

# **Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakken-model**

**Modelbouw, kalibratie en validatie**

**concept**





# **Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakken-model**

**Modelbouw, kalibratie en validatie**

Iris Niesten  
Aukje Spruyt



**Titel**  
Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakken-model

**Opdrachtgever**  
RWS-WVL

**Project**  
11203714-005

**Kenmerk**  
11203714-005-ZWS-0019

**Pagina's**  
145

**Trefwoorden**  
D-HYDRO, Rijntakken, Zesde generatie, Flexible Mesh.

### Samenvatting

Met het in gebruik nemen van de D-HYDRO Suite stapt RWS over van modelschematisaties in de vijfde generatie naar modelschematisaties in de zesde generatie. Het doel is om uiterlijk in 2020 de modellen voor alle watersystemen in D-HYDRO ter beschikking te hebben. In 2018 is begonnen met de opzet van een eerste zesde-generatie modelschematisatie van de Rijntakken voor de 2D-waterbeweging.

De D-HYDRO Suite werkt op basis van een ongestructureerd rooster en biedt daardoor mogelijkheden die in eerdere generaties Rijkswaterstaat-modellen niet aanwezig waren. De uitlijning van het rooster met de lokale geometrie en stroomrichting kan hierdoor significant worden verbeterd. Het rooster van het nieuwe Rijntakken-model loopt van Emmerich tot Hardinxveld-boven en Krimpen aan de Lek en inclusief het Ketelmeer en dekt de volledige Baseline-schematisatie van de vijfde generatie. In de modelbouw is verder aandacht besteed aan verbeterde invoer (baseline-)data, nieuwe implementatie van kunstwerken en stuwsturing en een aantal aangepaste fysisch-numerieke instellingen. Daarnaast is de kalibratie-aanpak aangepast, waarbij niet meer direct op de ruwheid, maar op een aparte kalibratiefactor wordt gekalibreerd. Hoewel nog niet afgerond, zijn de eerste kalibratieresultaten veelbelovend.

De opzet van het model is nog niet volledig afgerond en daarom worden de werkzaamheden in 2020 voortgezet om tot een volledig gekalibreerd en gevalideerd model te komen. In deze rapportage worden de werkzaamheden tot nu toe en de belangrijkste onderliggende keuzes beschreven.

### Referenties

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	dec. 2019	Iris Niesten Aukje Spruyt		Anke Beeker		Gerard Blom	

### Status

concept

Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doel	1
1.3	Gebruikte programmatuur en hardware	1
1.4	Organisatie en bijdragen	2
1.5	Versiebeheer	2
1.6	Leeswijzer	2
1.7	Terminologie	3
<b>2</b>	<b>Systeembeschrijving</b>	<b>5</b>
2.1	Algemeen	5
2.1.1	Stroomgebied	5
2.1.2	Sediment en morfologie	5
2.1.3	Afvoer en afvoerverdeling	5
2.2	Boven-Rijn en Waal	7
2.3	Pannerdensch Kanaal en Neder-Rijn/Lek	9
2.4	IJssel	10
2.5	Belangrijke kenmerken	11
2.5.1	Kunstwerken	11
2.5.2	Retentiegebieden en nevengeulen	17
2.5.3	Beken, rivieren en gemalen	21
2.5.4	Dijkringen en hoge gronden	21
2.6	Toepassingen van het model	21
2.7	Verbindingen met andere gebieden	23
<b>3</b>	<b>Beschikbare data</b>	<b>25</b>
3.1	Geometrie in Baseline	25
3.2	Randvoorwaarden en meetgegevens	26
3.2.1	Aangeleverde data	26
3.2.2	Randvoorwaarden laterale afvoeren	26
3.3	Fictieve randvoorwaarden	27
<b>4</b>	<b>Modelopzet</b>	<b>29</b>
4.1	Roosterontwerp	29
4.1.1	Methodiek	29
4.1.2	Aanpak	30
4.1.3	Roostereigenschappen	31
4.1.4	Roosterontwerp in overlapgebieden	32
4.2	Projectie vanuit Baseline	33
4.3	Randvoorwaarden	34
4.3.1	Open randen	34
4.3.2	Lateralen	37
4.3.3	Meteorologie	38
4.3.4	Initiële condities	38
4.4	Schematisatie en aansturing kunstwerken	38
4.4.1	Stuwen Neder-Rijn – Lek	39
4.4.2	Regelwerken	40

4.4.3	Inlaat Veessen-Wapenveld	41
4.4.4	Kunstwerken Betuwepand	41
4.4.5	Duikers en inlaatsluizen	42
4.4.6	Bruggen	43
4.5	Definitie ruwheden	44
4.5.1	Zomerbed	44
4.5.2	Winterbed	45
4.6	Fysisch-numerieke instellingen	46
4.6.1	Bodemhoogtediscretisatie	46
4.6.2	Overlaatformulering	47
4.6.3	Horizontale viscositeit en diffusiviteit	47
4.6.4	Wandruwheid	48
4.6.5	DIMR en rekentijdstappen	49
<b>5</b>	<b>Kalibratie en validatie</b>	<b>51</b>
5.1	Methodiek	51
5.1.1	Kalibratiefactor	51
5.1.2	Kalibratietrajecten	52
5.1.3	Kalibratie- en validatieperioden	54
5.1.4	Uitwerking per kalibratieperiode	56
5.1.5	Kalibratie stuwen	65
5.1.6	Kalibratieprocedure en OpenDA	65
5.1.7	Getijgedomineerde stations	66
5.2	Kalibratieresultaat	67
5.2.1	Kalibratiefactoren	67
5.2.2	Vergelijking met metingen	69
5.2.3	Discussie	72
5.3	Validatie	72
<b>6</b>	<b>Modeltoepassing</b>	<b>73</b>
6.1	Toetsing voor gebruikstoepassingen	73
6.2	Rekentijden en parallelisatie	73
<b>7</b>	<b>Samenvatting, conclusies en aanbevelingen</b>	<b>75</b>
7.1	Modelopzet	75
7.2	Kalibratie en validatie	75
7.3	Modeltoepassingen	75
7.4	Slotopmerkingen	75
<b>8</b>	<b>Referenties</b>	<b>77</b>
<b>Bijlage(n)</b>		
<b>A</b>	<b>Programma van eisen</b>	<b>A-1</b>
<b>B</b>	<b>Roosterontwerp</b>	<b>B-1</b>
B.1	Totaaloverzicht rooster	B-1
B.2	Locatiespecifieke keuzes	B-2
B.2.1	Splitsingspunt Pannerdensche Kop	B-2



B.2.2	Splitsingspunt IJsselkop	B-2
B.2.3	Regelwerk Pannerden en Regelwerk Hondsbroeksche Pleij	B-3
B.2.4	Inlaat en nevengeul Nijmegen Lent	B-3
B.2.5	Traject langsdammen	B-4
B.2.6	Afgedamde Maas	B-5
B.2.7	Groene rivier Arnhem	B-6
<b>C</b>	<b>Projectie, Baseline en geometrie</b>	<b>C-1</b>
C.1	Projectie van Baseline naar invoer voor D-Flow FM met BAS2FM	C-1
C.2	Projectie door initialisatie van Flexible Mesh	C-2
C.2.1	Punt-elementen: observation points, lateral sources,	C-2
C.2.2	Lijn-elementen: thin dams, fixed weirs, structures, cross-sections	C-2
C.2.3	Open randen	C-4
C.3	Ruwheden	C-4
C.3.1	Afleiding zomerbedruwheden	C-4
C.3.2	Ruwheidsbestand als invoer in D-HYDRO	C-17
<b>D</b>	<b>Schematisatie kunstwerken</b>	<b>D-1</b>
D.1	Aansturing kunstwerken operationeel	D-1
D.2	Aansturing kunstwerken kalibratie	D-3
<b>E</b>	<b>Overzicht numerieke instellingen</b>	<b>E-1</b>
E.1	Parameters in het .mdu-bestand	E-1
<b>F</b>	<b>Randvoorwaarden en metingen</b>	<b>F-1</b>
F.1	Overzicht metingen per meetstation	F-1
F.2	Randvoorwaarden Generator Water Modellen	F-3
F.2.1	Methode	F-3
F.2.2	Invoer	F-6
F.2.3	Uitvoer	F-7
F.3	Data	F-9
<b>G</b>	<b>Definities modelbeoordeling</b>	<b>G-1</b>
G.1	Achtergrond	G-1
G.2	Definities	G-1
G.2.1	Kalibratie	G-1
G.2.2	Validatie	G-1
G.2.3	Verificatie	G-1
G.3	Goodness-of-fit criteria	G-1
G.3.1	Bias	G-2
G.3.2	Standaardafwijking	G-2
G.3.3	Root Mean Square Error ( <i>RMSE</i> )	G-2
G.3.4	Relatieve bias	G-3
G.3.5	Variatiecoëfficiënt	G-3
G.3.6	Vershil in waarden rond extremen	G-3
G.3.7	Vershil in tijdstip van extremen	G-3
G.3.8	Overschrijdingsduur	G-3
G.3.9	Gemiddelde over stations	G-4
G.4	Middelingsduur variabelen	G-4
G.5	Nauwkeurigheidscriterium	G-4

<b>H Kalibratie en validatie</b>	<b>H-1</b>
H.1 Resultaten L1	H-1
H.1.1 Waal en (Neder-Rijn) Lek	H-1
H.1.2 IJssel	H-3
H.2 Resultaten M1	H-5
H.2.1 Waal	H-5
H.2.2 Neder-Rijn Lek	H-6
H.2.3 IJssel	H-7

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Met het in gebruik nemen van de D-HYDRO Suite stapt RWS over van modelschematisaties in de vijfde generatie naar modelschematisaties in de zesde generatie. Het doel is om uiterlijk in 2020 de modellen voor alle watersystemen in D-HYDRO ter beschikking te hebben. In 2016 zijn hiervoor al een drietal pilotstudies gedaan o.a. voor de Waal. Op basis hiervan en een aantal klankbordsessies zijn generieke specificaties voor de opzet van de zesde generatie modellen opgesteld (Spruyt et al., 2017).

Alleen tijdens de ontwikkeling van nieuwe generatie modellen kunnen methodieken gewijzigd worden, die van invloed zijn op de kalibratie en validatie (bijv. numerieke instellingen, bepaling van laterale toestromingen en Qf-relaties of de kalibratiestrategie). Ook het rekenrooster wordt opnieuw gemaakt, en er wordt overgestapt op nieuwe software. Een nieuwe generatie modellen biedt dus de kans voor een kwaliteitsimpuls.

Als eerste riviermodel in de zesde-generatie is in 2017 gewerkt aan de Maas. De modelopzet, kalibratie en validatie van dit model worden beschreven in de rapportage (De Jong & Yossef, 2017). Conclusies en beslissingen genomen in dit traject hebben invloed gehad op alle verdere modellen binnen de zesde generatie.

De modelopzet, kalibratie en validatie van het zesde-generatie model van de Rijntakken worden beschreven in deze rapportage.

## 1.2 Doel

Het doel is de ontwikkeling van een model van de Rijntakken in de D-HYDRO Suite. Dit model wordt opgezet voor meerdere historische situaties en gekalibreerd en gevalideerd op historische metingen. Het model moet geschikt zijn voor verschillende toepassingen, die staan beschreven in Hoofdstuk 2.6.

## 1.3 Gebruikte programmatuur en hardware

Binnen het project is continue gewerkt met recente versies van de software. Op die manier zijn zowel autonome ontwikkelingen als specifieke features voor dit project meegenomen. Op dit moment wordt gebruik gemaakt van de volgende versies:

- **D-HYDRO Suite 2020.01 (1.5.0.40944)**
- Rekenharten op Linux:
  - **dimr 2.01.16\_57933**
  - **dflowfm 1.2.13.62682**
  - D-RTC 1.4.2.1145
- Baseline 6.1
  - **BAS2FM 1.3.4 (in ArcGIS 10.3)**
- Baseline 5.3.3 (in ArcGIS 10.1)
- Hulpprogrammatuur 2.2.0
- RGWM 1.0.1

## 1.4 Organisatie en bijdragen

Aan dit project is bij Deltares vooral gewerkt door Iris Niesten (tevens deelprojectleider Rijntakken Zesde-generatie) en Aukje Spruyt (tevens projectleider KPP Modelschematisaties Zoet). Verder is veelvuldig gebruik gemaakt van de ervaring die door Jurjen de Jong is opgedaan bij het opzetten van het zesde-generatie model van de Maas en heeft Mohamed Yossef bijgedragen door het definiëren van een basisruwheid. Met Anke Becker heeft de afstemming plaatsgevonden over het overlapgebied Rijntakken – Rijn-Maasmonding, in samenwerking met Jelmer Veenstra en Remi van der Wijk. De modelopzet in het overlapgebied Rijntakken – IJssel-Vechtdelta heeft plaatsgevonden in samenwerking met Menno Genseberger en Asako Fujisaki, met ondersteuning van Alfons Smale. Door Anke Becker is tevens de review van de rapportage uitgevoerd

Tijdens de uitvoering heeft veel afstemming plaatsgevonden met RWS. Hierbij waren Martin Scholten (RWS-WVL) en Dénes Beyer (RWS-ON) betrokken. Vooral vanuit RWS-ON is belangrijke input geleverd voor dit project.

## 1.5 Versiebeheer

Dit rapport beschrijft het eindresultaat van 2019. Er wordt echter een nieuwe versie van het rapport beoogd in 2020 waarin ook kalibratie en validatie beschreven zullen zijn. Omdat daardoor sommige tekst een tijdelijk aard heeft, is deze tekst **rood gekleurd**.

## 1.6 Leeswijzer

Het rapport is opgezet volgens een generieke structuur voor de zesde-generatie modellen.

Allereerst volgt een uitgebreide beschrijving van het Rijntakken-systeem, de diverse geometrische elementen die hierin voorkomen en andere belangrijke aspecten voor modelopzet en –toepassingen (Hoofdstuk 2). Hierna volgt een beschrijving van een selectie van beschikbare data voor de opzet van het model (Hoofdstuk 3).

Vanaf Hoofdstuk 4 wordt begonnen met de opbouw van het model. Allereerst wordt hier het ontwerp van het rooster gegeven en daarna de verdere opzet en configuratie van het model. Na de opzet volgen de kalibratie en validatie van het model in Hoofdstuk 5. Ten slotte wordt het model getoetst aan de toepassing, waarbij ook de vergelijking met het vijfde-generatie WAQUA-model wordt gemaakt (Hoofdstuk 6).

In Hoofdstuk 7 volgt een samenvatting met de belangrijkste conclusies en aanbevelingen.

## 1.7 Terminologie

In dit rapport worden de volgende definities gebruikt:

<b>Nederlandse term</b>	<b>Beschrijving</b>	<b>Voorbeeld</b>
<i>gebiedsschematisatie</i>	Een beschrijving van een specifiek gebied of water-/grondwatersysteem, voor een specifieke periode	baseline-rijn-j15_5-v1 (software: Baseline, watersysteem: Rijn, periode: 2015)
<i>modelschematisatie</i>	= modelsoftware + gebiedsschematisatie Een rekenkundig model van een specifiek gebied of water-/grondwatersysteem gebouwd met specifieke modelsoftware, voor een specifiek systeem en een specifieke periode	waqua-rijn-j15_5-v1 (software: WAQUA, watersysteem: Rijn, periode: 2015)
<i>modelsoftware</i>	Een softwarepakket waarmee modelschematisaties kunnen worden doorgerekend aan de hand van een numerieke implementatie van fysische processen	D-Flow FM, WAQUA
<i>modelsoftwaresuite</i>	Een samenhangend geheel van modelsoftware systemen	D-HYDRO, SIMONA

Wanneer alleen het woord 'model' wordt gebruikt, wordt hier specifiek een 'modelschematisatie' mee bedoeld.



## 2 Systeembeschrijving

### 2.1 Algemeen

#### 2.1.1 Stroomgebied

De Rijn ontspringt in de Zwitserse Alpen uit twee bronrivieren en is een zogeheten gemengde rivier. Dit betekent dat het rivierwater afkomstig is van smeltende gletsjers en neerslag in het stroomgebied. Vanuit de Alpen stroomt de Rijn via Duitsland (en de grens met Frankrijk) richting de Noordzee. In Nederland begint de delta en splitst de Rijn zich op in meerdere takken (zie ook Figuur 2.1):

- Waal (§2.2).
- Pannerdensch Kanaal en Neder-Rijn / Lek (§0).
- IJssel (§2.4).

De Rijndelta is van oorsprong een zeer dynamisch systeem, waarvan de lopen zich regelmatig hebben verlegd. In de 19e en 20e eeuw zijn er echter grootschalige Rijn-normalisaties uitgevoerd, waardoor de vorm van de lopen tegenwoordig, ondanks hun meanderende uiterlijk, vast liggen tussen versterkte oevers en kribben. Hierdoor is de rivier enerzijds, door de aanleg van dijken en kribben, minder breed geworden en anderzijds, door het afsnijden van bochten, korter.

Na de hoogwaters van 1993 en 1995 is er voor gekozen om op een groot aantal plaatsen rivierverruimende maatregelen te nemen in het kader van het project Ruimte voor de Rivier (RvdR) om de kans op overstromingen te verminderen.

#### 2.1.2 Sediment en morfologie

Op de Boven-Rijn is het sediment van de rivierbodem relatief grof (zand/grind mengsel). Naarmate je verder stroomafwaarts gaat wordt het sediment steeds fijner (naar zand/slib), waarbij er een sterke zand/grind overgang is rond de Pannerdensch kop. De rivierbodem bij Lobith daalt door erosie ongeveer twee centimeter per jaar en snijdt daarmee als het ware in in het landschap. Deze lange-termijn bodemerosie is gunstig voor de waterveiligheid (waterstanden dalen min of meer mee) maar bedreigt de stabiliteit van kribben, oeververdediging, vaste lagen, stuwen en sluizen, is ongunstig voor de ecologie van de uiterwaarden (verdroging) en kan hinder voor de scheepvaart veroorzaken. Om deze daling proberen tegen te gaan worden er proeven gedaan met sedimentsuppleties op de Boven-Rijn.

#### 2.1.3 Afvoer en afvoerverdeling

De waterbeweging in de Rijntakken wordt met name bepaald door de bovenstroomse afvoer bij Lobith. Het jaargemiddelde van de Boven-Rijnafvoer te Lobith is ca. 2200 m<sup>3</sup>/s. De laagste Rijnafvoer bij Lobith werd gemeten in 1947, bij een waterstand van 7,54 m. Toen stroomde er 620 kubieke meter water per seconde door de rivier. Extreme afvoeren in 1926 en 1995 bedroegen ca. 12.280 respectievelijk 11.885 m<sup>3</sup>/s bij Lobith. Dit zijn de hoogste waargenomen afvoeren van de Rijn, waarbij de afvoer nauwkeurig berekend kon worden. Vanaf een afvoer van ca. 4000 m<sup>3</sup>/s beginnen de uiterwaarden tussen dijk en rivier te overstromen.

Onder normale omstandigheden wordt de afvoer ongeveer als volgt verdeeld:

- 2/3 – Waal.
- 1/3 - Pannerdensch kanaal (naar het splitsingspunt Neder-Rijn/IJssel)
  - 2/3 - Neder-Rijn/Lek (2/9 van totaal)
  - 1/3 - IJssel (1/9 van totaal).

Bij Boven-Rijnafvoeren onder de 2.500 m<sup>3</sup>/s treden de stuwen in de Neder-Rijn en Lek in werking en wordt bij dalende afvoeren steeds minder water over de Neder-Rijn/Lek gestuurd. De afvoerverdeling bij maatgevende afvoer bij Lobith, 16.000 m<sup>3</sup>/s, is wettelijk vastgelegd en wordt zoveel mogelijk gehandhaafd via regelwerken. Bij nog hogere afvoeren wordt de Neder-Rijn/Lek zoveel mogelijk ontzien.

De Rijn wordt zowel gevoed door regen, als door smeltwater vanuit sneeuw en gletsjers. Het aandeel smeltwater vanuit gletsjers is op jaarbasis niet erg groot, maar zorgt in de hoogzomer (juli – september) wel voor een belangrijke bijdrage, zodat echt lage afvoeren dan niet optreden. Vanwege de oorsprong in het hooggebergte treedt de laagste afvoer normaal pas in het najaar op, als de aanvoer vanuit sneeuw, gletsjers en meren minimaal is.





Figuur 2.1 Stroomgebied van de Rijn

## 2.2 Boven-Rijn en Waal

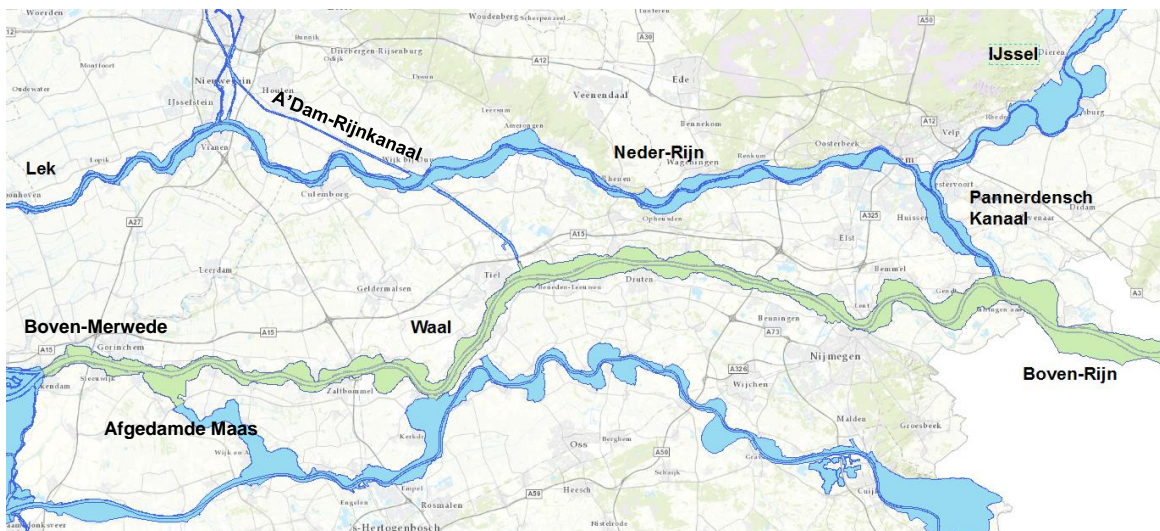
De Rijn komt Nederland binnen bij Emmerich/Lobith als de Boven-Rijn. Na ongeveer vijf kilometer splitst de Boven-Rijn zich in de Waal en het Pannerdensch Kanaal bij de Pannerdensch Kop, zie Figuur 2.2. De Waal is de grootste rivier van de Rijntakken met een lengte van ruim 90 kilometer en een gemiddelde breedte van zo'n 250 meter bovenstrooms tot 400 meter benedenstrooms. Na haar afsplitsing van de Boven-Rijn (rivierkilometer 867) bij de Pannerdensch Kop volgen twee relatief scherpe bochten bij Erlecom en Nijmegen. Door natuurlijke processen was er bij deze bochten sprake van erosie in de buitenbocht en sedimentatie in de binnenbocht, waardoor de voor de scheepvaart gegarandeerde minimale diepte en breedte niet gehaald werden. Om deze problemen te reduceren is besloten tot aanleg van bodemkribben (bij Erlecom) en een vaste laag (bij Nijmegen). De vaste laag bij Nijmegen

lag er reeds in 1995; de bodemkribben bij Erlecom slechts gedeeltelijk. De bodemkribben bij Erlecom waren gereed in 1996, en zijn niet opgenomen in de modellen die de situatie van 1995 beschrijven. De Waal kent nog een relatief scherpe bocht verder benedenstrooms bij Sint Andries, nabij Zaltbommel. Na het afronden van de bodemkribben bij Erlecom is begonnen aan het leggen van een vaste laag in deze buitenbocht. Deze vaste laag is in 1999 gereed gekomen.

De Waal heeft twee belangrijke zijtakken. Bij Tiel (rivierkilometer 913) takt het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal aan op de Waal. Het kanaal en de Waal zijn gescheiden door de Prins Bernhardsluizen, die bij waterstanden van lager dan 3 m + NAP bij Tiel open zijn, waardoor de Waal in directe verbinding komt te staan met de Neder-Rijn. De tweede zijtak is de Afgedamde Maas op rivierkilometer 953. De Afgedamde Maas verbindt de Waal met de (Bergsche) Maas. Dit is echter geen vrij stromende verbinding. De Waal eindigt bij de aantakking van de Afgedamde Maas en gaat verder als de Boven Merwede. De Boven Merwede splitst na ongeveer 9 km in de Beneden- en Nieuwe Merwede bij Hardinxveld.

Sinds 2017 is er in het kader van RvdR de nevengeul bij Lent in werking getreden. Bij waterstanden hoger dan de inlaatdrempel (10.5 m+NAP) stroomt deze nevengeul mee.

De waterstanden in de Boven-Rijn en Waal zijn een directe afgeleide van de afvoer: bij toenemende afvoer stijgen de waterstanden. Vanaf Zaltbommel wordt echter de getijdendynamiek (en eventuele stormopzet) vanuit de Rijn-Maasmonding merkbaar (met name bij lage afvoeren).



Figuur 2.2 Ligging Boven-Rijn en Waal

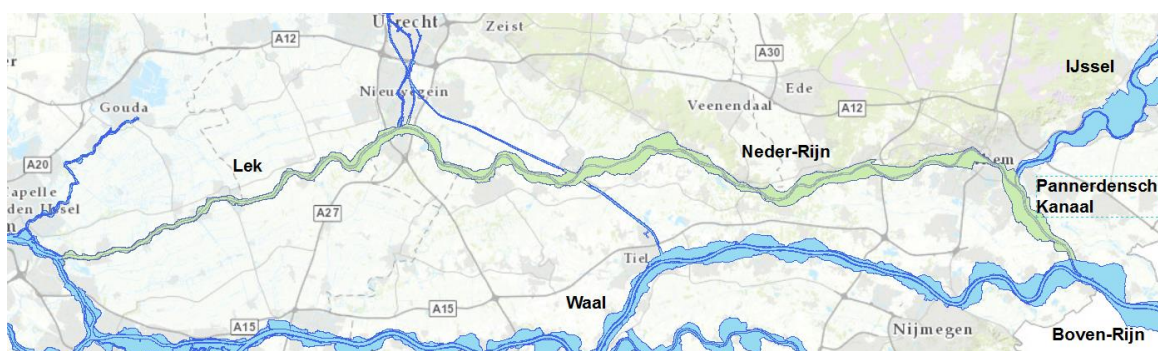
### 2.3 Pannerdensch Kanaal en Neder-Rijn/Lek

Het Pannerdensch Kanaal splitst zich na zo'n 10 kilometer in de Neder-Rijn en de IJssel bij de IJsselkop, zie Figuur 2.3. De Neder-Rijn (en Lek) onderscheidt zich van de andere Rijntakken doordat het over een groot deel een gestuwde rivier is. De drie stuwcomplexen bij Driel (rivierkilometer 891,5), Amerongen (rivierkilometer 922) en Hagestein (rivierkilometer 947) reguleren de waterstand bij relatief lage afvoeren; bij hogere afvoeren openen de stuwen waardoor de rivier vrij stromend is. De Neder-Rijn is verbonden aan het Amsterdam Rijnkanaal bij Wijk bij Duurstede. De Prinses Irenesluizen (voor het noordelijke pand) en Prinses Marijkesluizen (voor het Betuwepand) scheiden het kanaal en de Neder-Rijn. De Neder-Rijn gaat over in de Lek bij rivierkilometer 929. De Lek eindigt bij de samenvloeiing met de Nieuwe Maas en de Noord bij Krimpen aan de Lek.

Bij lage afvoeren (lager dan gemiddelde afvoeren) worden de waterstanden in de Neder-Rijn/Lek volledig gereguleerd door de stuwen. Daarboven worden de stuwen één voor één omhoog getrokken en worden de waterstanden een directe afgeleide van de afvoer: bij toenemende afvoer stijgen de waterstanden.

Als de waterstand bij Lobith tot onder de ca. 7,80 m +NAP zakt, worden de Prins Bernhardsluizen in het Amsterdam-Rijnkanaal bij Tiel geopend en ontstaat er een open verbinding tussen Waal, Amsterdam-Rijnkanaal en Lek. De waterstanden in het stuwpannd Amerongen-Hagestein zijn vanaf die afvoer niet meer gestuwd en fluctueren mee met de waterstand in de Waal. De prinses Marijkesluizen en kering Ravenswaaij, die het Betuwepand met de Lek verbinden, staan normaal gesproken open. Deze kering sluit tijdens hoogwater (minstens 5.55 m +NAP bij Wijk bij Duurstede).

Benedenstreams van de stuw bij Hagestein wordt de getijdendynamiek (en eventuele stormopzet) vanuit de Rijn-Maasmonding merkbaar (met name bij lage afvoeren). Zodra de stuw Hagestein omhoog getrokken wordt (boven een waterstand bij Lobith van 11,40 m +NAP) kan het getij ook tot bovenstreams van de stuw doordringen.



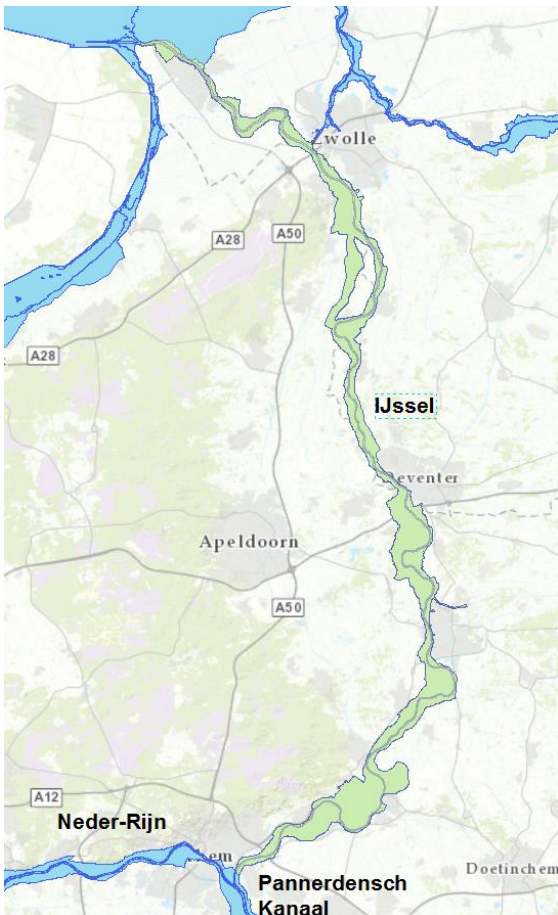
Figuur 2.3 Ligging Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek

## 2.4 IJssel

De IJssel is de kleinste (maar wel de langste) van de Rijntakken, zie Figuur 2.4. Zij stroomt vanaf de IJsselkop over een lengte van ruim 125 kilometer uit in het Ketelmeer bij Kampen. De IJssel kent in tegenstelling tot de Waal en Neder-Rijn/Lek een meanderend verloop. Bij hoog water leidt dit tot afwijkende stroomlijnen, wanneer het water een 'kortsluiting' neemt over de uiterwaarden. Dit speelt voornamelijk bij de Rhederlaag en de uiterwaarden bij Doesburg. Binnen de bandijken ligt de Wilpse (en Nijenbeker) Kleipolder. Bij hoogwater fungeert deze polder als een retentiegebied. Bij het hoogwater van 1995 is deze polder onder water gelopen. Sinds 2016 is er in het kader van RvdR de hoogwatergeul bij Veessen-Wapenveld in werking getreden. Bij waterstanden hoger dan 5.65 m +NAP bij het inlaatwerk stroomt deze hoogwatergeul mee.

De IJssel kent twee grote (en verschillende kleine) zijstromen. De Oude IJssel takt aan bij Doesburg (rivierkilometer 902). Het Twentekanaal takt aan op rivierkilometer 931. Beide zijn relatief grote zijstromen die significant bijdragen aan de afvoer in de IJssel.

De waterstanden in de IJssel zijn een directe afgeleide van de afvoer: bij toenemende afvoer stijgen de waterstanden. Benedenstrooms wordt de waterstand ook beïnvloed door het peil van het IJsselmeer (bijv. bij stormopzet). Het effect van het IJsselmeer (via het Ketelmeer) werkt door tot Olst.



Figuur 2.4 Ligging IJssel

## 2.5 Belangrijke kenmerken

### 2.5.1 Kunstwerken

Binnen het modelgebied van de Rijntakken zijn de nodige kunstwerken aanwezig. Deze moeten ook worden meegenomen in de hydraulische modellen, aangezien ze grote invloed kunnen hebben op de verdeling van water en de waterstanden. Bij voorkeur worden kunstwerken zodanig gemodelleerd zodat ze zo goed mogelijk aansluiten bij de realiteit, aansluitend bij de beoogde toepassingen van het model en de functie van het kunstwerk hierin. Hierbij wordt aangesloten bij de werkzaamheden zoals deze binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken worden uitgevoerd (Van der Wijk & de Groot-Wallast, 2017).

#### 2.5.1.1 Stuwcomplexen Neder-Rijn / Lek

In de Neder-Rijn / Lek zijn drie stuwcomplexen aanwezig (aangelegd tussen 1960 en 1970). Elke stuw is hier voorzien van twee zogenaamde vizierschuiven: een halfronde klep met een gewicht van ongeveer 200 ton (Figuur 2.6). Deze schuif wordt met behulp van kabels geheven. De manier van bewegen van de schuif doet denken aan het oogvizier van een oude ridderhelm. Bij hoge rivierwaterafvoer openen de stuwen door de bogen omhoog te brengen.

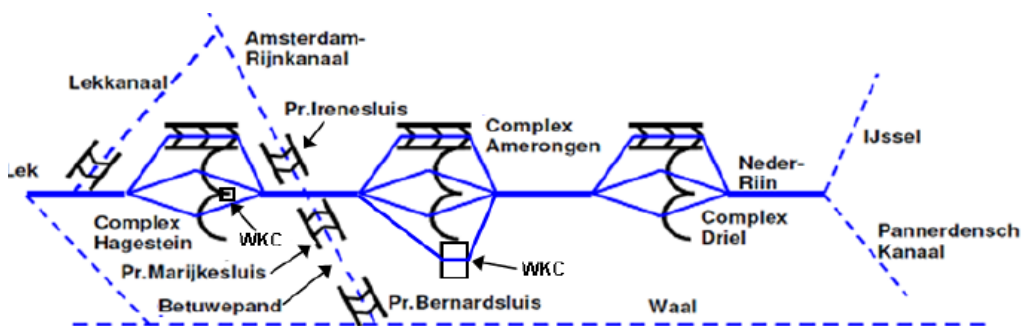
De stuwen in de Neder-Rijn / Lek worden bediend op basis van een stuwprogramma. De afvoerverdeling over IJssel en Neder-Rijn is het belangrijkste uitgangspunt van het stuwprogramma. De stuw bij Driel zorgt voor de waterverdeling bij de IJsselkop over de IJssel en de Neder-Rijn en stuurt de waterstanden, en daarmee de vaardiepte, op het traject Driel-IJsselkop. Bij lage afvoeren reikt de invloed van Driel veel verder, tot aan Lobith toe, waardoor ook de waterverdeling tussen de Waal en het Pannerdensch Kanaal er door wordt beïnvloed. Verder zorgt de stuw ervoor dat er extra veel water over de IJssel stroomt, zodat die over de hele lengte meer waterdiepte krijgt en beter bevaarbaar is.

Voor de stuwen kunnen de volgende doelen onderscheiden worden:

- Scheepvaart: Door de stuwen wordt de waterstand opgestuwd om scheepvaart mogelijk te maken (CEMT-klasse Va). Bij lage afvoer maakt de scheepvaart gebruik van de sluis; bij hoge afvoer is de stuw gestreken en is scheepvaart door de stuw mogelijk.
- Vistrap: Ten behoeve van de vismigratie zijn bij alle stuwen vistrappen aangelegd zodat de vissen ook in bovenstroomse richting kunnen zwemmen.
- Waterkrachtcentrale: Door het aanwezige verval bij lage afvoer zijn er waterkrachtcentrales aangelegd bij stuw Hagestein (1,8 MW) en Amerongen (10 MW).

Ieder stuwcomplex bestaat dus uit een stuw, een sluis, een bedieningsgebouw en een vistrap (aangelegd na 1995). Elke stuw is gevormd door twee landhoofden, een middenpijler en twee vizier-schuiven. Elke opening is 48m breed. De stuwen bij Hagestein en Amerongen hebben daarnaast ook een waterkrachtcentrale. De waterkrachtcentrale bij Hagestein is sinds de renovatie in 2005 gesloten, en wordt daarom niet opgenomen in het zesde-generatie model. De waterkrachtcentrale bij Amerongen zal wel worden opgenomen. Elke stuw heeft 4 omloopriolen (+ cilinderschuif), die in de landhoofden zijn verwerkt. Hiermee wordt bij heel laag water de afvoer geregeld. De stuw bij Driel is gemiddeld 75 dagen per jaar geopend. De stuwen bij Amerongen en Hagestein zijn gemiddeld 25 dagen per jaar geopend.

De interactie van de sluiscomplexen met andere sluisen in de omgeving wordt schematisch weergegeven in Figuur 2.5.



Figuur 2.5 Interactie van de sluiscomplexen op de Neder-Rijn en Lek met andere sluisen in de omgeving.

De stuwmeester is verantwoordelijk voor het behalen van de stuwpeilen, maar heeft ook de mogelijkheid om hiervan af te wijken, waardoor in de praktijk afwijkingen kunnen ontstaan tussen het stuwprogramma en de metingen.



Figuur 2.6 Overzichtsfoto van het stuwcomplex Amerongen in benedenstroomse richting, met links direct naast de vizerschuiven de WKC Amerongen en meest links de vistrap (bron: wikimapia.org).

### 2.5.1.2 Regelwerken

De regelwerken Pannerden en Hondsbroeksche Pleij zijn in 2013 en 2012 aangelegd om de afvoerverdeling over de riviertakken te kunnen handhaven tijdens en na de uitvoeringsfase van Ruimte voor de Rivier. Het regelwerk Pannerden bestaat uit 32 afzonderlijke openingen van 5 m breed (dus in totaal 160 m breed), zie Figuur 2.7. In deze openingen kunnen maximaal 5 schotten geplaatst worden van 1 m hoog en deze zijn stapelbaar vanaf 12,00 (drempelhoogte) tot 17,00 m+NAP. De schotten worden vóór elk hoogwaterseizoen opnieuw ingesteld en worden daarna niet meer aangepast. Het regelwerk Pannerden is in werking sinds november 2013. Het regelwerk Pannerden stroomt mee vanaf ca. 8.500 m<sup>3</sup>/s bij Lobith (afhankelijk van de instelling van het regelwerk) en heeft een regelbereik op de Waal van ca. 500 m<sup>3</sup>/s (bij 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith).



Figuur 2.7 Regelwerk Pannerden (bron: [www.rijnwaardenseuiterwaarden.nl](http://www.rijnwaardenseuiterwaarden.nl))



Figuur 2.8 Regelwerk Hondsbroeksche Pleij (bron: beeldbank RWS)

De Hondsbroeksche Pleij ligt ten zuidoosten van Arnhem op de plek waar het Pannerdensch Kanaal zich splitst in de Neder-Rijn en de IJssel. De dijkteruglegging Hondsbroeksche Pleij en het regelwerk zijn destijds aangelegd omdat de Ruimte voor de Riviermaatregel Meinerswijk veel waterstandsvaling zou realiseren. Toen besloten werd om Meinerswijk kleiner uit te voeren, was de extra afvoercapaciteit naar de IJssel voor de korte termijn (2015) niet meer nodig. Het regelwerk staat daarom nu dicht, met een tijdelijke uitzondering van één opening om meetgegevens te kunnen verzamelen. Het regelwerk bestaat uit 30 afzonderlijke openingen van 5 m breed (dus in totaal 150 m breed), zie Figuur 2.8. In deze openingen kunnen maximaal 4 schotten geplaatst worden van 1,05 m hoog en deze zijn stapelbaar vanaf 11,00 (drempelhoogte) tot 15,20 m+NAP. Met behulp van een kraan kunnen de schotten geplaatst en weggehaald worden. In tegenstelling tot regelwerk Pannerden is bij Hondsbroek ook een noodvoorziening aanwezig om tijdens hoogwater schotten te kunnen trekken. Deze noodvoorziening bestaat uit de mogelijkheid om een drijvend ponton met een hijswerktuig af te voeren. De vraag is echter in hoeverre hier onder extreme omstandigheden gebruik van kan worden gemaakt.

Voor de lange termijn (2050) is het regelwerk wel nodig om de Neder-Rijn en Lek te kunnen ontzien (beperken van de afvoer naar de Neder-Rijn tot 3.380 m<sup>3</sup>/s bij een afvoer van meer dan 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith). Het regelwerk Hondsbroeksche Pleij is in werking sinds 2012. Het regelbereik van regelwerk Hondsbroeksche Pleij op de IJssel is ca. 170 m<sup>3</sup>/s (bij 16.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith).

### 2.5.1.3 Kunstwerken in het Amsterdam-Rijnkanaal

Het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal verbindt de Waal met de Lek en wordt daarbij afgesloten door twee kunstwerkcomplexen: de Prinses Marijkesluis bij de verbinding met de Lek en de Prins Bernhardsluis bij de verbinding met de Waal, zie ook Figuur 2.5. Bij normale tot verhoogde afvoeren staat het Betuwepand in open verbinding met de Lek (en staat de keersluis bij de Prinses Marijkesluis open en is die bij de Prins Bernhardsluis gesloten). Op dit deel van het kanaal stijgt en daalt het waterpeil dan mee met dat van de Lek. Bij een verwachte waterstand van 5,5 meter boven NAP wordt het kanaalpeil te hoog en vóór deze waterstand wordt bereikt, wordt de verbinding met de Lek bij de Prinses Marijkesluis dichtgezet. Bij laag water (waterstanden bij Tiel < 3.00 m+NAP) staat de Lek in open verbinding met de Waal via het Betuwepand en zijn allebei de sluisen geopend.

Daarnaast is de Lek verbonden met het noordelijke deel van het Amsterdam-Rijnkanaal via de Prinses Beatrix- en Prinses Irenesluis. In het Rijntakken-model ligt hier een dichte rand; de onttrekking via de Prinses Irenesluis wordt opgelegd als lateraal.

#### Prinses Marijkesluis

De Prinses Marijkesluis is gelegen in het Amsterdam-Rijnkanaal aan de noordzijde van het Betuwepand. Het complex bestaat uit twee schutkolken en de keerschuif Ravenswaaij om het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal af te sluiten van de Lek.

#### *Keerschuif Ravenswaaij*

Het zuidelijk deel van het Amsterdam-Rijnkanaal, tussen Ravenswaaij en Tiel, staat in normale omstandigheden in open verbinding met de Lek. Op dit deel van het kanaal stijgt en daalt het waterpeil dan mee met dat van de Lek.

Bij een verwachte waterstand van 5,5 meter boven NAP wordt het kanaalpeil te hoog en vóór deze waterstand wordt bereikt, wordt de hoogwaterkering gesloten. Deze bestaat uit een keerschuif die in het kanaal zakt, zie Figuur 2.9. Schepen kunnen na de sluiting passeren door de naast de keerschuif gelegen Prinses Marijkesluis.



Figuur 2.9 Keerschuif Ravenswaaij (bron: [www.rijkswaterstaat.nl](http://www.rijkswaterstaat.nl))

De keerschuif Ravenswaaij gaat als eerste dicht als de verwachte waterstand hoog genoeg is; de sluisen blijven dan nog open. Als het kanaal “vol” is, gaan ook de sluisdeuren dicht. De keerschuif wordt in het model opgenomen met één kunstwerk met één sturing.



