefactoren neemt van zone 1 tot zone 4 af. De reactiefactor van zone 1 is het meest van invloed op de afvoerpieken en de reactiefactoren en de dikte van zone 2 en 3 bepalen samen het startverloop.

Tabel 6.2 Resultaten calibratie reactiefactoren Elsbeek

Zone 1 : 0,0 – 1,0 m-mv.	$\alpha_1 = 0,45$
Zone 2 : 1,0 – 1,1 m-mv.	$\alpha_2 = 0,15$
Zone 3 : 1,1 – 1,5 m-mv.	$\alpha_3 = 0,025$
Zone 4 : >1,5 m-mv.	$\alpha_4 = 10^{-10}$

Uit bijlage 6-G blijkt dat Sobek het verloop van de afvoer van de Elsbeek redelijk goed simuleerd (tabel 6.3, EF). Met name de lage afvoeren worden goed gesimuleerd en ook de toppen van de afvoerpieken worden redelijk goed gesimuleerd. De vorm een gesimuleerde afvoerpiek is scherper dan de werkelijk afvoerpieken. Dit is het gevolg van de verwaarlozing van de berging in waterlopen in een RRA. Bij samengestelde afvoerpieken (meerdere opeenvolgende afvoerpieken) worden de afvoerpieken die na de eerste afvoerpiek volgen, te hoog gesimuleerd. In figuur 6.5 zijn de verschillen tussen de gemeten en gesimuleerde afvoeren weergegeven met behulp van frequentiecurves. De frequentiecurves geven het tijdsdeel in de simulatieperiode aan, waarin een bepaald debiet wordt overschreden. Uit figuur 6.5 (calibratieperiode) en bijlage 6-G blijkt dat de hoogste afvoeren (>2,5 m³/s) door het model worden onderschat. Dit is (deels) met opzet zo gemodelleerd, omdat de gemeten hoge afvoeren van de Elsbeek mogelijk iets zijn overschat i.v.m. verdrinking van de meetstuw. De gesimuleerde afvoeren tussen 0,5 en 2,5 m³/s komen in de calibratieperiode vaker voor dan in de gemeten afvoerreeksen. Dit lijkt het gevolg van matig gesimuleerde staartverlopen (bijlage 6-G). Het gesimuleerde staartverloop is trager dan is gemeten. De lage afvoeren in de calibratieperiode blijken ook uit figuur 6.5 goed gesimuleerd.

In de validatieperiode worden de eerste twee pieken slecht gesimuleerd. Dit is (waarschijnlijk) het gevolg van de relatief droge beginsituatie van de validatieperiode. Het kengetal RMSE (uitleg: bijlage 6-F) is voor de calibratie- en de validatieperiode vrijwel gelijk, maar de EF en EF_{log} blijken voor de validatieperiode hoger (tabel 6.3). Het verschil lijkt te worden veroorzaakt door een enkele slecht gesimuleerde extreme afvoerpiek (dec '93 / jan '94) in de calibratieperiode. Uit figuur 6.5 blijkt dat frequentiecurves van de gemeten en gesimuleerde afvoeren van de validatieperiode ongeveer dezelfde vorm hebben, maar wel structureel naast elkaar liggen. De afvoer van de Elsbeek wordt in de validatieperiode structureel te hoog gesimuleerd, blijkt ook uit bijlage 6-G.



Figuur 6.5 Frequentiecurve van gemeten en gesimuleerde afvoeren in de calibratie- en validatieperiode van de Elsbeek. (tijdsdeel (%) waarin het debiet hoger is als Q-uurgemiddeld)

Tabel 6.3 Gemeten neerslagoverschot en debieten Elsbeek voor calibratie- en validatieperiode

	Tijdreeks Calibratie 10-1993 t/m 3-1994	Tijdreeks Validatie 10-1994 t/m 3-1995
Waterbalans simulatie Elsbeek		
Aantal dagen (-)	182	182
Neerslag* (mm)	591,6	625,0
Pot. Verdamping* (mm)	89,6	103,1
Neerslagoverschot* (mm)	502	522
Gemeten afvoer Elsbeek (mm)	437	363
Verschil neerslagoverschot en gemeten afvoer (mm)	+65	+159
Gesimuleerde afvoer Elsbeek (mm)	512	489
Verschil neerslagoverschot en gesimuleerde afvoer (mm)	-10	+33
Kengetallen simulatie Elsbeek		
EF (-)**	0,812	0,861
EF _{log} (-)**	0,861	0,894
RMSE (m ³ /s)**	0,297	0,292
Gemiddelde gemeten afvoer Elsbeek (m ³ /s)	0,583	0,485

*te Hupsel ** zie bijlage 6-F

Uit (tabel 6.3) blijkt tevens dat er gedurende beide simulatieperioden veel minder water wordt afgevoerd door de Elsbeek dan er bij komt door het neerslagoverschot. Als gevolg hiervan ligt de gesimuleerde afvoer gemiddeld boven de gemeten afvoer van de Elsbeek (bijlage 6-G). Er zijn enkele mogelijke oorzaken voor het verschil in afvoer tussen de simulatie en de meetgegevens:

1. de netto bergingsverandering wordt niet gesimuleerd. De netto berging is het verschil in de hoeveelheid water in de verzadigde en onverzadigde zone tussen het begin en einde van de simulatieperiode;
2. er treedt een grotere wegzijging op dan er is gemodelleerd (0,1 mm/d);
3. het afwateringsgebied ('grondwater-stroomgebied') is tijdens zeer natte perioden (de calibratie en validatieperiode) kleiner dan gemiddeld;
4. de toegepaste neerslaghoeveelheid wijkt af van de werkelijke gevallen neerslag;
5. de gemeten afvoeren zijn niet correct.

Aangezien er geen aanwijzingen zijn (Hoofdstuk 4) dat de gebruikte meetgegevens niet correct zijn toegepast, worden argument 4 en 5 buiten beschouwing gelaten. Argument 2 en 3 zijn met meetgegevens niet te kwantificeren, maar argument 1 wordt wel aan de hand van meetgegevens toegelicht.

In tabel 6.4 is zijn grondwater- en neerslaggegevens weergegeven om de bergingsverandering tijdens de simulatieperioden te schatten. Uit tabel 6.4 blijkt dat er tijdens de calibratieperiode netto weinig verandering in de berging is opgetreden, aangezien de grondwaterstand en de voorafgaande recente neerslag van 1-okt-'93 en 31-maa-'94 ongeveer overeenkomen. Het verschil tussen de gemeten en gesimuleerde afvoer van 65 mm (tabel 6.3) kan hieruit dus niet verklaard worden.

Tabel 6.4 Toename van grondwaterstand en voorafgaande recente neerslag tussen het begintijdstip en eindtijdstip van de calibratie- en validatieperiode

	Tijdreeks Calibratie 10-1993 t/m 3-1994	Tijdreeks Validatie 10-1994 t/m 3-1995
Meetgegevens Elsbeek		
Toename g.w.s (34G-L01) tussen 28-9 en 28-3 (m)	+0,01	+0,29
Toename g.w.s (34G-L03) tussen 28-9 en 28-9 (m)	-0,03	+0,34
Toename g.w.s (34H-L02) tussen 28-9 en 28-3 (m)	-0,06	+0,33
Neerslag in de 10 dagen voor 1-okt (mm)*	63	6
Neerslag in de 10 dagen voor 31-maa (mm)*	32	44
ΔV_g Geschatte netto bergingsverandering (mm)	+/- 0	+/- 50-100

* gemeten te Hupsel (KNMI)

Tijdens de validatieperiode neemt de grondwaterstand echter toe met ongeveer 30 cm. Waarschijnlijk is er ook een verschil in toename van de netto berging van het bodemvocht in de onverzadigde zone. De geschatte bergingsverandering in de verzadigde en onverzadigde zone is 50-100 mm. Hierbij is uitgegaan van een bergingscoëfficiënt van 0,13 (§4.3) en een verschil in bodemvochtfractie van enkele volumeprocenten.

Op basis van tabel 6.3 en de geschatte netto bergingsverandering gedurende de simulatieperiode (ΔV_g , tabel 6.4) kunnen een aantal voorlopige conclusies worden getrokken:

- de hoeveelheid gesimuleerde afvoer van de Elsbeek komt ongeveer overeen met het neerslagoverschot. De werkelijk gemeten afvoer ligt echter lager
- De ΔV_g (tabel 6.4) kan het verschil tussen de gemeten en gesimuleerde afvoer niet (geheel) verklaren. Kennelijk treden er in werkelijkheid processen op waardoor het stroomgebied water verliest. Meest waarschijnlijk is dat waterverliezen optreden door grondwaterstroming/wegzijing (tijdens de zeer natte simulatieperioden).
- De geschatte netto bergingsverandering, die gedurende de validatieperiode optreedt (50-100 mm) wordt slechts gedeeltelijk gesimuleerd door het model RR (33 mm). Hieruit blijkt dat model RR minder bergingsverandering simuleert.

Reinkstuw

De resultaten van de calibratie van het neerslagafvoermodel van het stroomgebied van de Reinkstuw staan in tabel 6.5 en de gegevens over de modelkwaliteit zijn in tabel 6.6 weergegeven. De gevoeligheid van de gecalibreerde reactiefactoren komt overeen met die van de calibratie van de Elsbeek.

Tabel 6.5 Resultaten calibratie reactiefactoren Reinkstuw

Zone 1 : 0,0 - 1,0 m-mv.	$\alpha_1 = 0,5$
Zone 2 : 1,0 - 1,07 m-mv.	$\alpha_2 = 0,2$
Zone 3 : 1,07 - 1,2 m-mv.	$\alpha_3 = 0,05$
Zone 4 : >1,2 m-mv.	$\alpha_4 = 0,001$

De resultaten van de simulatie van de Reinkstuw komen sterk overeen met die van de Elsbeek. Uit (Bijlage 6-H) blijken de afvoerpieken iets vaker te worden overschat. In de validatieperiode worden de afvoeren over de gehele linie overschat (bijlage 6-I). Dit uit zich in het verschil in RMSE (tabel 6.6). De model-efficiëntcy (EF en EF_{\log}) zijn ongeveer gelijk voor de calibratie- en validatieperiode. Uit deze kengetallen blijkt dat de afvoer van de Reinkstuw iets beter is gesimuleerd dan van de Elsbeek.

Tabel 6.6 Gemeten neerslagoverschot en debieten Reinkstuw voor calibratie- en validatieperiode

	Tijdreeks Calibratie 10-1993 t/m 3-1994	Tijdreeks Validatie 10-1994 t/m 3-1995
Waterbalans simulatie Reinkstuw		
Aantal dagen (-)	182	182
Neerslagoverschot* (mm)	502	522
Gemeten afvoer Reinkstuw (mm)	468	396
Vershil neerslagoverschot en gemeten afvoer (mm)	+34	+126
Gesimuleerde afvoer Reinkstuw (mm)	527	520
Vershil neerslagoverschot en gesimuleerde afvoer (mm)	-25	+2
Kengetallen simulatie Reinkstuw		
EF (-)**	0,841	0,858
$EF_{\log} (-)**$	0,926	0,904
RMSE (m^3/s)**	2,09	2,46
Gemiddelde gemeten afvoer Reinkstuw	4,35	3,68

*te Hupsel **zie bijlage 6-F

Evenals in de neerslagafvoer-simulatie van de Elsbeek komt de hoeveelheid gesimuleerde afvoer van de Reinkstuw (tabel 6.6) niet overeen met de gemeten afvoer. Een vergelijking tussen

tabel 6.3 en 6.6 laat zien dat het verschil tussen het neerslagoverschot en de gemeten afvoer van de Reinkstuw is kleiner is dan voor de Elsbeek. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat er in het stroomgebied van de Reinkstuw wellicht minder grondwaterverliezen optreden. Bij gebrek aan grondwaterstandsgegevens van het stroomgebied van de Reinkstuw is het niet mogelijk de bergingsverandering in de simulatieperioden (van de Reinkstuw) te schatten.

6.3.3 Conclusies model RR

- De vorm van de gesimuleerde afvoerpieken wijkt af van de gemeten afvoeren. De gesimuleerde afvoerpiek is relatief scherp en het staartverloop van de piek is te langzaam. De scherpte van de gesimuleerde afvoerpiek wordt veroorzaakt door de verwaarlozing van de berging in de waterlopen in een RRA. Samengestelde (opeen volgende) grote afvoerpieken worden door het model RR overschat.
- Het neerslagafvoer-model van de Reinkstuw heeft een hogere modefficiëntie (tabel 6.3 en 6.6) dan het neerslagafvoer-model van de Elsbeek. Dit is mogelijk het gevolg van het verschil in schaal en het complexe watersysteem van de twee stroomgebieden.
- De gesimuleerde afvoersom is voor de simulatieperioden hoger dan de gemeten afvoersom. De gesimuleerde afvoersom komt ongeveer overeen met de som van het neerslagoverschot in de simulatieperioden
- Het verschil tussen de gesimuleerde en gemeten afvoersom van de Elsbeek is groter dan de geschatte bergingsverandering in de simulatieperioden. Hieruit blijkt dat er tijdens de gesimuleerde natte winterperioden waterverlies optreedt in het stroomgebied van de Elsbeek, waarschijnlijk als gevolg van grondwaterstroming. Het is ook mogelijk dat het neerslagoverschot is overschat.
- De geschatte bergingsverandering in de validatieperiode wordt door model RR, slechts gedeeltelijk gesimuleerd. Hieruit blijkt dat het model te weinig bergingsverandering simuleert.
- Voor een goede analyse van het afvoerproces en modelsimulatie zijn nauwkeurige en betrouwbare gegevens van neerslag, afvoer en grondwater, uit het gebied zelf van groot belang

6.4 Model CF+RR: Buurserbeekmodel

Het neerslagafvoermodel van de Buurserbeek bestaat uit het hydraulische model (CF) waar de afwaterende gebieden aan zijn toegevoegd (bijlage 6-D). Er is voor gekozen om alleen sequentieel te simuleren (§6.1.2) en de infiltratie van de Buurserbeek naar de afwaterende gebieden te verwaarlozen (§6.2.3).

De kwaliteit van het Buurserbeekmodel (CF+RR) is getest door de afvoer van de Markveldse Molenstuw te simuleren aan de hand van de gemeten neerslag en verdamping (Hupsel) en de gemeten afvoer bij de Reinkstuw. De afvoer van de Reinkstuw wordt dus toegepast als laterale flux. Het gesimuleerde debiet van de Markveldse Molenstuw is daarna vergeleken met het gemeten debiet. De perioden die op deze manier gesimuleerd worden zijn gelijk aan de calibratie- en validatieperioden uit §6.3. De beginvoorwaarden (initiële waterstanden) zijn die afgeleid door de stationaire waterstanden te berekenen, die bij het gemeten debiet op de eerste tijdstap van de simulatieperiode horen.

Men moet bij deze methode om de modelkwaliteit te testen in het achterhoofd houden dat alleen het debiet bij de Markveldse Molenstuw als referentie is genomen. Het is best mogelijk dat er in het traject tussen de meetstuwen fouten optreden die elkaar compenseren, zodat deze niet opgemerkt worden. De test die wordt uitgevoerd op het neerslagafvoermodel van de Buurserbeek heeft dus meer betrekking op het neerslagafvoerproces op grote schaal dan op kleine schaal.

6.4.1 Simulatiere resultaten van het Buurserbeekmodel

In bijlage 6-J en 6-K zijn de gesimuleerde en de gemeten debieten van de Markveldse Molenstuw in een grafiek weergegeven. De gesimuleerde afvoer van het afwaterende modelgebied, ter hoogte van de Markveldse Molenstuw, is ook weergegeven.

Uit tabel 6.7 blijkt dat de gesimuleerde afvoer goed overeenkomt met de gemeten afvoer bij de Markveldse molenstuw, wat betreft de EF, EF_{\log} , en de RMSE. De gesimuleerde afvoer ligt wel consequent iets lager dan de gemeten afvoer. Dit is opvallend omdat uit §6.3 bleek dat de RR juist een te hoge afvoer simuleren. Dit wijst er op dat er in de gesimuleerde winterperioden geen infiltratie in de beek plaats vindt. Wellicht draineert de beek in natte tijden zelfs een groter oppervlak dan gemiddeld, doordat de (grond)waterscheidingen onder invloed het natte jaar verschuift.

Tabel 6.7 Resultaten Buurserbeekmodel

	Tijdreeks A 10-1993 t/m 3-1994	Tijdreeks B 10-1994 t/m 3-1995
Simulatie		
Gesimuleerde afvoer Markveldse molenstuw (mm)	442	401
" als percentage van de gemeten afvoer (%)	90,0	93,5
EF (-)*	0,911	0,909
EF_{\log} (-)*	0,881	0,883
RMSE (m^3/s)*	1,65	1,56
Gemiddelde afvoer Markveldse Molenstuw	5,75	5,03

*zie bijlage 6-F

De gesimuleerde afvoer van tijdreeks A (bijlage 6-J), komt goed overeen met de gesimuleerde afvoer van tijdreeks B (bijlage 6-K). In de grafieken in bijlage 6-J en 6-K valt op dat er met name in tijdreeks B een duidelijk verschil is tussen de gesimuleerde en gemeten afvoer van de Markveldse molenstuw. De gemeten debieten hebben een veel vloeiendere curve dan het gesimuleerde debiet. Het gesimuleerde debiet overschat de hoogte van de afvoerpieken (bijlage 6-H₂) en laat het staartverloop na de afvoergolf te snel afnemen. De hoogte van een gesimuleerde afvoergolf bij de Markveldse molenstuw blijkt uit bijlage 6-J en 6-K een optelsom van de hoogte van de afvoergolf bij de Reinkstuw ($\pm 75\%$) plus de zijdelingse toestroming ($\pm 25\%$). Uit de gemeten debieten blijkt echter dat dit in de werkelijkheid niet altijd het geval is (Bijlage 6-J en 6-K). Mogelijk vlakt de (scherpe) afvoergolf, die bij de Reinkstuw wordt gemeten, af in het beektraject tussen de Reinkstuw en de Markveldse molenstuw. Dit is alleen mogelijk als de bergende ruimte in of nabij de beek is onderschat. De overschatting van het debiet in met name bijlage 6-K heeft tot gevolg dat de waterstanden bij de Markveldse molenstuw 5-12 cm worden overschat. Stroomopwaarts is de afvlakking van de afvoerpiek minder groot en zal de overschatting van de waterstand afnemen.