### Prins Bernhardsluizen

De Prins Bernhardsluis vormt de verbinding tussen het zuidelijke gedeelte van het Amsterdam-Rijnkanaal en de Waal, zie Figuur 2.10. In het geval van waterstanden bij Tiel lager dan 3.00 m+NAP gaat de Bernhardsluis bij Tiel open. De waterstand op het stuwpand Hagestein beweegt dan mee met de waterstand op de Waal.



Figuur 2.10 Prins Bernhardsluizen bij Tiel (bron: beeldbank RWS)

#### 2.5.1.4 Overige schutsluizen en keringen

Op de Rijntakken zijn vele kanalen aangesloten. Een deel van deze kanalen staat bij lage afvoer in vrije verbinding met de (gestuwde) Rijntakken. Bij stijgende waterstanden worden alle schutsluizen gesloten. Een deel van de kanalen is in beheer bij Rijkswaterstaat en zal in de toekomst ook gemodelleerd worden en de aansluiting vormen naar andere modellen. Schutsluizen en keringen gelegen op de modelrand zijn de sluisen bij Weurt, Sint Andries en Wamel op de Waal, de reeds genoemde Prinses Irenesluizen en Prinses Beatrixsluis op de Neder-Rijn/Lek, en de sluisen bij Eefde en Zwolle, de Roggebotsluis en de Ramspolkering op de IJssel.

#### 2.5.1.5 Duikers en inlaatsluizen

Binnen de uiterwaarden liggen op diverse plaatsen duikers om de in- en uitstroming van de uiterwaarden enigszins te kunnen controleren. Deze liggen binnen het gebied, bijvoorbeeld in zomerkades, zie Figuur 2.11. Ook zijn er op diverse plekken tunnels aanwezig in bijvoorbeeld bruggenhoofden. Bij stroming door de uiterwaarden zullen deze tunnels mogelijk veel water afvoeren door de plaatselijke vernauwing van dit bruggenhoofd. Het effect van het meenemen van deze openingen op het verloop van een hoogwatergolf kan significant zijn, zie ook eerdere studie hiernaar (De Jong, 2015).



Figuur 2.11 Inlaatsluis in de zomerdijk bij Wageningen (bron: Nationale Beeldbank).

Een overzicht van enkele belangrijke duikers en onderdoorgangen, zoals geselecteerd door RWS-ON, is gegeven in Tabel 2.1. In principe worden al deze inlaatwerken opgenomen in het zesde-generatie model.

Tabel 2.1 Overzicht van belangrijke duikers en onderdoorgangen in de uiterwaarden

Naam	Tak	Type inlaat
Winssense waarden	WA	Coupure
Gouverneurspolder	WA	Coupure
Drutense waarden	WA	Duiker
Stiftse waarden	WA	Coupure
Heerewaarden	WA	Coupure
Scherpekamp	PK	Duiker
Huissen Noord	NR	Duiker
Opheusden	NR	Duiker
Randwijk	NR	Duiker
Maurik	NR	Coupure
Amerongen 917.9	NR	Coupure
Amerongen 918.9	NR	Coupure
Beusichem	LK	Coupure
Middelwaard	LK	Coupure

## 2.5.1.6 Bruggen

Ten behoeve van diverse vervoerstromen zoals voetgangers, autoverkeer en treinverkeer zijn er diverse bruggen over de riviertakken (zie Figuur 2.12 en Figuur 2.13). Deze bruggen beïnvloeden de stroming doordat er brugpijlers in de rivier staan en soms omdat het water tot het brugdek komt. Daarnaast hebben de bruggen vaak een talud met een brughoofd waardoor de doorgaande stroming door de uiterwaarden voorkomen of gehinderd wordt.



Figuur 2.12 Brug N325 (Andrej Sacharovbrug) bij Arnhem (Neder-Rijn rkm 880)



Figuur 2.13 Spoorbrug bij Zutphen (IJssel rkm 928)

## 2.5.2 Retentiegebieden en nevengeulen

In de Rijntakken zijn verschillende retentiegebieden en nevengeulen aanwezig, die met name bij hoge afvoeren moeten zorgen voor een (lokale) verlaging van de waterstand. Deze retentiegebieden en nevengeulen bevatten vaak een specifieke drempel of een in- of uitlaatconstructie waardoor de waterstand waarbij instroming plaats vindt nauwkeurig bekend is. Naast bestaande retentiegebieden en nevengeulen zijn er ook een aantal toekomstige maatregelen bekend.

### 2.5.2.1 Nevengeul bij Veur-Lent

De hoogwatergeul bij Lent (inclusief inlaatwerk) is sinds 2016 in werking. Het inlaatwerk bestaat uit een drempel met twee keer drie openingen op drie verschillende hoogtes die bij verschillende waterstanden gaan mee stromen, zie Figuur 2.14. Bij hoogwater (>12.5 m +NAP bij Lobith) overstroomt de drempel zelf ook.



Figuur 2.14 Duikers in inlaatwerk bij de hoogwatergeul bij Veur-Lent (bron: [www.nijmegency.nl](http://www.nijmegency.nl))

### 2.5.2.2 Veessen-Wapenveld

De hoogwatergeul Veessen-Wapenveld is gegraven om de waterstand op de IJssel te verlagen bij hoge afvoeren ten behoeve van de waterveiligheid. De nevengeul Veessen-Wapenveld omvat de IJssel tussen km 961,09 en 973,56. De instroom van Veessen-Wapenveld wordt gereguleerd met een inlaatwerk (zie Figuur 2.15). Op het moment dat de waterstand voor het inlaatwerk hoger wordt dan 5,65 m+NAP worden de schuiven van het inlaatwerk in 8 uur tijd geopend van 5,65 m+NAP naar 4,60 m+NAP. Dit gebeurt in vier verschillende delen. De meest recente procedure is beschreven in AVI (2017). Het regelwerk is sinds januari 2016 in werking.



Figuur 2.15 Inlaatwerk Veessen Wapenveld (bron: [www.rijkswaterstaat.nl](http://www.rijkswaterstaat.nl))

### 2.5.2.3 Reevediep

Het Reevediep is een bypass vanuit de IJssel bij Kampen naar het Drontermeer, zie Figuur 2.16, die vanaf 2019 in werking moet treden.

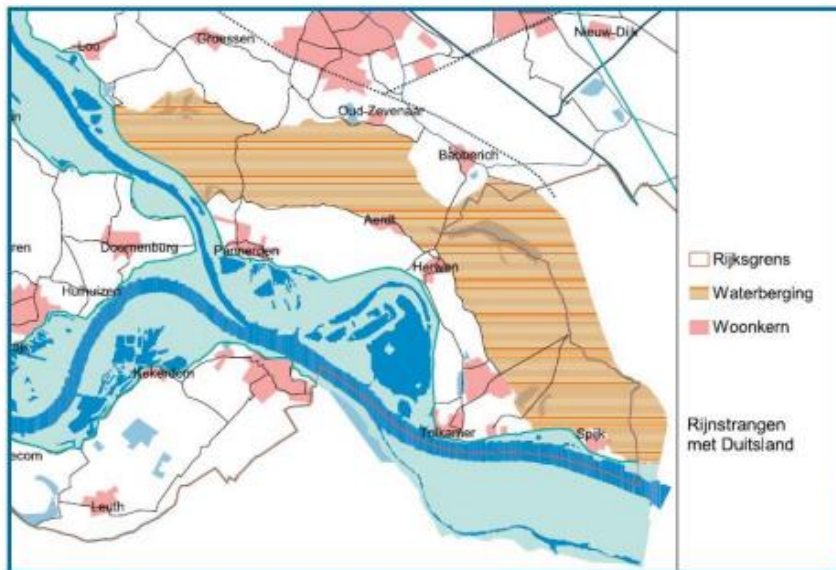


Figuur 2.16 Ligging Drontermeer, Vossemeer en Reevediep.

Door de directe verbinding met het IJsselmeer kent het Reevediep onder normale omstandigheden de waterstanden en peildynamiek van het IJsselmeergebied. Bij hoge afvoeren door de IJssel stroomt het IJsselwater bij Kampen door het inlaatwerk aan de IJsselkant door de dijkopening de bypass in. Naar verwachting gebeurt dit eens in de 5 jaar. Ook is het mogelijk dat water vanuit het IJsselmeer en Reevediep door noordwestelijke storm wordt opgestuwd waardoor de stroombaan volloopt en het de drempel van het inlaatwerk overstroomt. Bij normale afvoer op de IJssel staat het inlaatsysteem droog. Het inlaatwerk zelf bestaat uit een brug, een grondlichaam (drempel) en een stroombaan (bron: [www.ruimtevoorderivierijsseldelta.nl](http://www.ruimtevoorderivierijsseldelta.nl)).

#### 2.5.2.4 Rijnstrangen

De Rijnstrangen zijn een toekomstig retentiegebied in de Gelderse Poort, waar de Rijn in de Waal en het Pannerdens Kanaal splitst, zie Figuur 2.17. Dit gebied zit nu niet in het huidige vijfde-generatie model, maar is wel opgenomen in het rooster en er is een Baseline database van beschikbaar. In het rooster van de zesde generatie is dit gebied nog niet opgenomen. Wel is het rooster zó opgezet dat dit gebied kan worden toegevoegd zonder aanpassingen in het huidige modelgebied.



Figuur 2.17 Gebied Rijnstrangen

## 2.5.2.5 Varik-Heesselt



Figuur 2.18 Ligging Varik en Heesselt en de hoogwatergeul zoals voorzien in één van de gebiedsvisies (bron: [www.varikheesselt.gelderland.nl](http://www.varikheesselt.gelderland.nl)).

De bocht bij Sint-Andries vormt een knelpunt voor hoogwaterafvoer. Daarom heeft er een MIRT-verkenning plaatsgevonden met alternatieven om de rivier op deze plek meer ruimte te geven tijdens verhoogde afvoeren. Hieruit zijn verschillende alternatieven gekomen, waarvan er één bestaat uit het realiseren van een hoogwatergeul ten noorden van Varik en Heesselt, met ruimte voor natuur en recreatie (zie Figuur 2.18). Een andere variant bestaat uit het versterken van de bestaande dijken met watercompensatie in de uiterwaarden. Hoewel deze laatste voorlopig de voorkeursvariant lijkt te zijn, zal het rooster in het zesde-generatie model worden opgezet rekening houdend met een bochtafsnijding.

### 2.5.3 Beken, rivieren en gemalen

Op de Rijntakken lozen honderden beken, rivieren en gemalen. Omdat dit overzicht te groot is om te gebruiken in een model is een selectie gemaakt van de rivieren, gemalen en grotere beken. Een overzicht van deze belangrijke locaties die ook als laterale in- of uitstroming zullen worden meegenomen in het zesde-generatie Rijntakken-model is gegeven in bijlage F.2.

### 2.5.4 Dijkkringen en hoge gronden

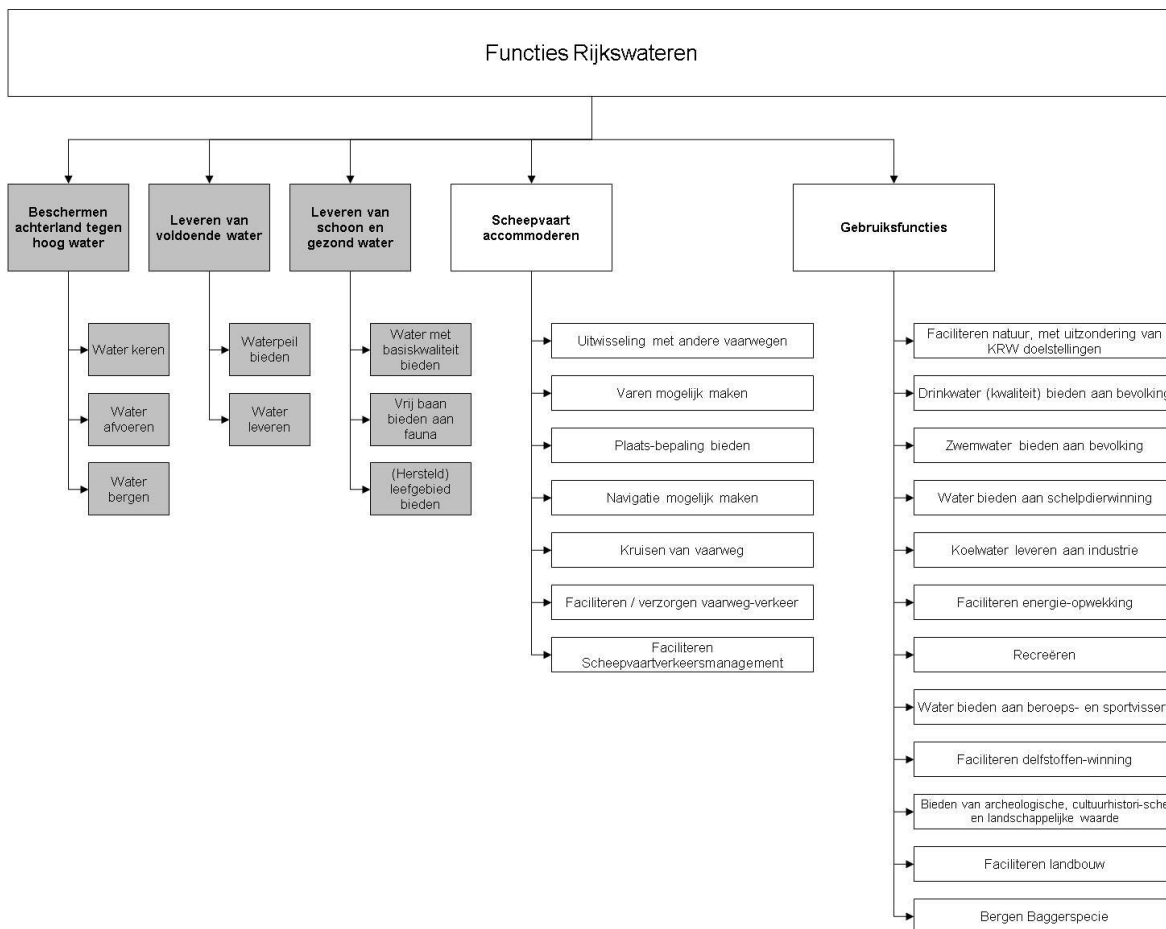
De begrenzing van de uiterwaarden van de Rijntakken wordt voor een groot traject bepaald door een bandijk. Op een aantal plaatsen worden de modellen echter niet begrensd door een bandijk, maar door zogeheten hoge gronden. De begrenzing bij de hoge gronden in de huidige modellen is gebaseerd op een 1/1250 afvoer bij Lobith (16.000 m<sup>3</sup>/s). Deze grenzen zijn zodanig gekozen dat deze afvoer nog kan worden doorgerekend zonder dat het effect van 'glazen wanden' optreedt. Tijdens de afgelopen WBI ronden werden echter veel hogere afvoeren doorgerekend (tot 24.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith), waarbij het 'glazen wand'-effect wel optreedt. De grens van de hoge gronden wordt daarom opnieuw vastgesteld.

## 2.6 Toepassingen van het model

De modellen van de Rijntakken worden gebruikt in verschillende toepassingen die gerelateerd zijn aan de functies van het watersysteem (zie Figuur 2.19) en dienen geschikt te zijn om vragen die hierop betrekking hebben te helpen beantwoorden. Elke toepassing stelt zijn eigen eisen aan de te gebruiken modellen. Deze eisen, wensen en verwachtingen zijn geïnventariseerd in Spruyt et al. (2016) volgens een indeling langs de lijn van de RWS-missie:

- Veilig.
- Schoon.
- Voldoende.
- Vlot.

en zijn ook opgenomen in het PvE van RWS voor de zesde-generatie modellen (bijlage A). Op deze manier staan de toepassingen voor RWS centraal en worden de modellen hiervoor gebouwd, in plaats van dat er eerst een model wordt gemaakt en dat iedere toepassing hiervan gebruik moet maken (of het geschikt is of niet).



Figuur 2.19 Functieboom Rijkswateren (Bron: Basisspecificatie Rijkswateren versie 5.2)

Toepassing van hydraulische modellen van de Rijntakken vindt in alle RWS-processen plaats:

- Aanleg en onderhoud
  - Ruimte voor de Rivier
  - Verkenningen en planstudies
- Informatievoorziening
  - toeleverend: gegevensinwinning (bodem, water, etc.)
  - aanleverend: vervaardigen betrekkinglijnen
- Slagvaardig crisismanagement
  - hoogwaterverwachting
  - overige crisissituaties
- Omgevings- en assetmanagement
  - AM: vergunningverlening en handhaving
- Verkeer- en watermanagement
  - dagelijkse berichtgeving (RWsOS)
- Kennis en netwerkqualiteit
  - bouw, ontwikkeling, actualisatie, software
  - beleidsadvies (bv. WBI2017, Deltaprogramma)
  - netwerkmonitoring (Advies Monitoring Hoogwaterveiligheid)
  - onderzoek (RiverCare)



## **2.7 Verbindingen met andere gebieden**

In het ontwikkelproces van de zesde-generatie modellen staat voorop dat de verschillende modellen gecombineerd kunnen worden waardoor het belangrijk is om zowel de numerieke instellingen als het rooster op elkaar aan te laten sluiten. De belangrijkste aansluitingen voor de Rijntakken zitten benedenstrooms. Daarom is er voor gezorgd dat de roosters van de modellen van de Rijntakken en Rijn-Maasmonding aan de ene kant en de IJssel-Vechtdelta aan de andere kant goed op elkaar aansluiten. Hiervoor is er een overlap gerealiseerd tussen de modellen. Daarnaast is ook de aansluiting op de Maas op een aantal locaties gerealiseerd en is er nagedacht over de toekomstige aansluiting met het Amsterdam-Rijnkanaal. In Hoofdstuk 4.1.5 wordt verder ingegaan op het roosterontwerp in deze overlapgebieden.



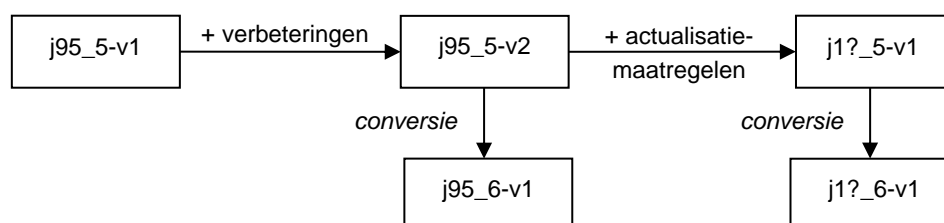
### 3 Beschikbare data

#### 3.1 Geometrie in Baseline

Rijkswaterstaat beheert de geografische informatie ten behoeve van modellen in de GIS-databases van de applicatie Baseline. In deze database wordt data uit lodingen, het digitaal terrein bestand (DTB), ontwerptekeningen en vele andere databronnen gecombineerd. De database is daarna geschikt voor de conversie naar een hydrodynamisch model. Baseline biedt de mogelijkheid om met behulp van lokale maatregelen aanpassingen in de database te maken en zo op een reproduceerbare manier een nieuwe gebiedsbeschrijving te maken om een vergelijking mee uit te voeren. Een overzicht van de datalagen in Baseline is gegeven in Bijlage D.

Binnen de vijfde-generatie hydrodynamische modellen zijn diverse Baseline-databases opgezet die passen bij de situatie van het hoogwaterseizoen (de winter). Deze databases zijn bedoeld voor diverse doelen zoals kalibratie/validatie, beschrijving van de actuele situatie of voor vergunningverlening en WBI-berekeningen (beno-modellen). Een overzicht van deze Baseline-databases kan gevonden worden in de Factsheet (Rijkswaterstaat, 2016).

Ten behoeve van de zesde-generatie modellen is er een verbeterslag gemaakt van de bestaande Baseline-schematisaties. Deze verbeteringen zijn eerst meegenomen in Baseline 5 en vervolgens geconverteerd naar Baseline 6. Dit proces is weergegeven in Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Werkwijze upgrade Baseline-schematisaties naar Baseline 6

De gebruikte Baseline-schematisaties voor de zesde-generatie Rijntakken-modellen zijn opgesomd in Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Overzicht van Baseline-schematisaties gebruikt in de opzet van de zesde-generatie Rijntakken-modellen. De schematisaties met achtervoegsel "-w\*" geven een werkversie aan.

Baseline-schematisatie	Doel in dit rapport
baseline-rijn-j93_6-v1	Kalibratie / Validatie
baseline-rijn-j95_6-v1	Kalibratie / Validatie/Roosterontwerp
baseline-rijn-j95_5-w8	Roosterontwerp
baseline-rijn-j95_5-w9	Roosterontwerp / testen overlaten
baseline-rijn-j11_6-v1	Kalibratie / Validatie
baseline-rijn-j16_6-v1	Kalibratie / Validatie
baseline-rijn-j16_5-w4	Roosterontwerp
baseline-rijn-j17_6-v1	Kalibratie / Validatie/Roosterontwerp
baseline-rijn-beno15_5-v2	Roosterontwerp, Extreme afvoer
ym_ijvd_ov-hr2017_5-v4	Testsommen overlapgebied

## 3.2 Randvoorwaarden en meetgegevens

### 3.2.1 Aangeleverde data

De Rijntakken worden al vele decennia bemeten. Voor de kalibratie en validatie van een model wordt bij voorkeur gebruik gemaakt van zo recent mogelijke en accurate metingen, maar is het ook belangrijk om minder frequente piekafvoeren mee te nemen. De laatste extreme afvoeren hebben plaatsgevonden tijdens de hoogwaters van 1993 en 1995. Voor minder extreme afvoeren kan gebruik gemaakt worden van recentere perioden en is gekozen voor het winterseizoen 2010-2011, en voor perioden van lage afvoer wordt gebruik gemaakt van de nog recentere periode 2015-2017, zie ook Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Overzicht relevante periodes

Periode	Begin	Eind
HW1993	01-11-1993	31-01-1994
HW1995	01-12-1994	28-02-1995
2011	01-11-2010	31-12-2011
2015/2016	01-09-2015	31-03-2016
2016/2017	01-09-2016	31-03-2017

Van deze perioden zijn nieuwe meetgegevens beschikbaar (zie bijlage B). De aanlevering bevat zowel waterstanden als afvoeren voor diverse jaren. De aangeleverde afvoerreeksen worden gemaakt door middel van ADM-metingen, Qh-relaties en Qf-relaties<sup>1</sup>. In Bijlage B is verdere informatie en een overzicht van de metingen in figuren en tabellen opgenomen voor alle jaren. De nieuwe data bevat vele verschillen met de data uit eerdere projecten met de vijfde generatie Rijntakken-modellen. De mate en de oorzaak van deze verschillen is niet onderzocht.

Voor de afvoer bij Lobith en op de splitsingspunten worden de vereffende afvoerreeksen gebruikt. De basis hiervoor zijn de beschikbare Qf-relaties (Qf09). Deze worden vervolgens gecorrigeerd op basis van beschikbare ADCP metingen. Daarna wordt de waterbalans zo goed mogelijk kloppend gemaakt (maar zonder het meenemen van eventuele lateralen). Dit is de beste beschrijving van de afvoer die op dit moment beschikbaar is.

### 3.2.2 Randvoorwaarden laterale afvoeren

Naast de metingen op de Rijntakken zijn de afvoermetingen van enkele aangetakte kanalen en beken aangeleverd. Er zijn echter vele laterale in- en uitstromingen die niet bekend zijn. Voor de eerdere generaties van hydrodynamische modellen zijn hiervoor regressieformuleringen afgeleid (Van der Veen et al. 2002; Van der Veen, 2005) en verwerkt in de Lateralen Afvoergenerator (LAG) (Tanis, 2015). Deze zijn verbeterd en opgenomen in de nieuwe Randvoorwaarden Generator Watermodellen (RGWM).

Er moet extra aandacht besteedt worden aan de beschikbaarheid van betrouwbare meetdata voor de Oude IJssel. Dit is namelijk een belangrijke laterale toestroming, waarvan in de RGWM de meeste andere laterale toestromingen worden afgeleid (zie ook bijlage G.3). Met name voor het deel van de IJssel benedenstrooms van de Oude IJssel is het cruciaal dat er goede meetdata voor deze lateraal beschikbaar is.

<sup>1</sup> Bij een Qh-relatie wordt de lokale waterstand gebruikt om de afvoer te bepalen. Bij een Qf-relatie wordt meer meegenomen dan enkel de waterstand (Van der Veen, 2013)

### 3.3 Fictieve randvoorwaarden

Naast de historische randvoorwaarden wordt tijdens de opzet van het model vaak gebruik gemaakt van (semi-)stationaire afvoeren en fictieve afvoergolven. Deze randvoorwaardensets dienen de volgende doelen:

- Validatie stuwsturing.
- Controle stabiliteit onder extreme afvoeren.
- Analyse verschillen in modellen door actualisatie Baseline.
- Validatie droogvallen rekencellen.

In alle gevallen wordt dit gecombineerd met de Qh-relaties bij Hardinxveld Boven (qh\_Werkendam\_j15\_5) en Krimpen aan de Lek (qh\_Krimpen\_ad\_Lek\_j15\_5) zoals afgeleid met het WAQUA-model van de Rijnmaasmonding (waqua-rmm-j15\_5) (Van der Wijk, 2016) en een relatie voor de Ketelbrug (qh\_ketebrug.T\_1250\_18000).



## 4 Modelopzet

Aan de hand van beschikbare gegevens over de geometrie (zie sectie 3.1) is eerst een rooster gebouwd (sectie 4.1). Vervolgens zijn ruimtelijke eigenschappen met Baseline op dit rooster geprojecteerd voor verschillende Baseline-schematisaties en aangevuld met handmatige aanpassingen en bestanden (sectie 4.2). Randvoorwaarden en externe forceringen zijn geconverteerd vanuit de RGWM (zie sectie 4.3). Ten slotte volgen de schematisatie en de sturing van de kunstwerken (zie sectie 4.4), de definitie van de ruwheden (zie sectie 4.5) en de fysisch-numerieke instellingen (zie sectie 4.6).

### 4.1 Roosterontwerp

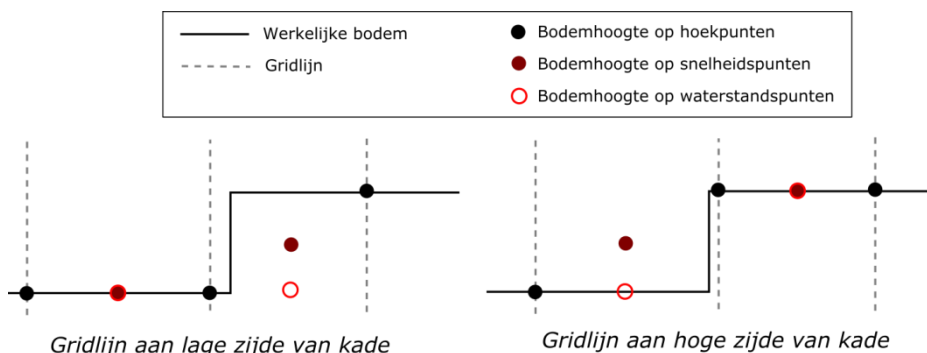
#### 4.1.1 Methodiek

Centraal in de opzet van het ongestructureerde rooster voor de zesde-generatie modellen staan de extra mogelijkheden om het rooster uit te lijnen met de lokale geometrie. Hierbij is de volgende prioritering toegepast (van belangrijk naar minder belangrijk):

- Normaallijnen/oeverlijnen (zomerbed).
- Kunstwerken.
- Stroomlijnen; Als hoofdelement wordt gekeken naar de stroomlijnen uit zowel het j17-model als het beno15-model. In de stroomlijnen zitten veel van onderstaande elementen automatisch meegenomen, waaronder nevengeulen, zomerbedverbredingen en belangrijke (stroomgeleidings)kades.
- Bruggen: (talud van) aanbruggen, doorstroomoppervlak en indien aanwezig zeer brede pijlers.
- Ingang van plassen aangetakt aan de rivier (ook rekening houdend met bodemhoogte).
- Belangrijke (stroomgeleidings)kades en inlaatkades retentiegebieden.
- Eilanden en nevengeulen.
- Toekomstige maatregelen (Reevediep, Deltaprogramma).
- Aansluiting met kanalen.
- Beekdalen (beken zelf niet noodzakelijk).
- Bandijken.

Ook is het belangrijk om de discretisatie van de bodemhoogte op het rooster mee te nemen in de opzet van het rooster. De bodemhoogte wordt ingevoerd op hoekpunten door te prikken in het hoogtebestand in Baseline. Op snelheidspunten wordt het gemiddelde genomen van de hoekpunten, op waterstandspunten het minimum van alle snelheidspunten (zie ook paragraaf 4.6.1).

Dit is met name belangrijk bij grote verandering in de bodem, bijvoorbeeld bij verticale kaden rondom stuwen (zie Figuur 4.1). Een kleine verplaatsing van de roosterlijn op de kade heeft hier grote gevolgen voor de discretisatie van de bodem. De bodemhoogte op snelheidspunten is van belang op het stroomvoerende profiel, terwijl de bodemhoogte op waterstandspunten enkel het bergende effect bepaalt. Het is daarom vooral van belang dat de snelheidspunten een goede bodemhoogte bevatten. Dit wordt bereikt door de roosterlijn altijd aan de lage zijde van de kade te leggen en de kade zelf ook te modelleren als overlaat in het model.



Figuur 4.1 Een dwarsdoorsnede van de bodemhoogte bij een kade met hierop het effect van de plaatsing van de drie gridlijnen op de discretisatie naar snelheids- en waterstandspunten

De resolutie van het rooster is vergelijkbaar met de resolutie van de vijfde-generatie modellen:

- In het zomerbed zijn er 6-10 cellen van minimaal 10 meter breedte. Deze hebben een aspectratio van maximaal 1:4 en zijn in de lengterichting 40 meter.
- In het winterbed wordt gericht op cellen met een aspect ratio van 1:1. Deze hebben dezelfde resolutie als de lengterichting van het zomerbed: 40 meter.

De cellen moeten een minimale resolutie van 10-15 meter hebben vanwege de subgrid-aanpak van overlaten (De Goede & Van Kester, 2013).

#### 4.1.2 Aanpak

Er is gekozen voor een methode waarbij het rooster zoveel mogelijk wordt uitgelijnd met stroombanen en waar vierhoekige roostercellen de voorkeur hebben boven driehoeken. Dit heeft de volgende voordelen (De Jong, 2017):

- Minder numerieke diffusie door uitlijning van het rooster met de stroomrichting.
- Een grotere rekentijdstep mogelijk door het grotere volume van vierhoeken ten opzichte van driehoeken.
- Minder roostercellen nodig door de betere gridconvergentie van vierhoeken.

Nadelen van deze methode zijn:

- Het ontwerp van het rooster is arbeidsintensiever.
- Eisen aan orthogonaliteit en smoothness zijn lastiger te halen.

De methode die gebruikt wordt voor het ontwerp kan benoemd worden als een blok-gestructureerd (of multiblok) rooster waarin verschillende kromlijnige blokken door de ongestructureerde administratie toch op elkaar aangesloten kunnen worden.

De algemene werkwijze kan samengevat worden in de volgende punten:

- 1 Allereerst wordt een kromlijnig rooster in het zomerbed gemaakt door met behulp van *splines* de oeverlijnen zo goed mogelijk te volgen.
- 2 Hierna volgt een exponentieel groeiende laag waarbij de langgerekte cellen van het zomerbed groeien tot vierkanten met een laag aspectratio.
- 3 Generatie overige uitgelijnde waterlichamen (kanalen, nevengeulen, etc.).
- 4 Vervolgens wordt het winterbed opgedeeld in blokken met vier hoekpunten die aansluiten op bestaande of toekomstige stukken rooster. Binnen ieder blok wordt een rooster van vierhoeken gegenereerd.
- 5 Afwerking om de roosterkwaliteit te verbeteren.



#### 4.1.3 Roostereigenschappen

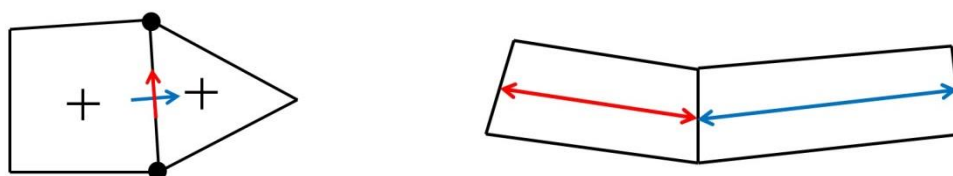
Na initialisatie van het model kan uit het uitvoerbestand (\*\_map.nc) worden uitgelezen hoeveel roostercellen (waterstandspunten) en flow links (snelheidspunten) er uiteindelijk actief zijn na toepassing van de rekenroosterbegrenzing. Dit is vergeleken met het (naar D-HYDRO geconverteerde) vijfde-generatie WAQUA-rooster in Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Vergelijking van aantal roostercellen en flow links voor de roosters van de vijfde en zesde generatie

	vijfde geenratie (40 m)	zesde generatie (40 m)
Aantal roostercellen	902.653	622.860
Aantal flow links	1.761.174	1.212.086

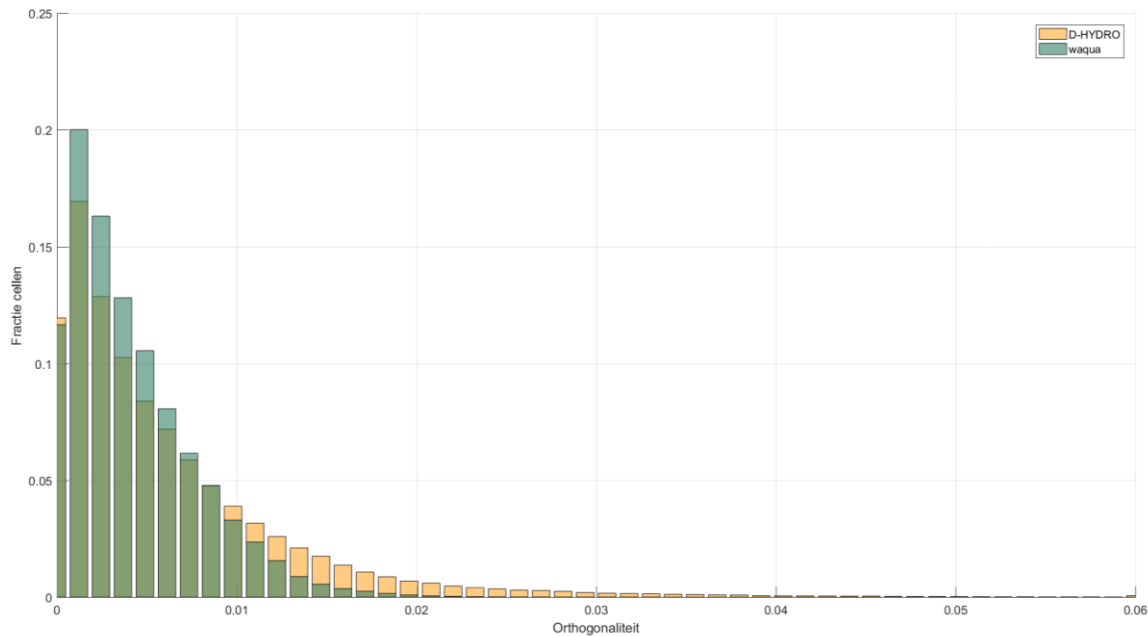
Traditioneel wordt een rekenkundig rooster getoetst aan met name de volgende eigenschappen:

- De orthogonaliteit: dit is de hoek tussen een netlink en een flowlink (Figuur 4.2 links).
- De gladheid (smoothness): dit is de verhouding van de lengte van twee aansluitende roostercellen (Figuur 4.2 rechts).



Figuur 4.2 Illustratie van orthogonaliteit (links) en gladheid/smoothness (rechts)

In Figuur 4.3 is een verdeling gemaakt van de orthogonaliteit en gladheid van het rooster. Het betreft hier alleen de orthogonaliteit van de riviertakken Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek, omdat het rooster op de IJssel nog aangepast zal worden in 2019. Hierbij is vergeleken met het vijfde-generatie WAQUA-rooster (geconverteerd naar D-HYDRO). Uit de figuren blijkt dat voor beide eigenschappen de kwaliteit van het rooster is verminderd. Dit wordt veroorzaakt doordat in het vijfde-generatie rooster deze eigenschappen leidend waren in de roostergeneratie, maar dat nu ook naar aanvullende eisen is gekeken (met name uitlijnen op geometrie en belangrijke kunstwerken) en daardoor op orthogonaliteit en gladheid wordt ingeleverd. In Bijlage C is een totaaloverzicht van het rooster opgenomen en worden locatiespecifieke keuzes beschreven.



Figuur 4.3 Verdeling van orthogonaliteit in het zesde-generatie rooster op de Boven-Rijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek (nog aanpassen naar volledig rooster)

Voor de orthogonaliteit is ernaar gestreefd om deze voor het merendeel van het rooster lager dan 0,01 te brengen. Lokaal kon echter niet voorkomen worden dat er vlakken met een orthogonaliteit tot 0,02 zouden ontstaan. Daarnaast zijn er enkele roostercellen met een orthogonaliteit tot 0,10. Deze zijn vooral buiten de stroomlijnen gehouden en vooral omringd door roostercellen met een lagere orthogonaliteit. Er zijn geen roostercellen in het model met een orthogonaliteit tussen 0,10 en 0,50 (het rekenkundig maximum van D-HYDRO).

Aan de gladheid zijn geen harde eisen gesteld. Toch wordt er geprobeerd om, voor een egaal beeld, het rooster zo glad mogelijk te houden.

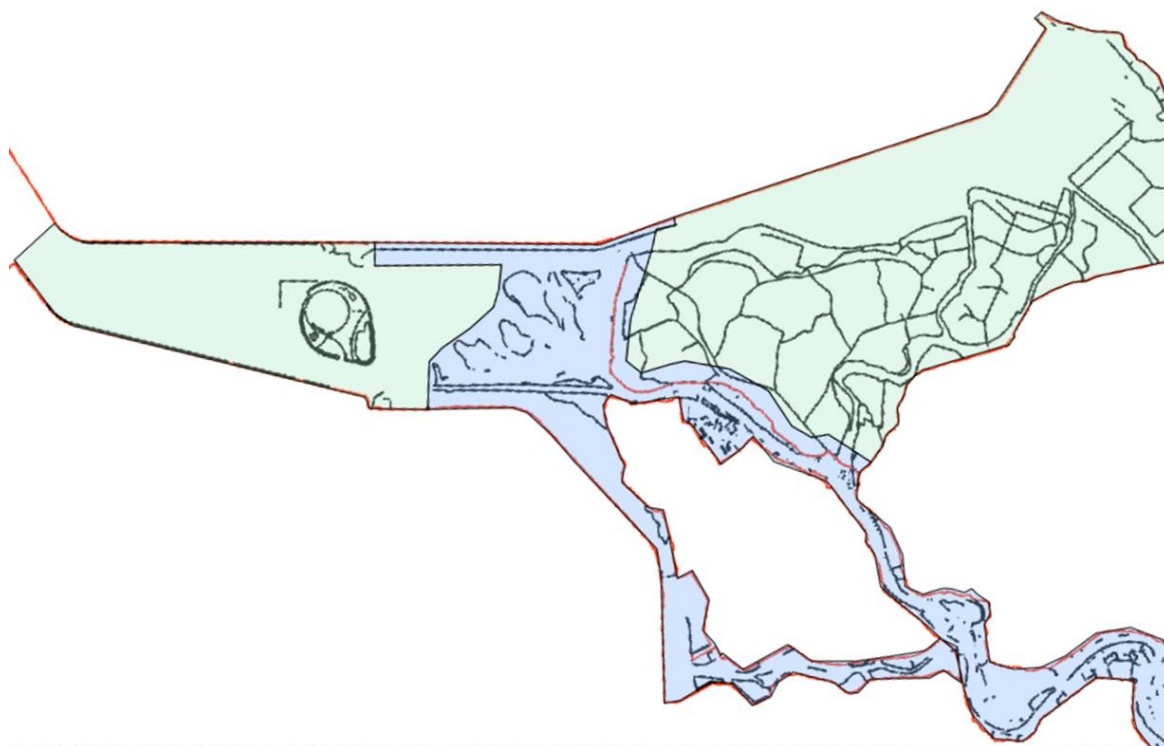
#### 4.1.4 Roosterontwerp in overlapgebieden

Het Rijntakken-gebied kent aansluitingen en/of overlap met drie andere modelgebieden, namelijk Rijn-Maasmonding, de Maas, en IJsselmeer-Vechtdelta (zie ook hoofdstuk 2.7). Voor het roosterontwerp in deze gebieden zijn de volgende afspraken gemaakt:

- 1 De Maas: Hoewel de modelgebieden van de Maas en de Rijntakken geen overlap hebben, raken ze wel aan elkaar en moet het mogelijk zijn om de gebieden aan te kunnen sluiten. Bovendien zijn beide takken samen onderdeel van het RMM-rooster. Er zijn drie aansluitingspunten, namelijk de sluisen bij Weurt (Maas-Waalkanaal), de bandijk bij Heerewaarden / Sint-Andries en de scheepvaartsluisen in de Afgedamde Maas. Op deze locaties zijn beide rekenroosters op elkaar afgestemd, zodat ze aangesloten kunnen worden zonder in te leveren op roosterkwaliteit. Over de bandijk bij Heerewaarden is wel ingeleverd op orthogonaliteit, omdat hier over een afstand van ongeveer 2 km de bandijk zo goed mogelijk gevolgd wordt. Afbeeldingen van het rooster op deze locaties zijn te vinden in Bijlage B.1.
- 2 De Rijn-Maas monding: Het modelgebied van de Rijntakken komt overeen met dat van de Rijn-Maas monding op de Lek tussen Hagestein en Krimpen aan de Lek en op de Waal tussen Tiel en Werkendam. Er is besloten om het rooster in dit overlapgebied op dezelfde manier op te zetten als het rooster van het rivierengebied en het dan over te

nemen in het RMM-rooster. Dit is gedaan vanuit het gebruiks-oogpunt: de beheergrenzen tussen RWS-ON en RWS-WNZ liggen bij Woudrichem op de Waal en Schoonhoven op de Lek.

- 3 IJsselmeer - IJssel-Vechtdelta: Het modelgebied van IJsselmeer – IJssel-Vechtdelta start op de IJssel bij Olst. Met name op het meer benedenstroomse deel van de IJssel (vanaf Zwolle / Kampen), het Reevediep en Keteldiep / Ketelmeer wordt de waterbeweging meer afhankelijk van wind dan van afvoer, en is de vraag of het rooster curvilineair of met driehoeken moet worden opgezet. Op locaties waar een dominante stromingsrichting is als gevolg van sturing door de geometrie, hebben vierhoekige cellen de voorkeur. Op locaties waar geen duidelijke stromingsrichting is, hebben driehoekige cellen de voorkeur. De uiteindelijke keuze voor het roosterontwerp in dit gebied is beschreven in (Genseberger, Niesten, & Fujisaki, 2018) en weergegeven in Figuur 4.4.



*Figuur 4.4 Keuze voor het roosterontwerp in het overlapgebied met IJsselmeer en IJssel-Vechtdelta, met in blauw het voorgestelde gebied voor een curvilineair rooster, en in groen het gebied waarin een triangulair rooster zal worden gebruikt.*

#### 4.2 Projectie vanuit Baseline

Voor de opzet van het model wordt grotendeels gebruik gemaakt van de geometrische gebiedsbeschrijving zoals deze opgenomen is in Baseline (zie Paragraaf 3.1). Met behulp van de tool BAS2FM zijn de bestanden geconverteerd naar de invoer voor D-HYDRO.

Vanuit Baseline worden de bestanden aangemaakt zoals weergegeven in Tabel 4.2. Een workflow van de Baseline-database naar deze bestanden is te vinden in Bijlage D.1. De wijze waarop de invoer door D-HYDRO naar het rooster geprojecteerd wordt is beschreven in Bijlage D.2.

Tabel 4.2 Overzicht van de verschillende soorten bestanden uit BAS2FM

Naamgeving FM	Extensie	Naamgeving WAQUA	Naamgeving Baseline 5	Beschrijving
netwerk	.net.nc	grid & bathymetry	rooster & bodem	De bodemhoogte wordt toegevoegd aan het rooster op de hoekpunten
landboundaries	.ldb		secties	<i>Enkel voor visualisatie</i>
fixed weirs	.pliz	weirs	overlaten	Subgrid afhandeling voor lokale bodemveranderingen, door een drempelwaarde op de snelheidspunten
trachytopen	.arl	roughcombination	ruwheid	Voor iedere snelheidslink is aangegeven uit welke trachytopen de ruwheid bestaat en in welke verhouding.
dry_areas	.pol	drypoints	schotjes	Definieert dat een roostercel niet actief is
thin dams	.pli	drypoints	schotjes	Definieert dat een snelheidspunt niet actief is
laterals	.pli	discharges	lateraal	Een lokale in- of uitstroming op een roostercel die niet aan de rand van het rooster zit.
weirs_gates	.pli	barriers	kunstwerken	In tijd variabele kunstwerken, afgehandeld als overlaat
observation points	.xyn	checkpoints	uitvoerlocaties	Locaties (waterstandspunten) waarop de waterstand met een hoge frequentie wordt weggeschreven

## 4.3 Randvoorwaarden

### 4.3.1 Open randen

#### *Bovenstreams*

De locatie van de bovenstroomse rand in de vijfde generatie ligt bij de brug bij Emmerich (ca. 10 km bovenstrooms van meetpunt Lobith). Deze is nu iets verder richting bovenstrooms verplaatst (ca. 5 km bovenstrooms van de werkelijke locatie van het meetpunt Emmerich, zie Figuur 4.5). Dit heeft als bijkomend voordeel dat er geen plas meer direct bij de instroomopening ligt. Voord deze bovenstroomse uitbreiding is extra Baseline-data beschikbaar gekomen.

Op de bovenstroomse rand wordt een afvoerrandvoorwaarde opgelegd. De totale afvoer die wordt opgelegd wordt automatisch verdeeld over de breedte van de rand. In berekeningen voor historische periodes wordt de afvoer ontleend aan de Qf-relatie bij Lobith. Kort gezegd geeft deze de relatie weer tussen de afvoer bij Lobith en de waterstand. De relatie houdt rekening met niet-stationaire effecten (hysterese van de afvoer), het stuwprogramma, bodemontwikkeling in de tijd. Vervolgens wordt deze afvoer handmatig verbeterd.

De afvoer bij Lobith moet vervolgens worden teruggerekend naar een afvoer bij Emmerich. Dit gebeurt normaalgesproken door de tijdreeks twee uur te verschuiven terug in de tijd ( $Q_{Emmerich} = Q_{Lobith} - 2 \text{ uur}$ ). Daarnaast wordt de afvoer op de rand iteratief aangepast, zodat de gewenste afvoer bij Lobith wordt gehaald. Hiermee kunnen ook de effecten van de berging tussen Emmerich en Lobith en de tussenliggende lateralen worden verdisconteerd.



Figuur 4.5 Locatie meetpunt Emmerich. Het blauwe gebied geeft het gebied aan dat in het zesde-generatie model is toegevoegd ten opzichte van de vijfde generatie. (Rode lijn = dekking vijfde-generatie model)

#### Benedenstreams

- **IJssel**

##### Ketelbrug

De locatie van de benedenstreamse rand op de IJssel ligt bij de Ketelbrug, zie Figuur 4.6. Hier worden de gemeten waterstanden van LMW<sup>2</sup>-locatie Kamperhoek<sup>3</sup> opgelegd of beschikbare Qh-relaties. De modelgrens bij de Ketelbrug ligt precies over de brug. In het vijfde-generatie model lag deze rand op dezelfde locatie.



Figuur 4.6 Locaties benedenrand(en) IJssel en bijbehorende meetpunten (rood omcirkeld). Blauw=dekking vijfde-generatie model.

##### Rampolbrug

Er is ook een open rand bij de Rampolbrug, die in de vijfde-generatie modellen niet wordt meegenomen. In het zesde-generatie model ligt hier wel een open rand. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de LMW-locatie Rampolbrug zich achter de Rampolkering (balgstuw), bevindt (zie §2.5.1.4), terwijl het model hiervoor al stopt, zie Figuur 4.7.

<sup>2</sup> LMW = Landelijk Meetnet Water

<sup>3</sup> Dit meetpunt is pas beschikbaar vanaf 2003, daarvoor was het dichtstbijzijnde meetpunt Rampolbrug.

Dit betekent dat hier geen correcte randvoorwaarden kunnen worden opgelegd wanneer de Ramspolkering gesloten is. De huidige grens bij de Ramspolbrug blijft echter gehandhaafd, omdat anders de Ramspolkering in het Rijntakkenmodel moet worden opgenomen.



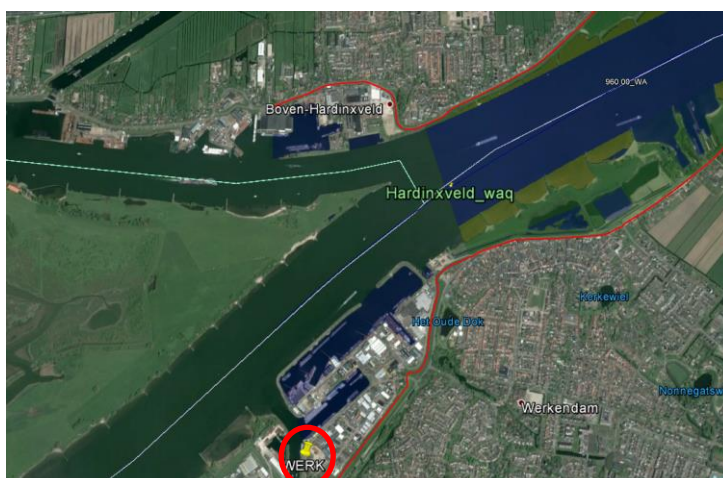
Figuur 4.7 Locatie benedenrand Ramspolbrug en bijbehorend meetpunt (rood omcirkeld). Blauw=dekking vijfde- en zesde-generatie model.

### Waal

De locatie van de benedenstroomse rand op de Waal ligt, net als in het vijfde-generatie model, bij Hardinxveld boven, vlak voor de splitsing in de Beneden Merwede en Nieuwe Merwede, zie Figuur 4.8. Hier ligt echter helaas geen meetlocatie. Als randvoorwaarde wordt nu gebruik gemaakt van de gemeten tijdreeksen van LMW-locatie Werkendam buiten, die met een SOBEK-RE model vertaald zijn naar de locatie van de rand en iteratief zijn aangepast totdat er een kloppende randvoorwaarde voor de rand was gegenereerd (Van der Veen en Agtersloot, 2011). In operationele toepassingen wordt hier echter rechtstreeks de tijdreeks van LMW-locatie Werkendam opgelegd. Daarnaast kan de volgende relatie worden gebruikt (zoals beschikbaar binnen de Lateralen Afvoer Generator (LAG)):

$$H_{\text{Hardinxveld}} = H_{\text{Werkendam\_buiten}} * 1.0501 - 0.0107$$

De huidige grens blijft gehandhaafd, alleen dient de relatie tussen de waterstand bij Hardinxveld en Werkendam opnieuw te worden afgeleid met recentere modellen voor 1998 en actueel, bij voorkeur met de meest geschikte WAQUA-modellen van het Rijn-Maasmonding gebied. Dit valt op dit moment echter nog niet binnen het kader van dit project.



Figuur 4.8 Locatie benedenrand Hardinxveld-boven en meetpunt Werkendam buiten (rood omcirkeld).  
Blauw=dekking vijfde- en zesde-generatie model.

### Lek

De locatie van de benedenstroomse rand op de Lek ligt, net als in het vijfde-generatie model, bij Krimpen aan de Lek bij het LMW-meetpunt met dezelfde naam, zie Figuur 4.9. De tijdreeksen van dit meetpunt kunnen dus rechtstreeks worden opgelegd of er kan gebruik worden gemaakt van beschikbare Qh-relaties.



Figuur 4.9 Locatie benedenrand Krimpen aan de Lek en bijbehorend meetpunt (rood omcirkeld).  
Blauw=dekking vijfde- en zesde-generatie model.

#### 4.3.2 Lateralen

Om diverse redenen zijn er laterale lozingen en onttrekkingen aan het model toegevoegd. Het kan hierbij gaan om gemalen, schutverliezen bij sluizen en instromende rivieren en beken met een breedte kleiner dan het rekenrooster. Het totale overzicht van laterale instromingen is gegeven in bijlage F.2, volgens de naamgeving vanuit Baseline.

De tijdseries van alle lateralen worden uitgerekend met de Randvoorwaarden Generator Watermodellen (zie Paragraaf 3.2.2).

#### 4.3.3 Meteorologie

Er is voor gekozen om geen gebruik te maken van diverse andere meteorologische randvoorwaarden omdat het effect hiervan op de hydrodynamische stroming beperkt is. In het model is daarom geen gebruik gemaakt van wind en regen.

#### 4.3.4 Initiële condities

Voor rivieren geldt over het algemeen dat initieel alleen het zomerbed (gedeeltelijk) gevuld moet zijn en de plassen in de uiterwaarden. Bij een gevuld winterbed verlies je het bergend effect van de uiterwaarden als er een hoogwatergolf moet worden doorgerekend. Als de plassen niet gevuld zijn, is er juist teveel berging in het systeem.

Binnen Baseline is hiervoor de Waterlevel Creation Tool (versie 0.1.2) beschikbaar (vergelijkbaar met WaqINI voor WAQUA). Deze tool genereert een waterstandsveld (bestandstype: hoogtemodel) op basis van de land/water grens zoals deze is opgeslagen in de Baseline-database. Dit waterstandsveld kan dan als basis worden gebruikt om goede initiële condities te genereren. Hierbij dient een initiële (stationaire) berekening plaats te vinden met de randcondities zoals die aan het begin van de uiteindelijke (eventueel dynamische) simulatie gebruikt gaan worden. Deze initiële berekening dient voldoende lang te zijn, zodanig dat er een stationaire toestand wordt bereikt (Spruyt, 2017c).

Indien een simulatie doorgestart dient te worden vanaf een specifiek moment, dan kan een restart-bestand gebruikt worden. Het restart-bestand bevat alle grootheden die van belang zijn voor de simulatie en is niet gekoppeld aan een bepaald tijdstip. Restart-bestanden gemaakt met een geparalleliseerd model kunnen samengevoegd worden met de tool *dfmoutput mapmerge* zodat deze ook gebruikt kunnen worden voor sequentiële simulaties of simulaties met andere parallelisaties van hetzelfde model.

Naast de initiële condities van het DFlow-FM-rekenhart dient ook het RealTimeControl-rekenhart (aansturing kunstwerken) een initiële toestand te krijgen. Dit gebeurt door het vervangen van het `state_import` bestand. Dit kan vervangen worden door de definitieve toestand van een eerdere simulatie (`state_export`) of door post-processing van het import-bestand met een python script.

### 4.4 Schematisatie en aansturing kunstwerken

De kunstwerken zoals geïntroduceerd in Hoofdstuk 2.5.1 worden ieder op hun eigen manier geschematiseerd in het model. In dit hoofdstuk worden alle verschillende typen kunstwerken langsgelopen. Voor ieder type wordt hierbij ook geschetst hoe deze aangestuurd worden door middel van FeedBackControl in D-RTC (RealTimeControl).



#### 4.4.1 Stuwen Neder-Rijn – Lek

De drie stuwcomplexen op de Neder-Rijn – Lek bestaan allen uit twee vizerschuiven (zie ook hoofdstuk 2.5 voor een volledige beschrijving), en zouden daarom bij voorkeur met het kunstwerk-type “gate” worden opgenomen. Ten tijde van de modelopzet is er echter geen afvoercoëfficiënt beschikbaar in combinatie met de *gate*, daarom is ervoor gekozen om de stuwen te implementeren als “general structure”. Dit type kunstwerk is complexer dan een *gate* maar kan gebruikt worden om een *gate* te beschrijven. De afzonderlijke schuiven hebben de volgende afmetingen:

	Breedte*	Drempelhoogte	Deurhoogte
Driel	48.3	1.25	8.9
Amerongen	48.3	-2	9.1
Hagestein	48.3	-4.5	9.0

In werkelijkheid zijn de vizerschuiven gebogen. De breedte in D-FM is gelijk genomen aan de kortste afstand tussen de linker- en rechteroever. De deurhoogte (afstand tussen de onder- en bovenkant van de deur) is niet exact bekend. Deze is afgeleid van het hoogteverschil tussen de landhoofden en de drempelhoogte van de stuwen. In operationele toepassingen zal de deurhoogte niet van belang zijn, omdat er in principe geen stroming over de deuren plaatsvindt. De deurhoogte is opgenomen zodat ook een situatie kan worden gesimuleerd waarin de vizerschuif zou falen en dicht blijft. Bovengenoemde eigenschappen zijn vast. D-RTC controleert de “hoogte onderkant deur” (gate lower\_edge\_level).

In de modelopzet is gebruik gemaakt van het vernieuwde Stuwprogramma 2016. De sturing voor de kalibratie en gebruik van het model zijn apart opgezet. Bij het gebruik van het model wordt het stuwpeil bepaald op basis van de waterstand bij Lobith, en bij kalibratie is het stuwpeil gegeven op basis van gemeten tijdseries. De stuwhoogte wordt in beide gevallen gecontroleerd met een PID-controller. Deze PID-controller probeert de waterstanden bovenstreams van de stuw zo goed mogelijk op het stuwpeil (het *setpoint*) te krijgen. Er wordt hierbij gebruik gemaakt van de volgende formulering, waarin  $f(t)$  de nieuwe stuwhoogte op de volgende tijdstap is en  $e(t)$  het verschil tussen de waterstand en het stuwpeil:

$$f(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

De kalibratiecoëfficiënten zijn als volgt:

$K_P$	<i>Proportional</i>	<i>Deze term regelt de snelheid van de stuwbeweging op basis van de actuele waterstand en is effectief in het reduceren van de fout, maar zal altijd een resterende fout overhouden</i>
$K_I$	<i>Integral</i>	<i>Deze term kijkt naar de voorgaande veranderingen in waterstand en beïnvloedt de tijd naar en de schommelingen rond het streefpeil, maar heeft maar beperkte invloed.</i>
$K_D$	<i>Derivative</i>	<i>Deze term dient toegevoegd worden aan de <math>K_P</math> om de setpoint te behalen.</i>

Voor een aantal testsommen zijn de kalibratiecoëfficiënten overgenomen uit het SOBEK3-model sobek-rijn-j17\_5-v1 (waarbij de  $K_p$  negatief is genomen omdat het hier om *gates* gaat in plaats van *weirs*). De kalibratie van de PID-coëfficiënten is uitgevoerd door Arcadis en wordt verder beschreven in Van der Baan (2019). Deze kalibratie leverde de volgende PID-waardes op:

$$K_p = 0.1$$

$$K_i = 0.001$$

$$K_d = 1$$

Bovenstaande waardes zijn gevalideerd met de (oude) standaardgolven van 4000 en 8000 m<sup>3</sup>/s en de huidige implementatie reproduceert het stuwprogramma goed.

#### *WKC Amerongen*

Net als de stuwbogen zelf, is de WKC bij Amerongen geïmplementeerd als general structure, die opent door de schuif omhoog te bewegen. De WKC heeft een capaciteit van maximaal 400 m<sup>3</sup>/s. Bij lagere afvoeren neemt de WKC de sturing over van de werkelijke stuw; bij hogere afvoeren wordt de capaciteit volledig benut en bepaalt daarnaast de stuw de waterstand bij Amerongen\_boven. Daarbij zijn een bepaald verval en een minimale afvoer van 25 m<sup>3</sup>/s vereist voor de waterkrachtcentrale. Samengevat zijn de volgende regels van toepassing op de sturing van de WKC:

- Bij een verval van minder dan 70 cm over het stuwcomplex, sluit de WKC.
- Bij een afvoer van minder dan 25 m<sup>3</sup>/s sluit de WKC.
- Bij een totale afvoer van meer dan 400 m<sup>3</sup>/s gaat er 400 m<sup>3</sup>/s door de WKC en de resterende afvoer door de stuwen.
- In alle andere gevallen neemt de WKC de sturing over van de stuwen.

Binnen het afvoerbereik waarin de WKC de sturing overneemt van de stuw (afvoer tussen 25 en 400 m<sup>3</sup>/s en een minimaal verval van 70 cm), wordt gebruik gemaakt van een PID-controller met dezelfde kalibratiecoëfficiënten als de stuw zelf. In de sturing is opgenomen dat wanneer de bovenstroomse afvoer hoger is dan 400 m<sup>3</sup>/s, de WKC stuurt op een afvoer (door de WKC) van 400 m<sup>3</sup>/s. De maximale opening van de WKC is daarbij gelimiteerd om ongeveer 400 m<sup>3</sup>/s door te laten, om slingeringen te voorkomen.

#### 4.4.2 Regelwerken

De twee regelwerken Regelwerk Pannerden en de Hondsbroeksche Pleij bestaan elk uit een aantal schotten. Omdat telkens één roostercel twee openingen bedekt, worden in D-HYDRO de schotten per twee vastgezet. De regelwerken zijn geïmplementeerd met kunstwerk-type weir. Tijdens de kalibratie van het model wordt voor de regelwerken géén gebruik gemaakt van D-RTC. De instellingen van de regelwerken tijdens de kalibratie- en validatieperioden zijn bekend. De hoogte van de schotten wordt tijdens de kalibratie ingevoerd als drempelhoogte van het kunstwerk.

Voor gebruik van het model wordt wel een sturing geïmplementeerd voor de regelwerken, omdat er gestuurd moet kunnen worden op een bepaalde afvoerverdeling over de takken. Hiervoor wordt weer gebruik gemaakt van een PID-controller, zoals beschreven in hoofdstuk 0, waarbij de drempelhoogte van het kunstwerk wordt aangestuurd. Hierbij mag de drempelhoogte van Regelwerk Pannerden variëren tussen 12.0 en 17.0 m+NAP, en de drempelhoogte van de Hondsbroeksche Pleij tussen 11.0 en 15.2 m+NAP.

#### 4.4.3 Inlaat Veessen-Wapenveld

De inlaat van de hoogwatergeul Veessen-Wapenveld bestaat uit 60 schotten, die bij hoge waterstanden op de IJssel (>5.65 m+NAP) worden geopend, zie ook de beschrijving in hoofdstuk 2.5.2.2). In het zesde-generatie model wordt dit kunstwerk bedekt door 30 roostercellen, iedere cel beslaat dus twee schotten. De afzonderlijke schotten zijn per twee geïmplementeerd als *general structure*, en hebben de volgende dimensies:

- Drempelhoogte: 4.65 m+NAP.
- Hoogte schotten: 1.06 m.
- Hoogte onderkant geopende schuif: 6.60 m+NAP.
- Breedte (dubbele) schuiven: 24 m.

De sturing van het kunstwerk gebeurt op basis van het bovenstroomse uitvoerpunt *IJ\_961.2\_L\_ov\_Inlaat-Veessen-boven*. Zodra de waterstand op dit punt 5.65 m+NAP overschrijdt, opent de eerste serie schuiven. In tegenstelling tot de werkelijke situatie wordt er vervolgens niet gewacht tot de waterstand benedenstrooms van het kunstwerk voldoende is gestegen. In de model-sturing wordt er van uitgegaan dat het twee uur duurt tot de waterstand achter het kunstwerk voldoende is gestegen. Twee uur na het openen van de eerste 10 kleppen wordt dus gestart met het openen van de volgende serie schuiven.

Voor de sturing van dit kunstwerk wordt dus geen gebruik gemaakt van een PID-controller. Op het moment dat de waterstand voor de inlaat (hiervoor wordt gekeken naar de waterstand op het observatiepunt 961.00\_IJ) hoger wordt dan 5.65 m+NAP, wordt het kunstwerk met een *relative time rule* als volgt geopend:

Tijd (seconden)	Tijd (minuten)	Schot	Hoogte onderkant schot
0 - 5040	0 – 84	11 - 24	van 4.65 naar 6.60 m+NAP
12240 - 16560	204 – 276	25 - 36	van 4.65 naar 6.60 m+NAP
16560 - 20160	276 – 336	1 – 10	van 4.65 naar 6.60 m+NAP
20160 - 37440	336 – 624	37 – 60	van 4.65 naar 6.60 m+NAP

Het sluiten van het kunstwerk gaat volgens het protocol direct van start als de waterstand tot onder de drempel is gezakt. In werkelijkheid zal de drempel nog moeten worden vrijgemaakt van obstakels. In D-HYDRO wordt het volledige kunstwerk in 6 uur gesloten nadat de waterstand onder de drempel komt.

#### 4.4.4 Kunstwerken Betuwepand

De schutsluizen en kering in het Betuwepand zoals genoemd in hoofdstuk 0 zijn geïmplementeerd met kunstwerktype “gate” en de volgende dimensies:

Naam	Drempelhoogte	onderkant deur (open)
Ravenswaaij	-2.35	11.65
Marijkesluis	-2	8
Bernhardsluis	-2	8

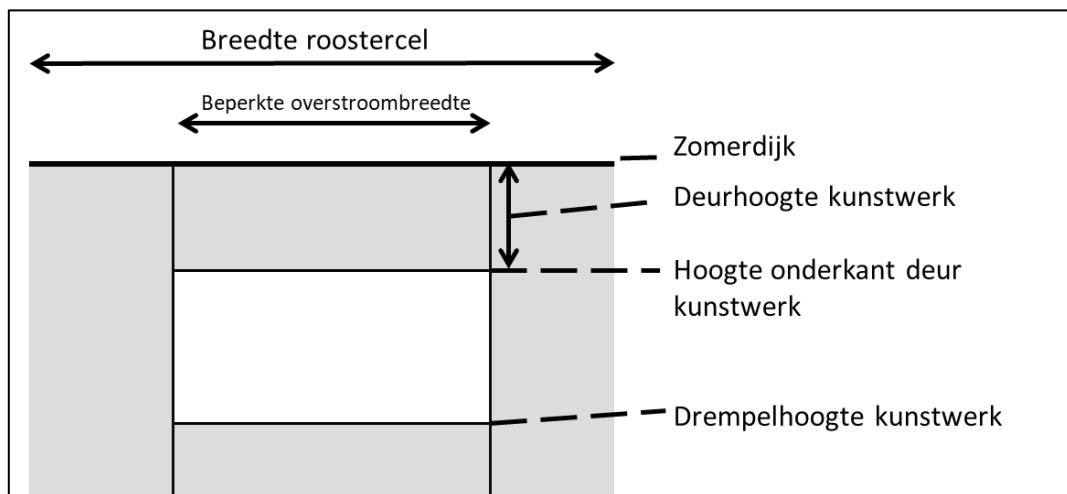
Voor de sturing van deze kunstwerken wordt geen gebruik gemaakt van een PID-controller, maar van een “rule”, op basis van de waterstanden zoals genoemd in hoofdstuk 0.

#### 4.4.5 Duikers en inlaatsluizen

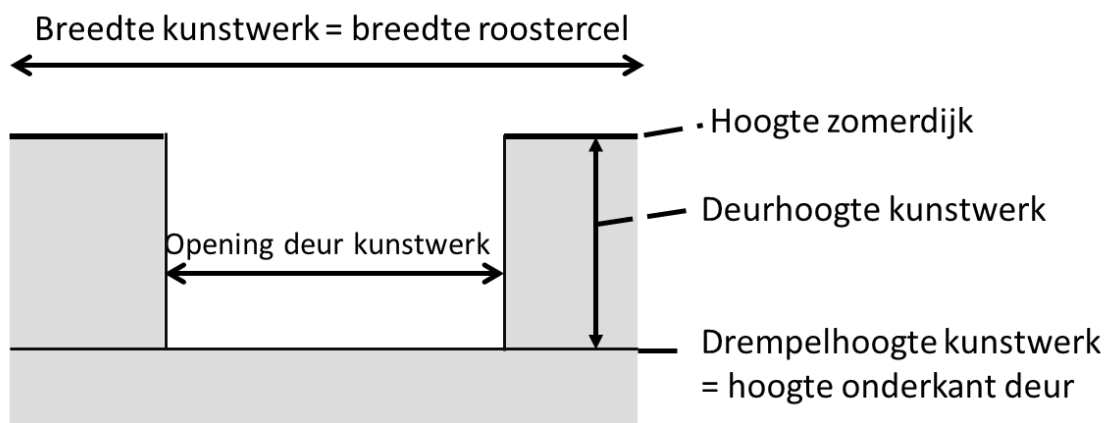
De inlaatwerken zoals genoemd in hoofdstuk 2.5.1.5 betreffen twee typen kunstwerken, namelijk duikers en coupures. De zomerdijken waarvan de inlaatwerken onderdeel zijn, bestrijken altijd meerdere roostercellen (orde grootte van deze dijken is enkele kilometers). De zomerdijken zijn opgenomen in D-HYDRO als overlaat (fixed weir). Wanneer de waterstand lager is dan de opgegeven kruinhoogte van de zomerdijk, wordt de stroming geblokkeerd. Omdat de inlaatwerken meestal kleiner zijn dan een enkele roostercel, is ervoor gekozen om de genoemde inlaatwerken te schematiseren als kunstwerken. Omdat projectie van een kunstwerk in principe "voorrang heeft" op de projectie van een overlaat, wordt de zomerdijk op de locatie van het inlaatwerk onderbroken door de duiker of coupure. De drempelhoogtes en breedtes van de afzonderlijke inlaatwerken zijn aangeleverd door RWS-ON.

Voor zowel coupures als duikers is ervoor gekozen om deze te implementeren als kunstwerk type "gate". Een *gate* heeft de eigenschappen *sill level* (drempelhoogte), *lower edge level* (hoogte onderkant deur), *door height* (deurhoogte) en *gate opening width* (horizontale opening deur). De duikers en coupures worden als volgt geschematiseerd:

- Duiker (Figuur 4.10): De drempelhoogte is gelijk aan het laagste punt van de duiker (onderkant buis), en de hoogte onderkant deur wordt gelijk gezet aan de drempelhoogte plus doorstroomhoogte van de duiker (bovenkant buis). De deurhoogte wordt berekend als kruinhoogte van de zomerkade minus bovenkant buis. Op deze manier loopt de zomerkade door in de cel waar de duiker wordt geprojecteerd en laat de zomerdijk al water door wanneer de waterstand de drempelhoogte van de duiker bereikt. Bij hogere waterstanden kan de duiker ook overstromen. Omdat de overlaat (zomerdijk) wordt onderbroken door het kunstwerk (duiker), ligt er in de volledige cel geen zomerdijk. De overstromingsbreedte is dus gelijk aan de kunstwerkbreedte, en wordt daarmee beperkt door de breedte van de duiker. Voor de huidige toepassing is geconcludeerd dat dit geen beperking vormt: over de totale lengte van de zomerdijk (orde grootte kilometers), is een vermindering van enkele meters verwaarloosbaar.
- Coupure (Figuur 4.11): Voor de schematisatie van een coupure wordt gebruik gemaakt van de mogelijkheid om een gate in horizontale richting te openen. De drempelhoogte is gelijk aan het laagste punt van de coupure. De deurhoogte van het kunstwerk is gelijk aan de kruinhoogte van de zomerdijk minus de drempelhoogte van de coupure. De totale breedte van het kunstwerk is (ongeveer) gelijk aan de lengte van de roostercel, waarbij de deuren in horizontale richting geopend zijn met de breedte van de coupure zelf. Op deze manier laat het kunstwerk met de juiste breedte water door bij zowel lage als hoge waterstanden.



Figuur 4.10 Schematisatie van een duiker door middel van een kunstwerk type "gate".



Figuur 4.11 Schematisatie van een coupure door middel van een kunstwerk type "gate".

Momenteel zijn een aantal softwarematige testen gaande om duikers en coupures, maar ook andere doorlaatmiddelen zoals bijvoorbeeld tunnels en sluiskolken te modelleren met een 1D-2D-koppeling.

#### 4.4.6 Bruggen

Brugpijlers in de uiterwaarden blokkeren de stroming en worden in D-HYDRO ingevoerd als hoogwatervrij terrein. Brugpijlers in het zomerbed worden verwerkt met een "porous plate"-aanpak, waarbij een kwadratische weerstand-term wordt toegevoegd aan de impulsvergelijking, waarvan de grootte afhangt van een coëfficiënt gebaseerd op de mate van blokkering van de rekencel. Omdat uit literatuur geen eenduidige methode kan worden afgeleid om de grootte van de verliescoëfficiënten te berekenen, hebben alle bruggen voorsnogen een verliescoëfficiënt van 1. Omdat bruggen met een sub-grid aanpak zijn geïmplementeerd, leveren twee brugpijlers in één roostercel een te groot energieverlies op. Voor beide pijlers wordt het verlies in dat geval immers berekend met de originele (onverstoorde) aanstroomsnelheid. Om een onrealistisch energieverlies te voorkomen, zijn brugpijlers die kort achter elkaar staan (in stroomrichting) deels verwijderd. De vuistregel daarbij is dat de minimale afstand tussen twee pijlers minstens twee volledige roostercellen moet beslaan. Bij verschillende diameters is altijd de kleinste pijler verwijderd.

## 4.5 Definitie ruwheden

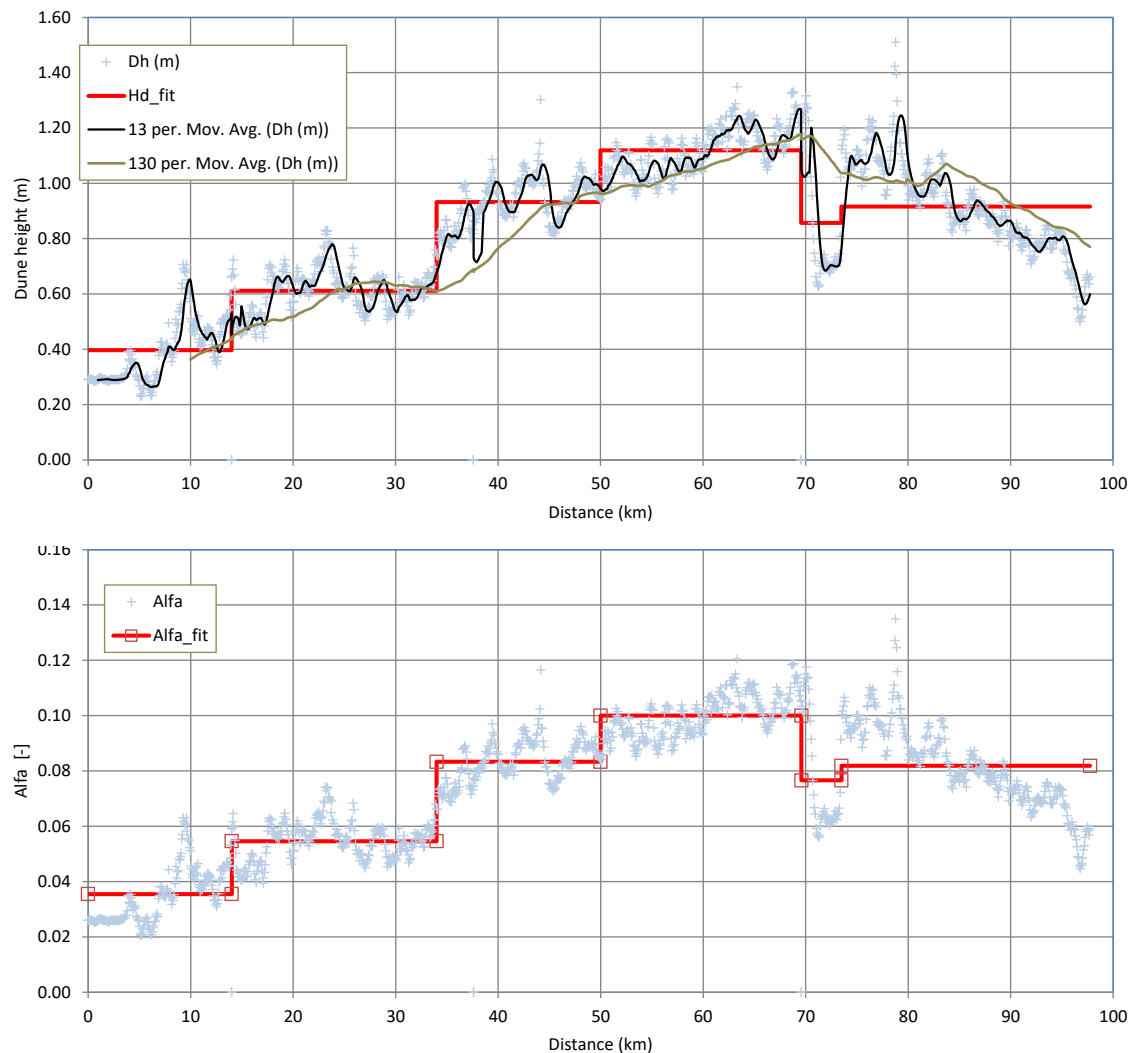
In het model wordt gebruik gemaakt van een ruimtelijk variërende ruwheid. In Baseline is dit gespecificeerd met polygonen en met behulp van de tool BAS2FM wordt voor iedere flow link (snelheidspunt) bepaald voor hoeveel procent dit afhankelijk is van de diverse polygonen. Binnen de trachytopen-module van D-HYDRO wordt vervolgens berekend welke ruwheid hierbij hoort. In tegenstelling tot de vijfde generatie worden deze waarden niet omgerekend naar Chézy, maar naar de gespecificeerde uniforme ruwheidsdefinitie van het model. Voor de zesde generatie is voor Manning gekozen.

De vertaalsleutel van ruwheidspolygonen naar ruwheden staat in het invoerbestand *roughcombination-all-2019\_6\_rijntakken-v1.ttd*, een geconverteerde versie van het bestand *roughcombination-all-2015\_5-v1* met de toevoeging van ruwheidscodes in de Duitse Rijn, omdat de bovenstroomse grens van het model verlegd is. Een beschrijving van de inhoud hiervan is hieronder gegeven voor het zomerbed en het winterbed. Het gehele bestand is opgenomen in Bijlage C.3.2.

### 4.5.1 Zomerbed

In tegenstelling tot de modellen van de vijfde generatie wordt de zomerbedruwheid niet gebruikt voor de kalibratie. In plaats daarvan wordt een kalibratiefactor toegepast bovenop een achtergrondruwheid (meer informatie volgt in Hoofdstuk 5.1.1). De achtergrondruwheid is de basis van de kalibratie en wordt bij voorkeur zo realistisch mogelijk gekozen op basis van de fysische eigenschappen van het segment van de rivier. Hierbij moet gedacht worden aan de opbouw van het sediment en de variatie van bodemvormen in tijd en ruimte.

Voor de bepaling van de achtergrondruwheid is gebruik gemaakt van de Van Rijn formule (1984), een ruwheidsschatter op basis van duinhoogtes waarin de korrelfrictie is genegeerd en alleen naar duinhoogtes is gekeken (zie voor de volledige analyse Bijlage C.3.1). Uit verschillende datasets is een gemiddelde duinhoogte en ruwheidscoëfficiënt bepaald. Op basis van de ruimtelijke trends in duinhoogte zijn alle takken opgesplitst in trajecten met verschillende ruwheidscoëfficiënten. Het resultaat voor de Boven-Rijn en Waal is weergegeven in Figuur 4.12. Het resultaat voor de overige takken en de volledige afleiding van de achtergrondruwheid zijn gegeven in Bijlage C.3.1.



Figuur 4.12 *Ruwheidstrajecten op de Boven-Rijn en Waal, waarin  $H_d$  de duinhoogte is, en Alfa de ruwheidscoëfficiënt zoals in de Van Rijn-formule.*

#### 4.5.2 Winterbed

Ook binnen het winterbed wordt gebruik gemaakt van verschillende ruwheidsformuleringen voor verschillende klassen, zie Tabel 4.3. In de tabel is ook af te lezen dat het mogelijk is om van een klasse een combinatie van andere ruwheidsklassen te maken. Dit werkt ook recursief waardoor soms voor één klasse tientallen subklassen worden gebruikt. Meer informatie over de ruwheidsformuleringen en hun coëfficiënten is te vinden in de D-Flow FM User Manual (Deltares, 2017).

Van een grote lijst met enkele honderden klassen (zie Bijlage D.1) is slechts een klein deel in gebruik in de schematisatie van het actuele model van de Rijntakken, zie Tabel 4.3. Naast de ruwheidsklassen van polygonen die in de figuur zijn weergegeven is er ook nog een klein deel van de ruwheden verwerkt in punten en lijnen.

Tabel 4.3 Overzicht ruwheidsformuleringen in het winterbed

Ruwheidsformulering	code	Codes
Hoogwatervrij terrein	1	1 – 3
White-Colebrook	51	101 – 300
Manning	53	301 – 500
Chézy	52	501 – 600
Simplified van Rijn	101	601 – 900
Barneveld 2	152	1201 – 1400
Bomen	251	1501 – 1600
Heggen 2	202	1601 – 1700
Combinaties	2	1801 – 2000

## 4.6 Fysisch-numerieke instellingen

In het model zijn diverse numerieke of geometrische instellingen belangrijk voor het verkrijgen van nauwkeurige modelresultaten. Een overzicht van alle instellingen is gegeven in Bijlage F. In onderstaande secties zijn enkele belangrijke keuzes toegelicht (overgenomen uit Spruyt et al., 2017). Voor de overige instellingen wordt verwezen naar Paragraaf 4.3 en Bijlage C in Spruyt et al. 2017. Hier wordt alleen in uitzonderlijke gevallen van afgeweken en alleen als hier een goed onderbouwde reden voor is.

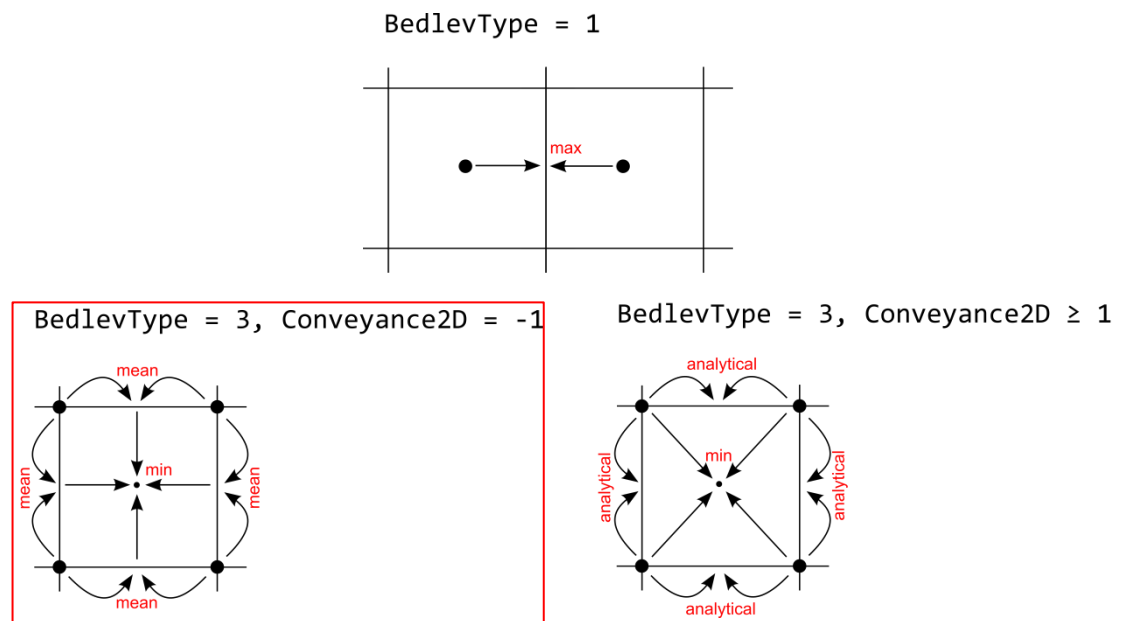
### 4.6.1 Bodemhoogtediscretisatie

In D-HYDRO zijn diverse instellingen mogelijk voor de locatie van de bodemhoogtes (zie de *BedlevTypes* in Figuur 4.13). Voor toepassing van morfologie is alleen voor 'bodemhoogtes in roostercellen' een volledige en gevalideerde implementatie beschikbaar. Deze aanpak is overgenomen uit Delft3D. Voor hydrodynamische modelschematisaties zijn beide aanpakken (*BedlevType*=1 of 3) mogelijk. De verschillen in resultaten zijn voor rivieren niet erg groot voor de verschillende opties en zijn weg te kalibreren. De ervaring bij zeeën en kusten is dat de verschillen groter zijn (met name vanwege de grovere resolutie) en daarom is besloten om bij zesde-generatie hydrodynamische modellen gebruik te maken van een discretisatie van de *bodemhoogte in hoekpunten (BedlevType=3)*. Voor morfologie is deze optie niet mogelijk. Daarom staat in Bijlage G van Spruyt et al. (2017) beschreven hoe uitgaande van een hydrodynamisch model met de bodemhoogte op hoekpunten een morfologiemodel kan worden afgeleid.

Er wordt geen gebruik gemaakt van interpolatie-(averaging-)algoritmen in DFlow-FM. In plaats daarvan wordt de bodemhoogte direct in het roosterbestand verwerkt door BAS2FM. Deze bodemhoogte wordt geprikt uit het Baseline-hoogtemodel op de locatie van de hoekpunten.

Naast de bodemhoogtes in hoekpunten (*BedlevType=3*) wordt *Conveyance2D = -1* toegepast. Deze goed werkende optie is gekozen omdat de overige opties voor *Conveyance2D* niet beschikbaar zijn in 3D-modellen en we ook de instellingen voor 2D en 3D modellen zo veel mogelijk op elkaar willen laten aansluiten.





Figuur 4.13 Schematische weergave hoe voor verschillende combinaties van BedlevType en Conveyance2D de bodemhoogte op de verschillende locaties van het rekenrooster wordt geprojecteerd. Rood omlijnd is de gekozen discretisatie.

#### 4.6.2 Overlaatformulering

Vanwege de gebruikte roosterresolutie kunnen niet alle lijnelementen in de bodem worden meegenomen. Er wordt daarom, net als in de vijfde generatie, een subgrid aanpak toegepast waarin vaste kunstwerken (o.a. kribben en overlaten) als zogeheten ‘fixed weirs’ in het model worden opgenomen. Bij de opbouw van het rooster dient er voor gezorgd te worden dat deze elementen zo goed mogelijk op het rooster geprojecteerd kunnen worden.

In de opzet van de zesde-generatie modellen wordt gebruik gemaakt van de zogeheten ‘Villemonte’ formulering (`FixedWeirScheme=9`), omdat deze meer flexibiliteit biedt in de modellering van overlaten dan de ‘Tabellenboek’-formulering (`FixedWeirScheme=8`), die tot nu toe standaard in de vijfde generatie wordt toegepast.

Als coëfficiënten wordt gebruik gemaakt van de standaard  $C1=1$  en  $C2=10$ . Deze zijn erop gericht om de resultaten van het Tabellenboek zo goed mogelijk te benaderen en vormen daardoor coëfficiënten voor een gladde overlaat vanuit de schaalmodelexperimenten gebruikt voor de opzet van het Tabellenboek. Een voorstel van Sieben (2010) is om de coëfficiënten te baseren op de ruwere overlaten van Bloemberg en daarom de coëfficiënten  $C1=0.8$  en  $C2=30$  te gebruiken. Er is voor de zesde-generatie modellen besloten om deze ruwere overlaten niet toe te passen.

#### 4.6.3 Horizontale viscositeit en diffusiviteit

D-HYDRO lost de ondiep watervergelijkingen op voor een niet-samendrukbare vloeistof. Over het algemeen is het rooster te grof en de tijdstap te groot om alle turbulente bewegingen te kunnen vatten. De turbulente processen zijn dan ‘sub-grid’.