6.4.2 Conclusies over het Buurserbeekmodel

- De gemiddelde gesimuleerde afvoer is ongeveer $0,44 m^3/s$ lager dan de gemeten gemiddelde afvoer. Dit wijst erop dat de opgelegde wegzijging in het beektraject van $0,21 m^3/s$ onterecht is. Mogelijk vindt er in (natte) winters geen infiltratie plaats. Dit versterkt het idee dat de infiltratie afhankelijk is van de grondwaterstanden in de omgeving en geen deel uitmaakt van een relatief constante grondwaterstroom naar het Twentekanaal of de IJssel. Het verschil tussen de gesimuleerde en gemeten afvoer kan ook verklaard worden met een niet-constante grootte van het stroomgebied. Grondwaterscheidingen kunnen onder invloed van relatieve hoeveelheid neerslag (nat / droog jaar) verschuiven. Mogelijk draineert de Buurserbeek in natte perioden een groter gebied dan in een gemiddelde situatie.
- Het neerslagafvoermodel simuleert bijna geen afvlakking van een afvoergolf, terwijl dit in werkelijkheid wel gebeurt. Uit §6.2.3 blijkt dat een fictieve afvoergolf in alleen het hydraulische Buurserbeekmodel niet afvlakt, zodat de gemeten afvlakking van de afvoergolf het gevolg moet zijn van berging van water. Deze berging kan plaats vinden in de Buurserbeek, de zijwaterlopen of in de bodem van het afwaterend gebied. In §5.2.3 wordt ingeschat dat extra berging in de bodem van het afwaterend gebied als gevolg van een hoog

beekpeil nihil is. Een extra berging in de beek zelf lijkt ook onwaarschijnlijk, aangezien de hele beek strak is ingesnoerd door kaden. Het lijkt het meest waarschijnlijk dat er bij hoge beekpeilen berging plaats vindt in de zijwaterlopen en in een enkel niet gesimuleerd retentiegebied.

- Het Buurserbeekmodel kan verbeterd worden door de afvlakking van de afvoergolven beter te simuleren. Dit is waarschijnlijk (deels) mogelijk door de berging in de waterlopen van de afwaterende gebieden op te nemen in de schematisatie van de Buurserbeek. Dit is mogelijk door in de model-schematisatie de RR's te vervangen door (opgegeven) laterale fluxen. In deze 'laterale flux'-knooppunten kan een bergende ruimte worden gedefinieerd, die overeen komt met de berging in het afwaterende gebied. Een bijkomend voordeel van de toepassing van vaste laterale fluxen, is dat vorm en grootte van de fluxen eenvoudig kunnen worden aangepast aan de gemeten afvoeren.

6.4.3 Het gebruik van het Buurserbeekmodel

Het doel van het neerslagafvoermodel is het simuleren en dus voorspellen van de effecten van herstelmaatregelen in de beek. Deze effecten worden gekwantificeerd door een uitgangssituatie (scenario 1) en een aangepaste situatie (scenario 2) met elkaar te vergelijken. In de meeste gevallen wordt een niet-stationaire extreme afvoerpiek gesimuleerd, door een extreme neerslagegebeurtenis te simuleren. De herhalingstijd van de hierdoor gegenereerde afvoergolf kan worden afgeleid uit de statistieken van de meetstuw (de frequentiecurven). Het Buurserbeekmodel kijkt op een aantal punten af van de werkelijkheid, die men bij het simuleren in het achterhoofd moet houden: Deze aandachtspunten zijn:

- De RRA's genereren afvoerpieken die wat betreft vorm afwijken van de werkelijk optredende afvoerpiek (§6.3.3).
- De RRA's zijn conceptuele neerslagafvoermodellen, die zijn gecalibreerd op de afvoer. De gesimuleerde grondwatergegevens moeten niet als de werkelijke gemiddelde grondwaterstand worden opgevat (§5.2).
- De RRA's onderschatten de bergingsverandering in de bodem (§6.3.3).
- Het neerslagafvoermodel gaat uit van een constante grootte van het oppervlakte van de afwaterende oppervlakten en van een constante hoeveelheid wegzijging uit de beek. Deze gegevens zijn waarschijnlijk niet-constant, maar afhankelijk van de grondwaterstanden.
- Het neerslagafvoermodel berekent bijna geen afvlakking van de afvoergolf, terwijl dit op grond van de gemeten afvoeren wel te gebeurt. De afwijking van tussen de gemeten en gesimuleerde piekafvoer bedraagt maximaal 25%. De overschatting van de waterstand kan hierdoor oplopen tot 12 cm.
- De betrouwbaarheid van het Buurserbeekmodel is getoetst aan de hand van de debieten van de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw. Strict genomen is de *gemiddelde* nauwkeurigheid van het gemodelleerde beektraject tussen de stuwen getoetst. Het is mogelijk dat de nauwkeurigheid lokaal 10-20 cm afwijkt van de gemiddelde nauwkeurigheid.
- De gehanteerde leidingweerstand gaat uit van een wintersituatie. In de zomer kan de leidingweerstand als gevolg van begroeiing 100% groter zijn. De waterstand kan hierdoor tot 0,4 m hoger zijn dan in de winter. Bij extreem hoge afvoeren in de zomer is de waterstandsverhoging relatief klein. Dit wordt veroorzaakt doordat de ruwheid van de waterloop afneemt door het platslaan van de oever- en bodembegroeiing onder de kracht van het stromende water.
- Het aflatwerk in de Schipbeek bij het Twentekanaal is niet opgenomen in de modelschematisatie, evenals de wegzijging / drainage uit de Schipbeek in het beektraject Markveldse molenstuw - Twentekanaal. Door het peilverschil tussen de Schipbeek en het Twentekanaal zijgt er nabij het Twentekanaal zeer waarschijnlijk water weg uit de Schipbeek.

- De nauwkeurigheid van de waterstanden is op basis van de voorgaande conclusies geschat (tabel 6.8)

Tabel 6.8 Geschatte onnauwkeurigheid van gesimuleerde waterstanden in het Buurserbeekmodel

	Onnauwkeurigheid waterstand	Overschatting waterstand
Basisafvoer (0-3 m ³ /s)	0-20 cm	-
Piekafvoer (>10 m ³ /s)	0-20 cm	5-15 cm

6.4 Scenario: beekherstelmaatregelen

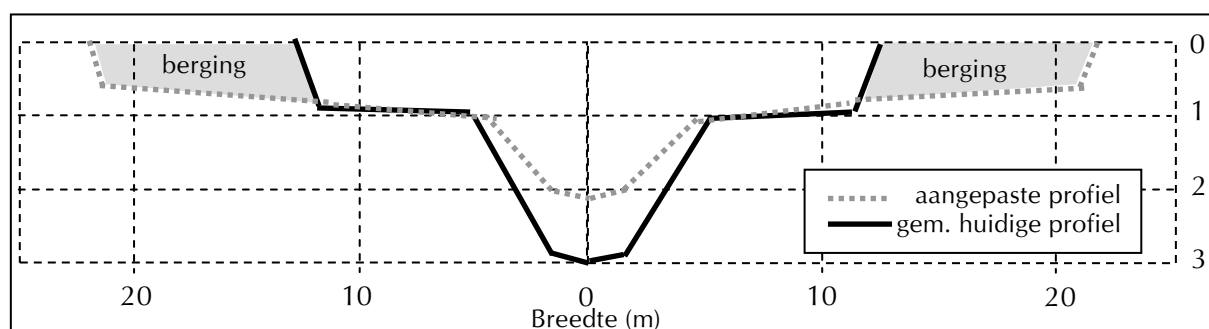
Het neerslagafvoermodel van de Buurserbeek is gemodelleerd om de effecten van de mogelijke herstelmaatregelen op het debiet en de waterstanden te simuleren. Om een inschatting te kunnen maken van deze effecten is in deze paragraaf een fictief scenario gemodelleerd, dat een aantal maatregelen bevat in het beektraject tussen de Rijksgrens en de Oosterdorper watermolen / stuwduiker. De gemodelleerde maatregelen zijn ontleend aan eerdere verkennende studies naar herinrichting van de Buurserbeek [Tauw, 1999 en 2002]. De volgende herstelmaatregelen zijn in het fictieve scenario gemodelleerd:

- *aankoppeling van oude meanders*. Hierdoor neemt de beeklengte naar schatting met 15% toe
- *verondiepen van de hoofdbedding*. De bodemhoogte wordt gemodelleerd op 2 m onder de kadehoogte / maaiveldhoogte. Eventuele onregelmatigheden in de bodemhoogte worden geëgaliseerd. De bodem wordt op deze manier gemiddeld 1,5 tot 2,0 m verhoogd.
- *aanpassen van beekprofiel (dwarsdoorsnede)*. Het huidige brede diepe profiel wordt vervangen door een smal en ondiep zomerbed met een bredere winterbed (+10 m), waarvan een deel wordt gemodelleerd als berging / retentie (figuur 6.6)
- *verwijderen van de alle stuwen in het traject*. Ook de Reinkstuw (die dient als meetstuw) is in dit scenario verwijderd. De stuwduiker en de Oosterdorper watermolen blijven bestaan in het scenario

Het effect van de aanpassingen is afgeleid aan de hand van een vergelijking met het ongewijzigde Buurserbeekmodel, in twee simulaties:

- simulatie 1 : stationair, 1,1 l/s.ha (maatgevende afvoer = 16 tot 17 m³/s),
- simulatie 2 : niet-stationair, afvoerpiek van 32 m³/s

De eerste simulatie is bedoeld om de verandering van de waterstand als gevolg van de maatregelen te bepalen. De tweede simulatie geeft inzicht in de verandering van de afvoerpiek als gevolg van de maatregelen. De resultaten zijn weergegeven in bijlage 6-L.



Figuur 6.6 Huidige en aangepaste beekprofiel (dwarsdoorsnede met hoogte (m-mv.) en breedte (m))

Uit de resultaten (bijlage 6-L) zijn een aantal conclusies getrokken:

- De waterstanden blijken door de maatregelen, met name door de aanpassing van het profiel en de bodemophoging, gemiddeld ongeveer een meter toe te nemen. In de huidige situatie betekent dit dat de kaden bij maatgevende afvoer plaatselijk overstromen. De bodemophoging die in dit scenario is gebruikt kan dus niet uitgevoerd worden, tenzij de piekafvoer wordt teruggebracht.
- De afvoerpiek blijkt nagenoeg dezelfde hoogte en vorm te hebben als in de huidige situatie. De extra berging treedt voornamelijk in werking aan het begin van de afvoerpiek (bijlage 6-

- L). De reductie van de hoogte van afvoerpiek is nog geen 1%. De aanleg van een breder winterbed (20 m extra) heeft dus geen afvlakking van de afvoergolf tot gevolg. Wil men de afvoerpiek toch afvlakken dan moet men de berging gerichter toepassen door bijvoorbeeld bij een bepaalde waterstand de retentie vol te laten lopen (over een verlaagde kade)
- de stroomsnelheid bij lagere afvoeren is door het smalle 'zomerbed' aanzienlijk hoger dan in de huidige situatie. Dit is geheel naar de doelstelling (§2.3.3). De stroomsnelheid is tijdens de afvoerpiek hoger dan in de huidige situatie. Dit komt niet overeen met de doelstelling. De toename van de stroomsnelheid tijdens afvoerpieken wordt veroorzaakt door de afwezigheid van de overlaten, waardoor de waterdiepte is afgenomen bij hetzelfde debiet. Deze hogere stroomsnelheid heeft tot gevolg dat er netto erosie gaat optreden, waardoor de beek gaat insnijden. Dit kan op twee manieren voorkomen worden. Ten eerste kan de bodem vastgelegd worden met bodemvallen. Het is alleen de vraag of er in die situatie niet alsnog netto erosie optreedt, in de trajecten tussen de bodemvallen. Een tweede manier om de erosie te voorkomen is het reduceren van de hoogte van de afvoerpiek door retentie.

Conclusies en aanbevelingen

Hoofdstuk 2

- Er is in het verleden al veel ingegrepen in de Buurser- en Schipbeek, waardoor met name het sedimenttransport is veranderd. De geplande herstelmaatregelen kunnen hetzelfde effect hebben.
- Een verhoging van het beekpeil heeft waarschijnlijk weinig invloed op de vochtuishouding van de droge delen in het afwaterend gebied. Beekpeilverhoging is dus maar beperkt nuttig bij droogtebestrijding

Aanbeveling:

- monitor de verandering van het (netto) sedimenttransport in de hoofdwaterlopen, waarin omvangrijke cultuurtechnische maatregelen uitgevoerd gaan worden

Hoofdstuk 3

- De kwaliteit van meetstuwen (in het studiegebied, maar waarschijnlijk in het algemeen) als meetopstelling is vaak niet goed. Met name de extreem hoge afvoeren worden overschat doordat vrijwel alle meetstuwen bij extreem hoge afvoeren verdrinken, waardoor de gehanteerde afvoerrelatie niet meer klopt. In de huidige situatie worden de afvoeren met een herhalingsstijd van meer dan een jaar overschat met mogelijk tientallen procenten, terwijl deze maatgevende afvoeren als 'hard' worden beschouwd en worden gebruikt in ontwerpstudies voor inrichtingsplannen.

Aanbevelingen:

- Het waterschap moet het belang van betrouwbare afvoer- en waterstandsgegevens erkennen dientengevolge voldoende aandacht besteden aan de geschiktheid van (het ontwerp) van meetlocaties. De hydrologen moeten dit inzicht bevorderen door duidelijk (praktisch) aan te geven wat de (on)nauwkeurigheid van hydrologische gegevens is.
- Een belangrijk aandachtspunt bij het verbeteren van de kwaliteit van de afvoergegevens is de correctie voor verdrinking van de stuwkruin. Hiervoor moet de benedenstroomse waterstand (HOH) bij elke meetstuw worden gemeten.

Hoofdstuk 4

Het westelijk deel van het modelgebied bevindt zich in de infiltratiezone van het Twentekanaal, waardoor er netto infiltratie optreedt in het stroomgebied van de Buurserbeek. In een droge zomer vindt er bijna geen oppervlaktewaterafvoer meer plaats en infiltreert de basisafvoer uit Duitsland in zijn geheel. Het is aannemelijk dat de infiltratie uit de Buurserbeek wordt versterkt door de relatief hoge ligging van de beek in het landschap.

Hoofdstuk 6

Conclusies betreft de kwaliteit van het Buurserbeekmodel:

- De afvlakking van een gesimuleerde afvoergolf gedurende zijn looptijd is nihil
- Een RRA simuleert de afvoer van een afwaterend gebied redelijk goed. De gesimuleerde afvoerpieken zijn te scherp, doordat de berging in de waterlopen binnen het afwaterende gebied wordt verwaarloosd in de RRA. De lage afvoeren worden goed gesimuleerd.
- De RRA's van de Elsbeek en de Reinkstuw simuleren tijdens de calibratie- en validatieperiode een hogere afvoersom dan is gemeten. Dit is voor de Elsbeek deels het gevolg van de onderschatting van de gesimuleerde netto bergingsverandering. Daarnaast treden er mogelijk grondwaterverliezen op en is het neerslagoverschot mogelijk overschat.
- Het neerslagafvoermodel van de Buurserbeek (model CF+RR) simuleert te hoge afvoerpieken (tot ongeveer 25% overschatting) en onderschat de afvlakking van de afvoerpiek. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het verwaarlozen van de berging in zijwaterlopen. Het neerslagafvoermodel simuleert de lage afvoeren goed.
- Het neerslagafvoermodel van de Buurserbeek (model CF+RR) simuleert een lagere afvoersom vergeleken met de gemeten afvoersom. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt, doordat de

grootte van de (niet-constante) wegzijging uit de beek en de (niet-constante) grootte van het door de Buurserbeek gedraineerde gebied, slechts deels bekend is

Aanbeveling:

- Het verdient aanbeveling om de neerslagafvoer-'knopen' in het neerslagafvoermodel van de Buurserbeek te vervangen door opgegeven laterale fluxen, die worden afgeleid van de beschikbare afvoermetingen. In deze knooppunten kan tevens de berging in de zijwaterlopen worden geschematiseerd, waardoor het model wellicht meer afvlakking simuleert en dus verbeterd kan worden.
- De simulatie van de neerslagafvoerreactie door een RRA kan verbeterd worden door de oppervlaktewaterberging in het afwaterend gebied in het model op te nemen en door de afvoersommen goed te simuleren. De simulatie van de berging kan mogelijk verbeterd worden door ook de grondwaterstanden op te nemen in de calibratie

Conclusies betreffende de mogelijke herstelmaatregelen in de Buurserbeek

- Het verwijderen van de vaste overlaten uit de Buurserbeek heeft tot gevolg dat de stroomsnelheid sterk toeneemt, waardoor er sterke erosie gaat optreden (tijdens de afvoerpieken).
- De gehanteerde hermeandering, die overeenkomt met 15% toename van de beeklengte, kan de toename van de stroomsnelheid als gevolg van de verwijdering van de stuwen niet beperken tot de stroomsnelheden die in de huidige situatie optreden.
- De toename van de berging in het beekprofiel door een profielverbreding heeft slechts een geringe invloed op de hoogte van een extreme afvoergolf ($Q=32 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Het toegepaste accoladeprofiel (figuur 6.6) heeft gevolg dat stroomsnelheden bij lage debieten vele malen groter is dan in de huidige situatie. Bij een debiet van $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ is de huidige gemiddelde stroomsnelheid ongeveer $0,1 \text{ m/s}$ en in het scenario $0,3 \text{ m/s}$. Dit is een duidelijke verbetering, die overeen komt met het streefbeeld van de Buurserbeek [Tauw, 2002].