De horizontale eddy viscositeit en eddy diffusiviteit worden meestal geassocieerd met de bijdrage van horizontale turbulente bewegingen en forceringen die niet worden weergegeven op het rooster of door de Reynolds-gemiddelde ondiep-watervergelijkingen. De horizontale coëfficiënten worden verondersteld te bestaan uit drie delen:

- i. Een deel door moleculaire viscositeit.
- ii. Een deel door '2D-turbulentie'.
- iii. Een deel door '3D-turbulentie'.

Voor de horizontale eddy viscositeit en eddy diffusiviteit kan een constante (of ruimtelijk variërende) achtergrondwaarde worden opgegeven. Het is binnen D-HYDRO nog niet mogelijk om gebruik te maken van HLES (Horizontal Large Eddy Simulation), een sub-grid model voor 2D-turbulentie. Wel is er een simpeler model beschikbaar, het zogeheten Smagorinsky model. Hiermee is het mogelijk om automatisch om te gaan met grote verschillen in celgrootte en mogelijk daarbij behorende stroomsnelheidsverschillen.

Om het effect van een 3D snelheidsprofiel mee te nemen in 2D dieptegemiddelde modellen kan een constante achtergrondwaarde worden gebruikt.

Daarom wordt in de zesde-generatie modellen gebruik gemaakt van de Smagorinsky-formulering (met constante  $C_s = 0,20$ ) samen met de constante achtergrondviscositeit (waarde van 0,1).

#### 4.6.4 Wandruwheid

Wanneer er geen stroming is door een celwand (edge), dan kan de diffusie van de ruwheid van deze celwand niet worden uitgerekend op basis van de stroomsnelheid en wordt er gebruik gemaakt van een slip-randvoorwaarde. Er zijn drie instellingen mogelijk:

- Vrije slip.
- Gedeeltelijke slip.
- Geen slip.

Bij vrije slip is er geen wandwrijving en dus een lagere weerstand, terwijl een simulatie zonder slip (geen slip) zal zorgen voor een grotere weerstand. Vrije slip komt overeen met de aanpak in WAQUA.

Rapporten van eerdere onderzoeken benadrukken de noodzaak van deze instelling voor een juiste berekening van de circulatie in kribvakken bij gebruik van een rekenrooster met een hogere resolutie in deelmodellen (Yossef, 2005 en Platzek & Patzwahl, 2015b). Door gebruik te maken van gedeeltelijke slip wordt de fysica beter gerepresenteerd en kan de instelling gelijk blijven voor verschillende resoluties.

Omdat we bij de opzet van de zesde-generatie modellen uitgaan van overzichtsmoellering is het effect echter zeer klein en wordt in de zesde-generatie modellen (net als in de vijfde generatie) gebruik gemaakt van ruwheid op basis van de vrije slip ( $i_{rov}=0$ ).

#### 4.6.5 DIMR en rekentijdstappen

Om de rekenharten (D-RTC en DFlow-FM) aan te sturen, wordt gebruik gemaakt van de Deltares Integrated Model Runner (DIMR). In de DIMR wordt gebruik gemaakt van een eigen tijdstap waarop gecommuniceerd wordt tussen beide modellen. Deze communicatietijdstap is gespecificeerd op 1 minuut. Na iedere 5 minuten worden waterstanden en afvoeren van DFlow-FM doorgegeven aan D-RTC. Met behulp van de gegeven logica uit Paragraaf 4.4 berekent D-RTC een nieuwe stand van de kunstwerken waarna deze worden teruggegeven aan DFlow-FM. Deze stuw- en keringstanden worden gedurende de volgende 5 minuten gebruikt in de berekening van DFlow-FM, waarna dit proces zich herhaalt.

Binnen deze communicatietijdstap hanteert het impliciete rekenhart van DFlow-FM een eigen rekentijdstap. Deze tijdstap wordt automatisch gelimiteerd op basis van het CFL-criterium en het ingegeven Courant-nummer (gespecificeerd op  $CFL_{Max} = 0.7$ ). Bij een combinatie van hoge stroomsnelheden en/of kleine roostercellen zal het CFL-criterium de rekentijdstap verkleinen. Omdat slechts één rekencel hierdoor de rekentijdstap van het hele model kan beïnvloeden dienen kleine rekencellen op locaties met hoge stroomsnelheid voorkomen te worden.



## 5 Kalibratie en validatie

Het model wordt gekalibreerd om te compenseren voor onbekenden en onnauwkeurigheden in de modelopzet. Onbekend is bijvoorbeeld de ruwheid van het zomerbed, onnauwkeurigheid wordt geïntroduceerd door bijvoorbeeld geometrische variaties van een subgrid resolutie of door fouten in de berekende energieverliezen van kribben. De kalibratie zal ook compenseren voor onbedoelde fouten in Baseline-schematisaties en randvoorwaarden.

### 5.1 Methodiek

#### 5.1.1 Kalibratiefactor

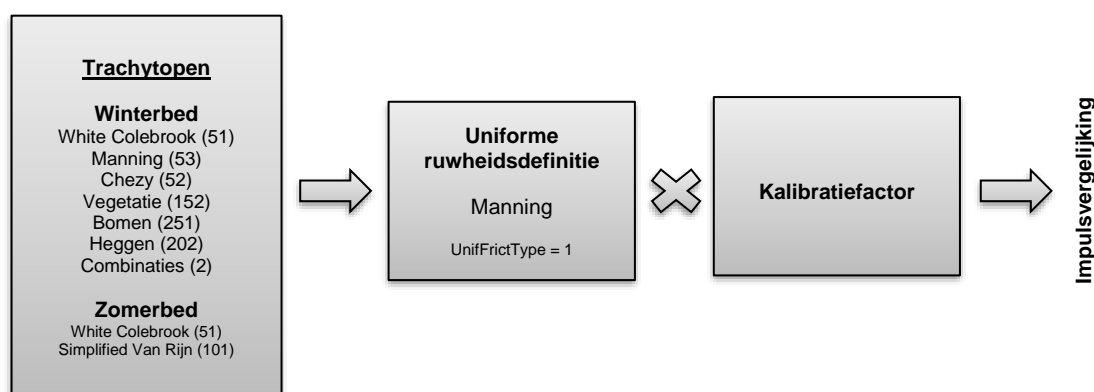
Voor de kalibratie van het model worden niet langer aanpassingen gedaan aan de definitie van de trachytopenruwheden (in het .ttd-bestand), maar wordt gebruik gemaakt van een nieuwe ruimtelijke variabele: de kalibratiefactor.

De werking van de kalibratiefactor is weergegeven in Figuur 5.1. Eerst wordt de trachytopen ruwheid omgerekend naar de uniforme ruwheidsdefinitie zoals dit aangegeven staat in het .mdu-bestand (in dit geval Manning). Deze Manning-ruwheid wordt vermenigvuldigd met een kalibratiefactor en pas daarna toegepast in de impulsvergelijking.

De invoer van de kalibratiefactor is vergelijkbaar aan de trachytopen en bestaat uit twee bestanden:

- Per roostercel wordt een kalibratiecode gespecificeerd (.cll-bestand).
- Per kalibratiecode wordt een (afvoerafhankelijke) kalibratiefactor toegekend (.cld-bestand).

Een kalibratiefactor van 1.0 betekent dat er geen veranderingen aan de ruwheid gedaan worden. Roosterzellen waar geen specifieke kalibratiecode aan is toegewezen, krijgen de kalibratiefactor 1.0.



Figuur 5.1 Werking van de kalibratiefactor

## 5.1.2 Kalibratietrajecten

Voor de toepassing van de kalibratiefactor worden de Rijntakken opgedeeld in kalibratietrajecten. De kalibratietrajecten worden op analoge manier gekozen als in de vijfde generatie. Kalibratietrajecten worden enkel onderbroken op plekken waar volgens het huidige systeem metingen aanwezig zijn (Landelijk Meetnet Water (LMW-)stations). Stations die in het verleden op een andere locatie lagen zullen wel worden gebruikt bij de kalibratie, maar het kalibratietraject zal gedefinieerd worden op basis van de huidige locaties. In principe worden alleen meetstations met een hoger meetfrequentie (10 minuten of één uur) gebruik voor de kalibratie. Meetstations met etmaalwaarden zullen gebruikt worden ter validatie. Een overzicht van de trajecten zoals gebruikt in de vijfde generatie is gegeven in Tabel 5.1 in combinatie met de beschikbare LMW-stations in 1995 en de huidige.

Voor de zesde generatie wordt de lijst nog uitgebreid met het station Tiel-kanaal. Dit ligt in het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal en kan gebruikt worden als kalibratie- en validatiestation en was ook al aanwezig in 1995. In feite wordt het traject Amerongen beneden-Culemborg gesplitst door het extra meetstation. Het Betuwepand wordt niet apart gekalibreerd, omdat hier geen nauwkeurige afvoermetingen beschikbaar zijn.

Een ander verschil met de kalibratietrajecten in de vijfde-generatie modellen is dat de kalibratietrajecten nu van stuw tot stuw lopen. In de vijfde generatie werd het traject tussen de twee meetpunten (*stuw<sup>boven</sup>* tot *stuw<sup>beneden</sup>*) gekalibreerd door de ruwheid aan te passen. In de huidige modelopzet zit de grens tussen twee kalibratietrajecten op de stuw, waarmee het korte kalibratietraject over de stuw komt te vervallen. Het verval over de stuw wordt nu gekalibreerd door de verliescoëfficiënt van de stuw in volledig geopende toestand te kalibreren (zie ook hoofdstuk 5.1.5).

Tabel 5.1 Ruwheidstrajecten en bijbehorende LMW-metstations in het zesde-generatie model.

traject	code	LMW-stations 1995	Huidige LMW-stations	rkm
<b>Boven-Rijn</b>				
Emmerich – Lobith	2000	Lobith	Emmerich	862.180
Lobith – Lobith haven	2001		Lobith	
Lobith Haven – Pannerdensch Kop	2002		Lobith Haven	
<b>Waal</b>				
Pannerdensch Kop – Nijmegen	2003	Pannerdensch Kop	Pannerdensch Kop	867.22
Nijmegen – Dodewaard	2004	Nijmegenhaven	Nijmegenhaven	884.87
Dodewaard – Tiel	2005		Dodewaard	901.30
Tiel – Varik	2006	Tiel Waal	Tiel Waal	913.25
Varik – Sint Andries	2007			
Sint Andries - Heesselt	2008			
Heesselt - Zaltbommel	2009			
Zaltbommel – Vuren	2010	Zaltbommel	Zaltbommel	934.78
Vuren – Merwedekop	2011	Vuren	Vuren	951.78
<b>Pannerdensch Kanaal</b>				
Pannerdensch Kop – Pannerden	2012	Pannerdensch Kop	Pannerdensch Kop	867.22
Pannerden – Looveer	2013		Looveer	876.50
Looveer – IJsselkop	2014			
<b>Neder-Rijn / Lek</b>				
IJsselkop – Arnhem	2015	IJsselkop	IJsselkop	878.46

traject	code	LMW-stations 1995	Huidige LMW-stations	rkm
Arnhem – stuw Driel	2016			
Stuw Driel – Grebbe	2017	Driel beneden	Driel beneden	891.75
Grebbe – stuw Amerongen	2018		Grebbe	908.09
Stuw Amerongen – Tiel Kanaal	2019	Amerongen beneden	Amerongen beneden	922.54
Tiel Kanaal – Culemborg	2020		Tiel Kanaal	
Culemborg – stuw Hagestein	2021	Culemborgbrug	Culemborg	939.80
Stuw Hagestein – Schoonhoven	2022	Hagestein beneden	Hagestein	947.11
Schoonhoven – Krimpen a/d Lek	2023	Schoonhoven	Schoonhoven	971.59
<b>IJssel</b>				
IJsselkop – Hondsbroeksche Pleij	2024	IJsselkop	IJsselkop	878.46
Hondsbroeksche Pleij – Westervoort	2025		Hondsbroeksche Pleij IJssel	
Westervoort – De Steeg	2026		Westervoort	881.05
De Steeg – Doesburg	2027		De Steeg	890.66
Doesburg – Zutphen	2028	Doesburgbrug	Doesburg	903.02
Zutphen – Eefde beneden	2029	Zutphen noord	Zutphen	929.30
Eefde beneden – Deventer	2030		Eefde beneden	931.00
Deventer – Olst	2031		Deventer	944.97
Olst – Veessen	2032	Olst	Olst	957.12
Veessen - Wijhe	2033		Wijhe	
Wijhe – Wapenveld	2034			965.17
Wapenveld – Katerveer	2035	Katerveer		
Katerveer – Reevediep	2036		Katerveer	980.75
Reevediep – Kampen	2037	Kampenbovenhaven		
Kampen – Keteldiep	2038		Kampenbovenhaven	994.49
Keteldiep – einde Keteldiep	2039		Keteldiep	1001.42

\* metingen bij meetpunt Arnhem voor de gebruikte jaren van 2011 en 2013 zijn geen echte meting, maar een berekening op basis van omliggende meetstations

Tabel 5.2 Overige LMW-stations

LMW-station	Waterlichaam	rkm
Hardinxveld	Waal	961.25
Krimpen aan de Lek	Lek	988.64
Ramspolbrug	Ketelmeer	
Roggebotsluis	Ketelmeer	
Ketelhaven	Ketelmeer	
Kamperhoek	Ketelmeer	

De trajecten zijn onafhankelijk van de trachytopen en laten daardoor toe om zowel het zomerbed als het winterbed te kalibreren. Hierdoor is het mogelijk om daar te kalibreren waar de onzekerheden het grootst zijn. Het kalibreren van het winterbed introduceert echter complicaties bij studies naar vergunningverlening, waardoor uiteindelijk is besloten de kalibratiefactor enkel toe te passen op het zomerbed. De polygonen voor de kalibratiefactoren worden daarom in de breedte begrensd door de smalste recente ligging van het zomerbed. Voor meer informatie en achtergrond van deze keuze wordt verwezen naar het memo van Kosters & Niesten (2019).

Om de afvoerverdeling tijdens de kalibratie te garanderen, worden alle takken (Waal, Neder-Rijn Lek en IJssel) eerst apart gekalibreerd. Het is namelijk van belang dat het aanpassen van de ruwheden niet leidt tot een andere afvoerverdeling. Door de takken apart te kalibreren kan de afvoer expliciet worden opgelegd. Na kalibratie van de afzonderlijke takmodellen worden de takken samengevoegd en worden voor alle afvoerniveaus de Boven-Rijn en Pannerdensch Kanaal gekalibreerd. Er is één uitzondering op deze aanpak: met het laagste afvoerniveau L1 worden de Waal en Neder-Rijn Lek samengevoegd en samen gekalibreerd. Deze keuze is gemaakt omdat tijdens lage afvoeren ( $< 1350 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Lobith) zowel de Kering Ravenswaaij (noordzijde Betuwepand) als de Bernhardsluizen (zuidzijde Betuwepand) open staan. De Waal en de Neder-Rijn Lek staan dan in open verbinding met elkaar en dienen dus als één systeem te worden beschouwd.

De aansluiting tussen de opeenvolgende kalibratietrajecten dient glad te verlopen, zodat er geen plotselinge overgangen zijn in de kalibratiefactoren. Dit heeft namelijk een nadelige invloed op morfologische berekeningen. Een tool voor het aanmaken van deze overgangen is nu beschikbaar binnen BAS2FM<sup>4</sup>. Voor het maken van de gladde overgangen worden in principe een overgangslengte van 2000 m en 20 discrete stappen gehanteerd (1000 m beide kanten op). Waar nodig wordt deze lengte verkleind, omdat enkele kalibratietrajecten te kort zijn. **Omdat een gladde overgang tussen drie kalibratietrajecten (nog) niet mogelijk is, is voorgesteld om de overgangen bij de twee splitsingspunten (Pannerdensch Kop en IJsselkop) in de benedenstroomse takken te leggen. Voor kalibratie van de afzonderlijke takken is deze keuze nog niet van belang:** omdat het bovenstroomse kalibratietraject dan niet is opgenomen in het model (bijvoorbeeld Boven-Rijn in het geval van het Waal-takmodel), is de gladde overgang op de bovenrand verwijderd.

### 5.1.3 Kalibratie- en validatieperioden

Voor de kalibratie van het model wordt gebruik gemaakt van een afvoerafhankelijke kalibratie. Dit betekent dat voor verschillende afvoeren een andere kalibratiefactor gebruikt zal worden. Voor tussenliggende afvoeren wordt de kalibratiefactor geïnterpoleerd, buiten de afvoerniveaus wordt de kalibratiefactor constant gehouden.

De keuze van de afvoerniveaus en de kalibratiemethodiek heeft grote invloed op de resultaten van validatie en modeltoepassingen, zoals onderzocht in Domhof et al. (2017). Er zijn verschillende methoden om de kalibratieniveaus te bepalen:

- Op basis van terugkeertijd.
- Op basis van geometrie.
- Op basis van beschikbare metingen.
- Op basis van grootste fout in modelresultaten.

Er is besloten vooral te kijken naar de geometrie en de beschikbare metingen. Hierop zijn de afvoerniveaus besloten zoals gegeven in Tabel 5.3.

---

<sup>4</sup> Om plotselinge overgangen in de ruwheid te voorkomen zouden ook in de basisruwheid gladde overgangen moeten worden toegepast. Dit is nu echter niet gedaan. Wel is er met het afleiden van de basisruwheden op gelet dat het verschil tussen opeenvolgende trajecten niet te groot is.



Tabel 5.3 Gebruikte afvoerniveaus voor kalibratie

Niveau		Afvoer bij Lobith (m <sup>3</sup> /s)	
Laag	L	800 – 1.000	Dit zijn de laagste afvoeren die regelmatig voorkomen.
Midden 1	M1	2.000	Bij deze afvoer is het zomerbed grotendeels gevuld.
Midden 2	M2	4.000	Bij deze afvoer zijn de uiterwaarden net gevuld, maar stromen nog niet mee.
Hoog 1	H1	8.000	Dit is de hoogste recente afvoer van het Hoogwater (januari) 2011.
Hoog 2	H2	12.000	Dit is de hoge afvoer van het Hoogwater (januari) 1995 die ook bij WAQUA diende voor de kalibratie van het hoogste afvoerniveau.

Bij de keuze voor kalibratie- en validatieperioden is gekeken naar de volgende onderdelen:

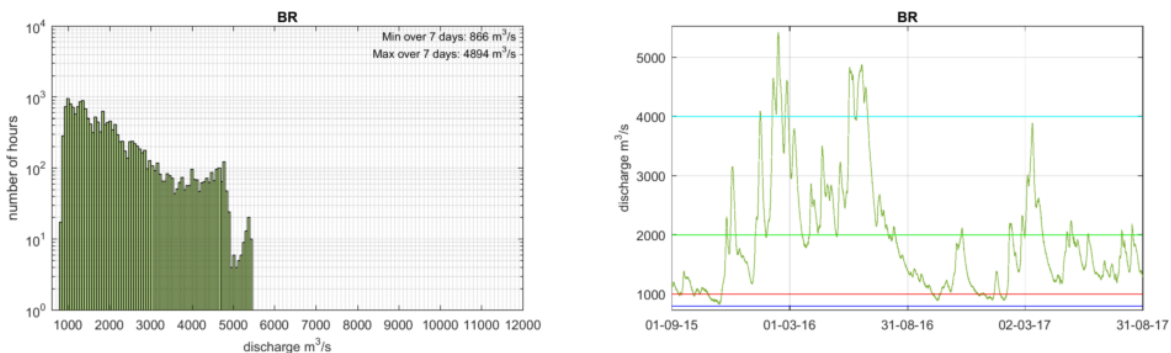
- Is het een periode met een stabiele afvoer?
- Zijn er binnen de periode grote veranderingen in de geometrie waardoor de metingen en schematisatie niet goed op elkaar aansluiten?
- Welke metingen zijn er per periode beschikbaar? Naast de beschikbaarheid van standaardmetingen (afvoer, ADM, waterstanden en belangrijke lateralen) kan hier ook gekeken worden naar: vloedmerken, inundatiekaarten en overige waterstandsmetingen.
- Bij voorkeur een zo recent mogelijke periode.
- Zoveel mogelijk afwezigheid van stormperiodes.

Daarnaast wordt een periode in de zomer liever niet gebruikt, aangezien dan andere vegetatieruwheden gelden. Voor extreem lage afvoeren worden bij voorkeur meerdere periodes of een langere kalibratieperiode gebruikt, want een juiste afvoerbeschrijving komt erg nauw bij lage afvoeren. In Tabel 5.4 worden de uiteindelijk gekozen kalibratie- en validatieperiodes samengevat. Voor een motivatie en meer precieze beschrijving van de periodes en bijbehorende afvoervensters wordt verwezen naar het memo van Niesten (2019).

Tabel 5.4 Gebruikte kalibratie- en validatieperioden. De afvoeren verwijzen naar de afvoer bij Lobith.

	Afvoer	Kalibratie	Validatie 1	Validatie 2
Laag (L)	1000	dec 2016/jan 2017	Okt 2015	Nov 2011
Midden 1 (M1)	2000	Nov 2016	Feb 2017	Dec 1994
Midden 2 (M2)	4000	Jan 2016	november 2010	Jan/feb 1995
Hoog 1 (H1)	8000	Januari 2011	Januari 2003	Januari 1994
Hoog 2 (H2)	11.800	Februari 1995	December 1993	-

Voor het laagste afvoerniveau geldt dat er weinig tot geen verval is over de stuwpanen van de Neder-Rijn/Lek. Aanpassingen van de zomerbedruwheid hebben dan nauwelijks invloed op de waterstanden. Dit afvoerniveau wordt daarom niet meegenomen voor de betreffende trajecten (conform de aanpak op de Maas). Voor het niveau M1 geldt dat er nog steeds erg weinig verval is over de twee benedenstroomse stuwpanen, maar deze worden toch gekalibreerd. Na de kalibratie wordt gekeken in hoeverre niveau M1 en M2 eventueel moeten worden samengevoegd.



Figuur 5.2 Afvoer Lobith: 1 september 2015 – 31 augustus 2017 (uurwaarden)

## 5.1.4 Uitwerking per kalibratieperiode

### Laag 1

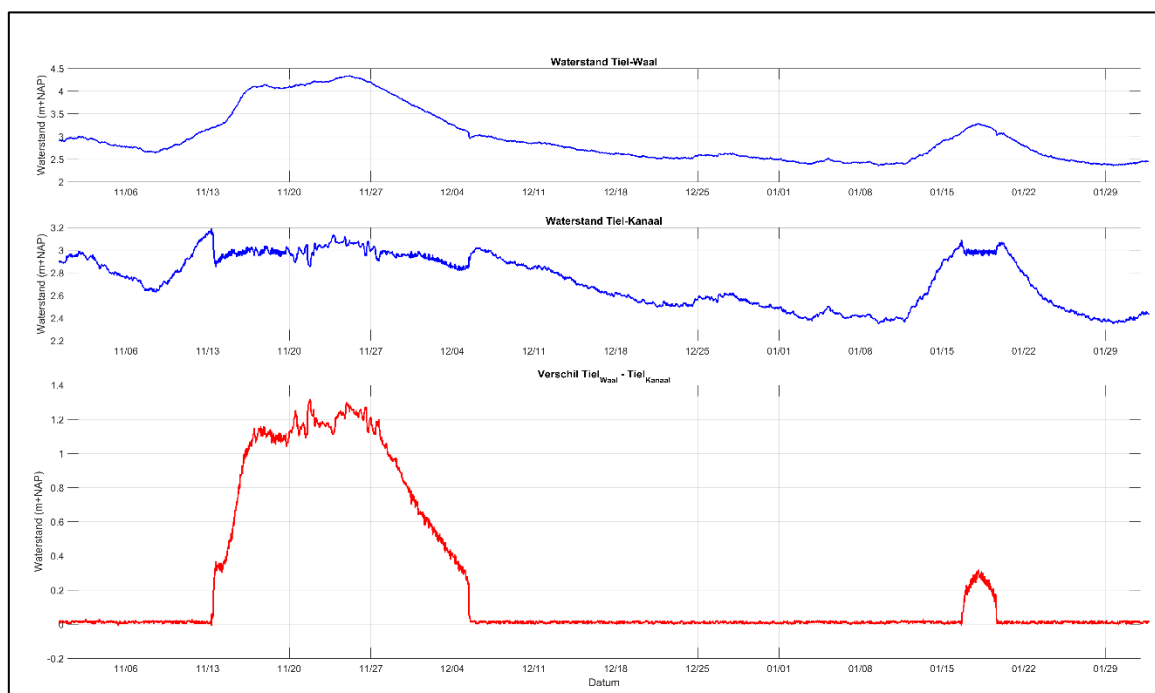
Kalibratieperiode: 21-12-2016 t/m 10-01-2017 (berekening van 15-12-2016 t/m 10-01-2017)

De kalibratieperiode voor de Waal en Neder-Rijn Lek is gekozen rekening houdend met:

- De stuwrenovatie Driel (19-10-2016 t/m 11-11-2016). Tijdens werkdagen wordt de afvoer geknepen (tussen 8:00 en 17:00). Deze periode is daarom niet opgenomen in de kalibratieperiode.
- Openen en sluiten van de Bernhardsluizen. Om discontinuïteiten tijdens de kalibratie te voorkomen is er gekozen voor een periode waarin de Bernhardsluizen altijd open staan (zie Figuur 5.3 Figuur 5.2).

Tevens zijn er periodes geweest met harde wind in de periode 15-12-2016 t/m 15-1-2017 (zie Figuur 5.4). Gezien de bovenstaande overwegingen is er toch gekozen voor een periode met wind.

De kalibratieperiode op de IJssel is gelijk aan die op de Waal en Neder-Rijn Lek. Hierbij is rekening gehouden met de beschikbare data, met name beschikbaarheid van laterale afvoeren vanuit de Oude IJssel en Twentekanaal (zie Figuur 5.5). Voor de IJssel, en dan met name het benedenstroomse deel tot en met Zutphen, kunnen ook windeffecten een rol spelen voor de waterstand (vooral bij lagere afvoeren). De pieken in de windsnelheid zoals te zien in Figuur 2.1 zijn dan ook direct terug te zien in de waterstanden, met name als de wind uit westelijke tot noordelijke richting komt (270 tot 360 graden), zie Figuur 5.4 (boven) en Figuur 5.4 (onder).



Figuur 5.3 Opener van de Bernhardsluizen zoals zichtbaar in de waterstandsverschillen tussen meetstation Tiel-Waal en Tiel-Kanaal.

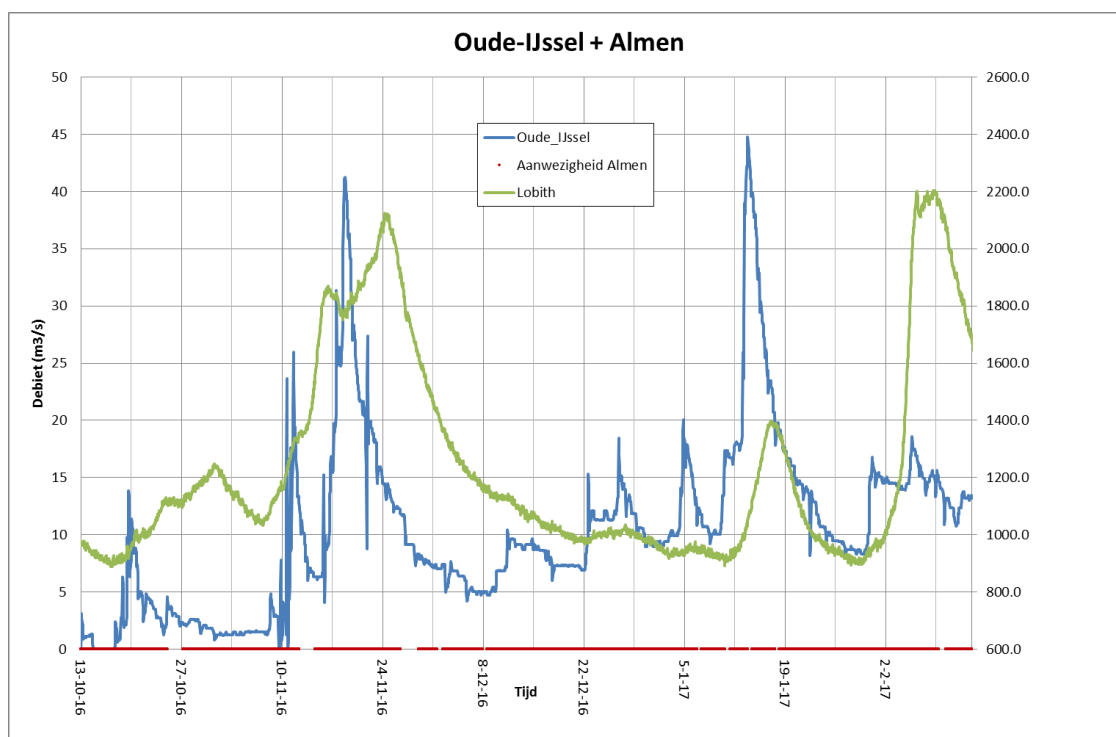


Figuur 5.4 Wind snelheid en -richting (gemiddelde uurwaarden) voor een aantal meetstations. De grijze verticale lijnen geven de kalibratieperiode aan (bron: KNMI <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie-metingen-en-waarnemingen>).

In de kalibratie van de vijfde-generatie modellen zijn de stuwen op de Neder-Rijn en Lek gestuurd op waargenomen waterstanden. Dit bleek echter een direct effect op de kalibratie van de Waal te hebben: Wanneer de gemodelleerde waterstand bij Hagestein-Boven te hoog was, ging de stuw open om meer afvoer door te laten. In werkelijkheid blijkt de stuw tijdens periodes van lage afvoer dicht te staan, en kan water uit het stuwpand Hagestein via de open verbinding door het Betuwpand naar de Waal stromen. Een stuwsturing gebaseerd op waterstanden kan

dus resulteren in een te lage afvoer over de Waal. Daarom is er tijdens de huidige kalibratie voor gekozen om Hagestein zoveel mogelijk te sturen op waargenomen afvoeren. Omdat uit logboeken bleek dat de stuw zelf gedurende de gehele kalibratieperiode dicht stond, is gebruik gemaakt van de theoretische waterstand-afvoerrelatie door de vistrap Hagestein zoals afgeleid in Schropp (2011). Hiermee wordt het schutverlies door de sluiskolk niet meegenomen, maar dit lijkt verwaarloosbaar.

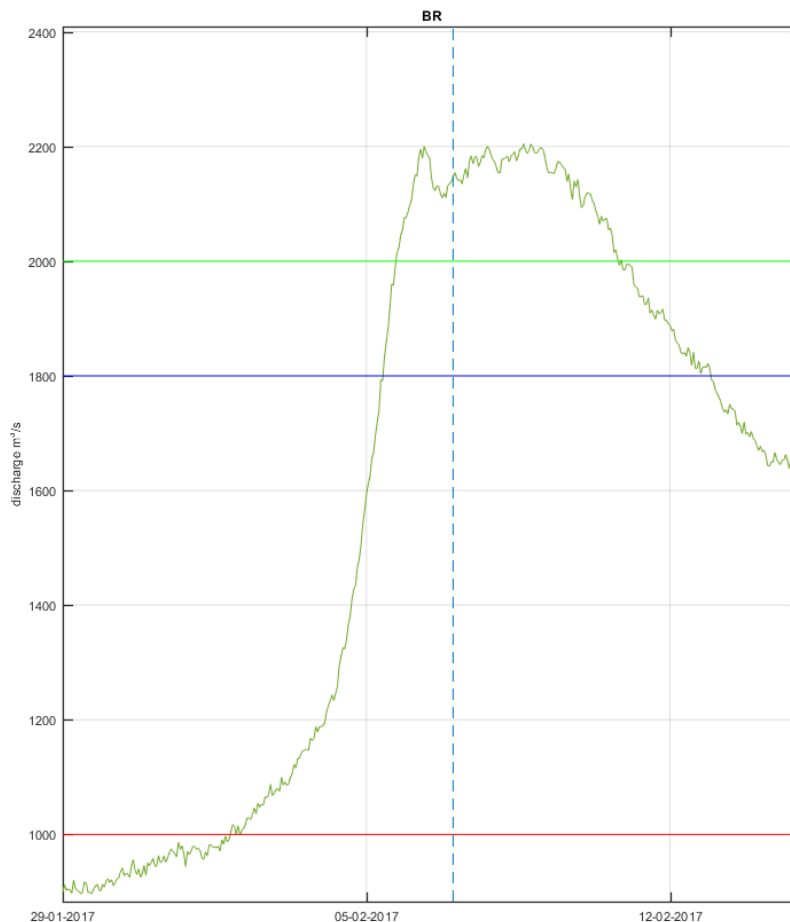
Op de IJssel lijkt met name de beschikbaarheid en nauwkeurigheid van laterale afvoeren van belang. Tijdens periodes van lage afvoer kan op de IJssel een extra afvoer van 1 m<sup>3</sup>/s al een waterstandsverschil van bijna 1 cm opleveren.



Figuur 5.5 Afvoer Oude-IJssel en Twentekanaal voor de kalibratieperiode voor L en M1, samen met de afvoer bij Lobith. De rode lijn geeft aan wanneer er metingen bij Almen beschikbaar zijn. Ter gebruik in de RGWM zijn de afvoerreksen bewerkt om onrealistische uitschieters te vermijden (zie ook bijlage F.3).

### **Midden 1:**

Het kalibratieniveau van M1 (2000 m<sup>3</sup>/s) komt overeen met het laagste kalibratieniveau in het vijfde-generatie model. De beste recente periode met dit afvoerniveau is het afvoerpiekje van begin februari 2017, met een vrij constante (hoewel iets te hoge) afvoer van 2200 m<sup>3</sup>/s gedurende enkele dagen (zie Figuur 5.6). Deze periode kan echter niet gebruikt worden op de Neder-Rijn Lek: het verval over de stuwpanen gedurende deze periode is met 0 - 5 cm te klein om te kalibreren op ruwheden. Voor de Waal en de IJssel is wel voor deze periode gekozen. Omdat de aanloop naar de afvoerpiek erg steil is (Figuur 5.6), wordt een tijdsvenster ingesteld vanaf 6 februari 2017, om te voorkomen dat de kalibratie beïnvloed wordt door een verkeerde timing van de piek in het model. Het afvoerniveau wordt alsnog ingesteld op 2000 m<sup>3</sup>/s (bij Lobith), de ondergrens is 1800 m<sup>3</sup>/s en er is geen bovengrens opgelegd. Een ander aandachtspunt is de beschikbaarheid van de afvoermeting bij Almen (zie ook Figuur 5.5).



Figuur 5.6 Afvoer bij Lobith tussen 29 januari 2017 en 13 februari 2017. De horizontale groene lijn geeft het afvoerniveau op de Boven-Rijn ( $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) aan. De horizontale blauwe lijn de onderkant van het afvoervenster, en de blauwe verticale onderbroken lijnen de start van het tijdsvenster voor de IJssel en Waal.

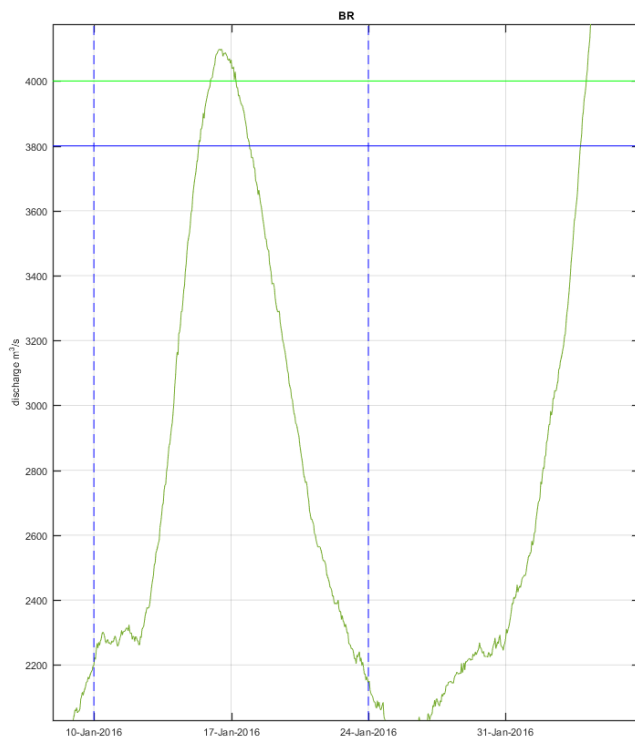
Omdat het verhang over de stuwpanden op de Neder-Rijn en Lek tijdens de periode 5 – 13 februari 2017 te klein is, wordt voor deze tak een andere periode gekozen. Enkele weken later, rond 26 februari 2017, is er een iets hogere afvoerpiek met een maximum van ongeveer  $2350 \text{ m}^3/\text{s}$  bij Lobith. Het kalibratieniveau voor M1 op de Neder-Rijn Lek verschilt dus van die op de Waal en IJssel, en wordt ingesteld op  $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit is noodzakelijk om met voldoende verval over de stuwpanden te rekenen. Omdat de Neder-Rijn Lek bij deze afvoer een “gesloten systeem” is (de afvoeren zijn alleen afhankelijk van de opgelegde bovenstroomse en laterale afvoeren), worden de stuwen gestuurd op waargenomen bovenstroomse waterstand. Bij deze afvoer is de WKC Amerongen ook in werking. Omdat de afvoer door de Neder-Rijn gedurende de kalibratieperiode niet hoger wordt dan ongeveer  $350 \text{ m}^3/\text{s}$ , staan de stuwbogen van Amerongen dicht en gaat alle afvoer door de WKC.

Het LMW-meetstation IJsselkop ligt in werkelijkheid niet in het takmodel van de Neder-Rijn Lek (het ligt namelijk aan de rechteroever van het Pannerdensch Kanaal). Om toch het traject IJsselkop – Driel te kunnen kalibreren is het meetpunt ten behoeven van het takmodel verplaatst naar de werkelijke kop. Dit is gedaan op basis van lijnen van gelijke waterstand resulterend uit een som met het totaalmodel.

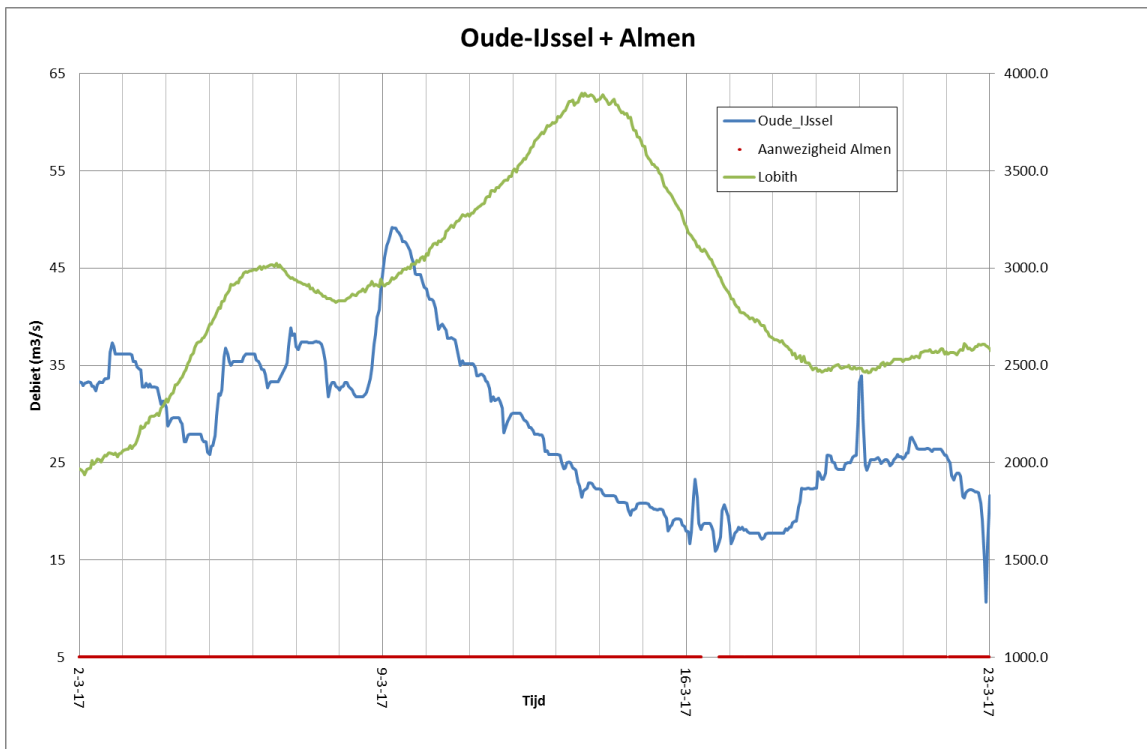
### Kalibratie Midden 2

Het afvoerniveau *Midden 2* zou overeen moeten komen met een afvoer van ongeveer  $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  op de Boven-Rijn. De afvoerpiek van 17 januari 2016 is hiervoor het meest geschikt, zie Figuur 5.7. De onderkant van het afvoervenster wordt ingesteld op  $3800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  op de Boven-Rijn. Om te voorkomen dat de steile en hogere afvoerpiek van februari 2016 wordt meegenomen in de kalibratie, wordt tevens een tijdsvenster ingesteld.

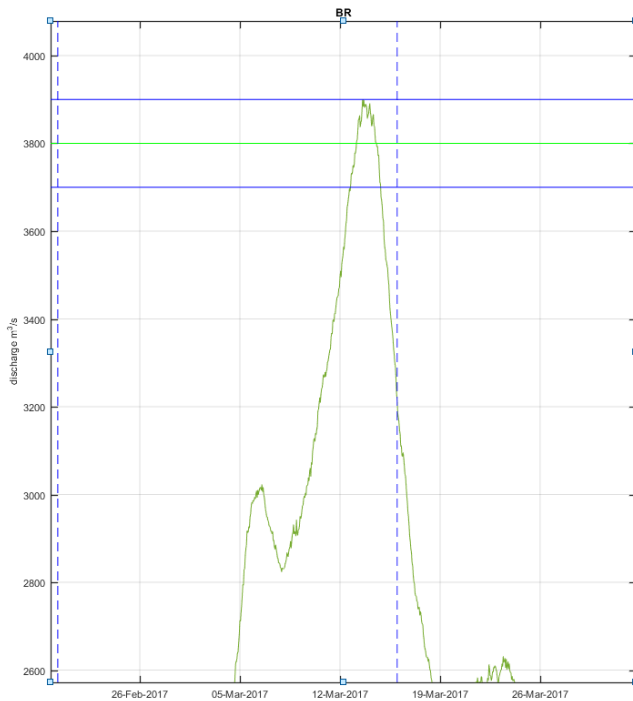
Het nadeel van de genoemde periode is dat er geen data betreffende lateralen op de IJssel beschikbaar zijn (Figuur 5.8). Dit betekent dat er voor de IJssel een andere kalibratieperiode gekozen moet worden. Hiervoor komt de afvoerpiek van 12 maart 2017 in aanmerking. Deze afvoerpiek is lager en bereikt niet het afvoerniveau van  $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Gezien de eigenschappen van de IJssel is dit echter juist een voordeel, omdat de uiterwaarden al bij lagere afvoeren onderlopen. Het kalibratieniveau *Midden 2* wordt op de IJssel dus vastgesteld op  $3800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Figuur 5.9 geeft de voorgestelde afvoer- en tijdsvenster weer voor de IJssel. Met het tijdsvenster is rekening gehouden met de beschikbaarheid van de laterale afvoeren.



Figuur 5.7 Kalibratieperiode Midden 2 voor de Waal en Neder-Rijn Lek met het kalibratieniveau (groen doorgetrokken), onderkant van het afvoervenster (blauw doorgetrokken) en tijdsvenster (blauw onderbroken).



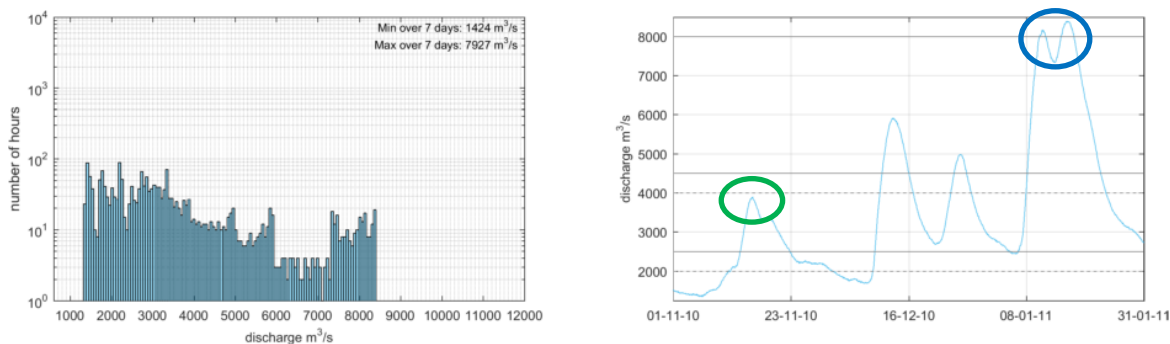
Figuur 5.8 Beschikbaarheid van metingen Almen voor M2.



Figuur 5.9 Kalibratieperiode Midden 2 voor de IJssel met het kalibratieniveau (groen doorgetrokken), onder- en bovenkant van het afvoervenster (blauw doorgetrokken) en tijdsvenster (blauw onderbroken).

## Kalibratie Hoog 1

Het kalibratieniveau *Hoog 1* ligt rond een afvoer van  $8000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Hiervoor wordt de afvoergolf van januari 2011 gebruikt. Deze afvoergolf bestaat uit twee opvolgende hoogwaterpieken, waarvan de eerste op 12 januari optreedt, en de tweede op 17 januari. De tweede piek is iets hoger, met een afvoer tot bijna  $8400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (de top van de eerste afvoerpiek ligt rond  $8060 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Er wordt gekalibreerd op de tweede afvoerpiek, om te voorkomen dat de kalibratie beïnvloed wordt door het onderlopen van de uiterwaarden. Door te kalibreren op de tweede piek, kan gestart worden met volgelopen uiterwaarden en wordt de afvoer door het zomerbed zo goed mogelijk benaderd. Voor alle riviertakken wordt dezelfde kalibratieperiode gekozen van 8 januari tot 30 januari 2011. De kalibratieniveaus komen overeen met een afvoer van  $8000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  op de Boven-Rijn. Met een tijdsvenster wordt ervoor gezorgd dat alleen gekalibreerd wordt op de tweede piek (zie Figuur 5.10).



Figuur 5.10 Afvoer Lobith: 1 november 2010 – 31 januari 2011 (uurwaarden)

Voor de validatie op Hoog 1 is er geen echt geschikte andere periode beschikbaar in de gedefinieerde perioden. Wel kan er een validatie plaatsvinden op andere beschikbare metingen binnen deze periode zoals:

- Divers.
- ADCP metingen.

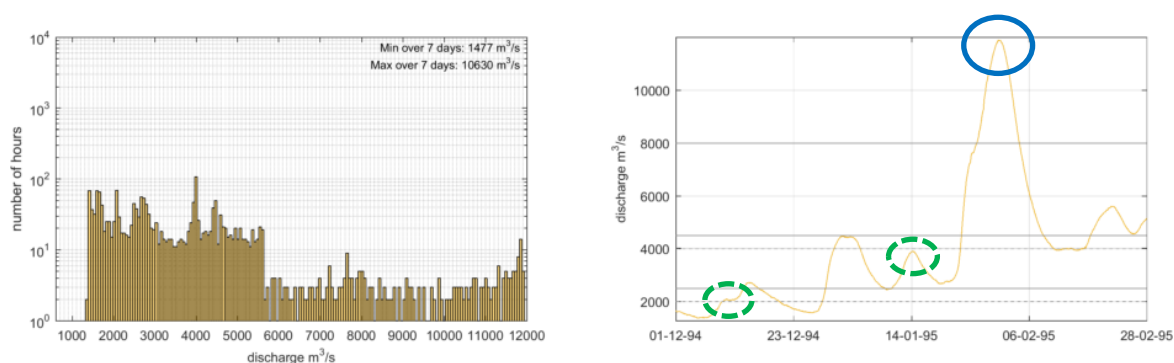
Daarnaast is het in de toekomst wenselijk om de afvoerpiek in januari 2018 mee te nemen. Hier is echter op dit moment echter onvoldoende (gevalideerde) data voor beschikbaar.

## Kalibratie Hoog 2

Kalibratieperiode: 29-1-1995 t/m 5-2-1995



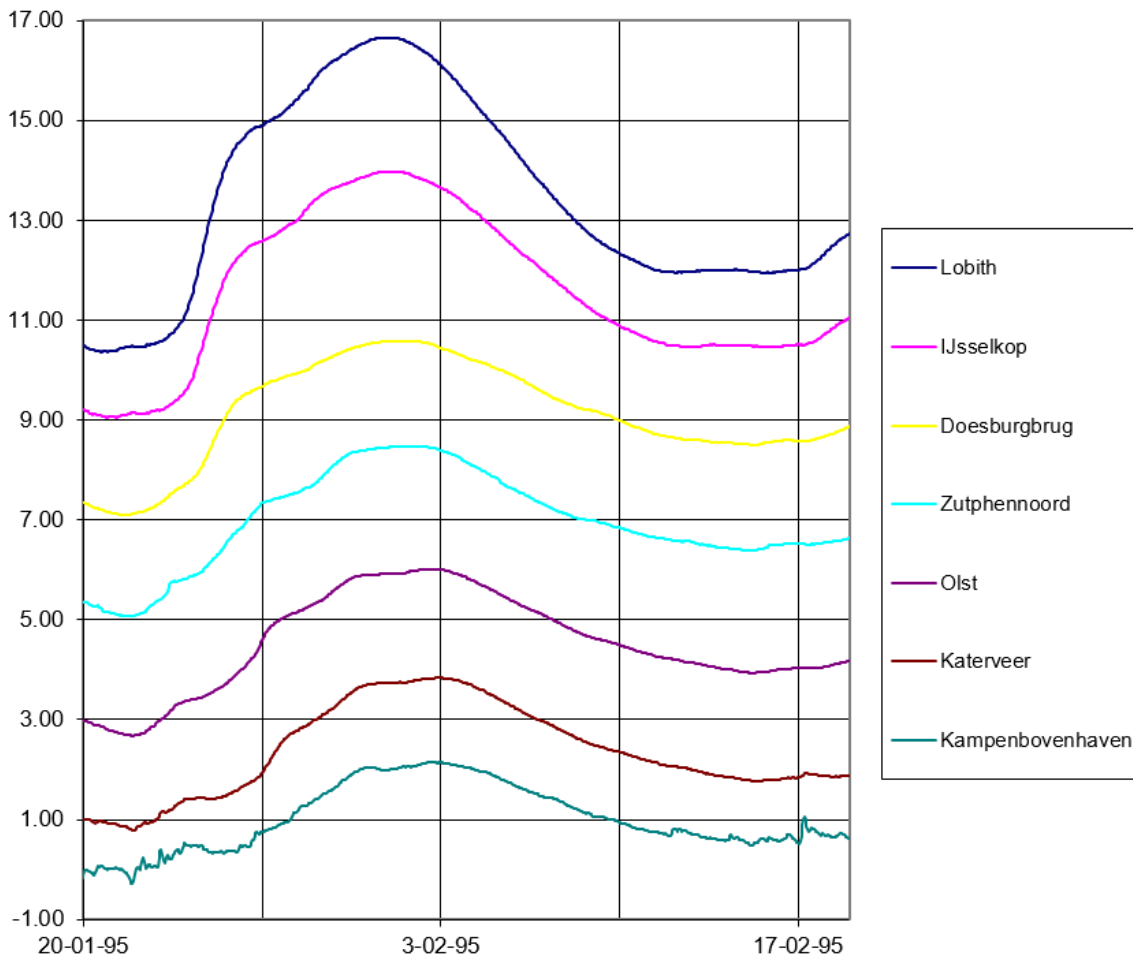
Er wordt getracht om zo goed mogelijk aan te sluiten bij de kalibratieperiodes die voor het vijfde-generatie model gebruikt zijn, dat wil zeggen dat er gekalibreerd wordt op ongeveer twee dagen rond de top van het hoogwater 1995, zie Figuur 5.11 en Tabel 5.5. Op de Waal en Neder-Rijn Lek is deze piekafvoer zichtbaar in het waterstandsverloop als één top. Deze takken worden dan ook gekalibreerd op de gehele hoogwaterperiode, waarbij alleen de ondergrens van de afvoer wordt vastgesteld (gelijk aan  $11.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  bij Lobith). Op de IJssel, met name verder benedenstrooms, worden twee pieken zichtbaar in het waterstandsverloop (zie Figuur 5.13). Dit wordt veroorzaakt door topafvlakking door het onderlopen van de bergingsgebieden langs de IJssel. Wanneer deze gevuld zijn, stijgt de waterstand verder. Bij de kalibratie van het vijfde-generatie model bleek dat het vollopen van de uiterwaarden op de IJssel niet goed kon worden gereproduceerd. We willen voorkomen dat de kalibratie resulteert in een niet-realistische (te hoge) ruwheid, doordat wordt gecompenseerd voor het te laat instromen van de uiterwaarden. De verwachting is dat het moment van instromen in het zesde-generatie model beter wordt berekend, door verbeterde (baseline-)data, betere uitlijning met de geometrie en opname van inlaatkunstwerken in het model. Mocht dit echter niet het geval zijn (of een kleiner effect hebben dan verwacht), dan zullen we de IJssel alleen moeten kalibreren op het eerste deel van de afvoerpiek. De beslissing hiervoor hangt af van een testsom waarin de volledige periode wordt doorgerekend.



Figuur 5.11 Afvoer Lobith: 1 december 1994 – 28 februari 1995 (uurwaarden)

Tabel 5.5 Kalibratieperiodes voor het hoogwater van 1995 voor de verschillende takken.

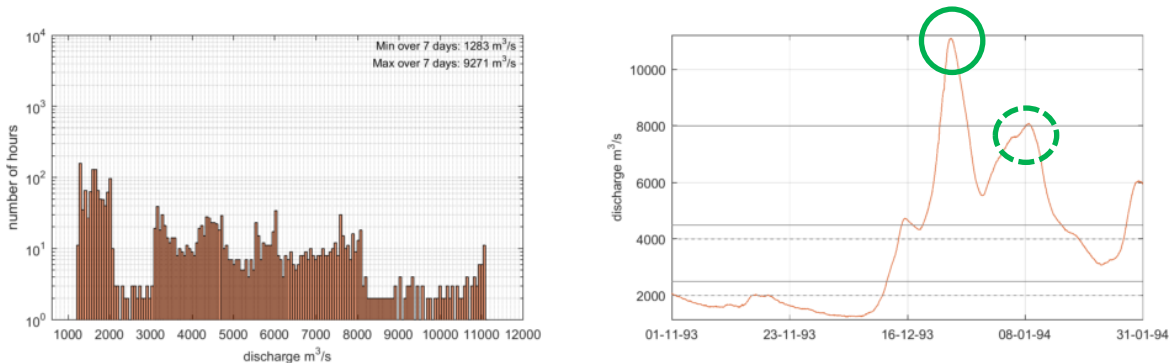
Riviertak	Start	Eind
Boven-Rijn	29-01-1995 0:00	02-02-1995 0:00
Waal	29-01-1995 0:00	03-02-1995 0:00
Neder-Rijn/Lek, IJssel	29-01-1995 0:00	05-02-1995 0:00



Figuur 5.12 Gemeten waterstanden tijdens het hoogwater van 1995 op de IJssel. Vanaf Olst en verder benedenstrooms is een dubbele waterstandspiek zichtbaar.

Validatieperiode: 1-11-1993 t/m 31-1-1994.

De piekafvoeren van het hoogwater 1993 zijn kleiner dan die van het hoogwater 1995 en vallen buiten het afvoerbereik “hoog”, zie ook Figuur 5.13. Daarom kan er geen validatie op dit specifieke afvoerniveau worden uitgevoerd. Wel worden ter validatie de berekende en gemeten piekwaterstanden en tijdstippen vergeleken.



Figuur 5.13 Afvoer Lobith: 1 november 1993 – 31 januari 1994 (uurwaarden)

### Validatie langere periode

Naast een validatie voor specifieke afvoerbereiken wordt een validatie uitgevoerd voor langere perioden (ca. 3 maanden). Deze zijn weergegeven in Tabel 5.6.

Tabel 5.6 Overzicht langere validatieperioden

Periode	Begin	Eind
HW1995	01-12-1994	28-02-1995
LW2011	11-11-2011	31-12-2011
2015/2016	01-09-2015	31-03-2015

#### 5.1.5 Kalibratie stuwen

In de vijfde-generatie modellen zijn ook de (korte) trajecten over de stuwen gekalibreerd via de zomerbedruwheid, terwijl de coëfficiënten van de kunstwerken op de default waarde werden gehouden. Dit had echter als resultaat dat er onrealistische ruwheidswaarden werden gevonden. In de zesde-generatie modellen zijn eerst de stuwen gekalibreerd. Het afregelen van de afvoercoëfficiënten (contraction coefficients) is zo dicht mogelijk gedaan bij het moment van openen. Je wilt namelijk dat het moment van openen goed wordt bepaald. Hiervoor is de periode 4-2-2016 t/m 19-2-2016 gebruikt. De bepaalde afvoercoëfficiënten worden weergegeven in Tabel 5.7.

Tabel 5.7 Gebruikte afvoercoëfficiënten voor de stuwen op de Neder-Rijn/Lek (In te vullen in 2019).

Stuw	Afvoercoëfficiënt (Contraction coefficient)
Driel	??
Amerongen	??
Hagestein	??

#### 5.1.6 Kalibratieprocedure en OpenDA

Voor de kalibratie is het model eerst in aparte takken opgesplitst (Waal, IJssel, Neder-Rijn/Lek). Op die manier kan de gewenste afvoerverdeling als bovenrand worden opgelegd. Voor het kalibreren van de overige trajecten is het model vervolgens samengevoegd, waarbij de waarden van de kalibratiecoëfficiënten van de al gekalibreerde trajecten worden vastgezet. Voor het laagste niveau staan de Waal en de Neder-Rijn/Lek met elkaar in open verbinding via het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal. Voor de kalibratie van dit niveau zijn deze twee takken daarom samengevoegd.

Na kalibratie worden afvoerafhankelijke ruwheden geïnterpoleerd tussen de gekalibreerde afvoerniveaus. Er is gekozen om de kalibratie te beginnen bij het laagste niveau en dan naar boven te werken, omdat de lage kalibratieniveaus wel invloed hebben op de kalibratie van hoge afvoerniveaus (afvoergolven), maar niet andersom.

Voor de kalibratieprocedure is gebruik gemaakt van de data-assimilatie tool OpenDA. Het DuD-algoritme van OpenDA is gebaseerd op een zelf lerend concept waarbij op basis van ingegeven *predictors* (de waterstanden bij de meetstations) en ingegeven *regularisationConstants* (de kalibratietrajecten) zelf wordt ontdekt welke kalibratietrajecten invloed hebben op verschillende meetstations. Het doel is om voor de predictors de afwijking tussen metingen en modelresultaten zo klein mogelijk te maken.

Het is in OpenDA slechts mogelijk om één specifiek tijdvenster op te geven voor de kalibratie. Voor de perioden op de IJssel waarvoor geen betrouwbare metingen voor de afvoer van de Oude IJssel beschikbaar zijn worden daarom alle metingen die gebruikt worden tijdens de kalibratie voor die specifieke periodes verwijderd (als er namelijk geen metingen beschikbaar zijn, doet OpenDA hier ook niets mee). Hierbij wordt rekening gehouden met het feit dat de looptijd van een afvoergolf van Doesburg (locatie van de instroom van de Oude IJssel) naar Katerveer ca. 17 uur bedraagt.

Vanwege de afvoerafhankelijkheid van de ruwheid moet voor elk ruwheidstraject een afvoerraai worden gedefinieerd. Daarbij zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- afvoer van bandijk tot bandijk.
- Afvoerraai volgt bij voorkeur een roosterlijn.
- raai ligt zo dicht mogelijk bij meetpunt.
- stabiele afvoer over gehele afvoerbereik. Dat betekent geen instabiliteiten door neren. Geen overige verstoringen zoals benedenstreams instromen van uiterwaarden (leidt tot een afname van de totale afvoer door de raai) of raaien dwars door aangetakte plassen (daar vindt bij normale afvoeren uitwisseling plaats tussen rivier en plas. De totale afvoer door de raai is dan niet gelijk aan de afvoer door het zomerbed.).
- rekening houdend met toekomstige projecten (is de raai daarna nog steeds geschikt?).
- rekening houdend met latere splitsing van trajecten.

#### 5.1.7 Getijgedomineerde stations

Voor de getijgedomineerde trajecten wordt niet gekalibreerd op de lokale afvoer, maar wordt gebruik gemaakt van de eerste bovenstroomse afvoerraai, waarbij het getij weinig tot geen invloed meer heeft op de afvoer. Het gaat hierbij om de volgende trajecten:

##### Lek

- Hagestein beneden – Schoonhoven
- Schoonhoven – Krimpen a/d Lek

Voor beide trajecten wordt gebruik gemaakt van de afvoer door *LE\_953.0\_QR\_stuwHagestein-Schoonhoven*. Dit is besloten in overeenstemming met de aanpak in RMM. Echter, bij lage en middenhoge afvoeren is getij nog steeds sterk zichtbaar in zowel de waterstanden als de afvoer door deze afvoerraai. Daarom is voor kalibratie van afvoerniveau L1 het afvoerniveau verhoogd tot boven de hoogst voorkomende afvoer tijdens de kalibratieperiode. Dit voorkomt dat de kalibratiefactor boven het oorspronkelijke afvoerniveau wordt geïnterpoleerd. Het afvoerniveau M1 is gekalibreerd door de kalibratiefactor van L1 als startwaarde te gebruiken, en de factoren voor L1 en M1 gelijktijdig aan te passen (samen te kalibreren). Dit voorkomt dat de kalibratiefactor binnen een getijcyclus wordt geïnterpoleerd tussen het oorspronkelijke afvoerniveau L1 en M1. Daarnaast is het afvoerniveau van M1 tijdens kalibratie verhoogd zodat ook geen interpolatie tussen M1 en M2 plaatsvindt. Uit het kalibratieresultaat moet blijken of de gevonden kalibratiefactoren voor L1 en M1 vergelijkbaar zijn; bij voorkeur worden voor deze afvoerniveaus gelijke kalibratiefactoren gekozen, om ook tijdens gebruik van het model te voorkomen dat er binnen een getijcyclus wordt geïnterpoleerd tussen twee kalibratiefactoren. De uiteindelijke kalibratiefactor voor L1 en M1 wordt afgestemd met RMM.

##### Waal

- Tiel – Zaltbommel
- Zaltbommel – Vuren
- Vuren – Hardinxveld

Op de Waal is er, in overeenstemming met de aanpak voor RMM, besloten om een afvoerraai bij Zaltbommel te gebruiken<sup>5</sup>. Deze keuze is een compromis tussen a) het gebruik van een meer bovenstroomse raai om afvoervariaties binnen een getijcyclus te vermijden en b) het gebruik van een meer benedenstroomse raai die dichter bij het kalibratietraject ligt. Hoewel de raai bij Zaltbommel behoorlijk ver benedenstrooms ligt, is het getij in mindere mate terug te zien tijdens hoge rivierafvoeren. Er kan dus afvoerafhankelijk gekalibreerd worden, wanneer de afvoer riviergedomineerd is. Om alle getij-variantie uit te bannen, zou een afvoerraai bij Tiel gekozen moeten worden. Dit is echter geen optie vanwege het voorkomen van lateralen tussen Tiel en Zaltbommel, en aanwezigheid van de mogelijke bypass Varik-Heesselt. Tegelijkertijd ligt de nu gekozen raai niet te veer bovenstrooms van meetstations Vuren en Zaltbommel, zodat looptijdefecten worden verminderd.

Voor de uiteindelijke ruwheid van deze trajecten dient afstemming plaats te vinden met de ruwheidsdefinitie zoals deze in het zesde-generatie model van de Rijn-Maasmonding wordt gehanteerd.

## 5.2 Kalibratieresultaat

In onderstaande paragrafen worden de resultaten van de kalibratie gegeven. Allereerst worden de resulterende kalibratiefactoren met enkele algemene conclusies gepresenteerd, daarna volgen de resultaten in waterstands- en afvoerstatistieken. Deze worden ten slotte in Paragraaf 5.2.3 besproken.

### 5.2.1 Kalibratiefactoren

Onderstaande tabel geeft de kalibratiefactoren per traject en per kalibratieniveau. De gepresenteerde kalibratiefactoren zijn het resultaat van de eerste kalibratieronde en kunnen nog aangepast worden naar aanleiding van een vergelijking met metingen en daaropvolgende extra kalibratiesommen. Onder de tabel worden een aantal algemene observaties genoemd. De meer uitgebreide resultaten zijn opgenomen in bijlage H. **Later in 2019 en in 2020 worden nog de resultaten voor de overige afvoerniveau's en het totaalmodel (Boven-Rijn en Pannerdensch Kanaal) aan toegevoegd.**

Traject	code	L1	M1	M2	H1	H2
<b>Boven-Rijn</b>						
Emmerich – Lobith	2000					
Lobith – Lobith haven	2001					
Lobith Haven – Pannerdensch Kop	2002					
<b>Waal</b>						
Pannerdensch Kop – Nijmegen	2003	0.966	0.927			
Nijmegen – Dodewaard	2004	0.867	0.893			
Dodewaard – Tiel	2005	0.866	0.927			
Tiel – Varik	2006	0.886	0.979			
Varik – Sint Andries	2007	0.886	0.979			
Sint Andries - Heesselt	2008	0.886	0.979			
Heesselt - Zaltbommel	2009	0.886	0.979			
Zaltbommel – Vuren	2010	0.837	1.004			
Vuren – Merwedekop	2011	0.953	0.824			
<b>Pannerdensch Kanaal</b>						
Pannerdensch Kop – Pannerden	2012					

<sup>5</sup> De betreffende raai heet in de OpenDA-opzet nog WL\_934.6\_QR\_Zaltbommel. Deze naam wordt nog aangepast om aan de naamgevingsconventies te voldoen.

Traject	code	L1	M1	M2	H1	H2
Pannerden – Looveer	2013					
Looveer – IJsselkop	2014					
<b>Neder-Rijn Lek</b>						
IJsselkop – Arnhem	2015		0.820			
Arnhem – stuw Driel	2016		0.820			
Stuw Driel – Grebbe	2017		0.872			
Grebbe – stuw Amerongen	2018		0.447			
Stuw Amerongen – Tiel Kanaal	2019		0.871			
Tiel Kanaal – Culemborg	2020		0.606			
Culemborg – stuw Hagestein	2021		0.417			
Stuw Hagestein – Schoonhoven	2022	1.131	0.816			
Schoonhoven – Krimpen a/d Lek	2023	1.816	0.775			
<b>IJssel</b>						
IJsselkop – Hondsbroeksche Pleij	2024	0.842219	0.596			
Hondsbroeksche Pleij – Westervoort	2025	1.075651	1.094			
Westervoort – De Steeg	2026	0.911144	0.866			
De Steeg – Doesburg	2027	0.987792	0.970			
Doesburg – Zutphen	2028	0.87483	0.937			
Zutphen – Eefde beneden	2029	1.008694	1.031			
Eefde beneden – Deventer	2030	0.940227	0.991			
Deventer – Olst	2031	0.873898	0.933			
Olst – Veessen	2032	0.932354	0.939			
Veessen - Wijhe	2033	0.932354	0.939			
Wijhe – Wapenveld	2034	0.988382	0.979			
Wapenveld – Katerveer	2035	0.988382	0.979			
Katerveer – Reevediep	2036	1.009356	0.964			
Reevediep – Kampen	2037	1.009356	0.964			
Kampen – Keteldiep	2038					
Keteldiep – einde Keteldiep	2039					

\*De gearceerde kalibratietrajecten zijn voor het betreffende kalibratieniveau niet gekalibreerd omdat het verhang te klein is. De resulterende kalibratiefactor is dan gelijk aan 1.

## Algemene observaties: L1

- De kalibratiefactor voor L1 op de Waal is overal tussen 0.8 en 1. Toch is het kalibratiecriterium (maximaal 5 mm op de meetstations) nog niet overal bereikt. De bias over de kalibratieperiode is nog steeds 2 – 3 cm op de stations Nijmegen, Dodewaard en Zaltbommel. Dit is voornamelijk toe te schrijven aan de “hogere” afvoeren (afvoeren tussen 810 en 830 m<sup>3</sup>/s over de Waal, rond 28 december).
- Hoewel in de initialisatiematrix zichtbaar is dat de ruwheid weinig invloed heeft op de gemodelleerde waterstanden op de meetstations op de Lek (zie bijlage H.1), convergeert de kalibratie goed op dit traject. De resulterende bias is zeer klein, hoewel de kalibratiefactoren aan de hoge kant zijn (1.1 en 1.8 respectievelijk).
- De kalibratie op de IJssel convergeert goed. Met kleine aanpassingen in de ruwheid wordt een goede reproductie van de waterstandsmetingen bereikt. Uitzonderingen hierop zijn de meetstations Keteldiep en Kampen. De waterstanden op deze stations zijn zeer ongevoelig voor aanpassingen van de benedenstroomse ruwheid. Vermoedelijk wordt dit veroorzaakt door het geringe verhang op deze trajecten. Voor verdere kalibratie zijn de kalibratiefactoren op deze twee trajecten daarom vastgezet op een waarde van 1 voor kalibratieniveau L1.

Algemene observaties: M1

- Alle resulterende kalibratiefactoren op de Waal voor afvoerniveau M1 vallen tussen 0.89 en 1.004, met uitzondering van het traject Vuren – Merwedekop. Deze waarden geven aan dat de gekalibreerde ruwheid dicht bij de geschatte basisruwheid ligt. De kalibratiefactor op het traject Vuren – Merwedekop is met 0.824 is lager.
- In de testsimulaties is al geconstateerd dat de waterstanden te hoog (centimeters tot maximaal anderhalve decimeter) waren ten opzichte van de metingen. De resulterende kalibratiefactoren zijn echter erg laag, met name op de trajecten Grebbe – Amerongen en Culemborg – Hagestein. Vanzelfsprekend zijn dit de trajecten bovenstrooms van de stuwen. Omdat de stuwen sturen op een bovenstroomse waterstand, is het verhang op de trajecten direct bovenstrooms van de stuwen kleiner. Er moet daarom gecompenseerd worden met een veel lagere ruwheid.
- De kalibratie op de IJssel convergeert goed. Alle resulterende biases vallen binnen het kalibratiecriterium van 5 mm, met uitzondering van Wijhe (6 mm), Katerveer (10 mm) en Kampen en Keteldiep (beide ongeveer 20 mm). De kalibratie is echter nog bezig, waardoor de kans groot is dat ook Wijhe het kalibratiecriterium zal bereiken. Voor de meest benedenstroomse trajecten is het verhang waarschijnlijk te klein om te kalibreren.

Observaties met betrekking tot de andere kalibratieniveau's en het totaalmodel zullen later in 2019 en in 2020 worden toegevoegd.

## 5.2.2 Vergelijking met metingen

In deze paragraaf worden allereerst per kalibratieniveau en per traject de resulterende biases gepresenteerd. Vervolgens wordt ingegaan op de resultaten en worden eventueel onverwachte resultaten verder uitgewerkt.

L1: Waal en Lek

De Waal en de Neder-Rijn Lek zijn samen gekalibreerd voor L1, en worden daarom samen gepresenteerd. Op de Lek zijn alleen de twee trajecten benedenstrooms van stuw Hagestein gekalibreerd. De resulterende bias op alle LMW-stations is als volgt:

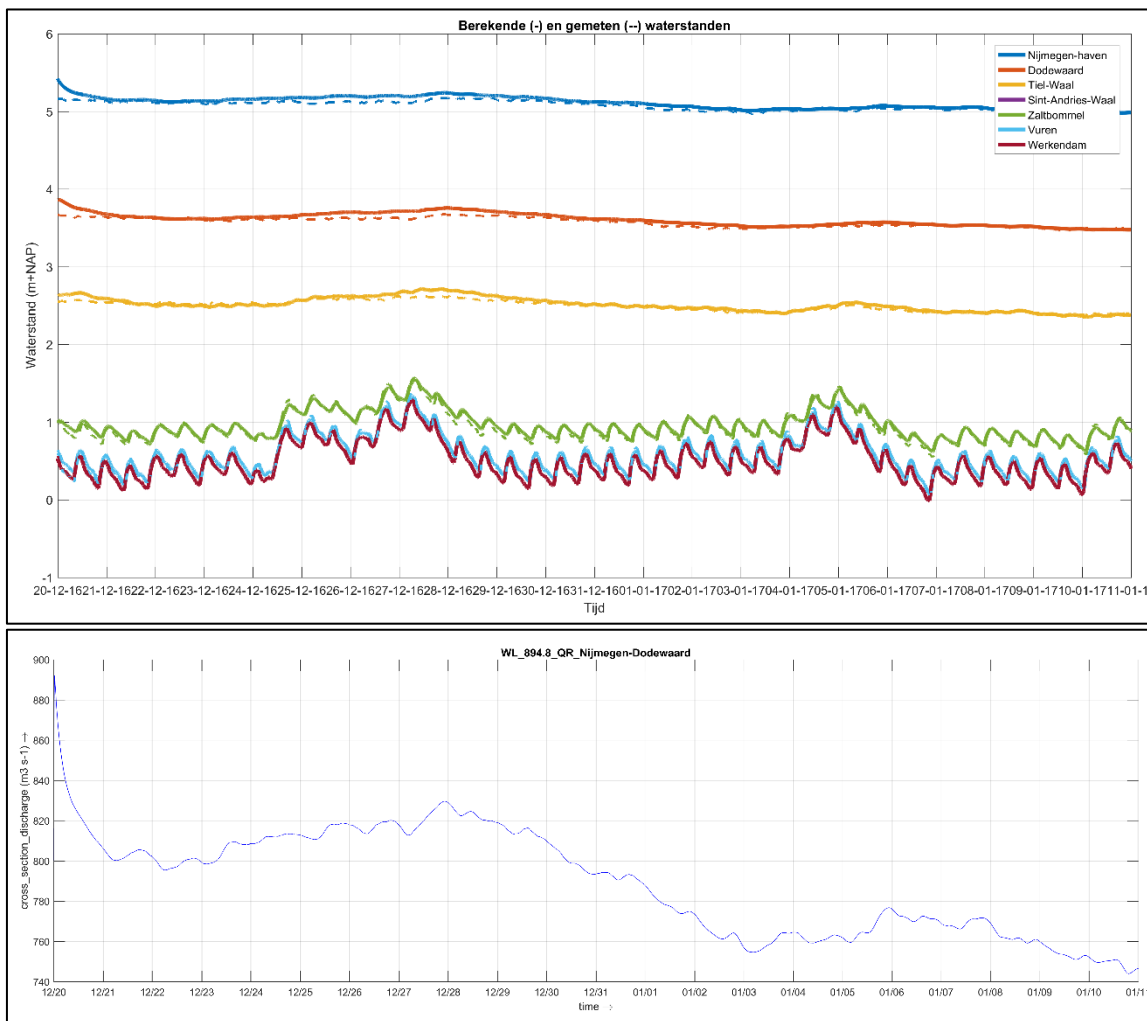
Pankopp	Nijmegen	Dodewaard	Tiel	Zaltbommel	Vuren	Hagestein	Schoonh
0.020	0.029	0.028	0.018	0.026	0.001	-0.003	0.007

Ondanks convergentie valt bias nog niet binnen het kalibratiecriterium van 5 mm. De grote bias op de Waal wordt voornamelijk veroorzaakt door de periodes met "hogere" afvoeren (> 800 m<sup>3</sup>/s op de Waal). Dit is goed zichtbaar in Figuur 5.14. De bias is met name zichtbaar in de periode rond 27 december (afvoer tussen 810 en 830 m<sup>3</sup>/s tussen Nijmegen – Dodewaard). Als we deze periode negeren en de bias berekenen over het kalibratieresultaat ná 3 januari, is de bias op de Waal aanzienlijk lager:

Nijmegen	Dodewaard	Tiel	Zaltbommel	Vuren
0.0151	0.0119	0.0067	0.026	0.001

Een sluitende verklaring voor de vergrote bias tijdens hogere afvoeren is er nog niet. Wel blijkt uit de initialisatiematrix dat het relatief lange kalibratietraject Tiel – Zaltbommel de enige "stuurknop" is om de waterstanden op Tiel goed te krijgen. Tegelijkertijd heeft dit traject een vrij groot effect op de waterstand bij Dodewaard (bijna net zo groot als het traject Dodewaard – Tiel). Mogelijk ligt hier een deel van de verklaring voor de grote biases. Bovendien blijkt uit verdere analyse dat de afvoer die door stuw Amerongen komt, en daarmee de afvoer over de

Neder-Rijn Lek en het Betuwepand, flink fluctueert (fluctuaties van enkele tientallen m<sup>3</sup>/s in een periode van uren). Dit kan de afvoerafhankelijke ruwheidswaarden niet ten goede komen. **Om deze reden zijn een aantal testsommen aangezet met een aangepaste stuwsturing van stuw Amerongen (minder gevoelige sturing en/of lagere bewegingssnelheid). Het resultaat hiervan wordt later in 2019 toegevoegd.**



Figuur 5.14 Bovenste panel: vergelijking tussen gemeten (stippellijn) en berekende (doorgetrokken lijn) waterstanden. Onderste panel: afvoer door de Waal over dezelfde periode.

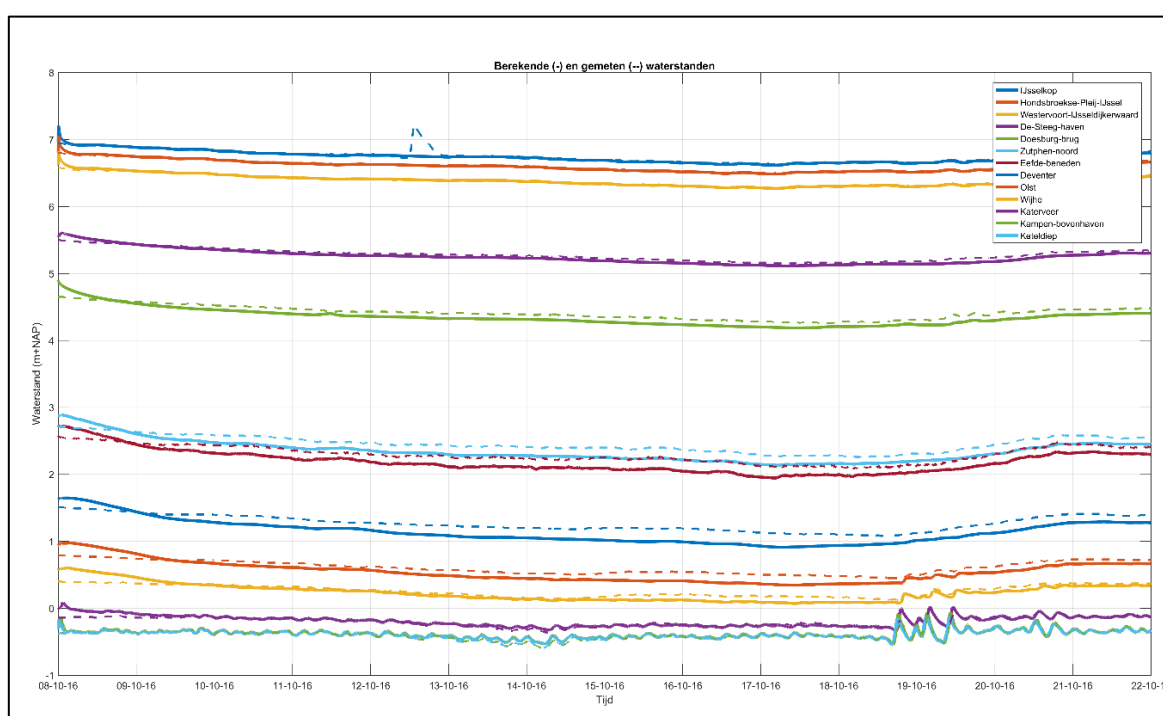
## L1: IJssel

De uiteindelijke bias op de IJssel is zeer klein op alle stations:

IJsselkop	Hpleij_ijssel	Westervoort	Desteege	Doesburg	Zutphen	Eefdebeneden
0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0
Deventer	Olst	Wijhe	Katerveer	Kampen	Keteldiep	
0	0	0	-0.001	-0.001	-0.007	



Een aandachtspunt bij de kalibratie van de IJssel is het gebruik van enkele korte kalibratietrajecten (IJsselkop – Hpleij, Hpleij – Westervoort en Zutphen – Eefde). Uit de initialisatiematrix (bijlage H.1) blijkt inderdaad dat het aanpassen van de kalibratiefactoren op de eerste twee (korte) trajecten, IJsselkop – Hpleij en Hpleij – Westervoort, een klein effect hebben op de waterstand op meetstation IJsselkop. Het effect van de kalibratiefactor over het traject Westervoort – De Steeg op de waterstand bij IJsselkop en Hpleij is groter. Hetzelfde geldt voor meetstation Zutphen, wat beïnvloed wordt door het korte traject Zutphen – Eefde, maar meer door het verder benedenstroomse traject Eefde – Deventer. Dit vormt geen probleem, en met kleine aanpassingen in de ruwheid wordt het kalibratiecriterium bereikt. Ter controle, en omdat een goede afvoerbeschrijving van groot belang is voor de kalibratie van lage afvoerniveaus (met name op de IJssel, waar de laterale afvoeren een groot effect hebben op de waterstand), is direct een validatiesom gestart voor de laagwaterperiode in oktober 2016. Hieruit blijkt dat het kalibratieresultaat niet voldoet voor deze periode (Figuur 5.15).



Figuur 5.15 Vergelijking tussen gemeten (onderbroken lijnen) en berekende (doorgetrokken lijnen) waterstanden met het (deels) gekalibreerde model in de periode oktober 2016.

Vermoedelijk heeft dit te maken met onnauwkeurigheden in de opgegeven afvoer. Het is echter niet af te leiden of de afvoer in oktober 2016 of december 2016 – januari 2017 aangepast zou moeten worden. Daarom is een kalibratiesom over een langere periode gestart, waarin beide laagwater-periodes worden meegenomen. **De resultaten hiervan worden later in 2019 toegevoegd.**

#### M1: Waal

De uiteindelijke bias op de Waal gaat overal richting nul:

Nijmegen	Dodewaard	Tiel	Zaltbommel	Vuren
0.0	0.0	0.0	0.0	0.001

Ook de bias op meetstation Vuren valt met 1 mm ruim binnen het kalibratiecriterium. Mogelijk convergeert dit traject niet volledig vanwege de getij-involed. Wat verder opvalt is dat de

resulterende kalibratiefactor (0.894) afwijkt van de kalibratiefactor voor L1 op hetzelfde traject (0.953). Ook de kalibratiefactoren voor L1 en M1 op het traject Zaltbommel – Vuren komen niet overeen. Uiteindelijk zullen deze kalibratiefactoren moeten worden samengevoegd. Welke factor er dan wordt gekozen kan worden moet blijken uit afstemming met RMM.

#### M1: Neder-Rijn Lek

De uiteindelijke bias op de Neder-Rijn Lek is gelijk aan nul op alle meetstations. Omdat de resulterende kalibratiefactoren echter zo laag zijn, wordt er niet aangeraden om de kalibratiefactoren (zeker Grebbe – stuw Amerongen en Culemborg – stuw Hagestein) over te nemen in de kalibratie van M2.

#### M1: IJssel

De resulterende bias op de IJssel is als volgt:

IJsselkop	Hpleij_ijssel	Westervoort	Desteeg	Doesburg	Zutphen	Eefdebeneden
0	0	0	0	0	0	0
Deventer	Olst	Wijhe	Katerveer	Kampen	Keteldiep	
0.001	0.002	0.006	0.01	0.02	0.021	

Wederom is de resulterende bias op de meest benedenstroomse stations vrij groot. Vanaf Wijhe wordt de bias groter dan het kalibratiecriterium van 5 mm.

### 5.2.3 Discussie

## 5.3 Validatie

Voor de validatie zijn vergelijkbare figuren gemaakt als de kalibratie.

Aanvullen in 2020.

## 6 Modeltoepassing

Aanvullen in 2020.

### 6.1 Toetsing voor gebruikstoepassingen

### 6.2 Rekentijden en parallelisatie



## **7 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen**

Aanvullen in 2019.

**7.1 Modelopzet**

**7.2 Kalibratie en validatie**

**7.3 Modeltoepassingen**

**7.4 Slotopmerkingen**



## 8 Referenties

- Agtersloot, R.C., & R. van der Veen (2012): Implementatie stuwprogramma 2005/2006 Neder-Rijn – Lek in WAQUA. Rapport P0040.9, 17 mei 2012.
- AVI (2017): Jaarlijkse Actualisatie Modellen Rijntakken 2017. AVI rapport P170217R
- Baan, van der J. 2019. Modelwerkzaamheden D-HYDRO model Rijntakken. Arcadis memo met kenmerk C03141.000103.
- De Jong, J.S. (2015): Onderzoek naar modelleren van inlaatsluizen met Simona. Deltares memo 1209448-002-ZKS-0007 (30 november 2015).
- De Jong, J.S. (2017): Het effect van het roosterontwerp van de Waal. Het gebruik van vierhoeken of driehoeken? Deltares memo 11200569-003-ZWS-0008
- De Jong, J., & Yossef, M. (2017). Ontwikkeling zesde-generatie Maas-model. Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11200569-0003-ZWS-0014. Delft: Deltares
- Domhof, B.C.A., K.D. Berends, J.J. Warmink, A. Spruyt & S.J.M.H. Hulscher (2017): Discharge and location dependency of calibrated main channel roughness for the River Waal (concept)
- Genseberger, M., Niesten, I., & Fujisaki, A. (2018). Aansluiting overlapgebied zesde-generatie modelschematisaties IJVD en Rijntakken. Deltares memo 11202220-008-ZWS-004-v2. Delft: Deltares
- De Goede, E. en Van Kester, J. (2013): Toepasbaarheid van kleine roostercellen in WAQUA voor overlaten. Deltares memo 1207880-006-ZWS-0009
- Kernkamp, H. (2017): D-Flow Flexible Mesh quality criteria for unstructured meshes. Deltares memo 9 januari 2017
- Reeze, B., A. van Winden, J. Postma, R. Pot, J. Hop en W. Liefveld (2017): Watersysteemrapportage Rijntakken 1990-2015 - Ontwikkelingen waterkwaliteit en ecologie. Bart Reeze Water & Ecologie, Harderwijk.
- Schropp, M.H.I. (2011): Hydraulische metingen vispassages Neder-Rijn Lek, resultaten 2002-2007. Rijkswaterstaat Waterdienst.
- Spruyt, A, T. Minns, F. Zijl, M. Genseberger, M. Yossef, T. van der Kaaij, E. de Goede (2017): Ontwikkeling Zesde-Generatie Modellen Met D-HYDRO - Generieke Technische En Functionele Specificaties." Concept 11200569-000. Delft: Deltares.
- Veen, R. van der. en R. Agtersloot (2011): Aanmaken modelrandvoorwaarden Rijn en Maas t.b.v. WTI2011. Beschrijving werkzaamheden en resultaten simulaties. 23-03-2011.