Literatuurlijst

F.G. Aelmans, Dienst grondwaterverkenning TNO, *Grondwaterkaart van Nederland, uitgave 1973, 28oost Almelo, 29 Denekamp, 34oost Enschede, 35 Glanerbrug, schaal 1:50.000*, 1973, Delft

P.B. Smoor, N.A. Ridder, Dienst grondwaterverkenning TNO, *Grondwaterkartering van Nederland, kaartbladen 34 W Groenlo en 41 W Aalten, schaal 1:50.000*, 1972, Delft

H. de Bakker en W.P. Locher, *Bodemkunde van Nederland, deel 2, Bodemgeografie*, 1990

W.Boiten, *Het opstellen van de afvoerkromme van klepstuwen, rapport 52*, Landbouwniversiteit Wageningen, Waterloopkundig laboratorium, 1995

W. Boiten, *Debietmeetstations op de Schipbeek, kloosterstuw te Deventer, Inlaatgemaal Twentekanaal te Markelo*, 2000, ISSN 0926-230X, Wageningen Universiteit, Sectie Waterhuishouding, rapport 96, Opdrachtgever Waterschap Rijn en IJssel,

M.G. Bos from The working Group on Small Hydraulic Structures, *Discharge measurement structures*, rapport 4, mei 1976, landbouwhogeschool Wageningen

P.H.A.M. Dirks et al, *Bouwstenen voor een meer natuurlijke Buurserbeek*, O&B rapport no. 98-10, 1998, Vereniging Natuurmonumenten, 's-Graveland

A.M.A.J Driessen, G.P. van de Ven, H.J. Wasser, *Gij beken eeuwig vloeiend, Water in de streek van Rijn en IJssel*, 2000, Utrecht, Opdrachtgever Waterschap Rijn en IJssel

A. Dommerholt, W. Boiten, *Ijking Reinkstuw in de Buurserbeek*, rapport 117, Wageningen universiteit, Sectie waterhuishouding, 2003, Opdrachtgever Waterschap Rijn en IJssel

R.A. Feddes, *Crop factors in relation to Makkink's reference crop evapotranspiration*. In: Evaporation and weather. CHO-TNO, Proc and Inform. No 39: 33-45

Flick Ingenieurgemeinschaft GmbH, *Ermittlung des natürlichen Überschwemmungsgebietes der Ahauser Aa basiert auf einem Abflussergebnis HQ 100, einschließlich Aa - Umflut, Vorentwurf*, 2001, Ibbenbüren, Auftraggeber Staatliches Umweltamt Münster

Heidemij, *Neerslag-afvoermodellering Schipbeek/Buurserbeek*, 1995, 634/OA95/2550/44201/sh, opdrachtgever Waterschap de Schipbeek

J.W. Kole (ed.), *Handleiding Veldpracticum Hydrologie*, Wageningen Universiteit, Sectie Waterhuishouding

N.M. Koomen, *Sobek vrijafwaterend?, Een testcase: Het gebruik van Sobek rainfall runoff in combinatie met Sobek channel flow in het stroomgebied van de Hupselse beek*, 2001, Wageningen Universiteit, sectie Waterhuishouding, WL delft hydraulics

H.A.J. van Lanen, R. Dijkma, *Hydrogeologie, Collegedictaat*, 1999, Landbouwniversiteit Wageningen, sectie Waterhuishouding

M. Meeuwissen (coordinator) et al, *Cultuurtechnisch Vademecum, Handboek voor inrichting en beheer van het landelijk gebied*, 2000, Elsevier bedrijfsinformatie, vereniging voor Landinrichting, Meppel

E.P. Querner, *De stromingsweerstand en de berekening van de afvoer in begroeide waterlopen*, artikel in 'Het Waterschap', nummer 9, 1995, pag. 350-356

Stichting voor bodemkartering, *Bodemkaart van Nederland, Blad 34 West Enschede, Blad 34 Oost Enschede, Blad 35 Glanerbrug*, 1979, Wageningen

H. Stricker, W. Brutsaert, Actual evaporation over a summer period in the Hupsel catchment, *Journal of Hydrology* 39, pag 135-157, 1978

Tauw, BügelHajema, *Visie voor het Herstel van de Buurserbeek*, 2002, 950.06.02.30.00, Opdrachtgever Waterschap Rijn en IJssel

Tauw, *Herstmogelijkheden Buurserbeek: effectenstudie kilometer 0 tot en met km 16,1 (Concept)*, 1999, R001-3710300PBW-C02-D, Opdrachtgever Waterschap Rijn en IJssel

Tauw, *Herstmogelijkheden Buurserbeek: effectenstudie kilometer 16,1 tot en met km 31,9*, 2000, R001-3790266PWN-D01-D, Opdrachtgever Waterschap Rijn en IJssel

P.A.M. Warmerdam, *Neerslag-afvoermodellen*, 2001, Wageningen unversiteit, afdeling waterhuishouding

A.B. Wittgen et al, *Het landschap van Twente, schets van de ontwikkelingsgeschiedenis*, 1986, Opdrachtgever Vereniging van Meester Bernink's Museum Natura Docet / Stichting Heemkunde Denekamp, Oldenzaal

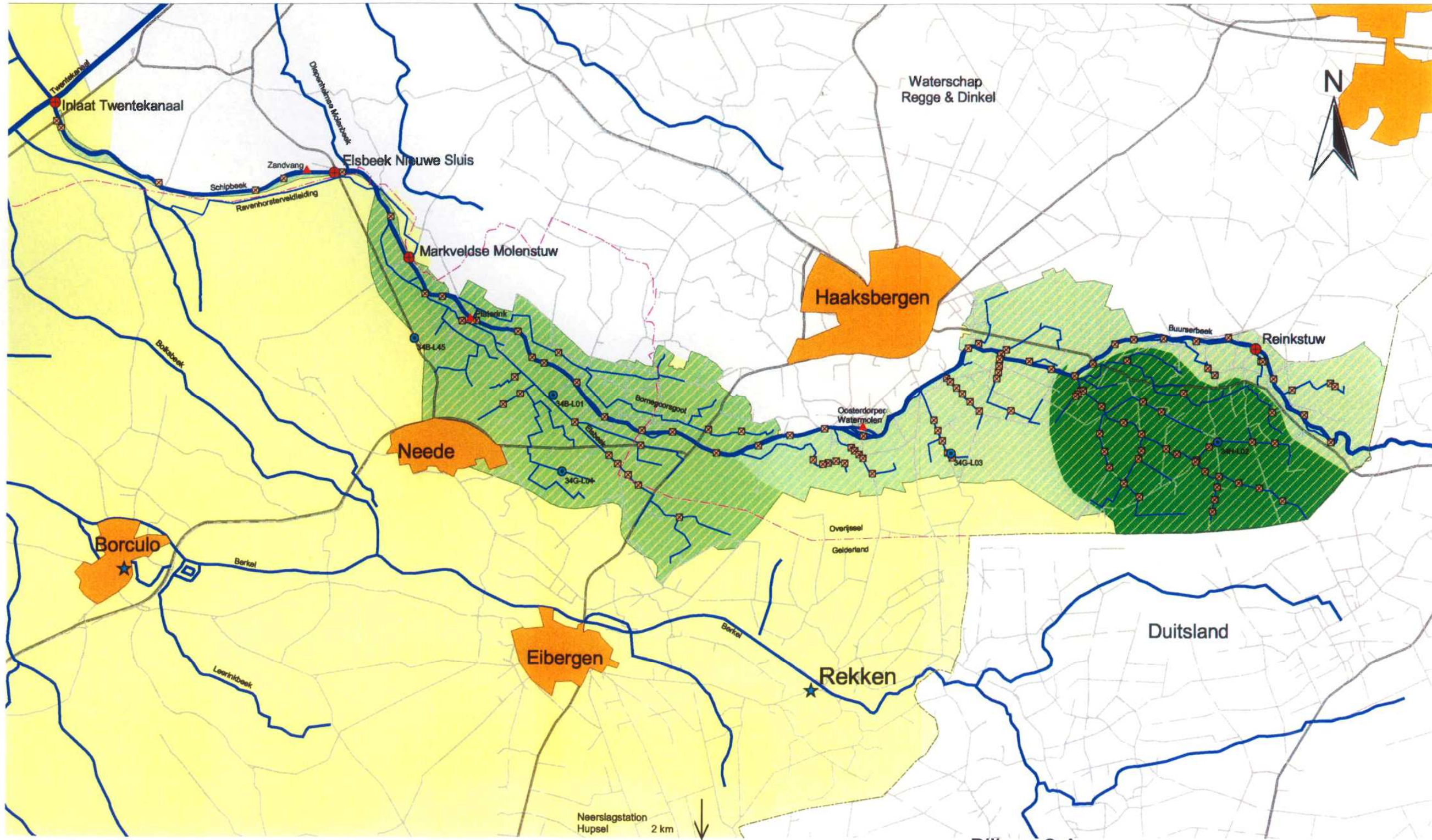
WL | Delft Hydraulics, *Technical Reference Manual Sobek 2.07, Appendix I Rural and Urban, Appendix II Rainfall Runoff*, 2001

INHOUD BIJLAGEN

- Bijlage 2-A Stroomgebied van de Schipbeek en de Buurserbeek
- Bijlage 2-B Hoogtekaart van het modelgebied
- Bijlage 2-C, Geschematiseerd afwateringsysteem Buurser-/Schipbeek
- Bijlage 2-D Overzicht historische maatregelen in de Buurserbeek / Schipbeek van de Rijksgrens tot het Twentekanaal
- Bijlage 3-A, Aanvulling neerslagreeks Recover
- Bijlage 3-B, Stuwkarakteristieken Reinkstuw
- Bijlage 3-C, Stuwkarakteristieken Markveldse Molenstuw
- Bijlage 3-D, Stuwkarakteristieken Elsbeek Nieuwe Sluis
- Bijlage 4-A, Maandtotalen neerslag en verdamping van station Hupsel periode 1992-1998
- Bijlage 4-B, Frequentiecurves van de afvoeren van de meetstuwen
- Bijlage 4-C, Cumulatieve procentuele afvoeren van de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw (1994 en 1995)
- Bijlage 4-D, Seizoensafhankelijke hydraulische weerstand
- Bijlage 4-E, Tabel maandelijkse waterbalans 'beektraject'
- Bijlage 4-F, Verschil in maandtotaal afvoer tussen de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw voor de periode 1992-1998
- Bijlage 5-A Kunstwerken in Sobek
- Bijlage 5-B Neerslagafvoer-schematisatie in Sobek
- Bijlage 6-A Overzicht kunstwerken in het neerslagafvoermodel
- Bijlage 6-C Berekening van de opstuwing van een brug tijdens een afvoergolf
- Bijlage 6-D Oppervlakten afwaterende gebieden
- Bijlage 6-E Ingevoerde parameterwaarden model RR
- Bijlage 6-F Gebruikte kengetallen voor de modelkwaliteit
- Bijlage 6-G Calibratie en validatie neerslagafvoer Elsbeek
- Bijlage 6-H Calibratie en validatie neerslagafvoer Reinkstuw
- Bijlage 6-I Frequentiecurve van gemeten en gesimuleerde neerslagafvoer
- Bijlage 6-J Resultaten neerslagafvoermodel tijdreeks A
- Bijlage 6-K Resultaten neerslagafvoermodel tijdreeks B
- Bijlage 6-L Resultaten scenario herstelmaatregelen

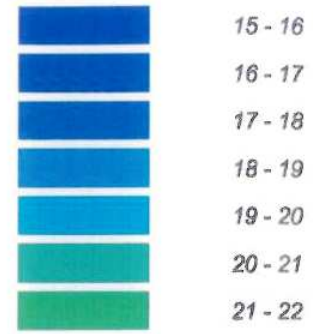
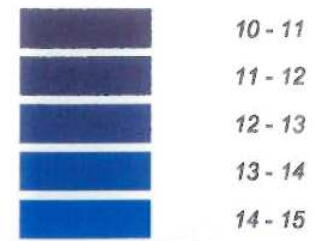
Legenda

- | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|---|----------------------|---|----------------|---|--------------------------|
|  | Waterschap Rijn & IJssel |  | Stroomgebied Elsbeek |  | Meetstuwen |  | Neerslagstation |
|  | Stroomgebied Buurserbeek/ Schipbeek |  | Waterlopen |  | Provinciegrens |  | Overige stuwen en dammen |
|  | Stroomgebied Zodebeek |  | |  | Rijksgrens |  | Grondwatermeetpunt |

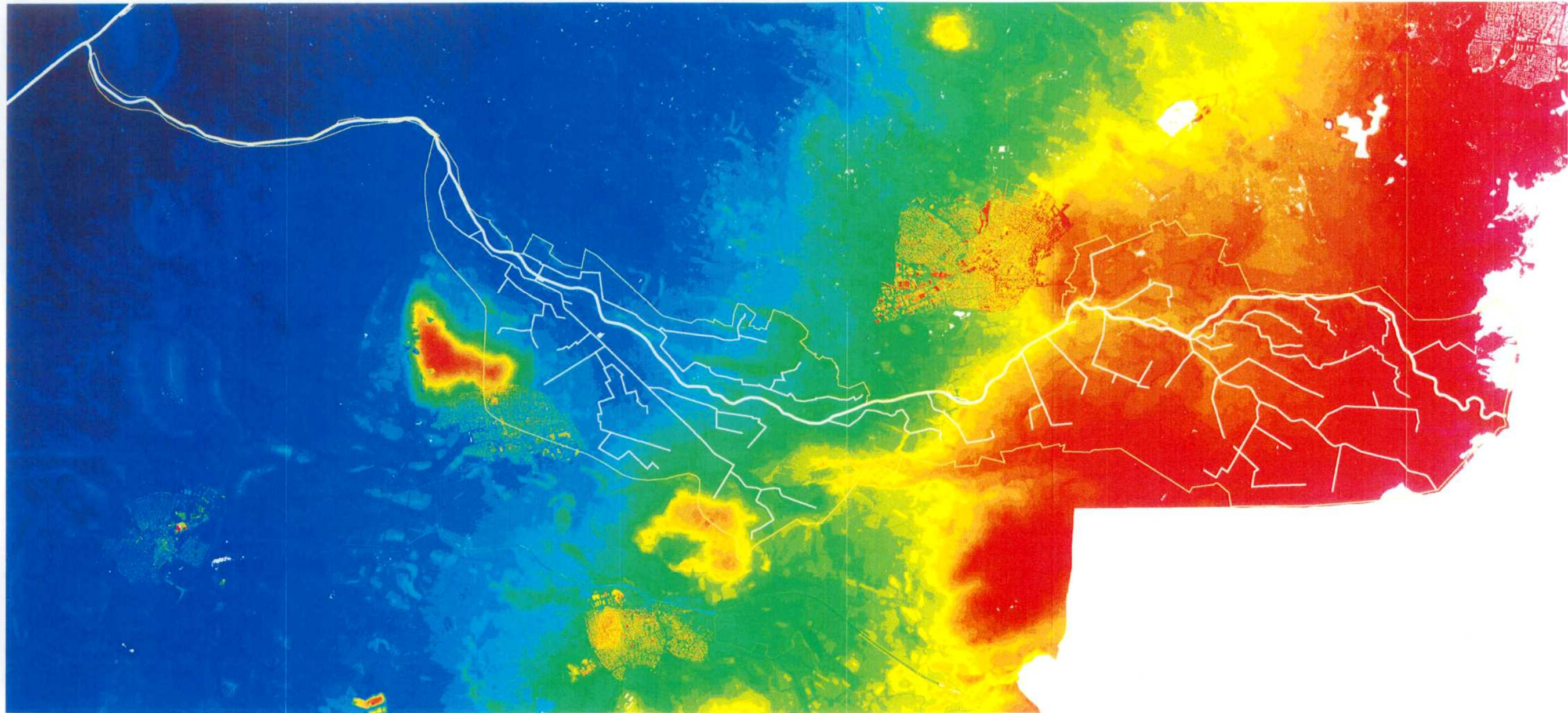
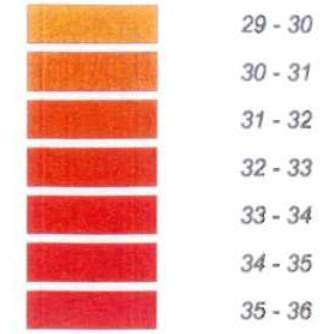
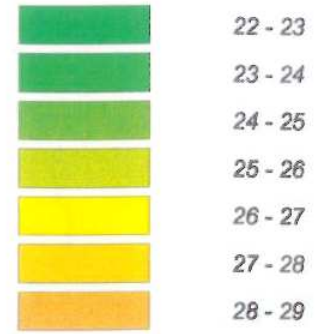


Bijlage 2-A
 Stroomgebied van de Buurserbeek/ Schipbeek
 Schaal 1:70.000

Hoogtes in m

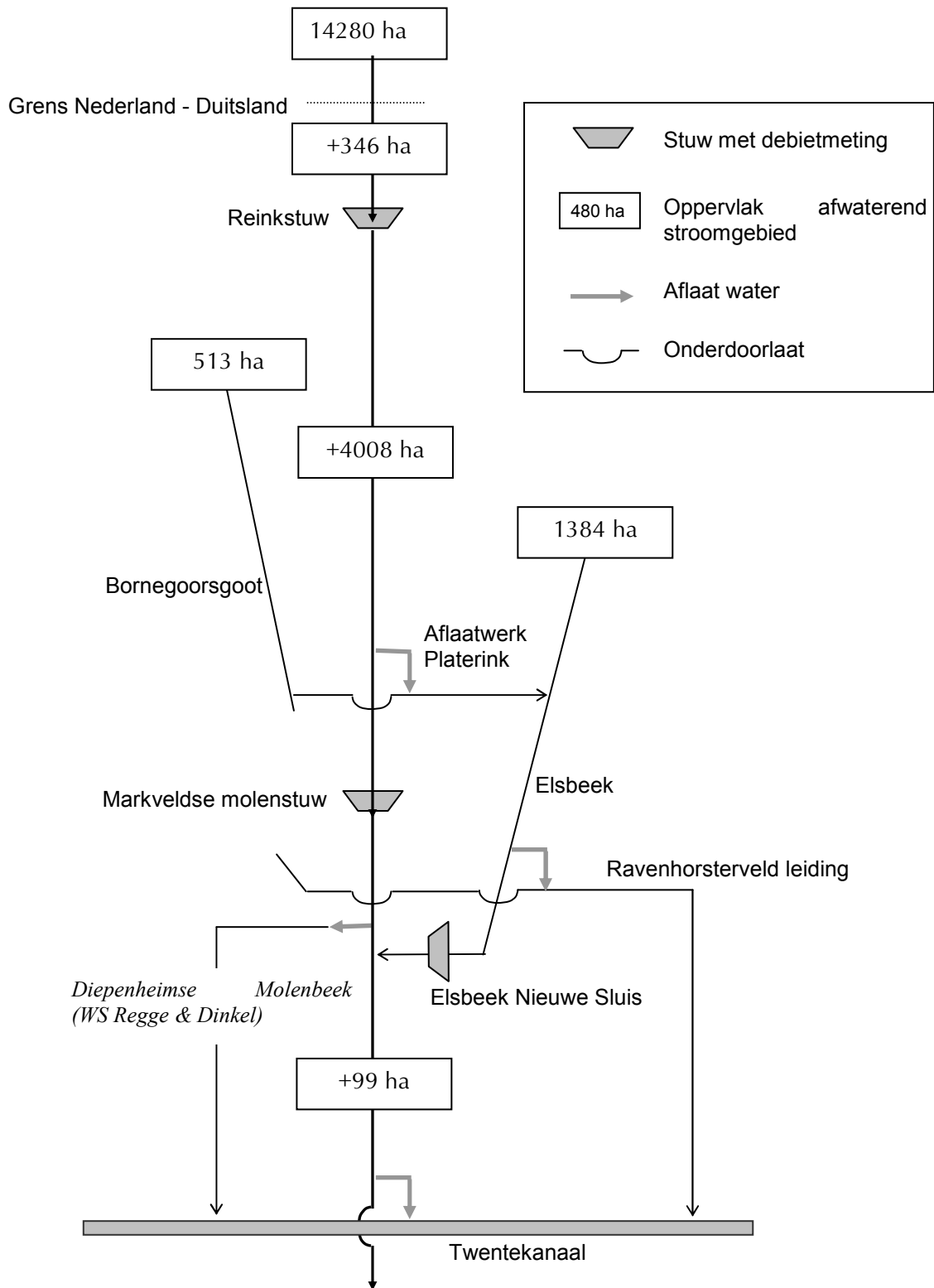


Legenda



Bijlage 2-B
Hoogtekaart van het modelgebied
Schaal 1:70.000

Bijlage 2-C, Geschematiseerd afwateringsstelsel Buurser-/Schipbeek



Bijlage 2-D Overzicht historische maatregelen in de Buurserbeek / Schipbeek van de Rijksgrens tot het Twentekanaal

Eerste verbeteringsronde (1894-1898 en 1906-1909)

Doelen

- zomervloeden mogen niet voorkomen
- verbindingen met andere stroomgebieden in stand houden
- gecontroleerde afleiding via sluizen
- kadebreuk voorkomen

Maatregelen

- Uitdiepen en verbreden stroombed, verhoging noordelijke kaden Buurserbeek
- Aanwezige stuwen: Nieuwe Sluis, Molenstuw (bij Haaksbergen) en Oortjessluis
- Bij > 8,4 m³/s bij Buurse aflat op Regge (Oortjessluis)
- Aflat naar Diepenheimse molen minimaal 1,5 m³/s

1880	einde Scheepvaart
1895	bouw Nieuwe sluis, brug wordt later gebouwd
1896	afsnijding in Buurserbeek (1,0 km)
1906	afsnijding Buurserbeek (1,2 km)
1911	Markveldse Molen aangekocht en geruimd (1912), bouw nieuwe ontlastsluis

Tweede verbeteringsronde (1930-1938)

Doel:

- Tegengaan wintervloeden

Maatregelen

- doorwaadbare plaatsen worden vervangen door houten bruggen
- verzanding groot probleem

1933-1934	aflatwerk Schipbeek bij twentekanaal gebouwd plus drie duikers onder het kanaal door
1933-1938:	Buurserbeek tot de weg Eibergen-Haaksbergen uitgediept (0-0,75 m) en uitdieping Buurserbeek 0,75-1,00 m tot ongeveer 6 km bovenstrooms van Nieuwe Sluis
1936-1937	Bedding Buurserbeek vergroten, kaden verhogen en verzwaren
1937	Sluiting Oortjessluis

Derde verbeteringsronde (1956-1968)

Doelen:

- tegengaan erosie
- alleen incidentele overstroming toestaan
- verlaging grondwaterstanden
- mechanisering van het onderhoud

Maatregelen

- intensiveren onderhoud
- ruilverkaveling landelijk gebied (1956-1980)
- aanleg vele vaste overlaten en regelbare stuwen
- modernisering bruggen van hout naar beton, verwijdering peilers uit de bedding (1965-1980)
- aflatwerk naar Diepenheimse molen wordt verbeterd

1946	initiëren onderzoek naar verdroging en verzanding
1957	bouw aflatwerk Twentekanaal (stortte in 1961 in)
1958	bouw proefzandvang
1963-1966	bouw definitieve zandvang, capaciteit 70.000 m ³
1966-1968	verbetering Zoddebeek
1967	herstel aflatwerk Twentekanaal

Bijlage 3-A, Aanvulling neerslagreeks Recover

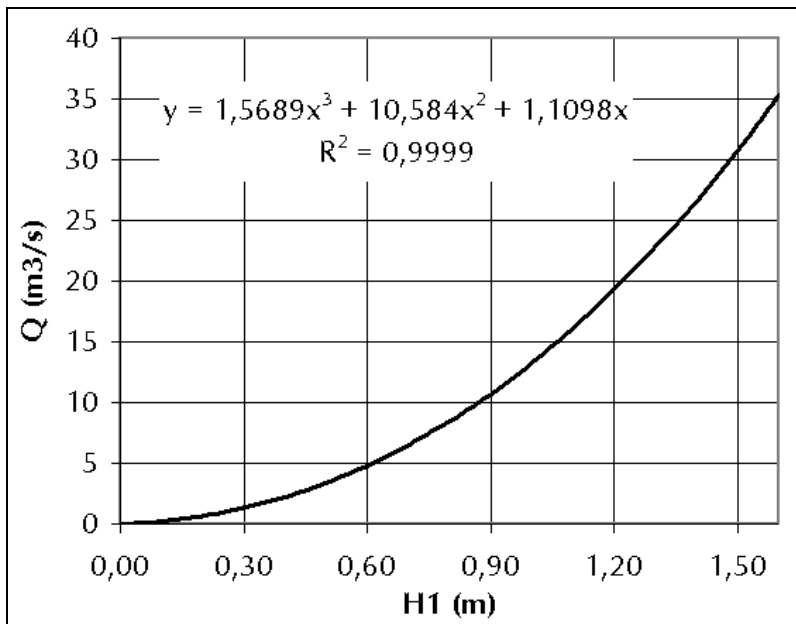
1996

-	30 jun	+1 mm
-	3 jul	+1 mm
-	4 jul	+1mm
-	5 jul	+2 mm
-	10 jul	+5 mm
-	28 aug	+4 mm
-	29 aug	+24 mm
-	30 aug	+23 mm
-	31 aug	+7 mm

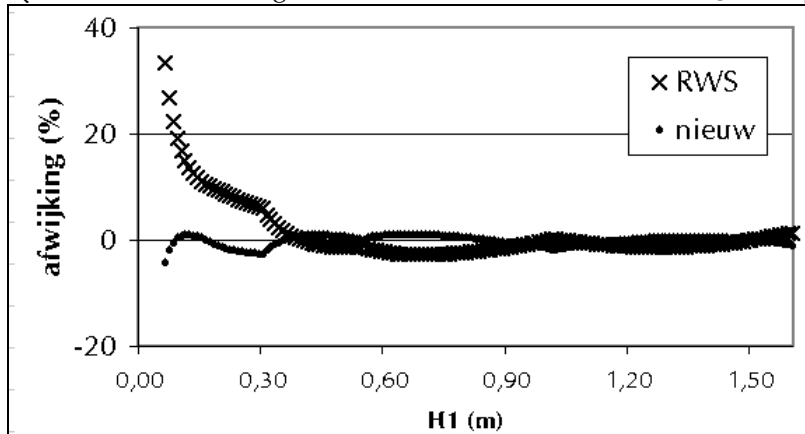
1998

-	19 jun	+4 mm
-	22 jun	+5 mm
-	26 jun	+4 mm
-	28 jun	+4 mm
-	30 jun	+4 mm
-	8 jul	+2 mm
-	10 jul	+1 mm
-	12 jul	+2 mm
-	13 jul	+1 mm
-	5 sept	+1 mm
-	8 sept	+2 mm
-	9 sept	+1 mm
-	10 sept	+5 mm

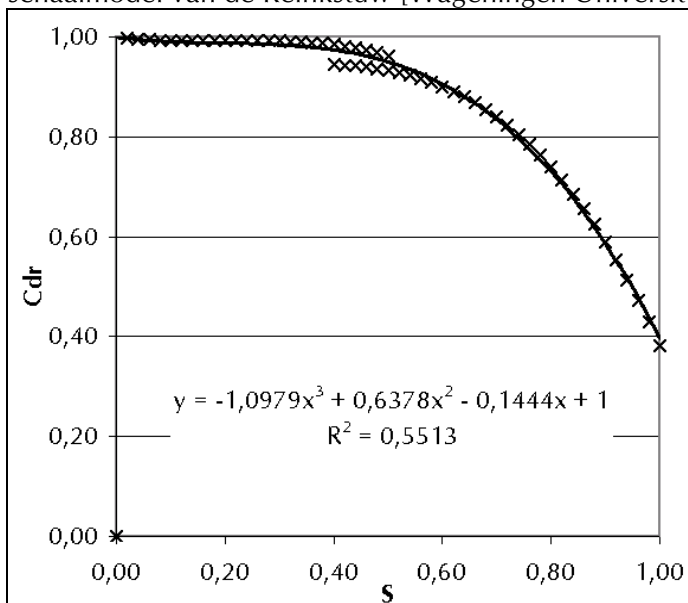
Bijlage 3-B, Stuwkarakteristieken Reinkstuw



QH-relatie van de ongestuwde afvoer van de Reinkstuw [voorlopige ijkingsresultaten]



Afwijking van de oude en nieuwe QH-relatie's met de ijkingsresultaten van het hydraulische schaalmodel van de Reinkstuw [Wageningen Universiteit, Anton Dommerholt, 2003]



S/Cdr relatie van de Reinkstuw

Bijlage 3-C, Stuwkarakteristieken Markveldse Molenstuw

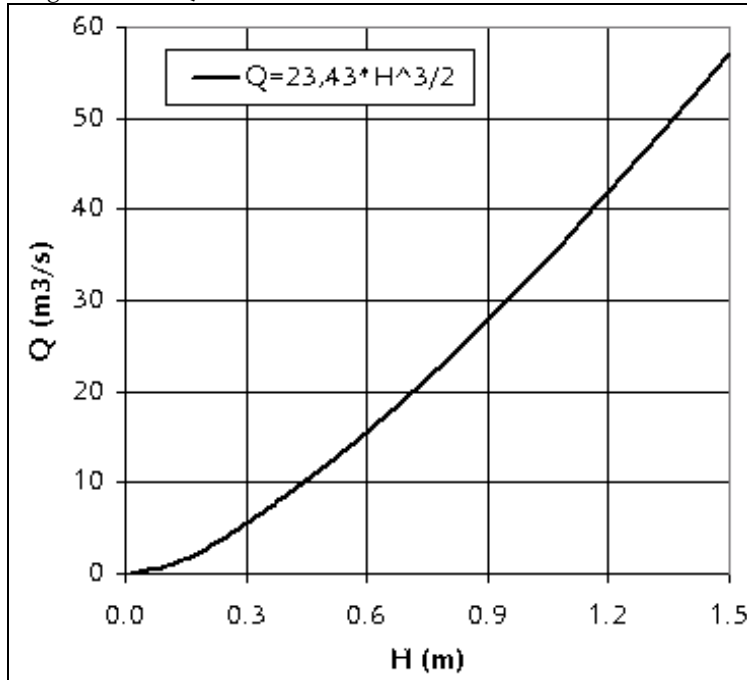
QH-relatie : $Q = 23,43 * C_e * H^{3/2}$ (door E. Kok (WRIJ), uit [Bos, 1976])

Berekend voor brede cilindervormige overlaat met $r = 0.1\text{m}$

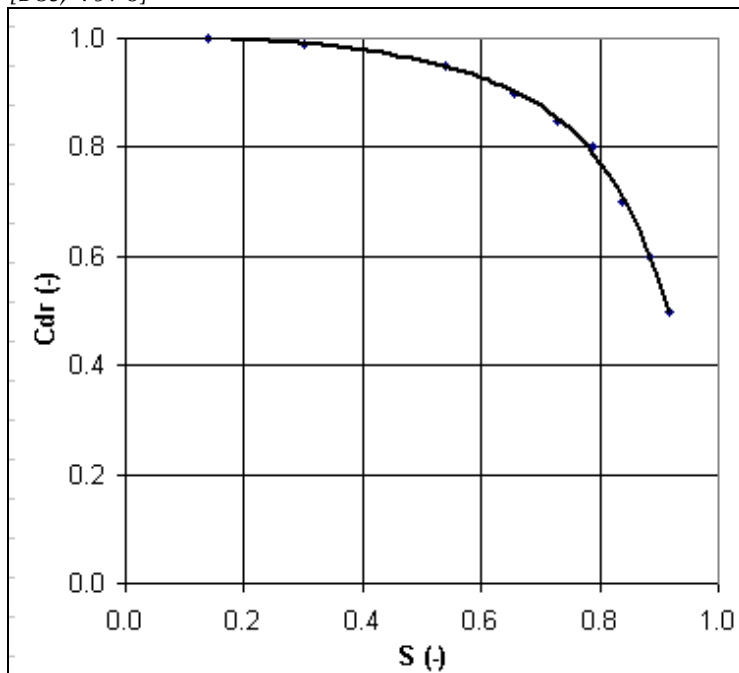
$C_e (H < 0,4) = -5,6144 H^2 + 3,9688 H + 0,7609$

$C_e (H > 0,4) = -0,1125 H + 1,495$

Ongestuwde QH-relatie Markveldse Molenstuw

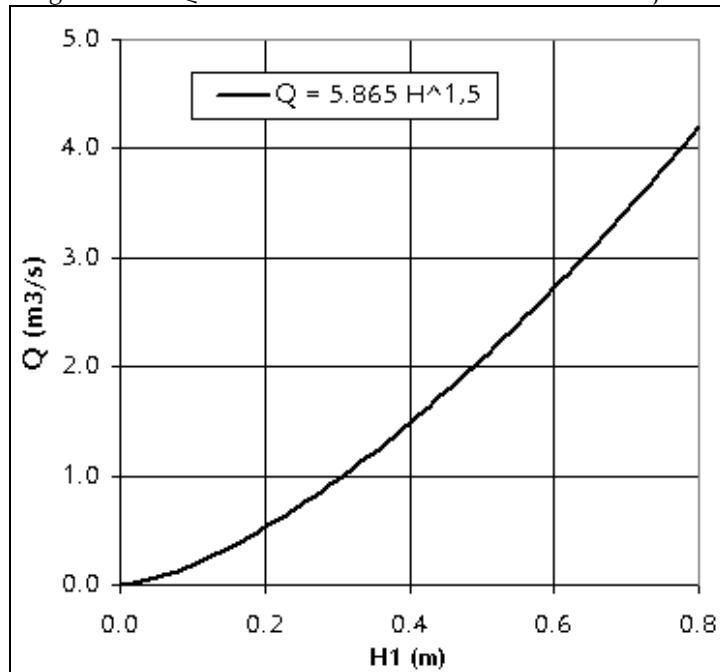


Relatie tussen de verdrinkingsgraad (S) en de afvoercorrectie (C_{dr}) van de Markveldse Molenstuw [Bos, 1976]