- Velzen, E.H. van, P. Jesse, P. Cornelissen en H. Coops (2003a): Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden, Deel 1, RIZA rapport 2003.028. ISBN 9036956439, Arnhem, november 2003.
- Velzen, E.H. van, P. Jesse, P. Cornelissen en H. Coops (2003b): Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden, Deel 2, RIZA rapport 2003.029. ISBN 9036956439, Arnhem, november 2003.
- Wijk, R. van der, I. de Groot-Wallast (2017): Schematisatie van kunst- en regelwerken in modelschematisaties van het (hoofd)watersysteem. Deltares rapport 11200741-002-HYE-0002



## A Programma van eisen

Aan te leveren door RWS



## **B Roosterontwerp**

### **B.1 Totaaloverzicht rooster**

Vanwege de grootte van de rooster-atlas wordt deze bijlage apart aangeleverd.

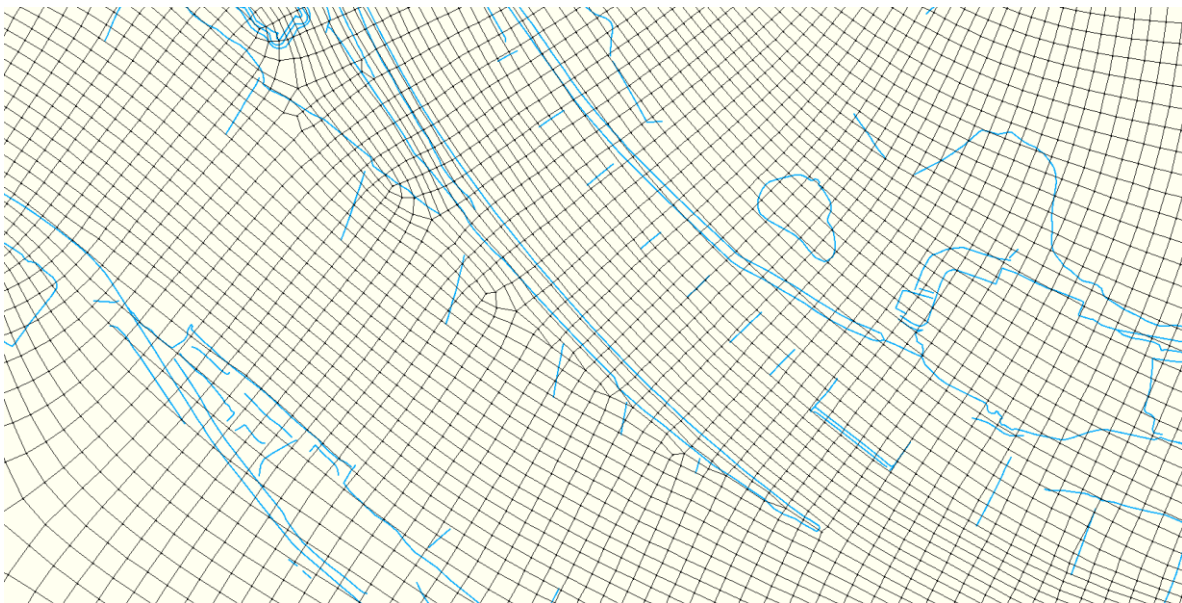
## B.2 Locatiespecifieke keuzes

Deze bijlage bevat voor een aantal locaties een beschrijving van specifieke keuzes die zijn gemaakt tijdens het roosterontwerp.

### B.2.1 Splitsingspunt Pannerdensch Kop

Op het splitsingspunt Pannerdensch Kop is ervoor gekozen om naast vierhoekige cellen ook driehoekige en vijfhoekige cellen te gebruiken om de zomerbedvolgende roosters van Waal en Pannerdensch Kanaal in het winterbed aan te kunnen sluiten. Het resultaat is een volledig curvilineair rooster in het zomerbed van de Boven-Rijn, Waal en Pannerdensch Kanaal. Hierbij is ervoor gezorgd dat het zomerbedrooster op de Boven-Rijn 19 cellen in de breedte heeft. Dit aantal wordt verdeeld als 12 cellen op de Waal en 8 op het Pannerdensch Kanaal. Eén cel "loopt dood" op de Kop zelf, en wordt direct gesplitst door middel van een vijfhoek. Bij het invullen van het winterbed is verder gelet op:

- Locatie van de knopen: zoveel mogelijk buiten kribvakken.
- Projectie van de overlaten: met name de geleidingsdammen het dichtst bij de Kop.



*Figuur B.1 Bij splitsingspunt Pannerdensch Kop worden een vijfhoek en enkele driehoeken gebruikt om cellen te splitsen en zowel het zomerbed van de Waal als van het Pannerdensch Kanaal te volgen (achter het rooster zijn in blauw de overlaten uit j17 weergegeven).*

### B.2.2 Splitsingspunt IJsselkop

Het Pannerdensch Kanaal heeft vlak vóór de IJsselkop 15 cellen in de breedte. Dit aantal wordt gesplitst in 8 cellen op de Neder-Rijn en 6 op de IJssel. Net als bij de Pannerdensch Kop wordt één cel direct gesplitst op de IJsselkop door middel van een vijfhoek. De oriëntatie van het rooster bij de IJsselkop werd bemoeilijkt door de aanwezigheid van het regelwerk de Hondsbroeksche Pleij (aangegeven als rode lijn in Figuur B.2). Dit heeft geleid tot een lagere orthogonaliteit in het zomerbed (tot 0.051). Tevens zijn de cellen in zowel het zomerbed als het winterbed ingekort om te voldoen aan de vereiste lengte-breedte verhouding. Bij het opvullen van de IJsselkop is verder gelet op:

- Locatie van de knopen: zoveel mogelijk op de hoogwatervrije vlakken (weergegeven als rode vlakken in Figuur B.2) en buiten kribvakken.
- Het volgen van de zomerkades langs de IJssel en Nederrijn.



Figuur B.2 Het rooster op de IJsselkop en Hondsbroeksche Pleij. De achterliggende baseline-schematisatie is j16\_5-w4.

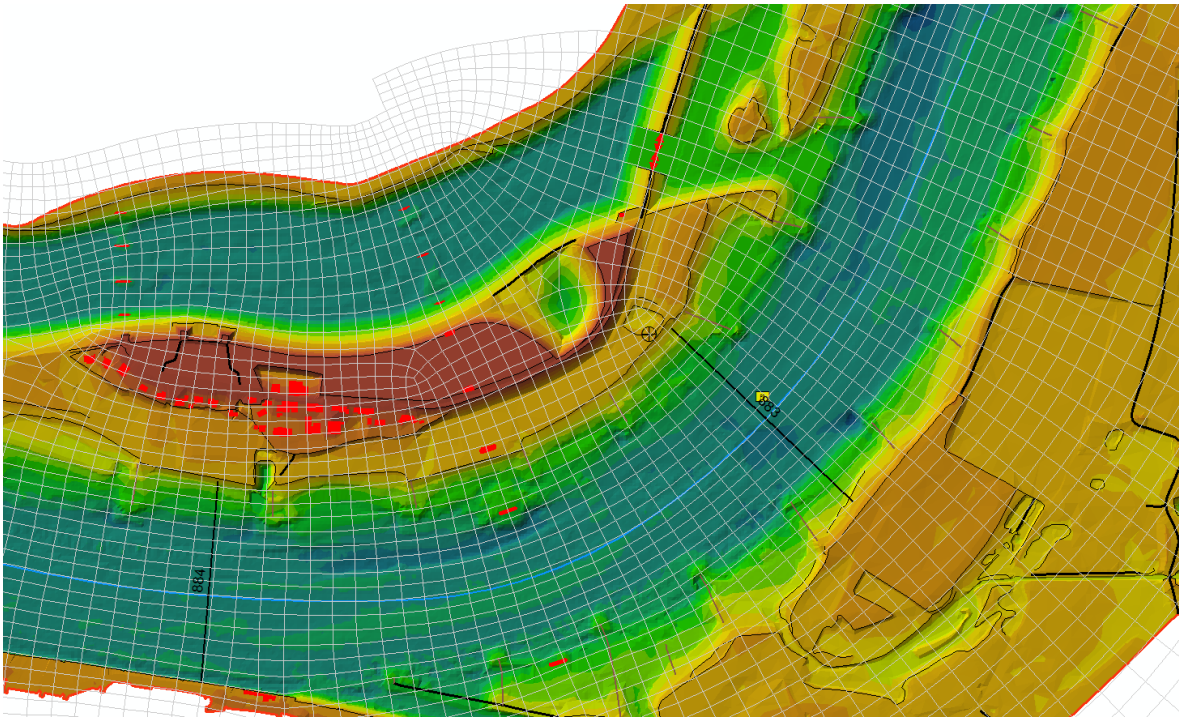
### B.2.3 Regelwerk Pannerden en Regelwerk Hondsbroeksche Pleij

De regelwerken worden bij de start van ieder hoogwaterseizoen opnieuw ingesteld om de hoogwaterverdeling over de takken te verdelen. Het Regelwerk Pannerden controleert de afvoerverdeling over de Waal – Pannerdensch Kanaal en heeft 32 schotten. Het Regelwerk Hondsbroeksche Pleij controleert de afvoerverdeling over de Neder-Rijn - Lek – IJssel en bestaat uit 30 schotten. Bij beide regelwerken is ervoor gekozen om in de breedte één cel over twee schotten te leggen. Op deze manier kan het regelwerk in het model per twee schotten worden ingesteld, en loopt er in het verfijnde rooster een cel over elk afzonderlijk schot.

Bij beide regelwerken is ervoor gezorgd dat er een roosterlijn precies op de drempel ligt. Daarbij is geprobeerd om de geleidingsdammen zo goed mogelijk te volgen.

### B.2.4 Inlaat en nevengeul Nijmegen Lent

Bij hogere afvoer vormt de nevengeul bij Lent een belangrijke stroombaan, en het is van groot belang dat de inlaat (duikers en kade) goed worden opgenomen in het model. Met de gestructureerde blok-aanpak zijn nu zowel het zomerbed van de Waal als het inlaatwerk en de nevengeul van Lent gevolgd. De aansluitingspunten zijn zoveel mogelijk op het hoge deel van het eiland Lent geplaatst zodat de kleine cellen niet beperkend zullen zijn voor de rekentijdstep (Figuur B.3).



Figuur B.3 Grid bij Nijmegen Lent.

Tegenover de nevengeul op de Waal bij Nijmegen is een roosterlijn aan de diepe kant van de Waalkade gelegd. Op deze manier wordt het doorstroomoppervlak bij lage afvoeren gewaarborgd. Intussen wordt de flow link "dichtgezet" door projectie van de kade op dezelfde diepe roosterlijn.

#### B.2.5 Traject langsdammen

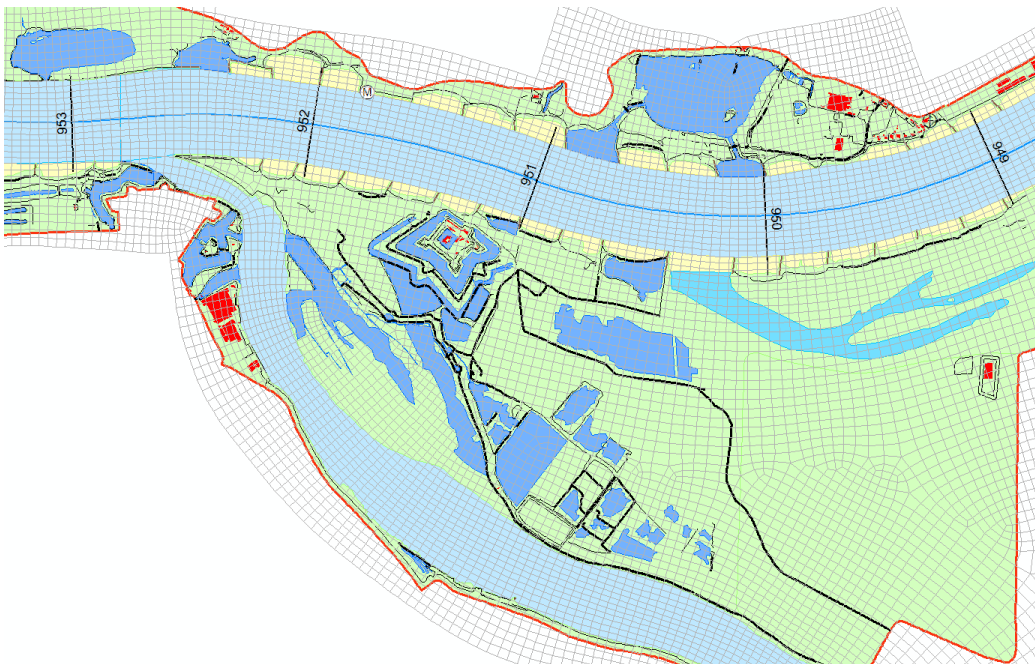
De langsdammen bij Tiel zijn aangelegd in 2015. Het streven is om het rooster zoveel mogelijk uit te lijnen met het systeem zoals het er in de huidige situatie uitziet. Voor kalibratie is de situatie tijdens het hoogwater van 1995 echter van belang. Daarom is geprobeerd om de roosterlijnen aan te laten sluiten op zowel de kruin van de langsdammen (huidige situatie) als op de sectie 1-lijn in 1995 (zie Figuur B.4). Hierbij is voorrang gegeven aan uitlijning op de situatie mét langsdammen. De orthogonaliteit op dit traject is goed met waarden  $< 0.01$ .



Figuur B.4 Rooster bij het langsdammen-traject in de situatie 2016 (links) en de situatie 1995 (rechts)

#### B.2.6 Afgedamde Maas

Bij hogere afvoeren vormt de Afgedamde Maas een belangrijke stroombaan. Het rooster op deze locatie is een duidelijk voorbeeld van een gestructureerde blok-aanpak (Figuur B.5). Bij de opzet van het rooster is de Afgedamde Maas behandeld als zomerbed en is het diepe deel curvilineair opgevuld met behulp van splines. Vervolgens is het rooster uitgebreid in het winterbed. Waar de gestructureerde blokken van de Waal en Afgedamde Maas elkaar tegenkomen, is het rooster geplakt door middel van “knopen”. De landtong tegenover Woudrichem is behandeld als splitsingspunt en bevat enkele vijfhoekige cellen om te celrijen te kunnen splitsen. Bij de aantakking van de Afgedamde Maas op de Waal / Boven Merwede is erop gelet dat er voldoende roostercellen in de diepe geul liggen.



Figuur B.5 Het rooster volgt zowel de Afgedamde Maas als het zomerbed van de Waal en Boven-Merwede.

Omdat uit berekeningen met hoge afvoer bleek dat de cellen in de haven van Woudrichem beperkend waren voor de rekentijdstep, zijn de kleine cellen verwijderd of verplaatst naar de vesting Woudrichem (buiten modelgebied).

## B.2.7 Groene rivier Arnhem

Net als de Afgedamde Maas is de nieuw ingerichte Groene Rivier bij Arnhem een belangrijke stroombaan tijdens hogere afvoeren. Er is daarom extra aandacht besteed aan het volgen van deze stroombaan (zie Figuur B.6).



Figuur B.6 Rooster bij de Groene Rivier, Arnhem (instream).

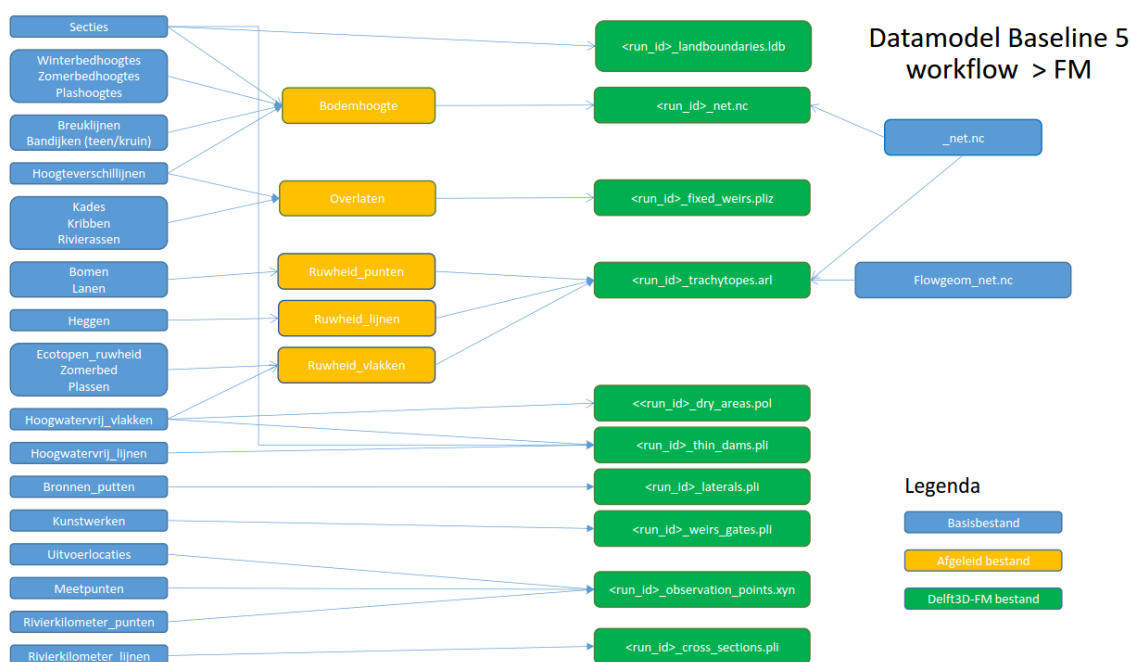


## C Projectie, Baseline en geometrie

### C.1 Projectie van Baseline naar invoer voor D-Flow FM met BAS2FM

De projectie van de Baseline-geodatabase naar invoer voor DFlow-FM gebeurt met behulp van de tool BAS2FM (LievenceCSO, 2017b). Deze tool is de vervanging van de applicatie BASWAQ (Baseline naar WAQUA). DFlow-FM maakt voor een groot deel gebruik van roosteronafhankelijke invoer, waardoor BAS2FM enkel de conversie hoeft uit te voeren naar bestandsformaten die door DFlow-FM gelezen kunnen worden. Uitzonderingen hierop zijn de projectie van de trachytopen en de bodemhoogte.

Tijdens het project is gebruik gemaakt van ontwikkelversies van BAS2FM (eerst 1.0.0, daarna 1.3.4). Hierdoor zijn er nog onvolkomenheden en bugs in de projectie waardoor er handmatige aanpassingen nodig zijn (zie D.3). De verdere ontwikkelingen van BAS2FM voor Baseline 5 zouden niet moeten resulteren in veranderingen in rekenresultaten.



Figuur C.1 Beschrijving van de workflow in BAS2FM 1.0.0 voor Baseline 5 (LievenceCSO, 2017a).

De totale projectie neemt 5.5 uur in beslag op het WCF-cluster van Deltares. Dit genereert de volgende bestanden:

Tabel C.1 Overzicht van elementen voor de 4 kalibratieschematisatie

	j93_5-v1	j95_5-v1	j11_5-v2	j14_5-v2
Fixed Weirs	6.944	6.944	13.086	12.987
Thin Dams	7	60	30	30
Observation Points	294	294	295	339
Dry areas	1	1	4	4
Trachytopen	1.363.338	1.363.338	2.179.380	2.180.985
Laterals	38	38	38	38
Weirs gates	10	10	10	10

## C.2 Projectie door initialisatie van Flexible Mesh

### C.2.1 Punt-elementen: observation points, lateral sources,

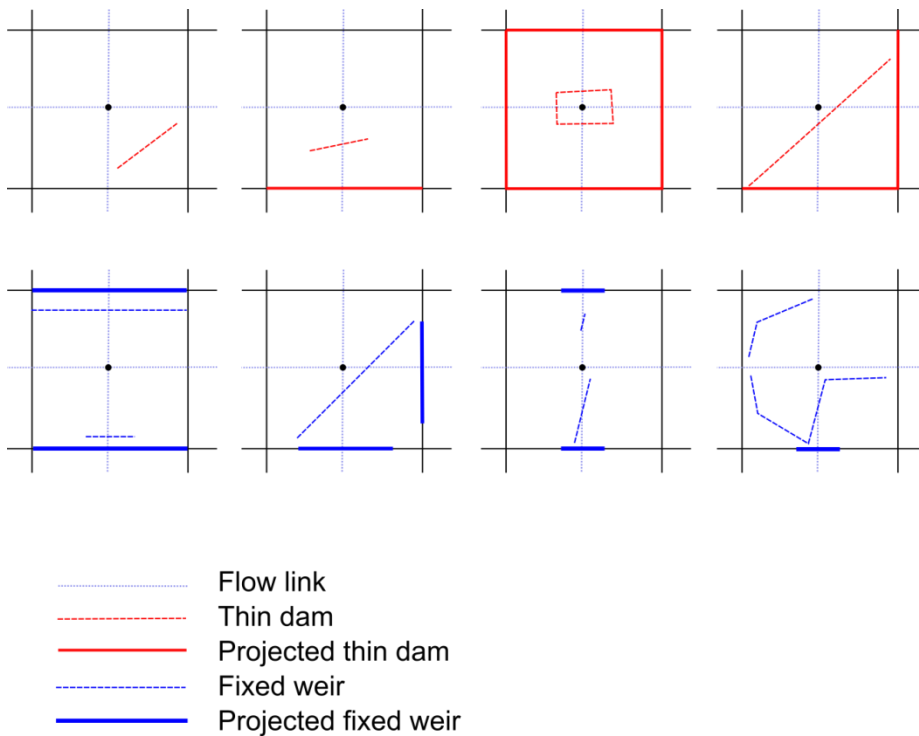
Als een punt-element binnen het rooster valt, dan wordt dit geprojecteerd op het dichtstbijzijnde waterstandspunt. Wanneer het punt niet binnen het rooster ligt, dan wordt hier een melding van gemaakt in het '.dia'-logbestand en worden er NaN of -999 uitgevoerd.

### C.2.2 Lijn-elementen: thin dams, fixed weirs, structures, cross-sections

In de onderstaande figuur wordt voor een achttal situaties 1 roostercel weergegeven met vier flow links naar nabijgelegen cellen. De bovenste vier figuren geven aan hoe een ongeprojecteerde hoogwatervrijelij (thin dam) wordt geprojecteerd op de flow celwand (edge), de onderste vier figuren geven aan hoe een ongeprojecteerde overlaat (fixed weir) op het rooster wordt geprojecteerd. De getekende breedte van de geprojecteerde overlaat geeft de breedte van de overlaat aan in verhouding tot de celbreedte. De breedte ( $wu$ ) van een overlaat (fixed weir) wordt enkel bepaald door de hoek ( $\alpha$ ) tussen de overlaat en de flow link.

$$wu = \cos(90 - \alpha) \cdot edgewidth$$

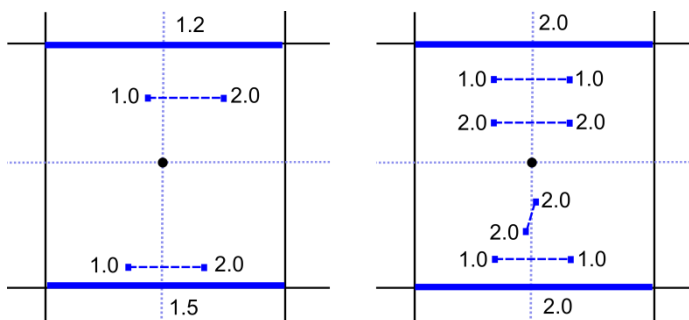
De FixedWeirType heeft geen invloed op de uitgevoerde projectie.



Figuur C.2 Schematische weergave van de wijze waarop schotjes (thin dams) en overlaten (fixed weir) worden geprojecteerd op het rekenrooster

In onderstaande afbeelding staat ook uitgewerkt hoe de hoogte wordt overgenomen in de geprojecteerde overlaat. Hierbij gelden de volgende regels:

- De hoogte is een gewogen gemiddelde (lineaire interpolatie) op de locatie waar de flow link doorsneden wordt.
- Indien meerdere overlaten de lijn doorkruisen:
  - Van de diverse hoogtes van de overlaten wordt de maximale hoogte gekozen.
  - Van de diverse breedtes van de overlaten wordt de maximale breedte gekozen.



Het principe is geheel anders dan in WAQUA. In WAQUA worden de volgende stappen gedaan:

- De steunpunten van een overlaat worden op de hoekpunten van een rooster cel geprojecteerd. (met maximum kruinhoogte en maximale verval).
- Tussen deze hoekpunten worden celwandjes met elkaar verbonden.
- De hoogte van de overlaat wordt gemiddeld tussen de hoekpunten.
- De breedte van een overlaat wordt niet gevarieerd, een overlaat kan wel diagonaal zijn.

Wanneer we kijken naar de verschillen tussen WAQUA en D-Flow FM, dan blijkt:

- De locatie van de overlaten identiek te zijn.
- De hoogtes van de overlaten worden op een andere manier gemiddeld, maar zullen weinig verschillen.
- De breedte tussen beide methoden is zeer verschillend voor overlaten die niet diagonaal lopen.

### C.2.3 Open randen

Open randen worden geprojecteerd op een modelrand als deze binnen een bepaalde marge van de rand zijn aangegeven. Ze hoeven dus niet exact op de modelrand te liggen. Standaard is deze marge ongeveer drie roosterzellen.

## C.3 Ruwheden

Deze bijlage bevat achtereenvolgens de afleiding van de achtergrondruwheden in het zomerbed (Bijlage C.3.1) en het voorlopige ruwhedensbestand zoals wordt ingevoerd in D-HYDRO (Bijlage C.3.2). De afleiding van de zomerbedruwheden bestaat uit twee memo's (beide door Mohamed Yossef). Memo 1 (dd 18-09-2018) bevat de afleiding van de ruwheden, omschrijving van de gebruikte dataset en de conclusie dat over alle Rijntakken één ruwhedescoefficiënt kan worden gebruikt. In memo 2 (dd 23-10-2018) is deze keuze herzien, wat heeft geleid tot de ruwheidstrajecten zoals beschreven in Hoofdstuk 4.5.1..

### C.3.1 Afleiding zomerbedruwheden

Memo 1

Auteur: M.F.M. Yossef

18-09-2018

---

#### **Analysis of available data**

The calibration procedure is described in Section xxx. In this approach, the most relevant change from the earlier calibration method is the use of a calibration factor, which is applied on the initially defined background roughness. The background roughness sets the starting point of calibration and can be defined as the physically-based roughness of the river reach, which can be deduced from sediment and bedform characteristics; including spatial and temporal variabilities. Information about dune heights and sediment characteristics in the Rhine were made available from three main sources. A dataset processed by Arjan Sieben (2008), a raster dataset, provided by RWS-ON, and the DVR model sediment input dataset and the results of the dune height predictor. Herein, we used data on sediment size as used in the DVR model, which has been based on an extensive analysis of measurements. The data is shown in Figure 8.1, see as well Figure 8.2. The data shows that, for the Waal, the discrepancy between the different sources of data is relatively large. For the Nederrijn there is a somewhat good similarity between the three different datasets. for the upstream part of the IJssel (up to rkm 930) there is some resemblance between the DVR model results and the data. Around rkm 930, there is a discontinuity in the pattern calculated by the DVR-model, due to changing from graded to uniform sediment model. In general, there some discrepancies between the different sources of data with a level of correspondence in patterns that captures the general trend. Given the uncertain nature of dune height estimates, such discrepancy may be considered acceptable.

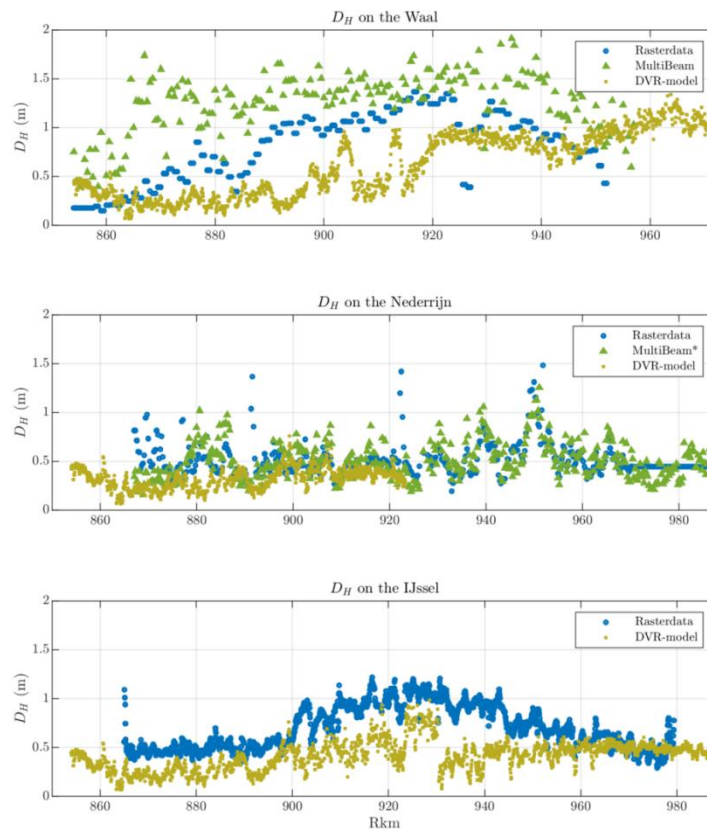


Figure 8.1 Bedform height as a function of river chainage for the Waal, the Nederrijn, and the IJssel, the most upstream part of all graphs covers the Boven-Rijn.

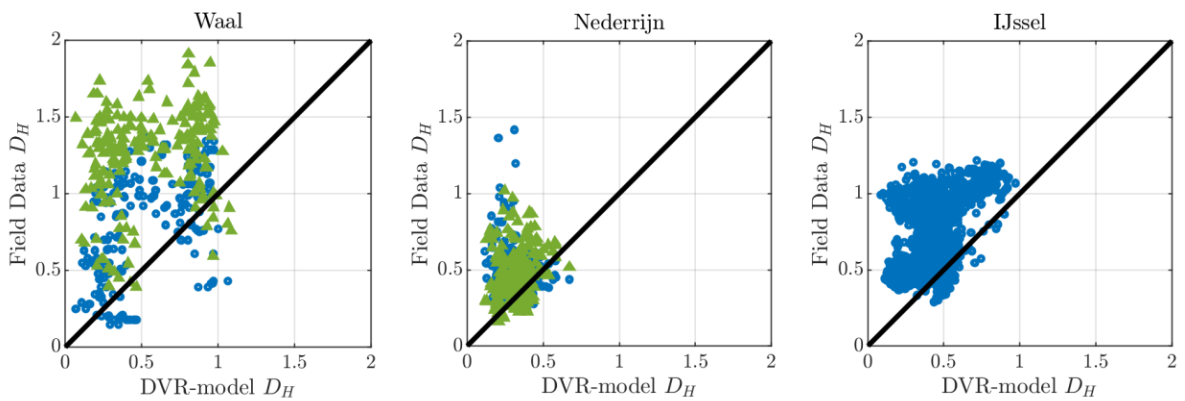


Figure 8.2 Comparison between the average bedform height calculated by the DVR model and that from the field measurements.

Roughness estimates, based on sediment size and bedform characteristics can be made using the formula of Van Rijn (1984)

$$k_{s,1} = 3D_{90} + 1.1h_d \left( 1 - e^{-25 \frac{h_d}{L_d}} \right) \quad (4.1)$$

With,  $k_s$  as White-Colebrook/Nikuradse roughness value,  $h_d$  dune height,  $L_d$  dune length. The subscript (1) denotes that  $k_{s,1}$  follows the formulation of Equation 1.1.

Assuming  $h_d \propto h$  &  $L_d \propto h$  and ignoring grain roughness, a simplified representation of the formula of Van Rijn can be written as;

$$k_{s,2} = Ah^{0.7} \left(1 - e^{-Bh^{0.3}}\right) \quad (4.2)$$

with  $A$  and  $B$  as calibration coefficients; with  $B$  value of 2.5 as most common. The subscript (2) denotes that  $k_{s,2}$  follows the formulation of Equation 1.2.

The value of  $k_s$  can be estimated based on the Equation 1.1 ( $k_{s,1}$ ) see Figure 8.3. The value of  $A$  can be then found such that the deviation (RMSE) between the value of  $k_{s,2}$  and  $k_{s,1}$  is minimum. We are able to calculate the value in of  $A$  in three different ways: as a single value per branch, a single value per calibration reach, or spatially varying values (point by point).

Figure 8.4 & Table 8.1 give the values of the calibration coefficient  $A$  as a single value per branch based on the two data sources as well as the DVR-model results. The resulting single calibration coefficient for the Waal has large variations whereas the values for the Nederrijn are more consistent. The  $A$  value for the IJssel based on the raster dataset is 0.19 compared to around 0.07 based on the DVR-model results. The issue with this is that in all three cases, the correspondence of  $k_{s,2}$  to  $k_{s,1}$  is poor.

If the same analysis is made for reaches corresponding to the calibration reaches of the Waqua 5<sup>th</sup> generation model; the corresponding values of  $A$  are shown in Figure 8.5. For the Waal, the values based on the DVR-model are the closest to the values of the Waqua model. The values based on the multibeam dataset are much higher (0.4 to 0.5), which is expected as this dataset have the largest dunes. The  $A$  values based on the raster dataset is between 0.1 and 0.3, which is still higher than the WAQUA calibration values, but it is fairly comparable in trend to that of the DVR-model or the Waqua model calibration. For the Nederrijn, the correspondence between the  $A$  values based on the different data sources are in the same range, and in the same range of the values of the calibrated Waqua model. For the IJssel, the resulting  $A$  values based on the DVR-model corresponds better to the values of the calibrated Waqua model.

Based on the  $k_s$  values calculated along the river (based on cross-section averaged dune heights and depth), it is possible to calculate the local values of  $A$ , that minimises the deviation between of  $k_{s,2}$  and  $k_{s,1}$ . In this case, and because the analysis is made locally, the resulting of  $k_{s,2}$  values are identical to Figure 8.3. The resulting  $A$  values are given in Figure 8.7, with comparison with the mean values of the 5<sup>th</sup> generation WAQUA model calibration values; values of all calibration discharge levels are shown in Figure 8.6. Figure 8.7, top panel, shows that there is deviation between the  $A$  values based on the three different data sets, this is expected, in accordance with the discrepancy in bedform data shown in Figure 8.1. The range of variations is somewhat large (ca. from 0.05 to 0.6). For the Nederrijn, the results from the field datasets and the DVR-model give similar behaviour. The values of  $A$  though in the same range of the calibrated WAQUA model, the pattern is somewhat different. For the IJssel, the data-based  $A$  values has a much larger range than that of the calibrated Waqua model.

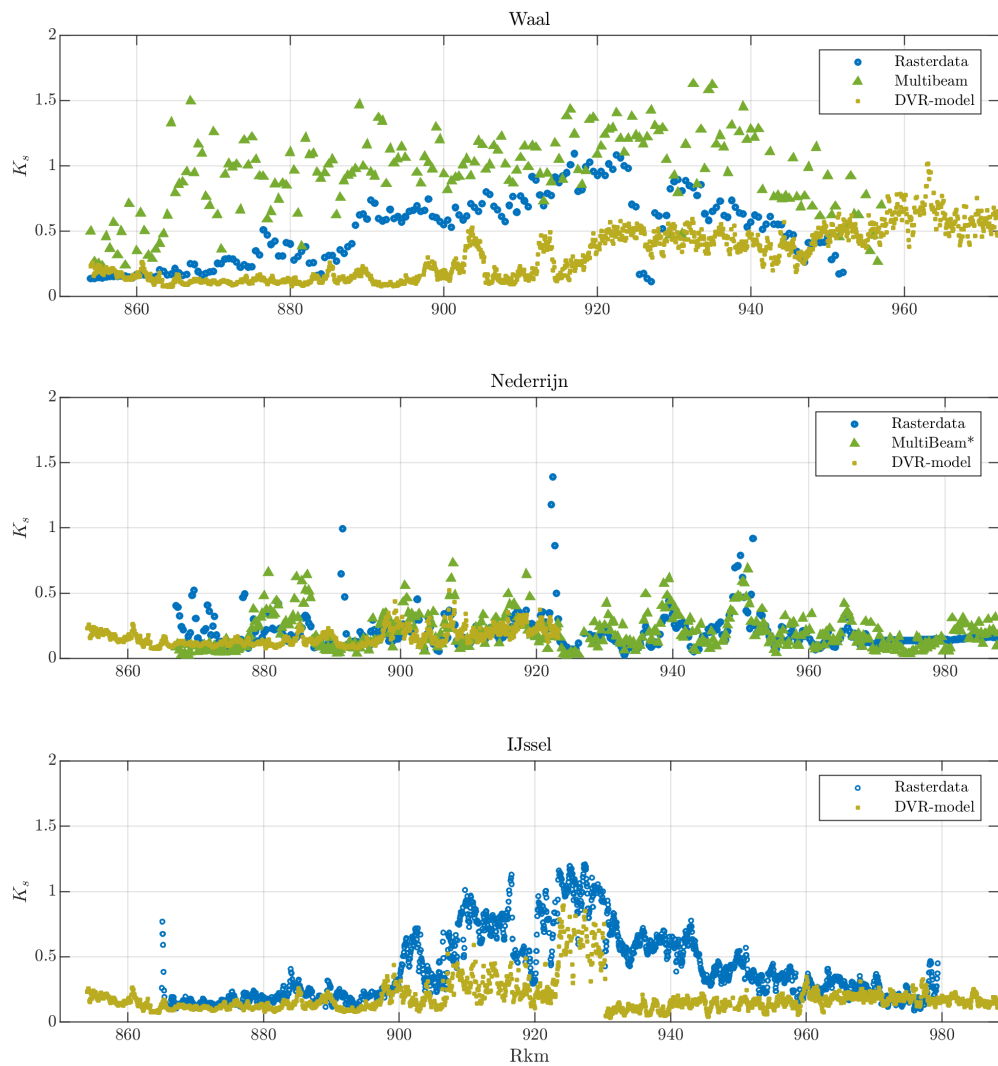


Figure 8.3  $K_s$  values based on Equation 1.1 ( $K_{s,1}$ ) –DVR-model data (sampled at  $Q = 3824 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

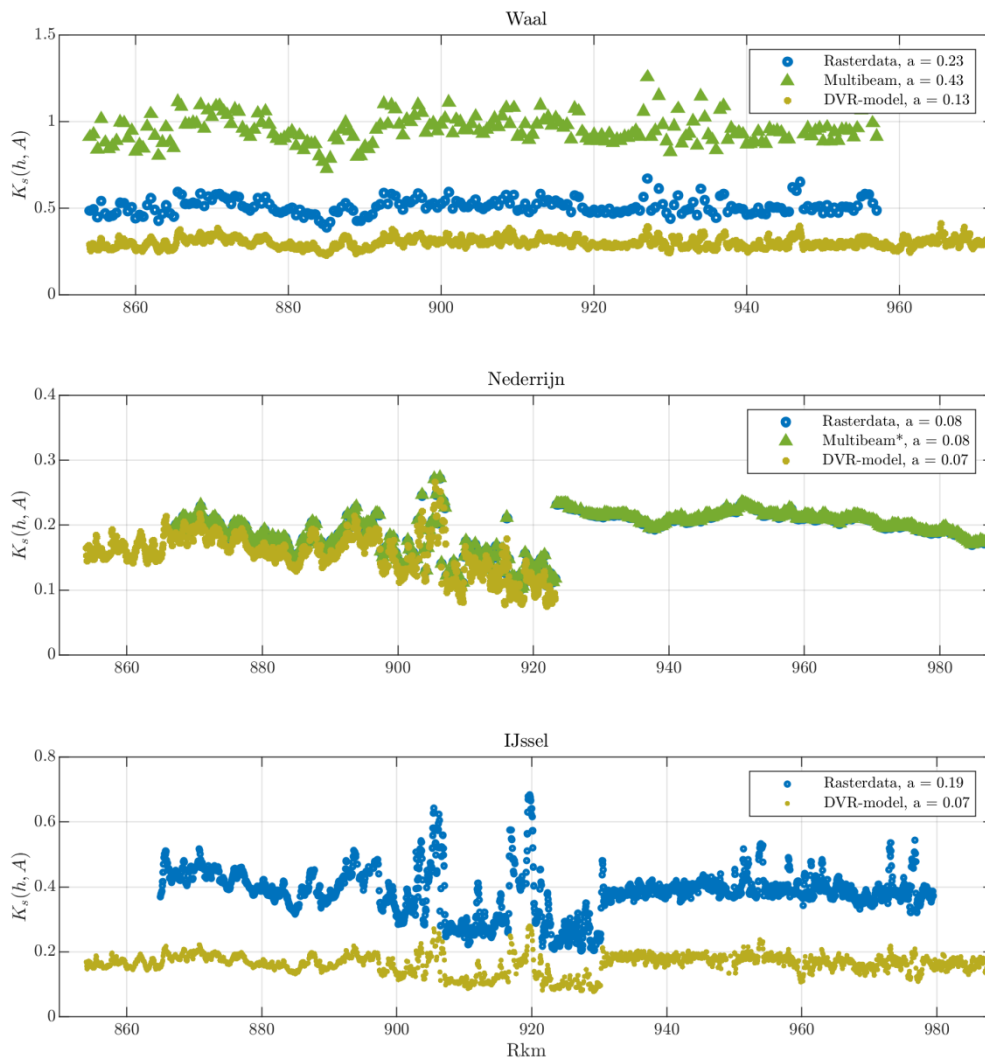


Figure 8.4  $K_s$  values based on  $A$  as a single value per branch; values of  $A$  are in legend, DVR uses  $Q=3824 \text{ m}^3/\text{s}$ . table below gives an overview of the values of  $A$ .