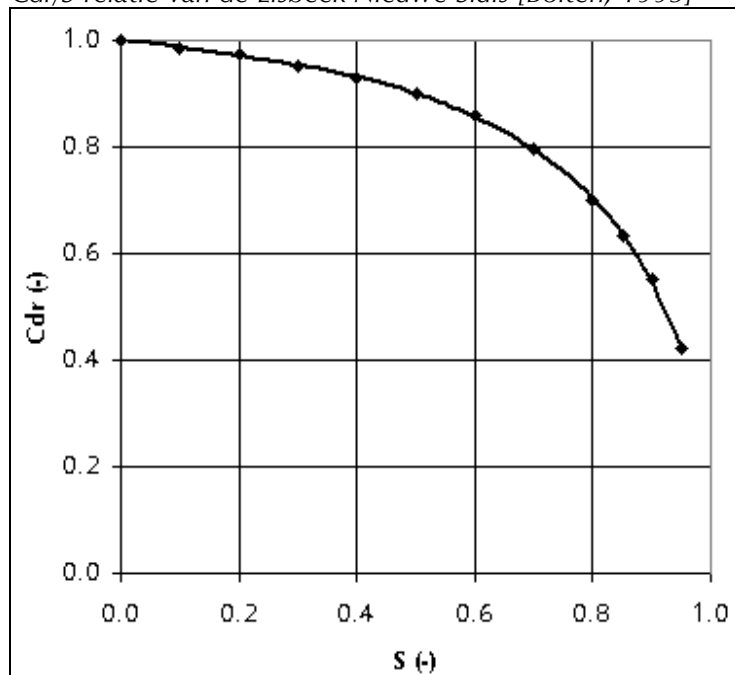


Bijlage 3-D, Stuwkarakteristieken Elsbeek Nieuwe Sluis

Ongestuwde QH-relatie van de stuw in de Elsbeek bij de Nieuwe Sluis



Cdr/S-relatie van de Elsbeek Nieuwe Sluis [Boiten, 1995]



Bijlage 4-A, Maandtotalen neerslag en verdamping van station Hupsel periode 1992-1998

Neerslag in mm (bron: Hupsel, regenmeter: Recover)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	GEM
jan	33.6	98.4	123.1	138.8	6.5	43.4	60.6	72.1
feb	32.6	27.8	21.0	84.2	112.9	103.6	15.5	56.8
mrt	85.7	12.2	130.1	104.3	10.9	36.6	96.0	68.0
apr	61.9	49.3	68.2	40.7	9.1	36.6	110.4	53.7
mei	62.3	59.9	42.5	88.9	66.0	60.1	49.2	61.3
jun	56.3	40.8	61.1	62.2	53.6	145.7	168.4	84.0
jul	29.6	176.4	37.2	45.1	75.9	119.5	72.3	79.4
aug	107.6	47.2	71.9	22.1	160.8	45.1	55.9	72.9
sep	37.7	151.9	114.4	95.0	42.0	29.3	181.7	93.1
okt	74.2	93.6	97.8	24.1	73.4	76.4	147.6	83.9
nov	112.6	45.8	74.3	37.3	123.1	22.2	83.6	71.3
dec	61.2	177.8	121.8	35.9	58.1	68.0	66.7	84.2
SOM	755.3	981.2	963.2	778.7	792.3	786.6	1107.9	

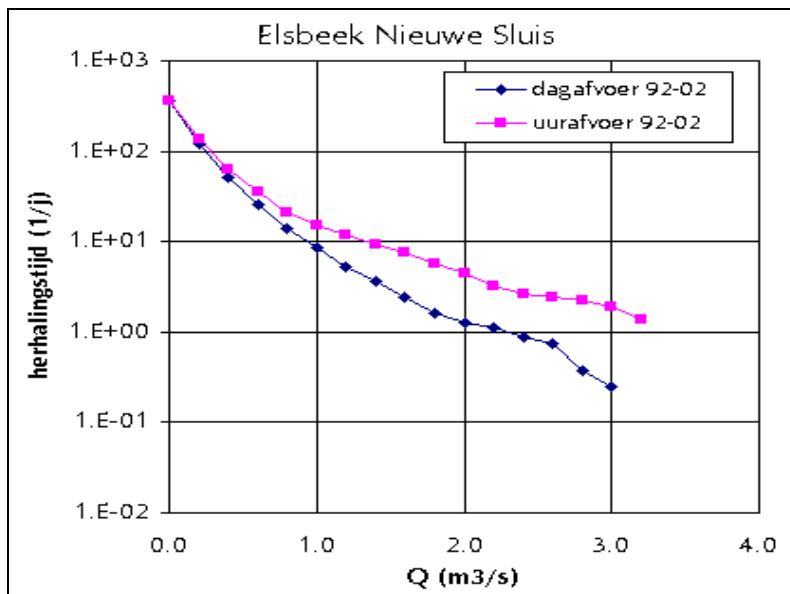
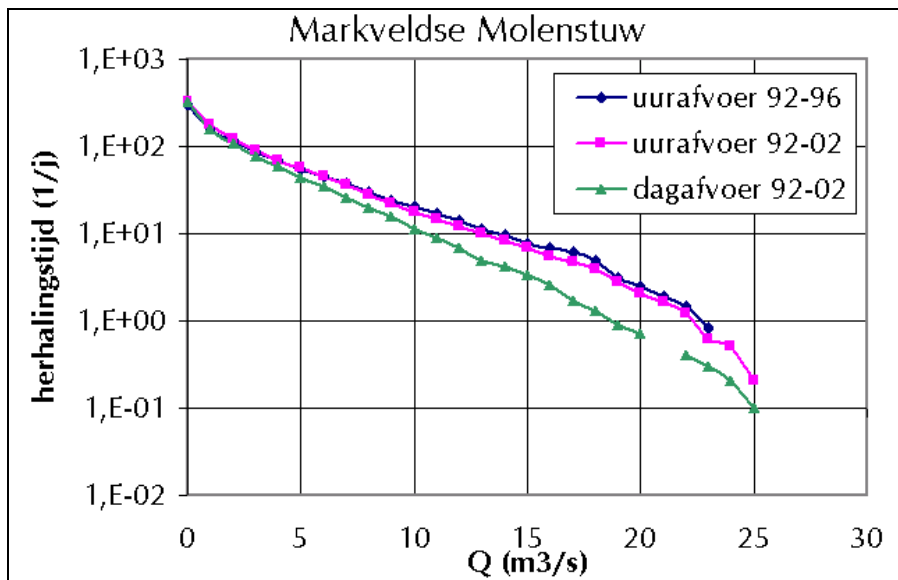
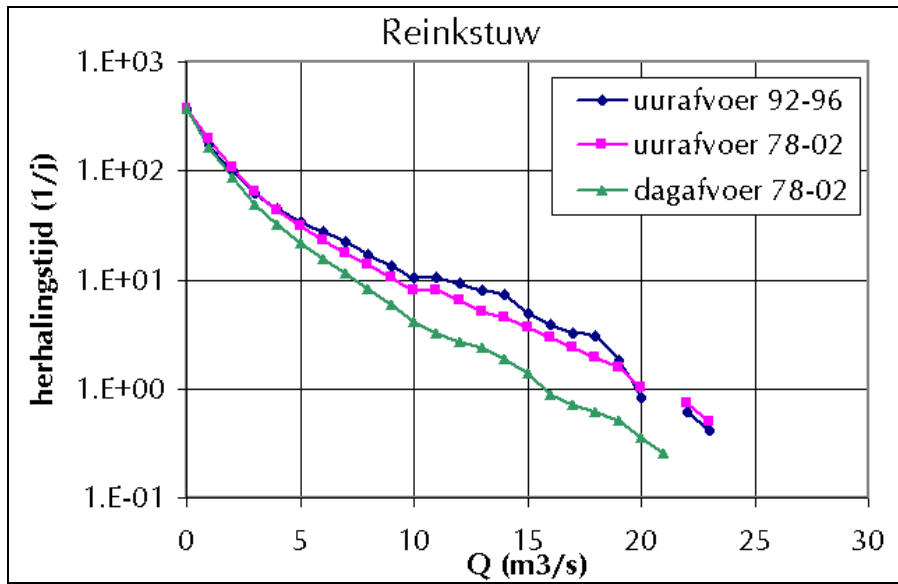
Actuele verdamping in mm (bron: referentie-verdamping Hupsel, maal factor 0,9)

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	GEM
jan	6.8	7.4	6.7	7.9	8.2	6.4	7.4	7.3
feb	14.7	10.4	12.7	12.5	10.8	12.8	15.2	12.7
mrt	25.7	38.0	26.9	32.6	28.8	30.0	26.0	29.7
apr	46.6	53.4	44.4	45.4	60.9	50.6	38.7	48.6
mei	98.6	79.0	64.0	79.6	55.7	76.2	80.1	76.2
jun	91.4	79.1	74.0	80.2	83.7	88.9	68.8	80.9
jul	88.0	68.4	111.2	108.3	83.3	80.1	70.5	87.1
aug	67.0	59.0	71.6	92.1	71.0	86.1	75.7	74.6
sep	45.0	35.9	34.3	40.2	44.3	53.3	38.8	41.7
okt	22.2	21.7	24.1	28.8	25.7	24.8	15.5	23.2
nov	9.8	8.8	10.1	10.9	7.7	9.0	10.3	9.5
dec	5.6	3.7	5.6	5.4	4.9	5.0	5.4	5.1
SOM	521.3	464.9	485.6	543.8	484.9	523.2	452.3	

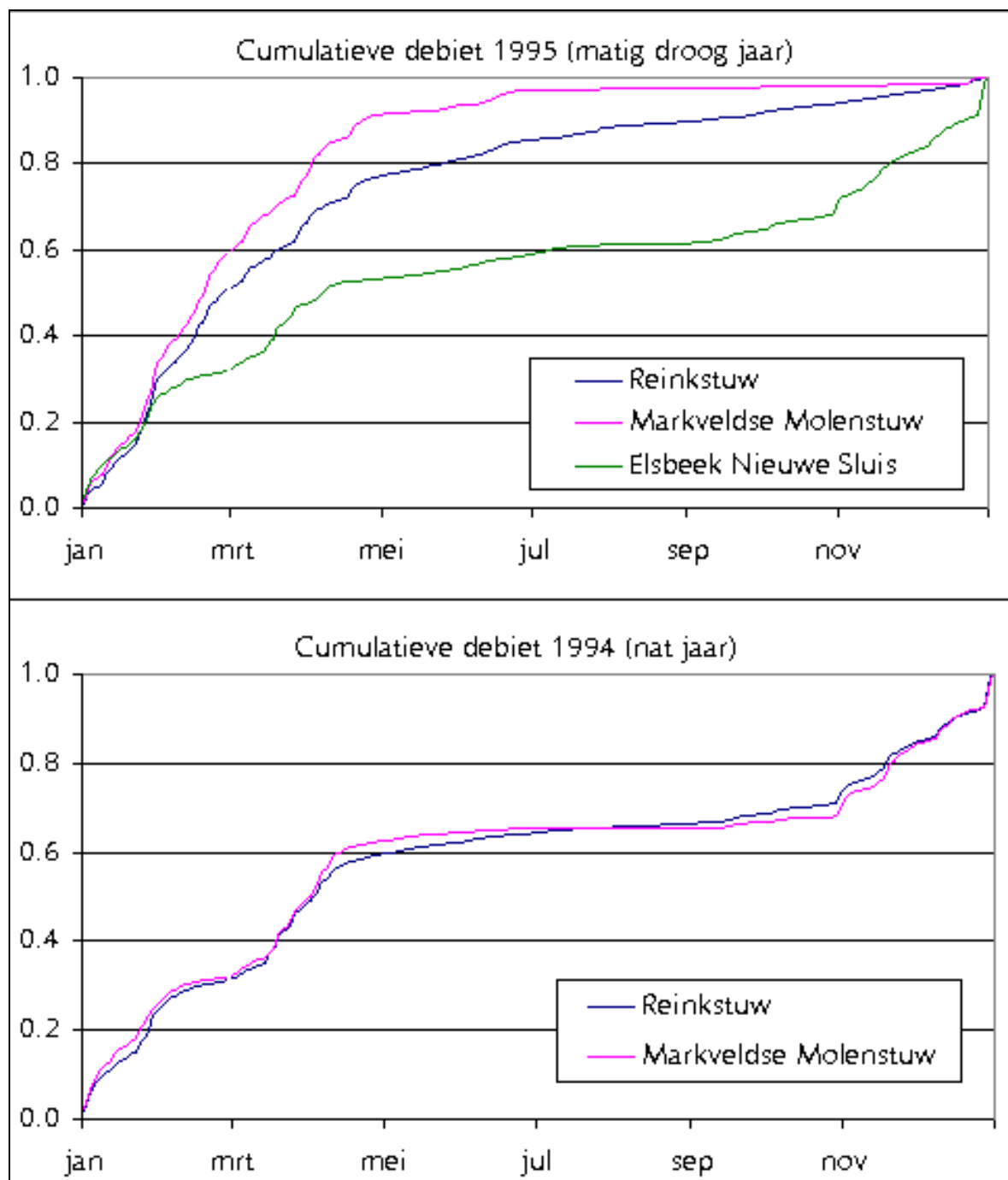
Neerslagoverschot / -tekort in mm

	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	GEM
jan	26.8	91.0	116.5	130.9	-1.7	37.1	53.2	64.8
feb	18.0	17.4	8.3	71.7	102.1	90.8	0.3	44.1
mrt	60.0	-25.7	103.2	71.7	-17.9	6.6	70.0	38.3
apr	15.3	-4.1	23.8	-4.7	-51.8	-14.0	71.7	5.2
mei	-36.3	-19.1	-21.5	9.4	10.3	-16.1	-30.9	-14.9
jun	-35.1	-38.3	-12.9	-18.0	-30.1	56.8	99.6	3.1
jul	-58.4	108.0	-74.0	-63.2	-7.5	39.4	1.8	-7.7
aug	40.7	-11.9	0.2	-70.0	89.8	-41.0	-19.8	-1.7
sep	-7.3	116.0	80.1	54.8	-2.3	-24.0	142.9	51.5
okt	51.9	71.9	73.7	-4.7	47.8	51.7	132.1	60.6
nov	102.8	37.0	64.2	26.4	115.4	13.2	73.4	61.8
dec	55.6	174.2	116.2	30.5	53.2	63.0	61.3	79.1
SOM	234.0	516.4	477.7	234.9	307.4	263.4	655.7	

Bijlage 4-B, Frequentiecurves van de afvoeren van de meetstuwen

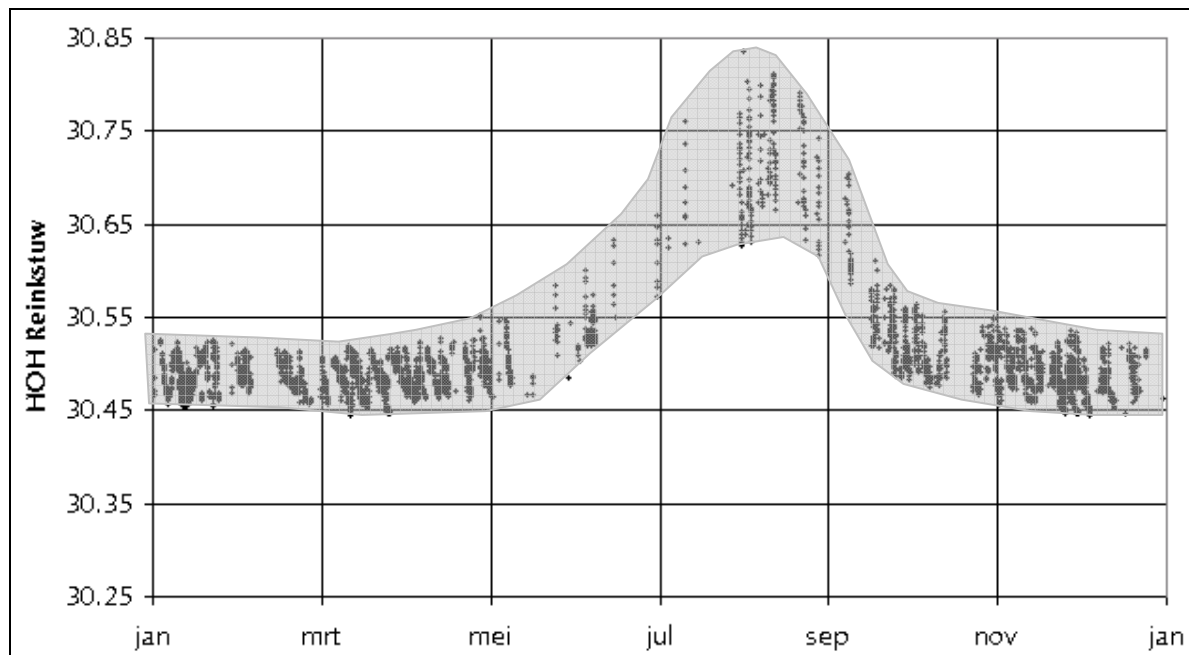


Bijlage 4-C, Cumulatieve procentuele afvoeren van de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw (1994 en 1995)



Bijlage 4-D, Seizoensafhankelijke hydraulische weerstand

Aangezien de fysische vorm en afmetingen van de Buuserbeek niet veranderen in de tijd is de relatie tussen het debiet en de waterhoogte op een punt in de Buuserbeek is ongeveer constant. Uit de onderstaande figuur blijkt echter dat dit niet het geval is. De oorzaak hiervoor is de niet-constante begroeiing van de oevers en waterbodem van de Buuserbeek. Dit betekent dat de waterstanden in de zomerperiode door een relatief hoge leidingweerstand hoger zijn dan in de winter bij eenzelfde debiet.