Table 8.1 Values of calibration factor  $A$ , as a single value per branch

	Field Data		DVR-Model, function of discharge								
	Mbeam	Raster	Q=1203	Q=1635	Q=2252	Q=2250	Q=3053	Q=3824	Q=4717	Q=6151	Q=8592
Waal	0.43	0.23	0.2018	0.1752	0.1605	0.1673	0.1734	0.132	0.1193	0.1071	0.0970
Nederrijn	0.08	0.08	0.1122	0.0890	0.0798	0.0825	0.0857	0.0673	0.0603	0.0548	0.0483
IJssel	-	0.19	0.0642	0.0602	0.0623	0.0706	0.0795	0.0696	0.082	0.0866	0.0723



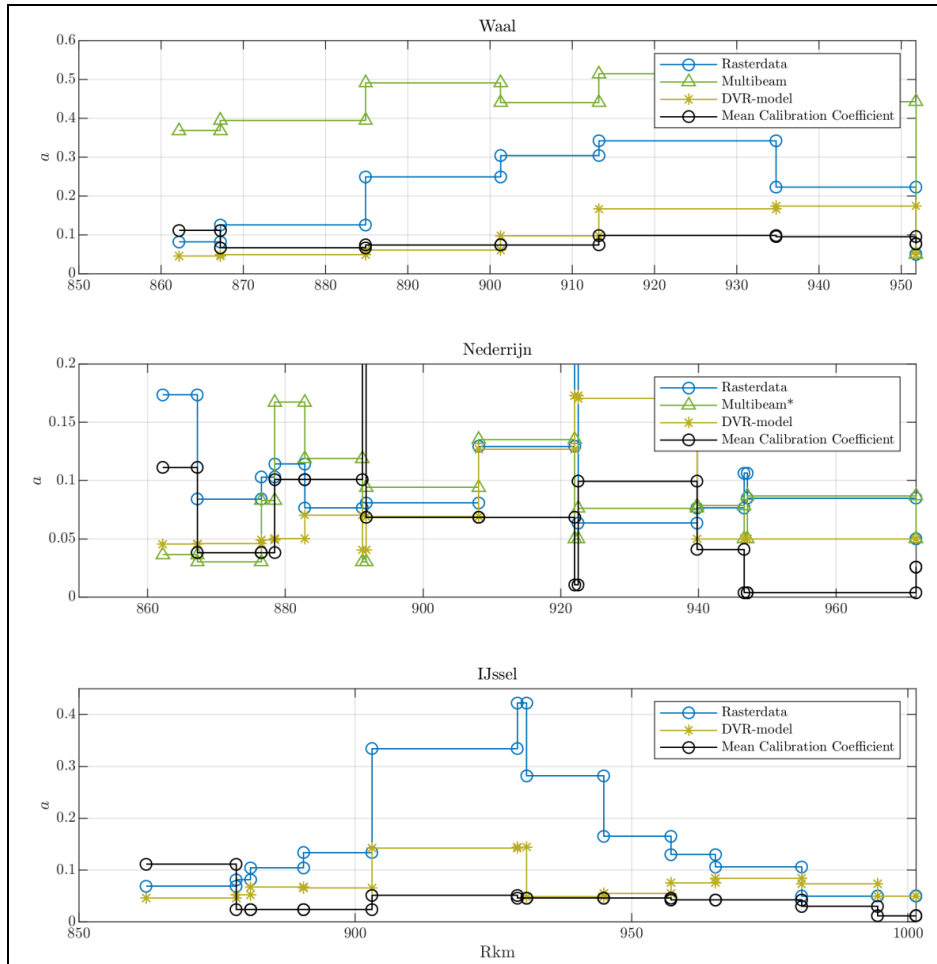


Figure 8.5 Spatial variations of the calibration coefficient A based optimised over each calibration reach of the Waqua 5<sup>th</sup> generation model – the mean values of the Waqua calibration coefficients are added for visual comparison (all values of the Waqua model calibration coefficient are shown in Figure 8.6)

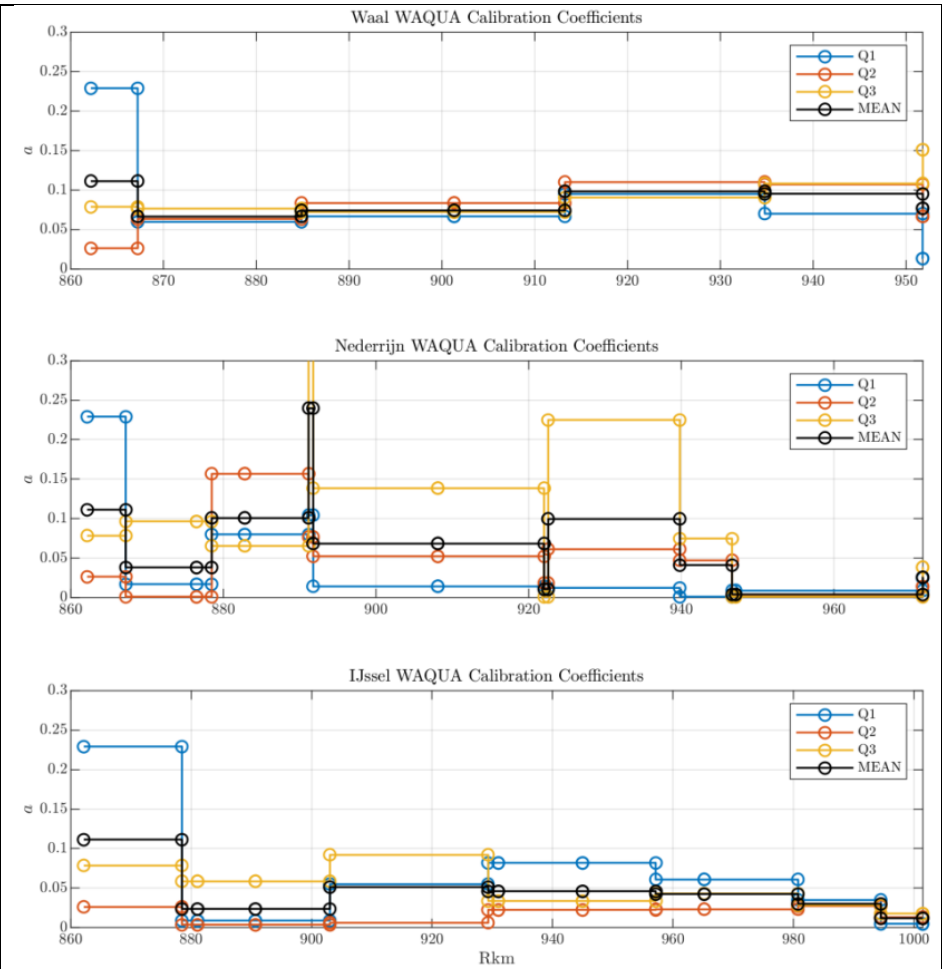


Figure 8.6 Spatial variability of the calibration coefficient A used in the 5<sup>th</sup> generation model



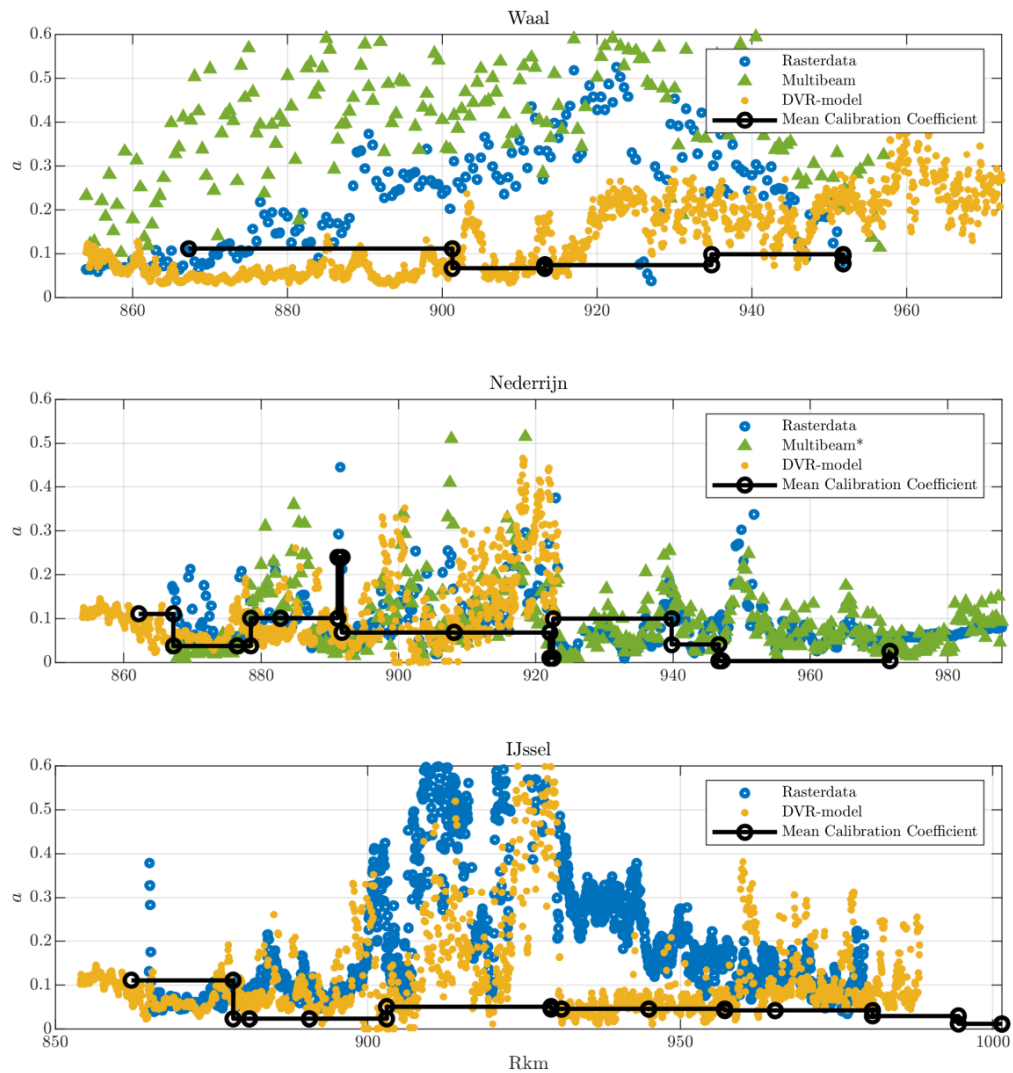


Figure 8.7 Spatial variations of the calibration coefficient  $A$  ( $A(Ks2 = Ks1)$ ). The mean calibration coefficient of the 5<sup>th</sup> generation Waqua model is added for visual comparison (all values of the Waqua model are shown in Figure 8.6)

## Concluding remarks

**These are initial thoughts for discussion with the RWS.**

Given the above analysis (see as well the analysis made by White in Annex xxx) it is rather difficult to reach a reliable definition of the spatial variations of the values of the background roughness calibration coefficient  $A$ . Particularly for the Waal, there is a large discrepancy between the results based on the different datasets and the magnitude of the calibration coefficients seem to be high.

Accordingly, it is recommended to use a constant  $A$  value for all branches; a typical value of  $A = 0.1$  can be used. In this way, the calibration result would be easy to understand and analyse.

The analysis carried out herein highlight a knowledge gap about our ability to make estimates of the background roughness values, that is physically based, and about the status of bedform datasets. It is recommended to formulate a research that address this knowledge gap with in the next couple of years, such that the next round of model updates, this knowledge gap is covered. The research can start by reevaluating the bedform datasets and collect new data; associate the collected data with accurate water depth measurements, such that the roughness estimates are made based on consistent bedform and water level data. A research programme such as the KPP-river dynamics may be suitable for this kind of research.

## References

- Sieben, J. (2008) Taal van de rivierbodem: parameters voor morfodynamiek in rivieren. Rijkwaterstaat.
- van Rijn, L. (1984). Sediment Transport, Part III: Bed forms and Alluvial Roughness.

Memo 2

Auteur: M.F.M. Yossef

23-10-2018

### Simplified conversion from dune height to roughness calibration coefficient

The analysis presented in the previous memo gives inconclusive answer for defining spatially varying roughness calibration coefficient. Accordingly, we follow a simplified approach in which we assume that:

- the roughness coefficient (alfa) is linearly proportionate to the dune height
- the maximum roughness coefficient of the Rhine Branches can be set to equal a value of 0.1

Subsequently, we fit a step-wise function to the measured dune height; this fit is made as follows:

- The locations of transition of the stepwise function are selected based on visual observation of transition in dune height or sediment size; or on a branch boundary. This defines sub reaches.
- The fitted dune heights are calculated based on the average dune height per sub-reach.

Subsequently, a linear conversion is made from the stepwise dune heights to a stepwise roughness coefficient ALfa. In this conversion a single scaling parameter is used for all branches. The scaling parameter is defined as the ratio between the maximum defined roughness coefficient Alfa and the maximum fitted dune height; such that the Alfa (maximum dune) = maximum Alfa.

The result is given in the table below and in Figure 8.8 Figure 8.9 Figure 8.10.

Boven-Rijn & Waal			PK & Nederrijn			PK & IJssel		
Distance (km)	H <sub>d</sub> (m)	Alfa	Distance (km)	H <sub>d</sub> (m)	Alfa	distance (km)	H <sub>d</sub> (m)	Alfa
0.00	0.397	0.035	0.00	0.557	0.050	0.00	0.557	0.050
14.01	0.397	0.035	10.72	0.557	0.050	10.72	0.557	0.050
14.01	0.611	0.055	10.72	0.543	0.049	10.72	0.493	0.044
34.00	0.611	0.055	26.07	0.543	0.049	42.64	0.493	0.044
34.00	0.932	0.083	26.07	0.513	0.046	42.64	0.896	0.080
50.00	0.932	0.083	54.00	0.513	0.046	95.00	0.896	0.080
50.00	1.119	0.100	54.00	0.529	0.047	95.00	0.571	0.051
69.58	1.119	0.100	75.03	0.529	0.047	124.31	0.571	0.051
69.58	0.857	0.077	75.03	0.714	0.064			
73.50	0.857	0.077	90.00	0.714	0.064			
73.50	0.916	0.082	90.00	0.504	0.045			
97.75	0.916	0.082	117.88	0.504	0.045			

Note that we tried to base this analysis on variations in sediment size in the form of Alfa = f(D<sub>50</sub>). However, the sediment variations, particularly the downstream fining, yield a trend in Alfa that is not corresponding to the variations in dune heights. As such, we decided to follow a more direct approach in which we base Alfa on dune heights.

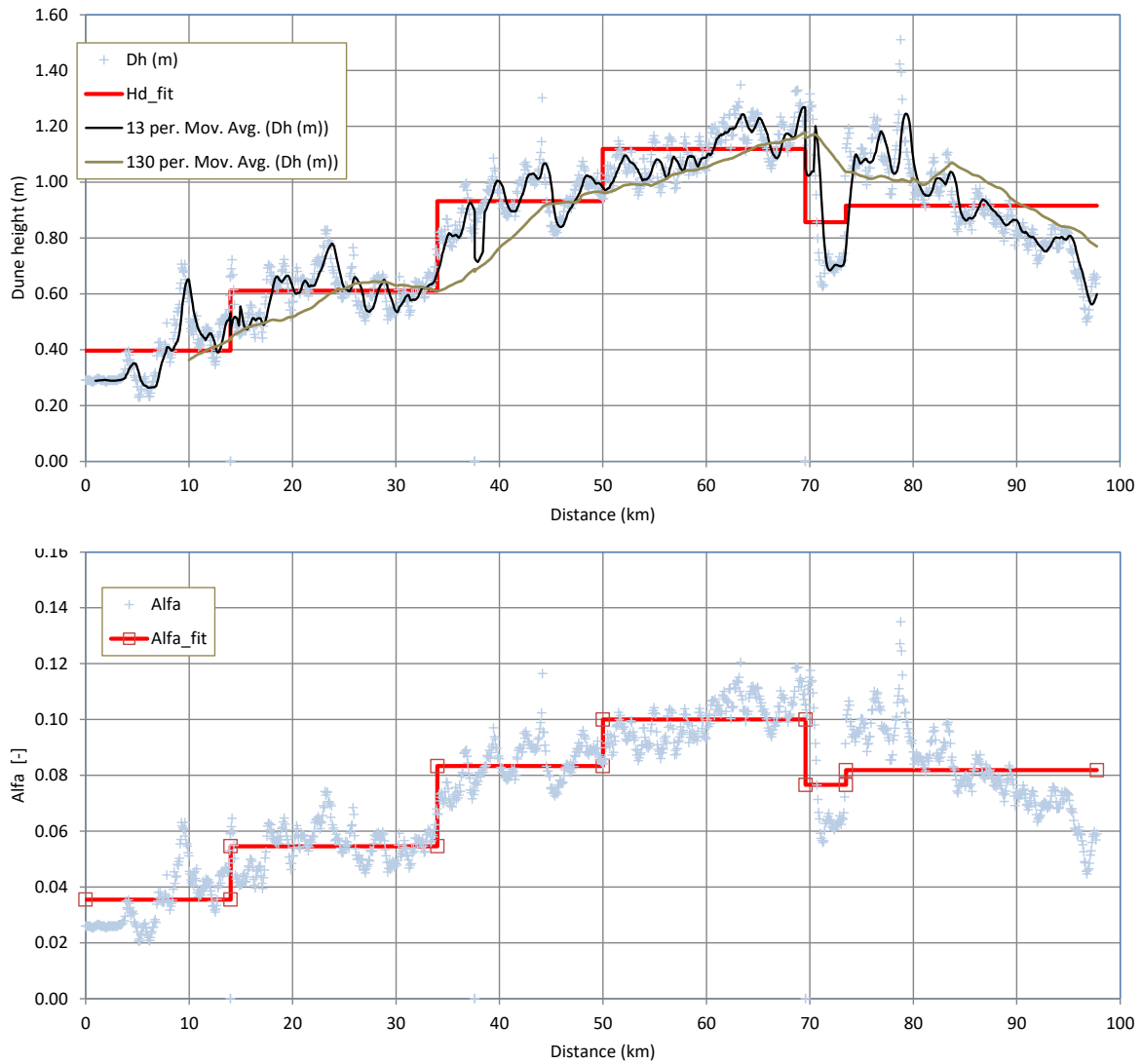


Figure 8.8 Boven-Rijn & Waal: Stepwise fit of dune heights (upper panel), and corresponding roughness coefficient (lower panel).

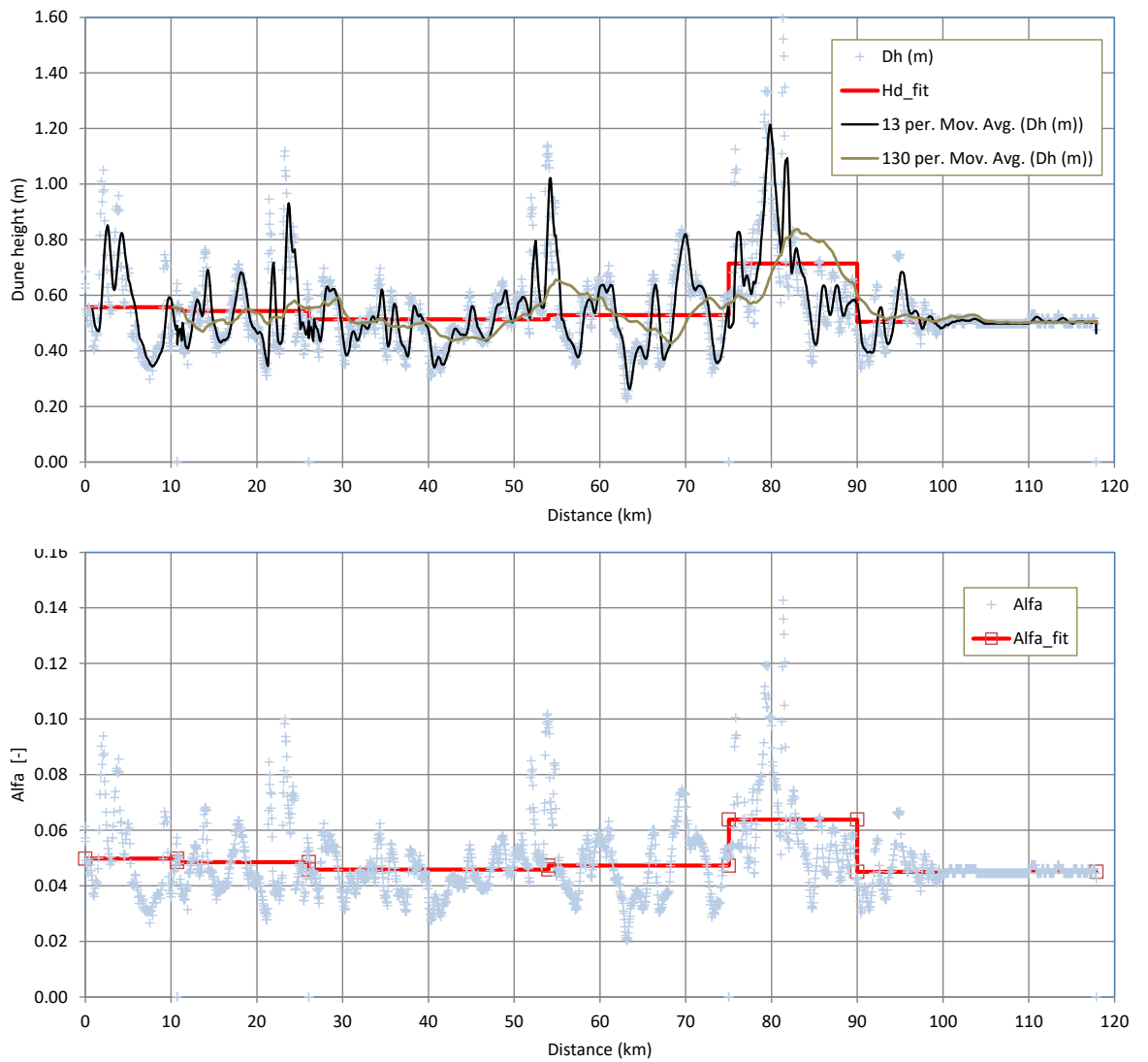


Figure 8.9 PK & Nederrijn: Stepwise fit of dune heights (upper panel), and corresponding roughness coefficient (lower panel).

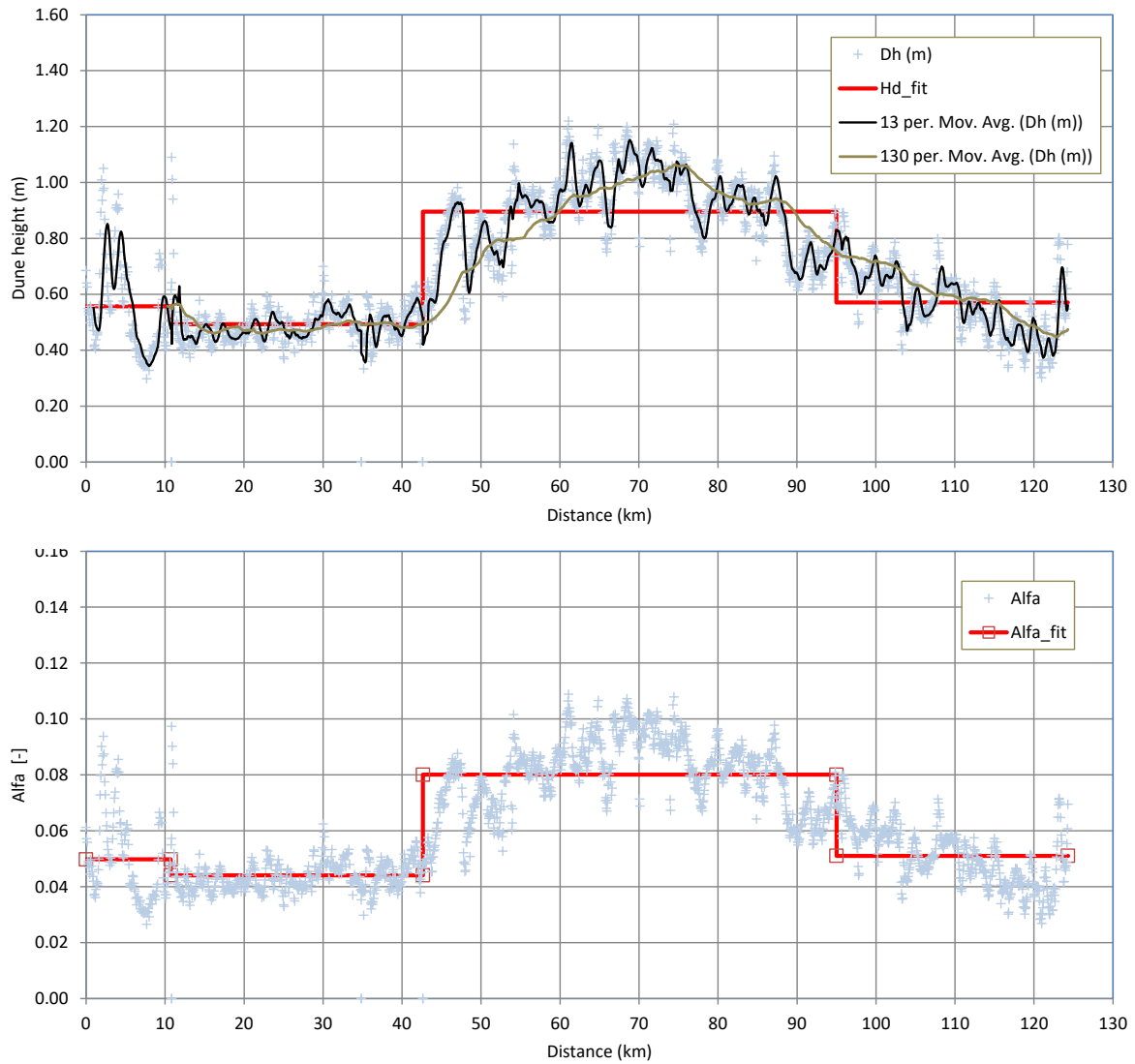


Figure 8.10 PK & IJssel: Stepwise fit of dune heights (upper panel), and corresponding roughness coefficient (lower panel).



### C.3.2 Ruwheidsbestand als invoer in D-HYDRO

Deze bijlage bevat een kopie van het bestand "roughcombination-all-2015\_5\_rijntakken-v1.ttd", zoals geconverteerd uit het WAQUA-ruwheden bestand "roughcombination-all-2015\_5" en met toevoeging van de ruwheidscodes uit de Duitse Rijn (ruwheidscodes 751 - 757).

---

```
# This file has been created by conversion from WAQUA using the matlab script by
Jurjen de Jong
# 15/06/2018: Handmatig ruwheidscodes toegevoegd uit Ketelmeer / Zwarte Meer. Afk.
uit IJVD-waqua hr2017
# 04/07/2018: Handmatig ruwheidscodes Duitse Rhein toegevoegd (751 - 760). Afk.
uit DVR-model
1 1
2 1
3 1
#=====
#
# Roughcombination : Ruwheids karakteristieken voor de ROUGHCOMBINATION method in
Waqua
#
#           De r_code verwijst naar de r_code in de area-u en area-v files
#
#           De vegetatie waarden zijn afkomstig van het Handboek
#           Stromingsweerstand vegetatie in uiterwaarden Deel 1 en 2
#           Riza rapport 2003.028 en Riza rapport 2003.029
#
#           De handboek ruwheden kunnen vrijuit gebruikt worden. Het betreft
de codes:
#           101-122, 1201-1250, 1501-1510, 1601-1618, 1801-1807
#
#           De overige codes zijn :
#           - gekalibreerde waarden voor specifieke gebieden
#           - coderingen gebruikt in WBR vergunningen
#           - specifieke ruwheden voor projecten
#           Deze ruwheden zijn niet vrijuit in andere projecten te gebruiken.
#
#-----
# Versie 2015_5-v1 (06-11-2015): - gebaseerd op Versie 0.88 van
'roughcombination.karak_5_vast'
#
#           - opschonen code: alle gekalibreerde waarden
voor specifieke
#
#           gebieden worden in aparte files opgenomen
#           - overgang naar nieuwe naam volgens naamgevingsconventie
#           - toevoegen codering ivm vegetatielegger
#
#=====
# CODE 1-50           : Formulering voor bebouwing en hoogwatervrije terreinen
#
#           : Deze formulering vraagt geen invoer parameters in roughcombination
#
#=====
#
```

```

# CODE 51-100      : Niet gedefinieerd
#
#=====
#
# CODE 101-300    : Ruwheids formulering volgens de formule van White-Colebrook
# r_code         : de ruwheids code
# a              : k-Nikuradse (normaal of eb)          (0.0001 - 0.20 - 100.)
# b              : k-Nikuradse (vloed)                 (0.0001 - 0.20 - 100.)
# c              : geen betekenis
# d              : geen betekenis
#
101 51 0.20      # default waarde
102 51 0.15      # diepe bedding
103 51 0.15      # ondiepe bedding
104 51 0.15      # strang
105 51 0.20      # nevengeul
106 51 0.05      # plas/haven/slikkige oever
111 51 0.15      # kribvakstrand/zandplaat/grindplaat
112 51 0.40      # ruwe oever
113 51 0.30      # steenbekleding
114 51 0.60      # bebouwd/verhard terrein
115 51 1.00      # bebouwd terrein
116 51 0.20      # verhard terrein
121 51 0.20      # akker
122 51 0.25      # strooisel
131 51 0.63      # vaste laag Nijmegen
132 51 0.34      # vaste laag St. Andries
133 51 0.68      # bodem kribben Erlecom
#
161 51 3.00      # oever met begroeiing Brokx_kl
#                # dit is een Ruimte voor de Rivier maatregel
#
# CODE 171 t/m 175 : Codes gereserveerd voor de Duitse zijrivieren
# Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-rhein'
#
# CODE 180 t/m 185 : Codes gereserveerd voor de Markermeer-Gooimeer-Eemmeer-
schematisatie
# Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-markermeer'
#
# De volgende codes zijn toegevoegd voor de Vegetatielegger
201 51 0.15      # water
202 51 0.60      # verhard
#
#r_code = 299 a = 0.20 b = 0.25      # eb en vloed (voorbeeld)
#
#=====
#
# CODE 301-500    : Ruwheids formulering volgens de formule van Manning
# r_code         : de ruwheids code
# a              : Manning (normaal of eb)             (0.001 - 0.0263 - 100.)
# b              : Manning (vloed)                    (0.001 - 0.0263 - 100.)

```

```

# c          : geen betekenis
# d          : geen betekenis
#
301 53 0.0263          # default waarde
302 53 0.0263          # diepe meerbodem
303 53 0.0283          # ondiepe meerbodem
304 53 0.024           # diep getijdewater
305 53 0.022           # ondiep getijdewater
#
#
# CODE 307 t/m 315 : Codes gereserveerd voor de Noordzee
#     Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-noordzee'
#
# CODE 320 t/m 400 : Codes gereserveerd voor de Rijn-Maasmonding schematisatie
#     Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-rmm'
#
# =====
#
# CODE 401 t/m 410 : Codes gereserveerd voor de IJsselmeer-IJsselVechtDelta en
Overijsselsche Vecht-schematisatie
#     Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-ym_ijvd_ov'
#
#Not calibrated parameters for IJsselmeer, Zwarte Meer (handm toegevoegd)
401 53 0.013989779470259332          # Zwarte Meer = calibrated
402 53 0.0263          # Vossemeer = default
403 53 0.0263          # Ketelmeer Oost = default
404 53 0.0263          # Ketelmeer West = default
405 53 0.022           # IJsselmeer = uit oud model
#
# =====
#
# CODE 411 t/m 415 : Codes gereserveerd voor de Markermeer-Gooimeer-Eemmeer-
schematisatie
#     Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-markermeer'
#
# CODE 416 t/m 420 : Codes gereserveerd voor de Veluwerandmeren-schematisatie
#     Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-vrm'
#
# CODE 421 t/m 423 : Codes gereserveerd voor de Volkerak-Zoommeer-schematisatie
#     Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-vozo'
#
# CODE 424 t/m 429 : Codes gereserveerd voor de Oosterschelde-schematisatie
#     Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-oosterschelde'
#
# CODE 430 t/m 432 : Codes gereserveerd voor de Veerse Meer-schematisatie
#     Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-veersemeer'
#
# CODE 433 t/m 473 : Codes gereserveerd voor de Westerschelde-schematisatie
#     Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-westerschelde'
#
# CODE 474 t/m 477 : Codes gereserveerd voor de Grevelingen-schematisatie

```

```

#       Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-grevelingen'
#
#r_code = 499 a = 0.0263 b = 0.0283 # eb en vloed (voorbeeld)
#
#=====
#
# CODE 501-600 : Chezy waarde
# r_code      : de ruwheids code
# a           : Chezy (normale of eb)                (0.01 - 45. - 100.)
# b           : Chezy (vloed)                        (0.01 - 45. - 100.)
# c           : geen betekenis
# d           : geen betekenis
#
501 52 45.0 # default waarde
#r_code = 599 a = 45.0 b = 40.0 # eb en vloed (voorbeeld)
#
#=====
#
# CODE 601-900 : Ruwheids methode voor het zomerbed van een rivier
# r_code      : de ruwheids code
# a           : alfa (normaal of eb)                (0.001 - 0.1 - 1.)
# b           : beta (normaal of eb)                (0.1 - 2.5 - 100.)
# c           : alfa (vloed) (alleen voor testen)  (0.001 - 0.1 - 1.)
# d           : beta (vloed) (alleen voor testen)  (0.1 - 2.5 - 100.)
#
601 101 0.1 2.5 # zomerbed default
#
# CODE 611 t/m 700 : Codes gereserveerd voor de Rijntakken-schematisatie
#       Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-rijn'
#
# CODE 701 t/m 750 : Codes gereserveerd voor de Maas-schematisatie
#       Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-maas'
#
# CODE 751 t/m 760 : Codes gereserveerd voor de Duitse Rhein
#       Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-rhein'
# Duitse Rhein [based on rough.karak_2004)
#r_code = 751 a = 0.0335 b = 2.5 # Andernach - Bonn
#r_code = 752 a = 0.0180 b = 2.5 # Bonn - Koln
#r_code = 753 a = 0.0191 b = 2.5 # Koln - Dusseldorf
#r_code = 754 a = 0.0304 b = 2.5 # Dusseldorf - Ruhrort
#r_code = 755 a = 0.0350 b = 2.5 # Ruhrort - Wesel
#r_code = 756 a = 0.0533 b = 2.5 # Wesel - Rees
756 101 0.0809 2.5
#r_code = 757 a = 0.0161 b = 2.5 # Rees - Emmerich
757 101 0.0809 2.5
# CODE 800 t/m 850 : Codes gereserveerd voor de IJsselmeer-IJsselVechtDelta en
Overijsselsche Vecht-schematisatie
#       Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-ym_ijvd_ov'
#
# CODE 851 t/m 860 : Codes gereserveerd voor de Rijn-Maasmonding-schematisatie
#       Deze codes zijn opgenomen in het bestand 'roughcombination-rmm'

```

```

#
#=====
#
# CODE 901-1200 : Niet gedefinieerd
#
#=====
#
# CODE 1201-1400 : Ruwheids formulering voor door- en overstroomde vegetatie
# r_code          : de ruwheids code
# a               : de vegetatie hoogte          (0.001 - 0.2 - 50.)
# b               : de vegetatie dichtheid       (0.0001 - 0.2 - 100.)
# c               : drag coefficient              (0.1 - 1.8 - 10.)
# d               : k-Nikuradse (onderlaag begroeiing) (0.001 - 0.2 - 100.)
#
1201 152 0.06 45. 1.8 0.1      # productiegrasland
1202 152 0.10 12. 1.8 0.1      # natuurlijk gras/hooiland
1203 152 0.20 15. 1.8 0.1      # verruigd grasland
1211 152 0.30 3. 1.8 0.1       # akkerdistelruigte
1212 152 0.56 0.23 1.8 0.1     # droge ruigte
1213 152 0.50 0.56 1.8 0.1     # dauwbraamruigte
1214 152 0.95 0.13 1.8 0.1     # wilgenroosje ruigte
1215 152 2.00 0.16 1.8 0.1     # rietruigte
1221 152 0.35 0.25 1.8 0.1     # natte ruigte homogeen
1222 152 0.30 1.2 1.8 0.1      # zegge homogeen
1223 152 1.00 0.4 1.8 0.1      # rietgras homogeen
1224 152 0.50 1.2 1.8 0.1      # biezen homogeen
1225 152 1.50 0.35 1.8 0.1     # lisdodde homogeen
1226 152 2.50 0.37 1.8 0.1     # riet homogeen
1231 152 6.00 0.13 1.5 0.4      # zachthoutstruweel
1232 152 3.00 0.041 1.5 0.4    # griend
1233 152 5.00 0.17 1.5 0.4      # doornstruweel
1241 152 10.00 0.011 1.5 0.3    # productiebos hardhout
1242 152 10.00 0.010 1.5 0.3    # productiebos zachthout
1243 152 10.00 0.016 1.5 0.3    # productiebos naaldhout
1244 152 10.00 0.023 1.5 0.4    # hardhoutooibos
1245 152 10.00 0.028 1.5 0.6    # zachthoutooibos
1246 152 3.00 0.024 1.5 0.2    # boomgaard laagstam
1247 152 6.00 0.01 1.5 0.2     # boomgaard hoogstam
1250 152 0.15 0.15 1.8 0.1     # pioniervegetatie
#
# Aanvullingen voor wbr08 van DON van 1300-1379
#
1301 152 1.00 0.130 1.5 0.4     # zachthoutstruweel, hoogte 1.00 m
1305 152 2.00 0.130 1.5 0.4     # zachthoutstruweel, hoogte 2.00 m
1311 152 5.00 0.130 1.5 0.4     # zachthoutstruweel, hoogte 5.00 m
1316 152 8.00 0.130 1.5 0.4     # zachthoutstruweel, hoogte 8.00 m
1362 152 0.50 0.041 1.5 0.4     # griend, hoogte 0.50 m
1365 152 1.50 0.041 1.5 0.4     # griend, hoogte 1.50 m
1379 152 0.20 0.041 1.5 0.4     # griend, hoogte 0.20 m
#
# Einde aanvullingen voor wbr08 van DON van 1300-1379

```

```

#
#=====
#
# CODE 1401-1500 : Niet gedefinieerd
#
#=====
#
# CODE 1501-1600 : Ruwheids formulering voor door- en overstroomde bomen
# r_code          : de ruwheids code
# a               : de vegetatie hoogte           (0.5 - 10. - 50.)
# b               : drag coefficient              (0.1 - 1.5 - 10.)
# c               : geen betekenis
# d               : geen betekenis
# In area file staat de dichtheid ( (de som van alle diameters) / celgrootte)
#
1501 251 1.00 1.5          # individule bomen
1502 251 2.00 1.5          # individule bomen
1503 251 3.00 1.5          # individule bomen
1504 251 4.00 1.5          # individule bomen
1505 251 5.00 1.5          # individule bomen
1506 251 6.00 1.5          # individule bomen
1507 251 7.00 1.5          # individule bomen
1508 251 8.00 1.5          # individule bomen
1509 251 9.00 1.5          # individule bomen
1510 251 10.00 1.5         # individule bomen
#
#=====
#
# CODE 1601-1700 : Ruwheids formulering voor door- en overstroomde heggen
# r_code          : de ruwheids code
# a               : de vegetatie hoogte           (0.5 - 2.0 - 10.)
# b               : de vegetatie dichtheid        (0.01 - 0.6 - 10.)
# c               : drag coefficient              (0.1 - 1.5 - 10.)
# d               : overlaat coefficient          (0.1 - 1.2 - 10.)
#
1601 202 1.00 0.20 1.5 1.2 # heggen zeer open
1602 202 1.00 0.60 1.5 1.2 # heggen open
1603 202 1.00 1.00 1.5 1.2 # heggen dicht
1604 202 2.00 0.20 1.5 1.2 # heggen zeer open
1605 202 2.00 0.60 1.5 1.2 # heggen open
1606 202 2.00 1.00 1.5 1.2 # heggen dicht
1607 202 3.00 0.20 1.5 1.2 # heggen zeer open
1608 202 3.00 0.60 1.5 1.2 # heggen open
1609 202 3.00 1.00 1.5 1.2 # heggen dicht
1610 202 4.00 0.20 1.5 1.2 # heggen zeer open
1611 202 4.00 0.60 1.5 1.2 # heggen open
1612 202 4.00 1.00 1.5 1.2 # heggen dicht
1613 202 5.00 0.20 1.5 1.2 # heggen zeer open
1614 202 5.00 0.60 1.5 1.2 # heggen open
1615 202 5.00 1.00 1.5 1.2 # heggen dicht
1616 202 6.00 0.20 1.5 1.2 # heggen zeer open

```

```

1617 202 6.00 0.60 1.5 1.2          # heggen open
1618 202 6.00 1.00 1.5 1.2          # heggen dicht
#
#=====
#
# CODE 1701-1800 : Niet gedefinieerd
#
#=====
#
# CODE 1801-1999 : Ruwheids combinatie voor r_codes van 101-600 en 1201-1300
#                   Combinatie van enkelvoudige code met een combinatie dan:
#                   a = enkelvoudige code
#                   b = combinatie code
#                   Combinatie van 2 combinaties mogelijk vanaf simona2007-01 versie
# r_code           : de ruwheids code
# a                : de r_code van de eerste ruwheid           (1 - 1221 - 1300)
# b                : de r_code van de tweede ruwheid           (1 - 106 - 1900)
# c                : het percentage van de eerste r_code       (0.001 - 0.75 - 0.999)
# d                : het percentage van de tweede r_code        (0.001 - 0.25 - 0.999)
#
1801 2 1221 106 0.75 0.25           # 75% natte ruigte
# 25% water
1802 2 1245 1801 0.05 0.95          # 5% zachthoutooibos
# 95% (natte ruigte met 25% water)
1803 2 1222 122 0.75 0.25           # 75% zegge
# 25% strooisel
1804 2 1223 106 0.75 0.25           # 75% rietgras
# 25% water
1805 2 1224 106 0.75 0.25           # 75% biezen
# 25% water
1806 2 1225 106 0.75 0.25           # 75% lisdodde
# 25% water
1807 2 1226 122 0.75 0.25           # 75% riet
# 25% strooisel
#
# 1808 uit rough.karak_wbr08 van DON
# 1809 uit rough.karak_hr2006_pkb
#
1808 2 1245 1231 0.50 0.50          # 50% zachthoutooibos
# 50% zachthoutstruweel
1809 2 1203 1245 0.90 0.10          # 90% verruigd grasland
# 10% zachthoutooibos
#
# combinaties uit de vegetatie opname van DON 2004
#
1811 2 1250 1245 0.95 0.05          # 95% pioniervegetatie
# 5% zachthoutooibos
1812 2 1202 1245 0.80 0.20          # 80% natuurlijk gras/hooiland
# 20% zachthoutooibos
1813 2 1203 1231 0.80 0.20          # 80% verruigd grasland
# 20% zachthoutstruweel

```

```

1814 2 1223 1231 0.95 0.05      # 95% rietgras homogeen
                                # 5% zachthoutstruweel
1815 2 1226 1231 0.70 0.30      # 70% riet homogeen
                                # 30% zachthoutstruweel
1816 2 1231 1245 0.80 0.20      # 80% zachthoutstruweel
                                # 20% zachthoutooibos
1817 2 1221 1245 0.95 0.05      # 95% natte ruigte homogeen
                                # 5% zachthoutooibos
1818 2 1221 1231 0.70 0.30      # 70% natte ruigte homogeen
                                # 30% zachthoutstruweel
1819 2 1212 1231 0.90 0.10      # 90% droge ruigte

# 10% zachthoutstruweel
#
# combinaties uit de Atkis gegevens van de BFG, Duitse Rhein
#
1820 2 1202 1241 0.75 0.25      # 75% natuurlijk gras/hooiland
                                # 25% produktiebos hardhout
1821 2 1201 1241 0.75 0.25      # 75% produktiegrasland
                                # 25% produktiebos hardhout
1822 2 121 1233 0.95 0.05       # 95% akker
                                # 5% doornstruweel
1823 2 1202 1244 0.25 0.75      # 25% natuurlijk gras/hooiland
                                # 75% hardhoutooibos

#
# Codes uit rough.karak_wbr08 van DON:
#           1850,1851,1852,1853,1854,1859,1860,1862,1863,1864
#           1865,1866,1867,1868,1872,1879,1880,1881,1882,1887
#           1888,1889,1890,1891
# Codes uit rough.karak_hr2006_pkb van PKB:
#           1850,1851,1852,1853,1854,1860,1861,1862,1863,1865
#           1866,1867,1868,1870,1871,1874,1875,1876,1877
#           1879,1880,1881
#
1850 2 1222 1231 0.80 0.20      # 80% zegge
                                # 20% zachthoustruweel
1851 2 1202 1245 0.50 0.50      # 50% natuurlijk gras/hooiland
                                # 50% zachthoutooibos
1852 2 1202 1231 0.95 0.05      # 95% natuurlijk gras/hooiland
                                # 5% zachthoutstruweel
1853 2 1202 1231 0.75 0.25      # 75% natuurlijk gras/hooiland
                                # 25% zachthoutstruweel
1854 2 1202 1231 0.90 0.10      # 90% natuurlijk gras/hooiland
                                # 10% zachthoutstruweel

# Toegevoegd t.b.v. maatregel ma_overdm_al (email Jan Bremer)
# CODE 1855-1893 : Nieuw tbv project Over de Maas (NB hoogste code in b)
#
1855 2 1202 1212 0.90 0.10      # 90% natuurlijk gras/hooiland
                                # 10% droge ruigte
1856 2 1231 1855 0.05 0.95      # 5% zachthoutstruweel
                                # 95% 1855