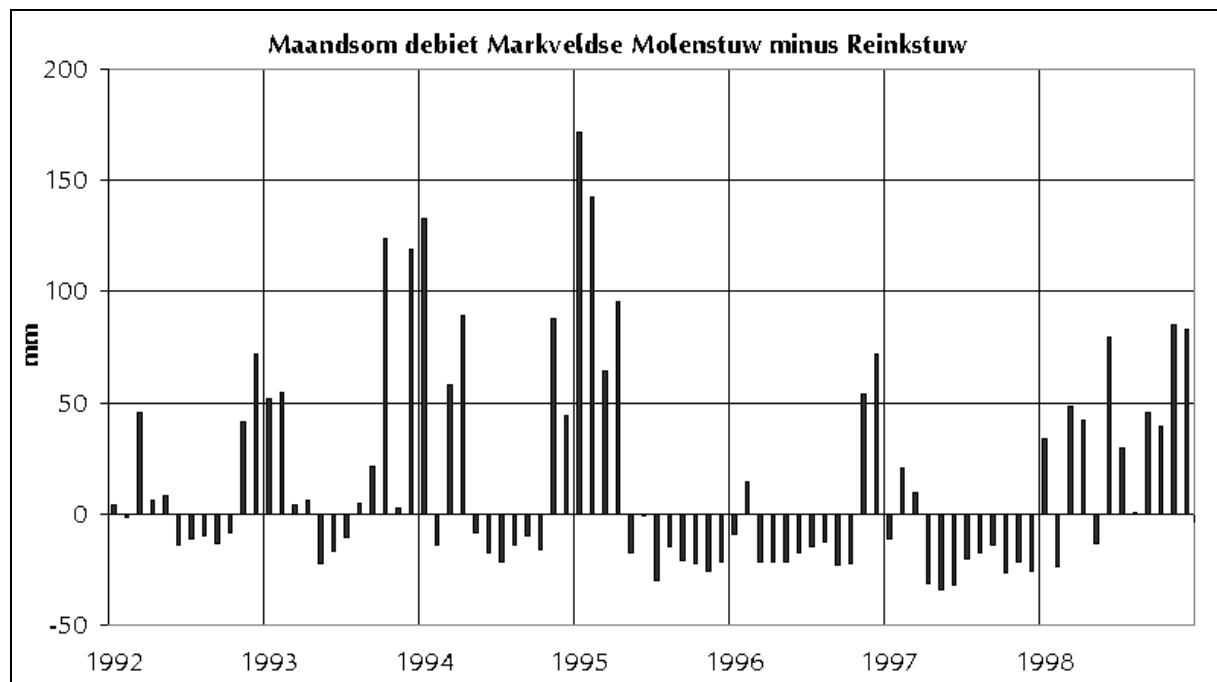
Een selectie van de HOH-gegevens van de Reinkstuw (2000-2002), bij debieten tussen de 2 en 3 m³/s. De minimale waterstand in het betreffende peilvak wordt opgelegd door een vaste overlaat met een kruinhoogte van 30,26 m+N.A.P.

Bijlage 4-E, Tabel maandelijks waterbalans 'beektraject'

	Q_R - Q_{MM} mm/maand	Q_{platerink} mm/maand	P mm/maand	ET mm/maand	Rest mm/maand
Jan-92	4.3		34.8	3.0	27.5
Feb-92	-2.1		32.6	13.7	21.1
Mar-92	47.1		84.5	23.7	13.7
Apr-92	6.7		57.1	45.8	4.6
May-92	8.7	1.3	38.9	88.9	-60.0
Jun-92	-16.0	1.3	85.7	93.5	6.9
Jul-92	-12.2	1.3	29.6	86.6	-46.0
Aug-92	-10.9	1.3	80.0	76.0	13.7
Sep-92	-15.0	1.3	65.3	46.2	32.8
Oct-92	-9.5		71.5	24.8	56.2
Nov-92	47.8		115.0	10.5	56.7
Dec-92	77.2		61.4	5.5	-21.2
Jan-93	57.1		83.5	3.8	22.6
Feb-93	67.1		42.7	10.7	-35.1
Mar-93	3.8		12.2	32.0	-23.6
Apr-93	6.6		49.3	49.2	-6.6
May-93	-23.7	1.3	44.8	79.7	-12.6
Jun-93	-19.2	1.3	55.9	78.0	-4.3
Jul-93	-11.4	1.3	166.1	73.7	102.5
Aug-93	5.6	1.3	56.2	58.0	-8.7
Sep-93	24.5	1.3	153.2	40.0	87.4
Oct-93	137.6		93.6	23.0	-67.1
Nov-93	3.3		45.8	10.3	32.3
Dec-93	127.8		130.3	3.9	-1.3
Jan-94	147.1		161.0	2.9	11.0
Feb-94	-17.1		30.6	13.4	34.3
Mar-94	58.4		127.0	22.4	46.1
Apr-94	101.9		71.3	43.1	-73.7
May-94	-9.3	1.3	42.5	61.0	-10.5
Jun-94	-19.9	1.3	54.5	71.8	1.2
Jul-94	-23.0	1.3	43.7	109.9	-44.5
Aug-94	-15.2	1.3	71.9	75.6	10.1
Sep-94	-11.7	1.3	114.5	40.5	84.3
Oct-94	-18.1		51.0	26.4	42.7
Nov-94	100.9		121.1	10.5	9.7
Dec-94	47.7		91.9	5.7	38.5
Jan-95	190.2		150.5	3.6	-43.3
Feb-95	174.7		102.5	13.4	-85.6
Mar-95	64.7		87.1	29.1	-6.7
Apr-95	109.4		57.8	44.4	-95.9
May-95	-18.8	1.3	70.4	73.7	14.3
Jun-95	-0.9	1.3	80.6	76.4	3.8
Jul-95	-31.8	1.3	45.1	106.9	-31.3
Aug-95	-16.2	1.3	19.1	99.5	-65.5
Sep-95	-24.1	1.3	94.0	45.4	71.4

Oct-95	-24.8		28.2	29.8	23.2
Nov-95	-29.5		37.0	13.5	53.0
Dec-95	-22.9		36.2	4.6	54.5
Jan-96	-10.3		5.9	3.7	12.4
Feb-96	17.1		113.5	11.5	84.9
Mar-96	-22.7		9.8	25.3	7.2
Apr-96	-24.7		10.2	58.2	-23.3
May-96	-23.2	1.3	66.0	50.8	37.2
Jun-96	-19.7	1.3	43.1	91.3	-29.8
Jul-96	-16.1	1.3	77.0	79.0	12.8
Aug-96	-14.0	1.3	99.5	76.5	35.7
Sep-96	-26.2	1.3	98.8	45.8	77.9
Oct-96	-24.7		79.6	26.5	77.8
Nov-96	61.4		114.5	8.9	44.2
Dec-96	77.0		74.4	4.7	-7.3
Jan-97	-12.8		42.7	3.2	52.4
Feb-97	25.8		104.3	12.2	66.3
Mar-97	9.7		33.7	25.1	-1.1
Apr-97	-36.1		21.5	54.1	3.5
May-97	-36.3	1.3	78.1	65.3	47.8
Jun-97	-36.6	1.3	125.9	97.0	64.2
Jul-97	-22.1	1.3	131.3	74.2	77.9
Aug-97	-19.7	1.3	49.4	91.4	-23.5
Sep-97	-16.3	1.3	33.0	56.1	-8.1
Oct-97	-29.1		76.4	25.3	80.3
Nov-97	-24.6		16.2	12.2	28.7
Dec-97	-28.0		70.8	4.7	94.1
Jan-98	37.6		61.0	3.6	19.8
Feb-98	-29.3		18.4	15.3	32.3
Mar-98	48.3		96.0	20.7	27.0
Apr-98	47.9		110.4	39.7	22.8
May-98	-14.6	1.3	36.8	76.0	-25.8
Jun-98	91.1	1.3	175.6	73.0	10.2
Jul-98	31.9	1.3	46.4	68.8	-55.5
Aug-98	0.5	1.3	86.9	76.2	8.8
Sep-98	52.1	1.3	181.7	42.2	86.1
Oct-98	44.0		137.8	17.1	76.7
Nov-98	97.6		85.3	11.5	-23.8
Dec-98	89.1		70.0	4.9	-24.0
SOM	1461	46	6162	3456	1199

Bijlage 4-F, Verschil in maandtotaal afvoer tussen de Reinkstuw en de Markveldse Molenstuw voor de periode 1992-1998



Bijlage 5-A Kunstwerken in Sobek

In deze bijlage worden de afvoer-vergelijkingen weergegeven van de typen kunstwerken die in neerslagafvoermodel zijn gebruikt [WL I Delft Hydraulics, 2001]. Deze kunstwerken zijn de stuw (weir), de universele stuw (universal weir) en de schuif (orifice).

Weir

Brede rechthoekige stuw

$$Q = c_e \cdot c_w \cdot W_s \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot g} \cdot (h_1 - z_s)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{free flow})$$

$$A_f = W_s \cdot \frac{2}{3} (h_1 - z_s) \quad (\text{free flow})$$

$$Q = c_e \cdot c_w \cdot W_s \cdot \left(h_1 - z_s - \frac{u_s^2}{2 \cdot g} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad (\text{submerged flow})$$

$$A_f = W_s \cdot \left(h_1 - z_s - \frac{u_s^2}{2 \cdot g} \right) \quad (\text{submerged flow})$$

$$\text{free flow} \quad h_1 - z_s > \frac{3}{2} \cdot (h_2 - z_s)$$

$$\text{submerged flow} \quad h_1 - z_s \leq \frac{3}{2} \cdot (h_2 - z_s)$$

A_f	wetted area (m ²)
c_e	discharge coefficient (-)
c_w	lateral contraction coefficient (-)
g	gravity acceleration (m/s ²)
h_1	upstream waterlevel (m+ref.lev.)
h_2	downstr. waterlevel (m+ref.lev.)
W_s	crest width (m)
Q	discharge across weir (m ³ /s)
u_s	velocity over crest (m/s)
z_s	crest level (m+ref.lev.)

Universal weir

Kruinvorm is definiëerbaar

$$Q = \sum Q_i \quad \text{en} \quad A_f = \sum A_{fi} \quad (\text{free flow})$$

$$Q = \sum 0,8 \cdot Q_i \quad \text{en} \quad (\text{submerged flow})$$

$$Q_i = c \cdot A_{fi} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (1 - \alpha)(h_1 - z_s)} \quad (\text{rectangular section})$$

$$Q_i = c \cdot A_{fi} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad (\text{triangular section})$$

A_{fi}	area of cross section
c	coefficient (-), normally between 0,85 and 1,37
α	flow height scaling factor (-) normally 2/3

Orifice

$$Q = c_w \cdot W_s \cdot \mu \cdot d_g \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - (z_s + \mu \cdot d_g))} \quad (\text{free orifice flow})$$

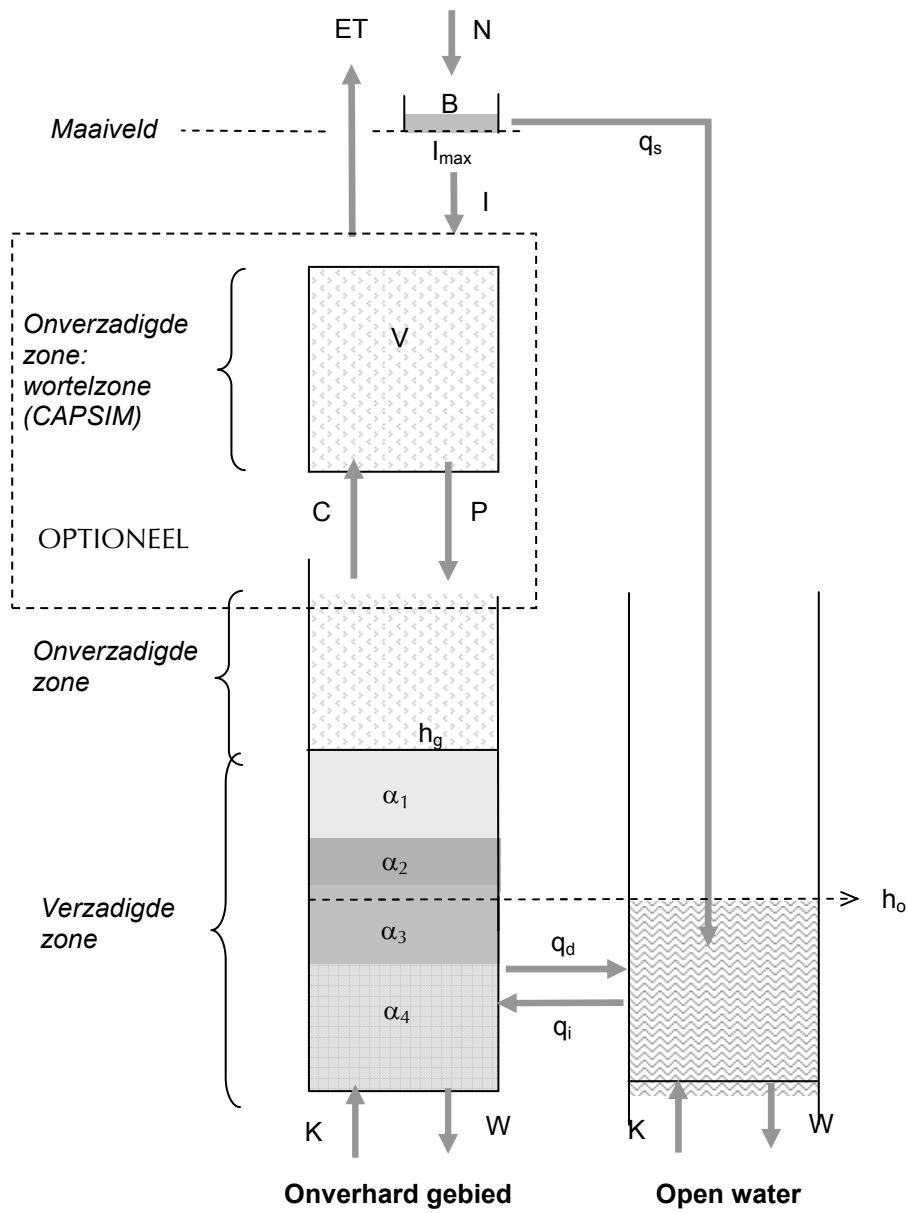
$$Q = c_w \cdot W_s \cdot \mu \cdot d_g \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad (\text{submerged orifice flow})$$

$$A_f = W_s \cdot \mu \cdot d_g \quad (\text{free and submerged orifice flow})$$

free orifice flow	$h_1 - z_s \geq \frac{3}{2} \cdot d_g$	and	$h_2 \leq z_s + d_g$
submerged orifice flow	$h_1 - z_s \geq \frac{3}{2} \cdot d_g$	and	$h_2 > z_s + d_g$
free weir flow	$h_1 - z_s < \frac{3}{2} \cdot d_g$	and	$h_1 - z_s > \frac{3}{2} \cdot (h_2 - z_s)$
submerged weir flow	$h_1 - z_s < \frac{3}{2} \cdot d_g$	and	$h_1 - z_s \leq \frac{3}{2} \cdot (h_2 - z_s)$

μ	contraction coefficient (-), normally 0,63
d_g	opening height (m)

Bijlage 5-B Neerslagafvoer-schematisatie in Sobek



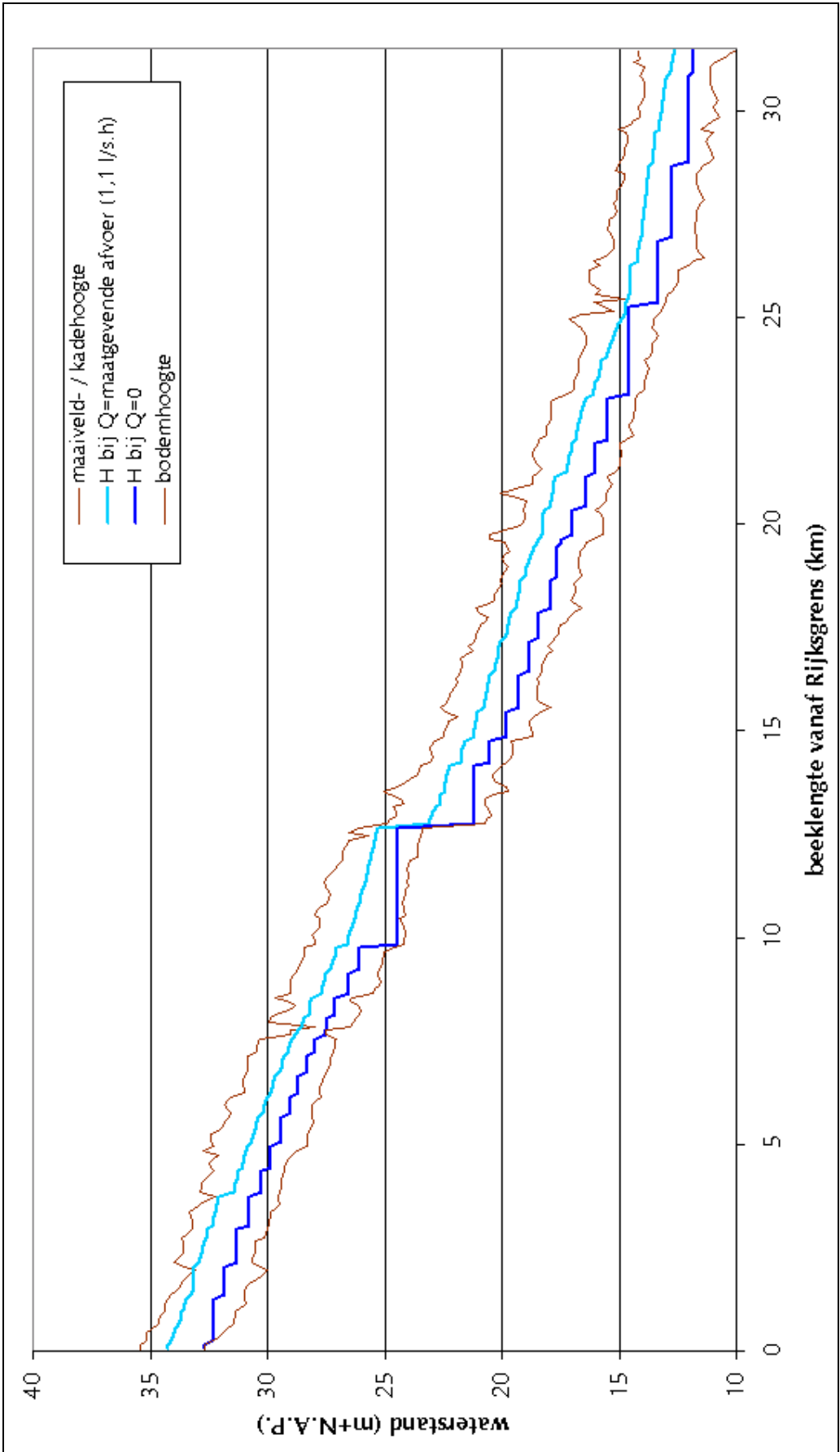
B	berging op het maaiveld (L)	K	kwel (LT^{-1})
C	Capillaire opstijging (LT^{-1})	N	neerslag (LT^{-1})
ET	actuele verdamping (LT^{-1})	q_d	drainage (LT^{-1})
h_g	grondwaterstand (L)	q_i	infiltratie (LT^{-1})
h_o	oppervlaktewaterpeil (L)	q_s	oppervlakte-afvoer (LT^{-1})
V	berging bodemvocht wortelzone (L)	W	wegzijing (LT^{-1})
I	infiltratie (LT^{-1})		
I_{max}	maximale infiltratiecapaciteit (L)		

Bijlage 6-A Overzicht kunstwerken in het neerslagafvoermodel

Sobek ID	naam	type kunstwerk	Kruin hoogte (m+N.A.P.)	Totale breedte (m)	Afstand van Rijksgrens (m)
in de Buurserbeek / Schipbeek					
dam1		vaste overlaat	32.28	20.50	1236
dam2		vaste overlaat	31.86	24.00	2044
dam3		vaste overlaat	31.28	24.00	2911
dam4	Reinkstuw	vaste overlaat*	30.79	13.20	3767
dam5		vaste overlaat	30.26	22.00	4306
dam6		vaste overlaat	29.90	23.00	4967
dam7		vaste overlaat	29.44	25.50	5621
dam8		vaste overlaat	29.01	26.00	6197
dam9		vaste overlaat	28.72	25.50	6695
dam10		vaste overlaat	28.27	25.00	7185
dam11		vaste overlaat	28.00	24.00	7617
dam12		vaste overlaat	27.45	25.01	8100
dam13		vaste overlaat	27.12	25.01	8556
dam14		vaste overlaat	26.53	26.00	9124
dam15		vaste overlaat	26.10	25.00	9793
Schotbalk		vaste overlaat	25.05	7.54	
molenstuw	Oosterdorper watermolen	vaste overlaat	25.10	2.70	
Molen_orifice	Oosterdorper watermolen	Onderdoorlaat	23.51	5.52	
stuwduiker2	stuwduiker	regelbare klepstuw	23.51	4.80	12698
dam16		vaste overlaat	21.18	28.01	13464
dam17		vaste overlaat	21.15	27.51	14160
dam18		vaste overlaat	20.49	27.51	14803
dam19		vaste overlaat	19.78	26.00	15681
dam20		vaste overlaat	19.27	29.50	16525
dam21		vaste overlaat	18.82	26.00	17301
dam22		vaste overlaat	18.40	26.50	18067
dam23		vaste overlaat	17.91	26.01	18870
dam24		vaste overlaat	17.64	26.81	19654
Stuw19837		vaste overlaat	17.44	26.36	19837
dam25		vaste overlaat	16.96	27.50	20538
dam26		vaste overlaat	16.55	25.01	21358
dam27		vaste overlaat	16.00	34.10	22143
Markveldstuw	Markveldse Molenstuw	vaste overlaat*	15.46	13.50	23300
dam28		vaste overlaat	14.53	27.01	24128
Nsluis_vast	Nieuwe Sluis	vaste overlaat	14.70	10.00	25500
Nsluis_schuif	Nieuwe Sluis	Onderdoorlaat	14.45	6.00	25500
Zandvang_Vaste overl		vaste overlaat	14.00	5.60	26588
Zandvang_Schuif		Onderdoorlaat	12.00	4.00	26588
dam29		vaste overlaat	13.32	31.90	27205
dam30		vaste overlaat	12.75	30.01	29140
BovenLoch		vaste overlaat	12.00	31.50	31340
BenedenLoch		vaste overlaat	11.32	30.50	31900
kunstwerken in zijwatergangen					
zodde	stuw in zoddebeek	vaste overlaat	28.55	5.60	
Stuw_Elsbeek	Elsbeek Nieuwe Sluis	regelbare klepstuw*	14.30	3.00	

*meetstuw

Bijlage 6-B Lengteprofiel van gemodelleerde Buurserbeek

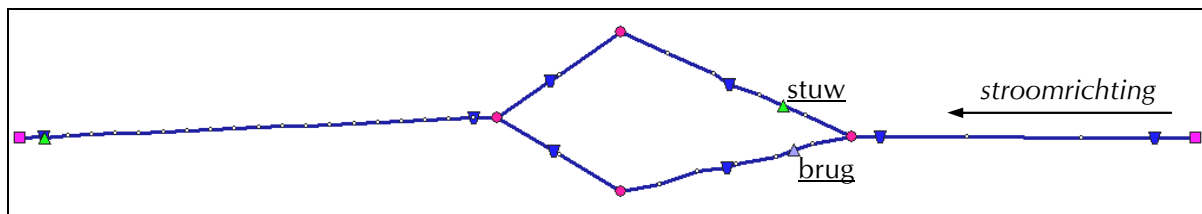


Bijlage 6-C Berekening van de opstuwing van een brug tijdens een afvoergolf

In deze bijlage wordt middels een eenvoudige modelberekening aangetoond of het relevant is bruggen in de schematisatie van het Buurserbeekmodel op te nemen. Wanneer de opstuwing van de gemodelleerde een vereenvoudigde Grensbrug minder is dan 10 cm bij $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$, worden de bruggen niet gemodelleerd in het Buurserbeekmodel.

Schematisatie van de Grensbrug

- in het model is zowel de afvoer onder als over de brug gesimuleerd, door de waterloop plaatselijk op te splitsen in twee parallelle waterlopen met daarin een stuw of een brug (figuur I)



Figuur I Modelschematisatie testbrug, ▽=beekprofiel, ●= knooppunt

- om het effect van de brug op de waterstanden volledig terug te voeren op de eigenschappen van de brug (vgl. I) zijn alle waterlopen, stuwen en de brug rechthoekig met een breedte van 6 m
- De brug bevindt zich 2 m boven de leidingbodem, waardoor het maximale doorstroombare oppervlak 12 m^2 wordt
- Het brugdek is 20 cm dik
- De (constante) intreed-weerstand en de weerstand over de bruglengte zijn verwaarloosd. Hierdoor staat de totale weerstand van de brug gelijk aan de uitteerd-weerstand, die afhankelijk is van A_f/A_{f2} (vgl II)
- In het veld bleek dat de Grensbrug bij een debiet van $13 \text{ m}^3/\text{s}$ bijna de waterspiegel raakte. Op basis van dit gegeven is de leidingweerstand gekozen: Bos en Bijkerk: $\gamma=23$ (-)

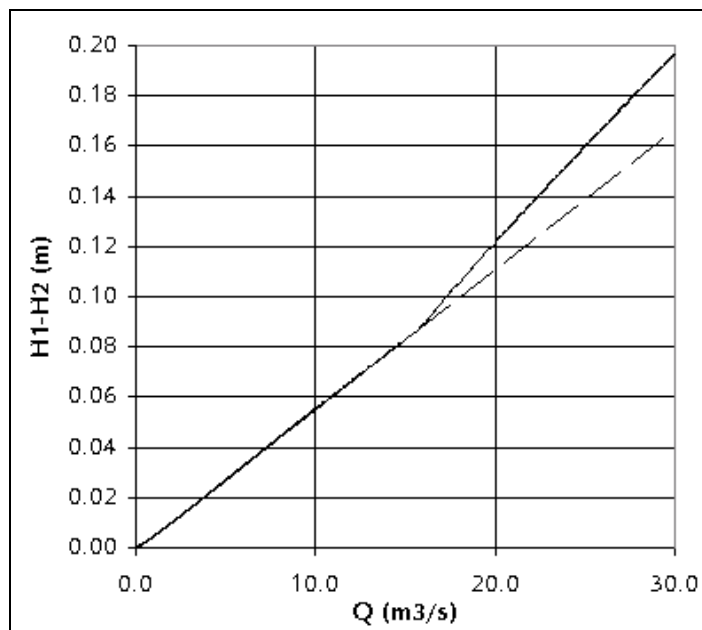
$$Q = \mu \cdot A_f \cdot \sqrt{2g \cdot (h_1 - h_2)} \quad (I) \qquad \mu = \left(1 - \frac{A_f}{A_{f2}}\right)^{-1/2} \quad (II)$$

μ	coëfficiënt berekend uit weerstanden (-)
A_f	nat oppervlak onder de brug (m^2)
A_{f2}	nat oppervlak in de waterloop na de brug (m^2)
g	zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
h_1	bovenstroomse waterhoogte (m+N.A.P.)
h_2	benedenstroomse waterhoogte (m+N.A.P.)

Scenario en resultaten

Het model is doorgerekend met een fictieve afvoergolf met een top van $30 \text{ m}^3/\text{s}$. De resultaten van deze berekening staan in figuur II. Uit figuur II zijn de volgende conclusie te trekken:

1. Sobek berekend door een vereenvoudigde brug-vergelijking geen reële opstuwing. In figuur II bereikt de waterstand pas bij $Q=16 \text{ m}^3/\text{s}$ het brugdek. Pas vanaf dit debiet zou er opstuwing moeten plaatsvinden. In de grafiek is te zien dat er al bij lagere afvoeren sprake is van opstuwing. Dit is het gevolg van het feit dat de Q in vgl. I afhankelijk is van h_1-h_2 . Hierdoor is bij $Q>0 \rightarrow h_1-h_2>0$
2. De berekende opstuwing als gevolg van een vernauwd doorstroombaar profiel is bij $30 \text{ m}^3/\text{s}$ slechts 3 cm.



Figuur II Relatie tussen het debiet en het verschil in waterniveau voor en na de Grensbrug

Bijlage 6-D Oppervlakten afwaterende gebieden

De ID-namen die in het Tauw-model zijn gebruikt zijn gebaseerd op de nummering van waterlopen van het waterschap 'De Schipbeek'.

Naam	ID (model)	Oppervlakten (ha)	
		Tauw-model	Rural-model
Beginpunt	B0	14280	14280
	Wtg1_22	346	392
	Wtg1_21	46	
	Wtg1_20	111	111
	Wtg1_19	337	337
Zoddebeek	Zodde	1924	1924
	Wtg1_17	47	
	Wtg1_15	432	479
	Wtg1_14	109	109
	Wtg1_13a	25	
	Wtg1_13	112	137
	Wtg1_12	203	264
	3120	61	
	Wtg1_10	156	156
	Wtg1_09	236	236
Elsbeek	Elsbeek	2099	2099
SOM		20524	20524

Bijlage 6-E Ingevoerde parameterwaarden model RR

Rainfall-Runoff area Elsbeek

Area	2099 ha	
land use	grass	
soiltype	light loamy medium course sand ($\mu=0,084$)	
depth groundwaterlayer	5 m	(=dikte dreatisch pakket)
surface level	21,5 m+ref.lev.	
boundary level	20,0 m+ref.lev.	(=ontwateringsniveau)
onland storage	30 mm	
infiltration capacity	30 mm/d	(=geen oppervlakteafoer)
seepage	-0,1 mm/d	(=wegzijing)
reactionfactor, zone 4	10^{-7}	(>1,5 m bel.surf)
reaction factor, horizontal inflow:	10^{-10}	(geen uitwisseling met het oppervlaktewater)

Calibratie	Initiele g.w.s.	= 1,1 m-mv
Validatie	Initiele g.w.s.	= 1,4 m-mv (beste 'fit')

Rainfall-Runoff area Reinkstuw

Area	14.626 ha	
land use	grass	
soiltype	light loamy medium course sand ($\mu=0,084$)	
depth groundwaterlayer	5 m	(=dikte dreatisch pakket)
surface level	32,5 m+ref.lev.	
boundary level	30,0 m+ref.lev.	(=ontwateringsniveau)
onland storage	30 mm	
infiltration capacity	30 mm/d	(=geen oppervlakteafoer)
seepage	0 mm/d	
reaction factor, horizontal inflow:	10^{-10}	(geen uitwisseling met het oppervlaktewater)

Calibratie	Initiele g.w.s.	= 1,1 m-mv
Validatie	Initiele g.w.s.	= 1,28 m-mv (beste 'fit')

Bijlage 6-F Gebruikte kengetallen voor de modelkwaliteit

Root Mean Square Error (RMSE)

De RMSE berekent het gemiddelde kwadratische verschil tussen gemeten en gemodelleerde gegevens. De RMSE is dus laag (=goed) wanneer het de gemodelleerde en gemeten gegevens dicht bij elkaar liggen.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}$$

n aantal waarden in de reeks (i=1, 2, ...n)

X waarde uit (gemeten) reeks

Y waarde uit (berekende) reeks

De RMSE is een maat voor het absolute kwadratische verschil tussen twee gegevensverzamelingen

Efficiency (EF)

De EF berekent de mate van lineaire samenhang tussen twee gegevensverzamelingen. EF varieert tussen de 0 (minimum) en 1 (maximum) en wordt door het gebruikte programma Excel berekend (met de R-kwadraat-functie):

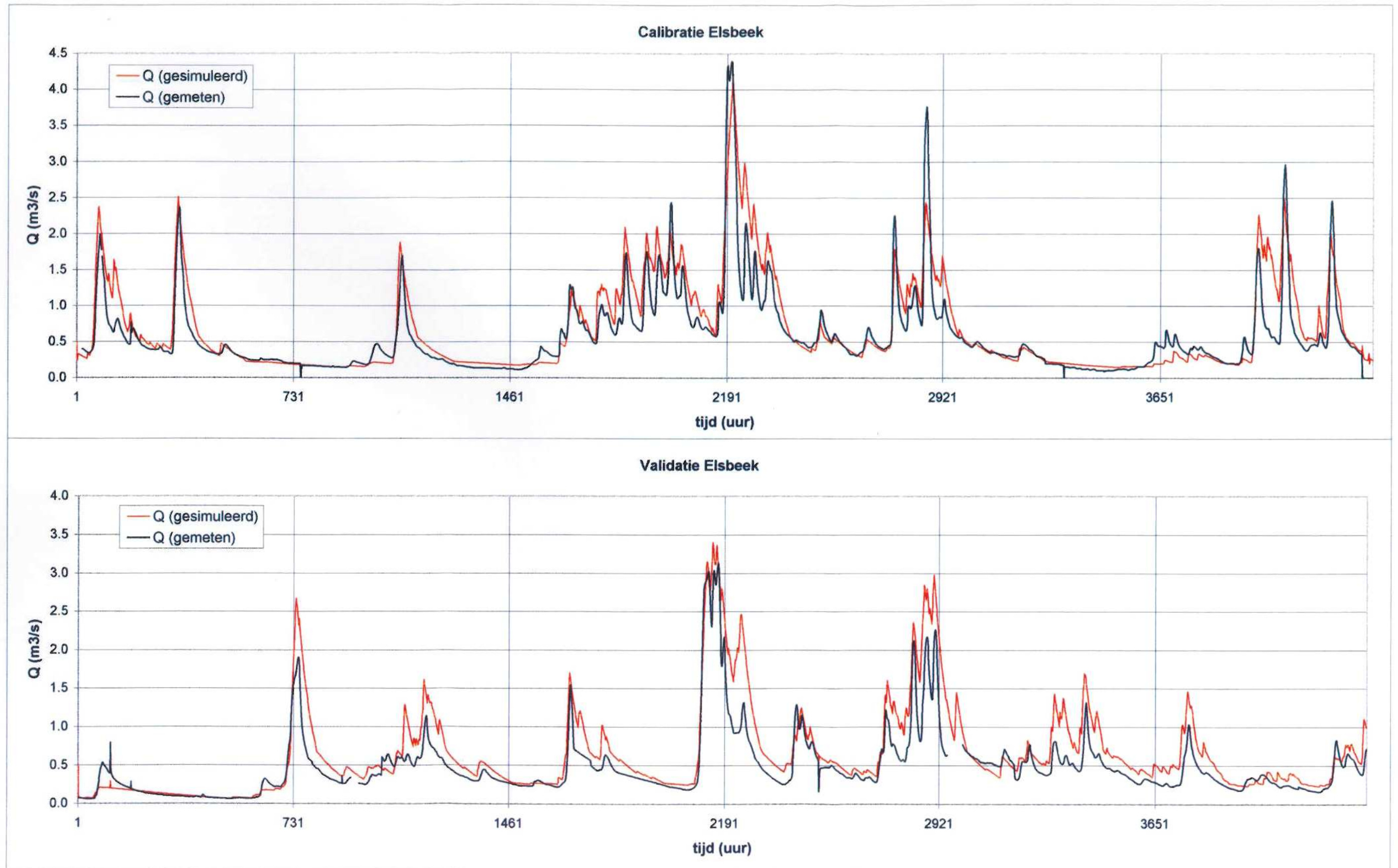
$$EF(X, Y) = [COR(X, Y)]^2$$

De EF is groot wanneer de gemeten en de berekende gegevens wat betreft vorm overeenkomen. In deze studie is onderscheid gemaakt tussen EF en EF_{\log} . De EF_{\log} wordt berekend op basis van de logatime van X en Y, waardoor de extremen in de gegevens minder bepalend worden voor de model-efficiëntie.

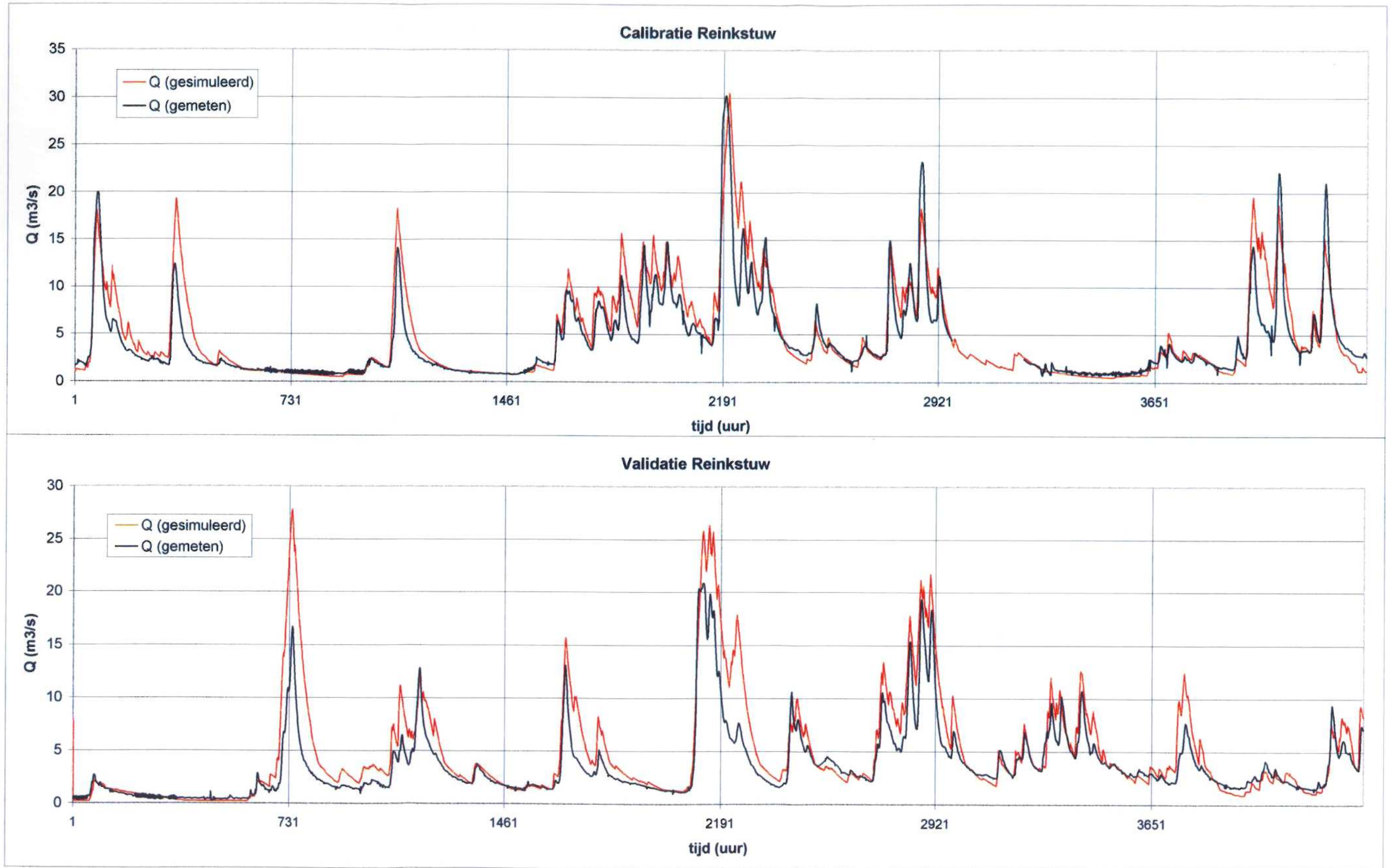
$$EF_{\log}(X, Y) = EF(\log X, \log Y)$$

De EF is een maat voor de lineaire samenhang tussen twee gegevensverzamelingen

Bijlage 6-G Calibratie en validatie neerslagafvoer Elsbeek

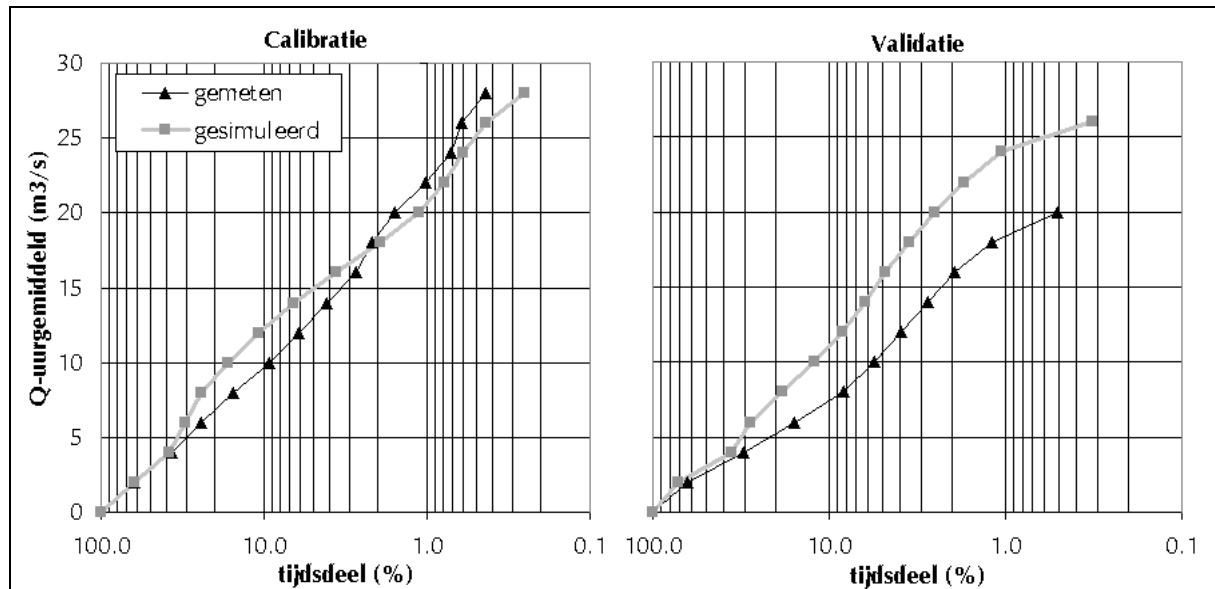


Bijlage 6-H Calibratie en validatie neerslagafvoer Reinkstuw

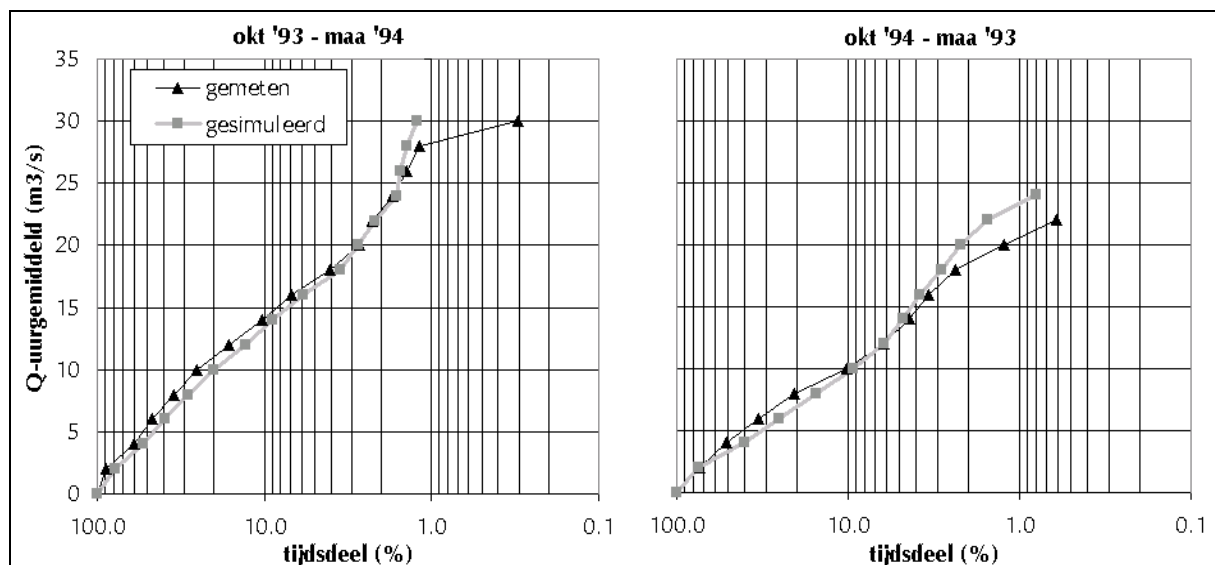


Bijlage 6-1 Frequentiecurve van gemeten en gesimuleerde neerslagafvoer

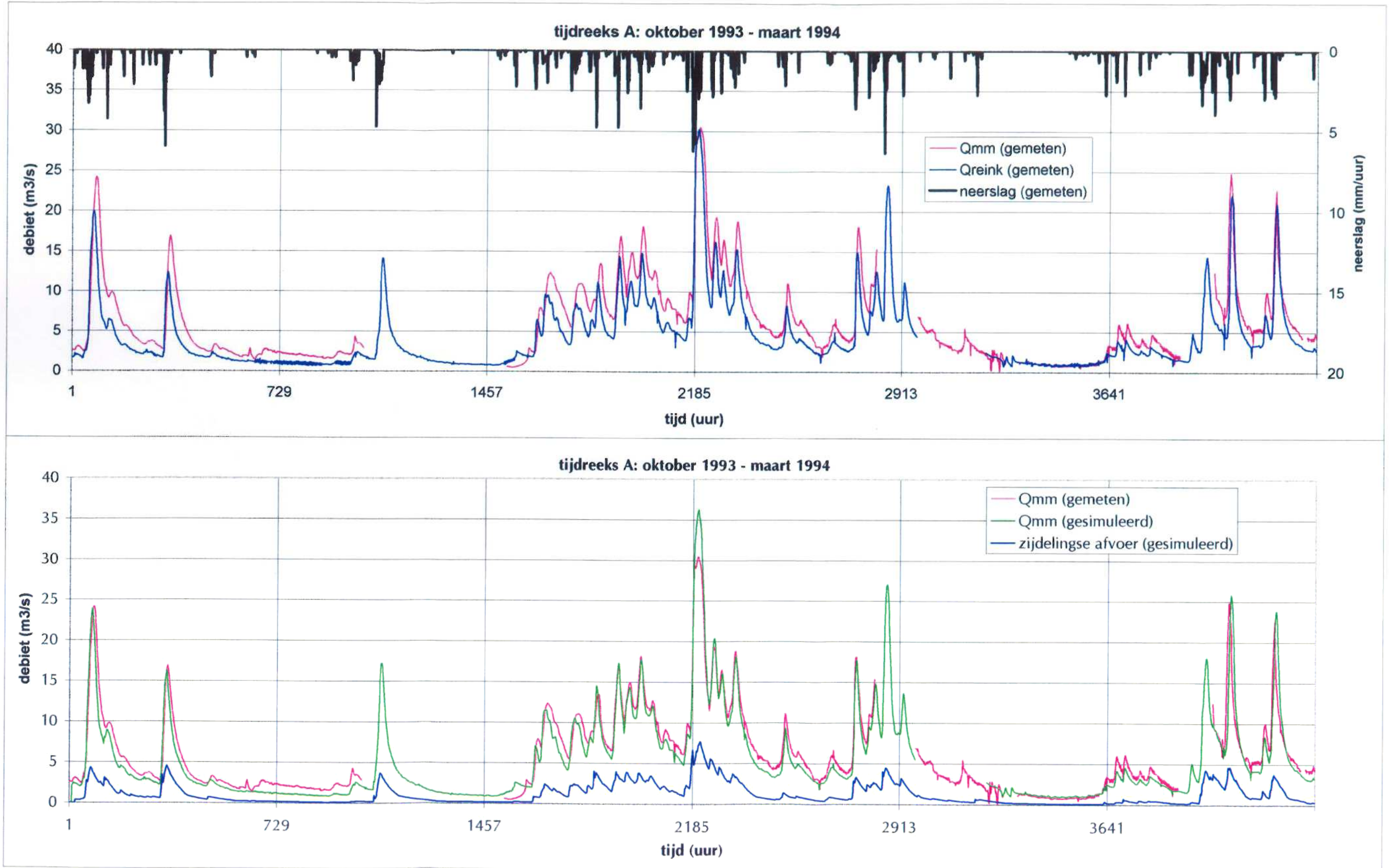
1) Frequentiecurve van gemeten en gesimuleerde afvoeren in de calibratie- en validatieperiode van de neerslagafvoer van de Reinkstuw. (tijdsdeel (%) waarin het debiet hoger is dan Q-uurgemiddeld)



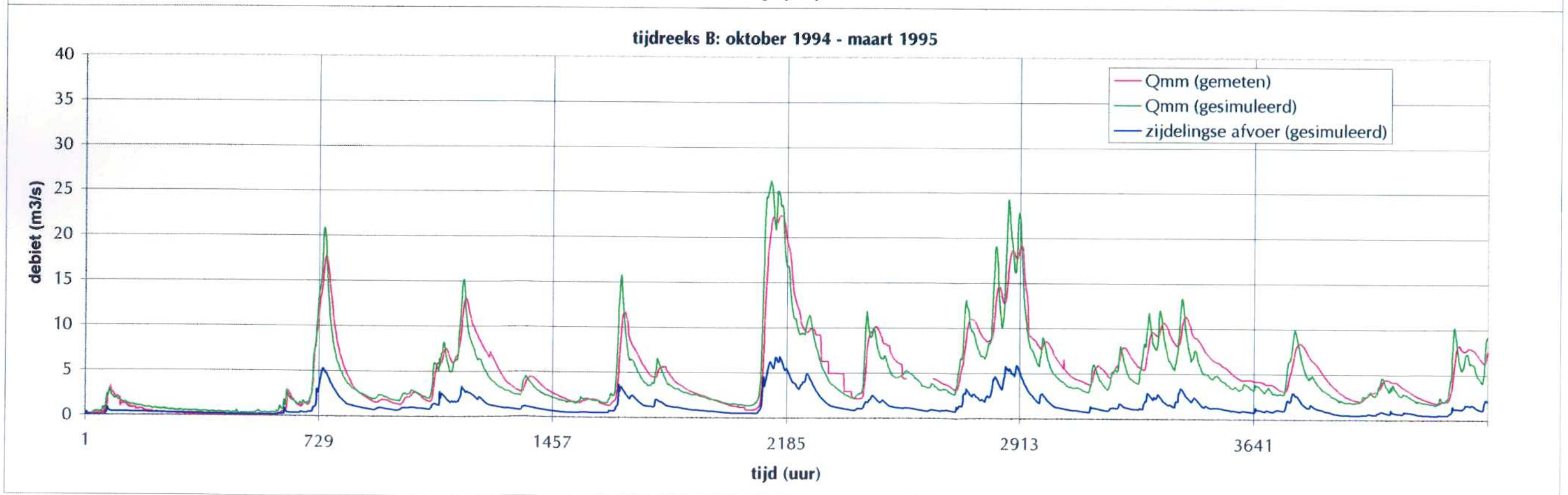
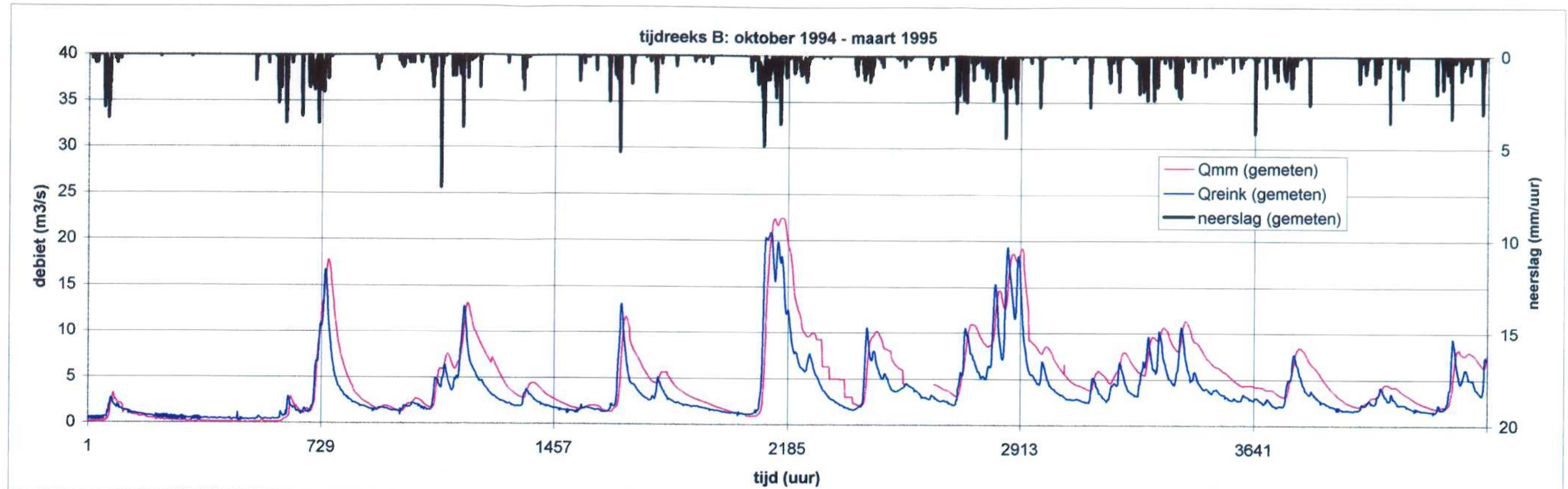
2) Frequentiecurve van gemeten en gesimuleerde afvoeren van de Markveldse molenstuw in het neerslagafvoermodel van de Buurserbeek (model CFRR)



Bijlage 6-J Resultaten neerslagafvoermodel tijdreeks A



Bijlage 6-K Resultaten neerslagafvoermodel tijdreeks B



Bijlage 6-L Resultaten scenario herstelmaatregelen