```



1857	2	1202	1223	0.75	0.25	# 75% natuurlijk gras/hooiland
						# 25% rietgras homogeen
1858	2	1245	1857	0.05	0.95	# 5% zachthoutooibos
						# 95% 1857
1892	2	1226	106	0.75	0.25	# 75% riet homogeen
						# 25% plas/haven/slikkige oever
1893	2	1245	1892	0.20	0.80	# 20% zachthoutooibos
						# 80% 1892
#						
1859	2	1212	1231	0.85	0.15	# 85% droge ruigte
						# 15% zachthoutstruweel
1860	2	111	1212	0.40	0.60	# 40% kribvak
						# 60% droge ruigte
1862	2	1245	1853	0.20	0.80	# 20% zachthoutooibos
						# 60% natuurlijk gras/hooiland
						# 20% zachthoutstruweel
1863	2	1860	1862	0.50	0.50	# 20% kribvak
						# 30% droge ruigte
						# 10% zachthoutooibos
						# 30% natuurlijk gras/hooiland
						# 10% zachthoutstruweel
1864	2	1202	1231	0.70	0.30	# 70% natuurlijk gras/hooiland
						# 30% zachthoutstruweel
1865	2	106	1231	0.83	0.17	# 83% slikkige oever
						# 17% zachthoutstruweel
1866	2	1245	1223	0.50	0.50	# 50% zachthoutooibos
						# 50% rietgras
1867	2	1865	1866	0.75	0.25	# 61% slikkige oever
						# 13% zachthoutstruweel
						# 13% zachthoutooibos
						# 13% rietgras
1868	2	111	1867	0.60	0.40	# 60% kribvak
						# 25% slikkige oever
						# 5% zachthoutstruweel
						# 5% zachthoutooibos
						# 5% rietgras
1869	2	1203	1231	0.95	0.05	# 95% verruigd grasland
						# 5% zachthoutstruweel
1870	2	1202	1231	0.99	0.01	# 99% natuurlijk gras/hooiland
						# 1% zachthoutstruweel
1871	2	1202	1231	0.975	0.025	# 97,5% natuurlijk gras/hooiland
						# 2,5% zachthoutstruweel
1872	2	1202	1231	0.98	0.02	# 98% natuurlijk gras/hooiland
						# 2% zachthoutstruweel
1874	2	1212	1231	0.20	0.80	# 20% droge ruigte
						# 80% zachthoutstruweel
1875	2	1212	1231	0.95	0.05	# 95% droge ruigte
						# 5% zachthoutstruweel
1876	2	1231	1801	0.25	0.75	# 25% zachthoutstruweel
						# 75% (natte ruigte met 25% water)
1877	2	1231	1803	0.20	0.80	# 20% zachthoutstruweel

1879	2	114	1231	0.90	0.10	# 80% (zegge met 25% strooisel)
						# 90% bebouwd/verhard terrein
						# 10% zachthoutstruweel
1880	2	1222	1223	0.50	0.50	# 50% zegge
						# 50% rietgras
1881	2	1202	1231	0.85	0.15	# 85% natuurlijk gras/hooiland
						# 15% zachthoustruweel
1882	2	1203	1231	0.975	0.025	# 97,5% verruigd grasland
						# 2,5% zachthoutstruweel
1886	2	1203	1231	0.90	0.10	# 90% verruigd grasland
						# 10% zachthoustruweel
1887	2	1202	1212	0.50	0.50	# 50% natuurlijk gras/hooiland
						# 50% droge ruigte
1888	2	1231	1887	0.05	0.95	# 5% zachthoutstruweel
						# 47,5% natuurlijk gras/hooiland
						# 47,5% droge ruigte
1889	2	1231	1887	0.10	0.90	# 10% zachthoutstruweel
						# 45% natuurlijk gras/hooiland
						# 45% droge ruigte
1890	2	1202	1231	0.50	0.50	# 50% natuurlijk gras/hooiland
						# 50% zachthoutstruweel
1891	2	1203	1231	0.97	0.03	# 97% verruigd grasland
						# 3% zachthoutstruweel
1906	2	1202	1245	0.90	0.10	# 90% natuurlijk gras/hooiland
						# 10% zachthoutooibos
1907	2	111	1231	0.88	0.12	# 88% kribvakstrand/zandplaat
						# 12% zachthoutstruweel
1908	2	111	1231	0.80	0.20	# 80% kribvakstrand/zandplaat
						# 20% zachthoutstruweel
1909	2	1245	1804	0.20	0.80	# 20% zachthoutooibos
						# 80% (rietgras met 25% water)
1910	2	1202	1245	0.95	0.05	# 95% natuurlijk gras/hooiland
						# 5% zachthoutooibos
1911	2	1212	1231	0.80	0.20	# 80% droge ruigte
						# 20% zachthoutstruweel
1912	2	1202	1231	0.80	0.20	# 80% natuurlijk gras/hooiland
						# 20% zachthoutstruweel
1913	2	106	1226	0.75	0.25	# 75% water
						# 25% riet homogeen
1914	2	111	1912	0.40	0.60	# 40% kribvakstrand
						# 48% natuurlijk gras/hooiland
						# 12% zachthoutstruweel
1915	2	106	1222	0.40	0.60	# 40% water
						# 60% zegge homogeen
1916	2	1226	1915	0.50	0.50	# 50% riet homogeen
						# 20% water
						# 30% zegge homogeen
1917	2	1202	1212	0.95	0.05	# 95% natuurlijk grasland/hooiland
						# 5% droge ruigte
1918	2	1213	1231	0.90	0.10	# 90% dauwbraamruigte
						# 10% zachthoutstruweel

1919	2	1215	1231	0.95	0.05	# 95% rietruigte
						# 5% zachthoutstruweel
1920	2	1215	1231	0.90	0.10	# 90% rietruigte
						# 10% zachthoutstruweel
1921	2	1801	1245	0.80	0.20	# 80% natte ruigte met 25% water
						# 20% zachthoutoibos
1922	2	1212	1245	0.80	0.20	# 80% droge ruigte
						# 20% zachthoutoibos
1933	2	1801	1231	0.95	0.05	# 95% natte ruigte met 25% water
						# 5% zachthoutstruweel
1934	2	1801	1231	0.90	0.10	# 90% natte ruigte met 25% water
						# 10% zachthoutstruweel
1935	2	1801	1231	0.80	0.20	# 80% natte ruigte met 25% water
						# 20% zachthoutstruweel
1936	2	1803	1231	0.95	0.05	# 95% zegge met 25% strooisel
						# 5% zachthoutstruweel
1937	2	1803	1231	0.90	0.10	# 90% zegge met 25% strooisel
						# 10% zachthoutstruweel
1938	2	1807	1231	0.95	0.05	# 95% riet met 25% strooisel
						# 5% zachthoutstruweel
1939	2	1807	1231	0.90	0.10	# 90% riet met 25% strooisel
						# 10% zachthoutstruweel
1940	2	1807	1231	0.80	0.20	# 80% riet met 25% strooisel
						# 20% zachthoutstruweel
1941	2	1202	1212	0.70	0.30	# 70% natuurlijk grasland
						# 30% droge ruigte
#-----						
# VEGETATIELEGGER						
#-----						
# Geaggregeerde klassen - Koen Volleberg - 15-06-2012						
# Aangepast voor vegetatieverdeling 2012 (Bas van Dongen, Arcadis, 04-01-2015)						
#						
# tussenstappen voor Homogene klassen						
1970	2	1201	1202	0.561757253	0.438242747	# Gras 1 (prod. gras & nat. gras)
1971	2	111	121	0.07415936	0.92584064	# Gras 2 (zand en akker)
1972	2	1212	1804	0.87552542	0.12447458	# Ruigte 1
1973	2	1242	1244	0.212045693	0.787954307	# Bos 1
1974	2	1245	1246	0.846018535	0.153981465	# Bos 2
1975	2	1973	1974	0.578653494	0.421346506	# Bos 3
1976	2	1970	1971	0.731872562	0.268127438	# Gras 3 (prod. gras, nat. gras, zand en akker)
#						
# Homogene klassen						
#						
1981	2	1250	1976	0.036775031	0.963224969	# gras en akker
1982	2	1807	1972	0.126268683	0.873731317	# riet en ruigte
1983	2	1975	1247	0.972225202	0.027774798	# bos
1984	2	1231	1233	0.597832635	0.402167365	# struweel
#						
# tussenstappen voor Mengklassen						

```

1989 2 1981 1982 0.50 0.50          # 50% gras en akker
                                     # 50% riet en ruigte
1993 2 1981 1982 0.25 0.75          # 25% gras en akker
                                     # 75% riet en ruigte

#
# Mengklassen (op basis van verdelingspercentages interventiewaarden)
#
1996 2 1981 1984 0.80 0.20          # 80% gras en akker | Mengklasse
90/10                                # 20% struweel      _|
1997 2 1989 1984 0.60 0.40          # 30% gras en akker |
70/30                                # 30% riet en ruigte | Mengklasse
                                     # 40% struweel      _|
1998 2 1993 1984 0.40 0.60          # 10% gras en akker |
50/50                                # 30% riet en ruigte | Mengklasse
                                     # 60% struweel      _|

#=====
=====
#
# DUITSE RHEIN
#
#=====
=====
611 DISCHARGE Q-LobithPannkop
611 2700 101 0.0229 2.5              # emmerich
- lobith
611 4450 101 0.0262 2.5
611 11800 101 0.0786 2.5
#
# in de calibratie van de Duitse Rhein is onderstaande waarde gecalibreerd voor
# traject 611
# in de lopende projecten hanteren we de Nederlandse calibratie waarde
# op termijn moet dit op elkaar worden afgestemd.
# verschil wordt veroorzaakt doordat er een verschil is tussen de Nederlandse en
# de duitse methodiek om de afvoer van een hoog water vast te stellen
# verschil in afvoer bij een zelfde waterstand kan alleen met een verschillende
# ruwheid
# r_code = 611 a = 0.0084 b = 2.5      # emmerich - lobith a is van Duitse
# Rhein model
#
#=====
=====
#
# BOVEN-RIJN
#
#=====
=====
612 DISCHARGE Q-LobithPannkop
612 2700 101 0.0229 2.5              # lobith - pankop

```

```

612 4450 101 0.0262 2.5
612 11800 101 0.0786 2.5
#=====
=====
#
# WAAL
#
#=====
=====
613 DISCHARGE Q-PannkopNijmegen
613 1850 101 0.0598 2.5 # pankop - erlecom
613 3000 101 0.0634 2.5
613 7450 101 0.0765 2.5
#-----
-----
614 DISCHARGE Q-PannkopNijmegen
614 1850 101 0.0598 2.5 # erlecom - nijmegen
614 3000 101 0.0634 2.5
614 7450 101 0.0765 2.5
#-----
-----
615 DISCHARGE Q-NijmegenTielWl
615 1850 101 0.0667 2.5 # nijmegen - dodewaard
615 3000 101 0.0838 2.5
615 7450 101 0.0721 2.5
#-----
-----
616 DISCHARGE Q-NijmegenTielWl
616 1850 101 0.0667 2.5 # dodewaard - tiel
616 3000 101 0.0838 2.5
616 7450 101 0.0721 2.5
#-----
-----
617 DISCHARGE Q-TielWlZaltb_waq
617 1850 101 0.0950 2.5 # tiel - sint andries
617 3000 101 0.1102 2.5
617 7450 101 0.0905 2.5
#-----
-----
618 DISCHARGE Q-TielWlZaltb_waq
618 1850 101 0.0950 2.5 # sint andries - zaltbommel
618 3000 101 0.1102 2.5
618 7450 101 0.0905 2.5
#-----
-----
619 DISCHARGE Q-Zaltb_waqVuren
619 1850 101 0.0701 2.5 # zaltbommel - vuren
619 3000 101 0.1074 2.5
619 7450 101 0.1085 2.5
#-----
-----

```

```

620 DISCHARGE Q-VurenHardxv_waq
620 1850 101 0.0134 2.5          # vuren - hardinkxveld
620 3000 101 0.0666 2.5
620 7450 101 0.1511 2.5
#=====
=====
#
# PANNERDENSCH KANAAL
#
#=====
=====
631 DISCHARGE Q-PannkopIJsselkop
631 850 101 0.0170 2.5          # pankop - pannerden
631 1450 101 0.0010 2.5
631 4250 101 0.0964 2.5
#-----
-----
632 DISCHARGE Q-PannkopIJsselkop
632 850 101 0.0170 2.5          # pannerden - looveer
632 1450 101 0.0010 2.5
632 4250 101 0.0964 2.5
#-----
-----
633 DISCHARGE Q-PannkopIJsselkop
633 850 101 0.0170 2.5          # looveer - ijsselkop
633 1450 101 0.0010 2.5
633 4250 101 0.0964 2.5
#=====
=====
#
# NEDERRIJN - LEK
#
#=====
=====
634 DISCHARGE Q-IJsselkopDrielbo
634 475 101 0.0798 2.5          # ijsselkop - arnhem
634 850 101 0.1569 2.5
634 2500 101 0.0656 2.5
#-----
-----
635 DISCHARGE Q-IJsselkopDrielbo
635 475 101 0.0798 2.5          # arnhem - drielbov
635 850 101 0.1569 2.5
635 2500 101 0.0656 2.5
#-----
-----
636 DISCHARGE Q-DrielbovDrielben
636 475 101 0.1044 2.5          # drielbov - drielben
636 850 101 0.0768 2.5
636 2500 101 0.5380 2.5

```

```

#-----
-----
637 DISCHARGE Q-DrielbeAmerongbo
637 475 101 0.0143 2.5 # drielben - grebbe
637 850 101 0.0523 2.5
637 2500 101 0.1385 2.5
#-----
-----
638 DISCHARGE Q-DrielbeAmerongbo
638 475 101 0.0143 2.5 # grebbe - amerongenbov
638 850 101 0.0523 2.5
638 2500 101 0.1385 2.5
#-----
-----
639 DISCHARGE Q-AmeronbeCulmbbrg
639 475 101 0.0122 2.5 # amerongenbov - amerongenben
639 850 101 0.0183 2.5
639 2500 101 0.0010 2.5
#-----
-----
640 DISCHARGE Q-AmeronbeCulmbbrg
640 475 101 0.0122 2.5 # amerongenben - culemborg
640 850 101 0.0615 2.5
640 2500 101 0.2249 2.5
#-----
-----
641 DISCHARGE Q-CulmbbrgHagestbo
641 475 101 0.0010 2.5 # culemborg - hagesteinbov
641 850 101 0.0473 2.5
641 2500 101 0.0745 2.5
#-----
-----
642 DISCHARGE Q-CulmbbrgHagestbo
642 475 101 0.0089 2.5 # hagesteinbov - hagesteinben
642 850 101 0.0018 2.5
642 2500 101 0.0010 2.5
#-----
-----
643 DISCHARGE Q-HagestbeSchoonh
643 475 101 0.0089 2.5 # hagesteinben - schoonhoven
643 850 101 0.0239 2.5
643 2500 101 0.0945 2.5
#-----
-----
644 DISCHARGE Q-SchoonhKrimpLk
644 475 101 0.0250 2.5 # schoonhoven - krimpenadlek
644 800 101 0.0140 2.5
644 2400 101 0.0383 2.5
#=====
=====
#

```

```

# IJSSEL
#
#=====
=====
651 DISCHARGE Q-IJsselkpDoesbbrg
651 370 101 0.0089 2.5          # ijsselkop - westervoort
651 625 101 0.0036 2.5
651 1780 101 0.0585 2.5
#-----
-----
652 DISCHARGE Q-IJsselkpDoesbbrg
652 370 101 0.0088 2.5          # westervoort - de steeg
652 625 101 0.0036 2.5
652 1780 101 0.0585 2.5
#-----
-----
653 DISCHARGE Q-IJsselkpDoesbbrg
653 370 101 0.0088 2.5          # de steeg - doesburg
653 625 101 0.0036 2.5
653 1780 101 0.0585 2.5
#-----
-----
654 DISCHARGE Q-DoesbbrgZutphen
654 400 101 0.0550 2.5          # doesburg - zutphen
654 675 101 0.0061 2.5
654 1850 101 0.0922 2.5
#-----
-----
655 DISCHARGE Q-ZutphenOlst
655 400 101 0.0818 2.5          # zutphen - eefde beneden
655 675 101 0.0224 2.5
655 1850 101 0.0336 2.5
#-----
-----
656 DISCHARGE Q-ZutphenOlst
656 400 101 0.0818 2.5          # eefde beneden - deventer
656 675 101 0.0224 2.5
656 1850 101 0.0336 2.5
#-----
-----
657 DISCHARGE Q-ZutphenOlst
657 400 101 0.0818 2.5          # deventer - olst
657 675 101 0.0224 2.5
657 1850 101 0.0336 2.5
#-----
-----
658 DISCHARGE Q-OlstKaterveer
658 440 101 0.0610 2.5          # olst - wijhe
658 730 101 0.0231 2.5
658 1900 101 0.0430 2.5

```



```

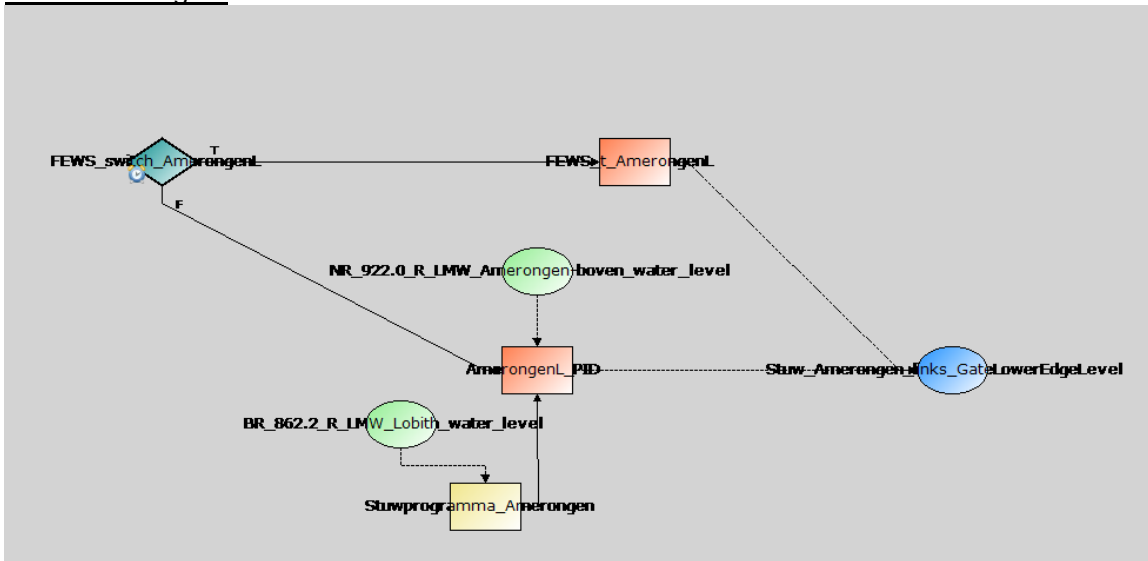
#-----
-----
659 DISCHARGE Q-OlstKaterveer
659 440 101 0.0610 2.5 # wijhe - katerveer
659 730 101 0.0231 2.5
659 1900 101 0.0430 2.5
#-----
-----
660 DISCHARGE Q-KatervrKampnbohv
660 440 101 0.0351 2.5 # katerveer - kampen
660 730 101 0.0271 2.5
660 1900 101 0.0281 2.5
#-----
-----
661 DISCHARGE Q-KatervrKampnbohv
661 440 101 0.0047 2.5 # kampen - keteldiep
661 730 101 0.0133 2.5
661 1900 101 0.0175 2.5
#-----
-----
662 DISCHARGE Q-KampnbohvKamprhk
662 440 101 0.0047 2.5 # keteldiep - eindeijssel
662 730 101 0.0133 2.5
662 1900 101 0.0175 2.5
#=====
=====
#
# vaste lagen en bodemkribben
#
#=====
=====
671 DISCHARGE Q-PannkopNijmegen
671 1850 101 0.0628 2.5 # binnenbocht vaste laag Nijmegen,
alfa = 1.05 * alfa traject 614
671 3000 101 0.0665 2.5
671 7450 101 0.0803 2.5
#-----
-----
672 DISCHARGE Q-TielWlZaltb_waq
672 1850 101 0.1302 2.5 # binnenbocht vaste laag St.
Andries, alfa = 1.37 * alfa traject 617
672 3000 101 0.1510 2.5
672 7450 101 0.1240 2.5
#-----
-----
673 DISCHARGE Q-PannkopNijmegen
673 1850 101 0.0759 2.5 # binnenbocht bodem kribben Erlecom,
alfa = 1.27 * alfa traject 613
673 3000 101 0.0806 2.5
673 7450 101 0.0971 2.5
#=====
=====

```

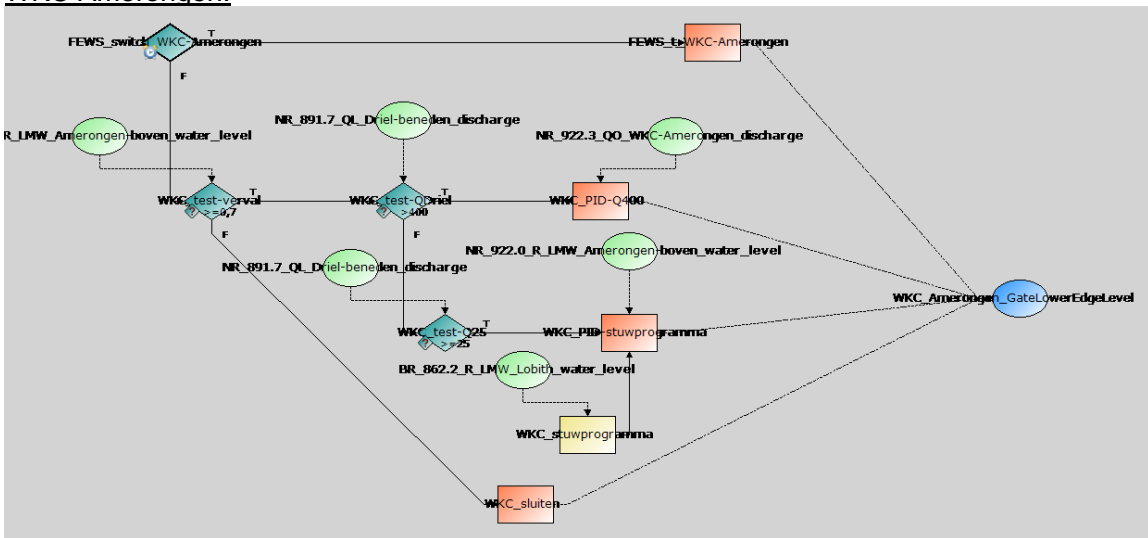
```
#  
# Einde roughcombination  
#  
#
```

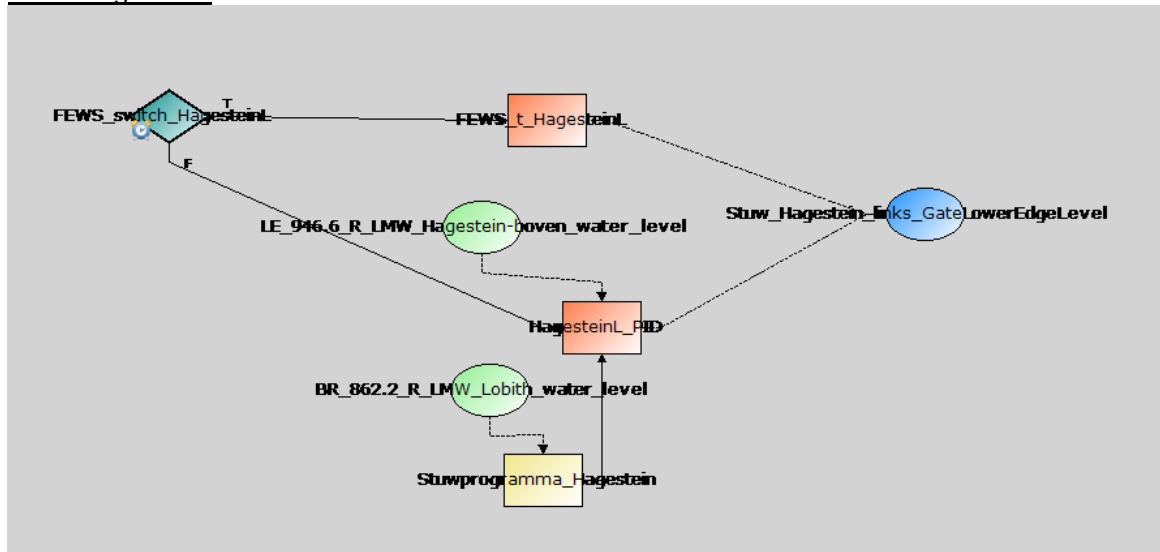


## Stuw Amerongen:



## WKC Amerongen:



Stuw Hagestein:**D.2 Aansturing kunstwerken kalibratie**

Voor de kalibratie is een aparte stuwsturing geïmplementeerd. Voor deze sommen wordt gestuurd op gemeten waterstanden (of afvoeren).

Aanvullen.



## E Overzicht numerieke instellingen

### E.1 Parameters in het .mdu-bestand

**Toevoegen tabel**





## F Randvoorwaarden en metingen

### F.1 Overzicht metingen per meetstation

Tabel F.1 Beschikbare waterstandsmetingen voor de vijf perioden. Een grijze cel geeft aan dat er geen data aanwezig is voor dit station voor het desbetreffende jaar, voor de stations die tegenwoordig niet meer aanwezig zijn, is ook de cel met de stationsnaam grijs gekleurd.

meetstations	rkm	HW1993	HW1995	HW2011	2015	2017
Emmerich						
LMW.Lobith	862.18					
LMW.Lobith Haven						
<b>Waal</b>						
LMW.Pannerdensche Kop	867.22					
LMW.Nijmegenhaven	884.87					
LMW.Dodewaard	901.30					
LMW.Tiel Waal	913.25					
LMW.Zaltbommel	934.78					
LMW.Vuren	951.78					
<b>Pannerdensch Kanaal</b>						
LMW.Pannerdensche Kop	867.22					
LMW.Looveer	876.50					
<b>Neder-Rijn/Lek</b>						
LMW.IJsselkop	878.46					
LMW.Arnhem*	882.80					
LMW.Driel boven	891.17					
LMW.Driel beneden	891.75					
LMW.Grebbe	908.09					
LMW.Amerongen boven	922.02					
LMW.Amerongen beneden	922.54					
LMW.Culemborg	939.80					
LMW.Hagestein boven	946.64					
LMW.Hagestein	947.11					
LMW.Schoonhoven	971.59					
<b>IJssel</b>						
LMW.IJsselkop	878.46					
LMW.Hondsbroeksche Pleij IJssel						
LMW.Westervoort	881.05					
LMW.De Steeg	890.66					
LMW.Doesburg	903.02					
LMW.Zutphen	929.30					
LMW.Eefde beneden	931.00					
LMW.Deventer	944.97					
LMW.Olst	957.12					
LMW.Wijhe	965.17					
LMW.Katerveer	980.75					
LMW.Kampenbovenhaven	994.49					
LMW.Keteldiep	1001.42					

Tabel F.2 Beschikbare metingen van de diver locaties voor de perioden.

meetstation	rkm	HW1993	HW1995	HW2011	2015/2016	2016/2017
<b>Boven-Rijn</b>						
RIJN8579R	857.9					
<b>Waal</b>						
WAAL8712R	871.2					
WAAL8758L	875.8					
WAAL8801R	880.1					
WAAL8819R	881.9					
WAAL8830R	883.0					
WAAL8900R	890.0					
WAAL8950R	895.0					
WAAL9051R	905.1					
WAAL9092R	909.2					
WAAL9170R	917.0					
WAAL9220R	922.0					
WAAL9257R	925.7					
WAAL9298L	929.8					
WAAL9399R	939.9					
WAAL9460R	946.0					
<b>Pannerdensch Kanaal</b>						
PANNDKN8680R	868.0					
PANNDKN8700R	870.0					
PANNDKN8728R	872.8					
<b>Neder-Rijn/Lek</b>						
NEDRN8801R	880.1					
NEDRN8827L	882.7					
NEDRN8870L	887.0					
NEDRN8962L	896.2					
NEDRN9002L	900.2					
NEDRN9042R	904.2					
NEDRN9134R	913.4					
NEDRN9182R	918.2					
LEK9281R	928.1					
LEK9312R	931.2					
LEK9349R	934.9					
LEK9434R	943.4					
LEK9526R	952.6					
LEK9566R	956.6					
LEK9628R	962.8					
LEK9669R	966.9					
<b>IJssel</b>						
IJSSL8812L	881.2					
IJSSL8841R	884.1					
IJSSL9120L	912.0					
IJSSL9351L	935.1					
IJSSL9399R	939.9					
IJSSL9499L	949.9					
IJSSL9610L	961.0					

meetstation	rkm	HW1993	HW1995	HW2011	2015/2016	2016/2017
IJSSL9700L	970.0					
IJSSL9750L	975.0					
IJSSL9850L	985.0					
IJSSL9980R	998.0					

Tabel F.3 Overzicht data belangrijke beken. De eerste letter geeft informatie over de tijdstap ( $t = 10$ -minutenwaarden;  $u =$  uurwaarden;  $e =$  etmaalwaarden). De tweede letter geeft informatie over de volledigheid van de reeks ( $v =$  volledig;  $h =$  hiaten).

Periode	HW1993	HW1995	HW2011	2015/2016	2016/2017
Oude IJssel	uv	uv	uh	uv	uh
Twente kanaal Almen	ev	ev	uh	th	th
Twentekanaal Afleidingskanaal	h	h	uh	uh	uv
Schipbeek	uh	uh	uh	uv	uv
Liemers	h	h	h	uh	uh
Bevermeer	h	h	uh	uh	uh
Grote beek	h	h	uh	uh	uv
Baakse beek	h	h	uh	uv	uh
Kanaal van Hackfort	h	h	uh	uh	uv
Wijk bij Duurstede	h	h	th	th	th
Nieuwegein	h	th	th	th	th

## F.2 Randvoorwaarden Generator Water Modellen

Voor het afleiden van laterale onttrekking en toestromingen wordt gebruik gemaakt van de Randvoorwaarden Generator Water Modellen (RGWM). In deze software is een database aan regressies opgenomen waarmee uit een beperkte set randvoorwaarden een volledige set verkregen kan worden.

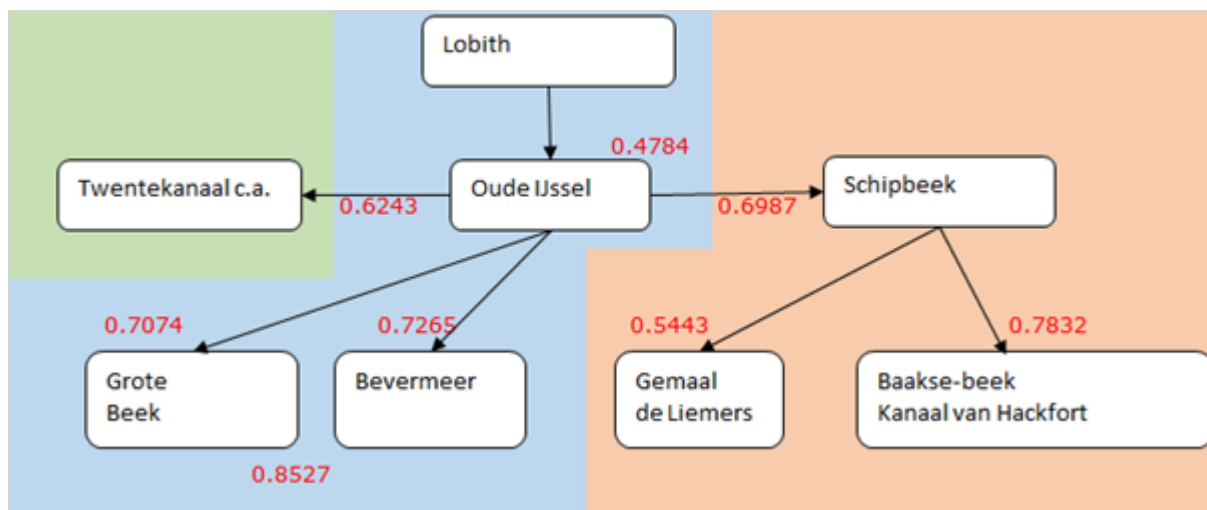
### F.2.1 Methode

In deze paragraaf wordt de methode waarop de RGWM de lateralen bepaalt beschreven. Alle lateralen zijn genoemd in Tabel G4. In sommige stappen zal er in de RGWM onderscheid worden gemaakt tussen een toepassing voor standaardafvoergolven en voor historische perioden. In deze tekst wordt enkel ingegaan op dit laatste.

Als basis wordt uitgegaan van afvoergegevens bij Lobith en metingen van enkele *belangrijke beken* van de Rijntakken. De belangrijke beken zijn:

- Oude IJssel.
- Twentekanaal (ADM Almen).
- Schipbeek.
- Grote beek.
- Broekhuizerwater (Bevermeer).
- De Zwalm (Liemers).
- Baakse beek.
- Kanaal van Hackfort.

Er wordt uitgegaan van de locatie van het meetstation. Voor historische perioden kan de RGWM gebruikt worden om voor deze beken hiaten op te vullen. Hiervoor zijn statistische regressierelaties opgesteld tussen de beken en Lobith volgens de gelaagde structuur uit onderstaande figuur. In de figuur staat de kwaliteit van de regressies aangegeven. Na deze stap zijn er volledige tijdreeksen voor de belangrijke beken.



Figuur F.1 Gevonden correlatiecoëfficiënten belangrijke beken (Van der Veen, 2018)

In een tweede stap worden de belangrijke beken vertaald naar de *overige beken*. Deze overige beken worden afgeleid op basis van oppervlakte-oppervlakte relaties met de nabijgelegen belangrijke beek. Hierbij worden de belangrijke beken ook vertaald naar hun monding in de Rijntakken en worden er aanvullende correcties uitgevoerd op beperking van de instroming door hoge waterstanden in de Rijntakken (een lozingsbeperking). Er wordt ook onderscheid gemaakt tussen de vrije afstroming van beken en de inzet van gemalen.

Voor waterinlaatpunten en lozingspunten van Riolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI) worden constante waarden aangenomen.

Er is geen rekening gehouden met pompen bij sluizen. Bij enkele schutsluizen die tijdens hoge afvoer afgesloten worden van de rivier, dient het op peil houden van het kanaal te gebeuren door het model.

Bij schutsluizen wordt gebruik gemaakt van de wekelijkse variabiliteit (per uur) en seizoensvariabiliteit (per maand) welke is afgeleid uit IVS-gegevens voor de scheepvaart. In combinatie met de oppervlakte van de sluisgolven is daarmee een schutintensiteit afgeleid (uitgedrukt in m<sup>3</sup>/s/m verval). Het verval kan worden ingegeven als invoer voor de RGWM, of (indien afwezig) worden afgeleid uit het debiet bij Lobith.

Tabel F.4 Overzicht laterale lozingen en onttrekkingen. Naamgeving volgens Baseline. Met groen zijn de belangrijke beken weergegeven.

Lateraal	type	Afgeleid van
BR_852.4L_Beek_Kalflack		Oude IJssel
BR_859.0L_Beek_Kellener_Altrhein		Oude IJssel
BR_859.0L_Beek_Spoykanaal		Oude IJssel
WL_877.0R_RWZI_Millingen_Gendt_buitendijks		Oude IJssel
WL_883.4L_Beek_Het_Meertje		Oude IJssel

Lateraal	type	Afgeleid van
WL_887.0L_Sluis_Weurt	schutdebiet	
WL_887.0L_RWZI_Nijmegen_buitendijks		Oude IJssel
WL_904.3L_RWZI_Druten_buitendijks		Oude IJssel
WL_914.6R_Inlaatgemaal_Echteldsedijk_Tiel	inlaat	
WL_926.2L_Sluis_Sint_Andries	schutdebiet	
WL_933.0L_RWZI_Bommelerwaard-Oost_buitendijks		Oude IJssel
WL_936.0R_RWZI_Haften_buitendijks		Oude IJssel
WL_943.0L_RWZI_Aalst		Oude IJssel
BO_952.7L_Pomp_Andel	pomp	
BO_952.7B_Sluis_Andel	schutdebiet	
BO_952.7L_Inlaat_Woudrichem	Inlaat	
BO_954.6R_Inlaat_Gorinchem_Benedenstad	Inlaat	
BO_957.8L_Gemaal_Land_van_Heusden_en_Altena		Oude IJssel
PK_870.3L_Inlaat_Doorneburg	Inlaat	
PK_873.5R_Gemaal_Kandia_Rijnstrangen		Oude IJssel
PK_876.2L_Inlaatgemaal_Vitens_Arnhem-Zuid	Inlaat	
NR_881.9R_Gemaal_t_Broek_Arnhem		Oude IJssel
NR_882.8R_Gemaal_Sint_Jansbeek		Oude IJssel
NR_887.6L_Gemaal_Arnhem_zuid		Oude IJssel
NR_889.7R_Beek_Oosterbeekse_Beken		Oude IJssel
NR_897.0R_Beek_Heelsumse_beken		Oude IJssel
NR_897.5R_RWZI_Renkum_buitendijks		Oude IJssel
NR_899.5R_Beek_Renkumse_beken		Oude IJssel
NR_902.0L_Gemaal_Kuyk_Linge_1		Oude IJssel
NR_908.0R_Inlaat_Valleikanaal	inlaat	
NR_913.0R_RWZI_Rhenen_buitendijks		Oude IJssel
NR_919.0L_RWZI_Eck_en_Wiel_buitendijks		Oude IJssel
NR_927.0R_Inlaat_Kromme_Rijn	Inlaat	
NR_929.0R_Prinses_Irenesluizen	schutdebiet	
LE_950.0R_Prinses_Beatrixluizen	schutdebiet	
LE_950.4L_Grote_sluis_Vianen	schutdebiet	
LE_950.5R_Inlaat_Oude_Sluis_Vreeswijk	inlaat	
LE_950.6R_Koninginnensluis_Vreeswijk	schutdebiet	
LE_952.0R_RWZI_Nieuwegein_buitendijks		Oude IJssel
	Inlaat	
LE_962.0L_Inlaat_Ameide		
LE_962.5R_RWZI_Lopik_buitendijks		Oude IJssel
LE_965.0R_Gemaal_Lopikerwaard		Oude IJssel
LE_971.0L_RWZI_Gelkenes_buitendijks		Oude IJssel
LE_980.1R_Gemaal_Krimpenerwaard		Oude IJssel
LE_986.6L_Gemaal_RWZI_Nw_Lekkerland_buitendijks		Oude IJssel
LE_988.1L_Gemaal_Elshoutsluis		Oude IJssel
YS_883.5R_RWZI_Nieuwgraaf	lozing	
YS_885.7L_Gemaal_Rozendaalsebeek_Beekhuizerbeek		Oude IJssel
YS_890.7L_Gemaal_Beekhuizerbeek_Oost		Oude IJssel
YS_897.2R_Gemaal_Liemers_De_Zwalm		Oude IJssel
YS_901.8R_Gemaal_Broekhuizerwater		Bevermeer

Lateraal	type	Afgeleid van
YS_901.8R_Beek_Oude_IJssel		Oude IJssel
YS_904.8L_Beek_Havikerwaard_		Oude IJssel
YS_911.6L_Inlaat_sluis_Dieren_Apeldoorns_kanaal	Inlaat	
YS_913.7L_Gemaal_Soerense_bEEK		Oude IJssel
YS_916.6R_Gemaal_Grote_Beek		Grote Beek
YS_918.3L_Gemaal_Leuvenheimse_bEEK		Oude IJssel
YS_921.5R_Gemaal_Baakse_Beek		Baakse Beek
YS_923.5R_Gemaal_Groene_kanaal		Kanaal van Hackfort
YS_925.9L_Gemaal_Oekense_bEEK_Rhienderense_bEEK		Oude IJssel
YS_927.7R_Gemaal_Vierakkerse_laak_Berkel		Oude IJssel
YS_932.4R_Beek_Flierderbeek		Oude IJssel
YS_935.2L_Gemaal_Voorsterbeek_Lage_Leiding		Oude IJssel
YS_939.1R_Gemaal_Dommerbeek		Oude IJssel
YS_942.3R_Beek_Schipbeek		Schipbeek
YS_943.9R_Gemaal_Overijssels_kanaal		Oude IJssel
YS_948.8L_Gemaal_Toevoerkanaal_Terwolde		Oude IJssel
YS_958.0R_RWZI_Olst_buitendijks		Oude IJssel
YS_974.8R_Inlaatgemaal_Harculo	Inlaat	
YS_977.7L_Gemaal_Grote_wetering_Wapenveld		Oude IJssel
YS_980.0R_Gemaal_Zwolle-zuid_en_polder_Vijf_marken		Oude IJssel
YS_982.2L_Gemaal_Gelderse_Stouwe		Oude IJssel
YS_990.1L_Gemaal_Laag_en_hoog_Zalk		Oude IJssel
YS_999.0L_RWZI_Kampen	lozing	
YS_999.9R_Gemaal_Raasje		Oude IJssel
YS_1001.R_Gemaal_Vosje		Oude IJssel
YS_1002.R_Gemaal_t_Katje		Oude IJssel
AR_71.4C_Prins_Bernhardsluis_zuid	schutdebiet	
AR_71.0C_Prins_Bernhardsluis_noord	schutdebiet	
AR_69.0R_RWZI_Tiel	lozing	
AR_68.5L_Gemaal_van_Beuningen_Linge_2		Oude IJssel
AR_64.7L_Gemaal_Rijkwijkse_veld		Oude IJssel
AR_62.3R_Inlaat_Drielandenpunt	Inlaat	
AR_62.2L_Prinses_Marijkesluizen_lozing	schutdebiet	
AR_61.9L_Prinses_Marijkesluizen_onttrekking	schutdebiet	
TK_3.3R_Beek_Twentekanaal_Sluis_Eefde		Twentekanaal
TK_3.3R_Pomp_Onttrekking_Twentekanaal	Onttrekking	
TK_3.2R_Afleidingskanaal_Berkel		Twentekanaal
TK_0.8L_Eefsebeek		Oude IJssel

## F.2.2 Invoer

De afvoerrelaties zijn aangepast ten opzichte van de vijfde-generatie modellen, omdat er een aantal lateralen zijn toegevoegd en/of uitgesplitst. De afvoerrelaties zijn gegeven in ".yaml-bestanden". De gebruikte afvoerrelaties voor kalibratie en validatie zijn geleverd in de volgende bestanden:

- rgwm\_lat-rijn-j16-v2.yaml
- rgwm\_lat-rijn-j95-v2.yaml

**Invoer tijdreeksen:**

0\_01\_Lobith.tim  
 1\_01\_Emmerich.tim  
 1\_02\_Lobith.tim  
 1\_03\_Hardinxveld.tim  
 1\_04\_Krimpen\_ad\_Lek.tim  
 1\_05\_Ketelmond.tim  
 1\_06\_Ketelbrug.tim  
 2\_01\_Liemers\_De\_Zwalm.tim  
 2\_02\_Bevermeer.tim  
 2\_03\_Oude\_Ijssel\_De\_Pol.tim  
 2\_04\_Grote\_beek.tim  
 2\_05\_Baakse\_beek.tim  
 2\_06\_Kanaal\_van\_Hackfort.tim  
 2\_07\_Twentekanaal\_Almen.tim  
 2\_08\_Twentekanaal\_Afleidingskanaal.tim  
 2\_09\_Schipbeek\_kloosterstuw.tim  
 2\_11\_Wijk\_bij\_Duurstede\_ADM.tim  
 2\_12\_Nieuwegein\_ADM.tim  
 5\_17\_Inlaat\_Kromme\_Rijn.tim  
 6\_01\_Sluis\_Weurt.tim  
 6\_03\_Sluis\_Andel.tim  
 6\_09\_Sluis\_Bernhard.tim

**F.2.3 Uitvoer**

Onderstaande lijst geeft de uitvoer van de RGWM voor de Rijntakken. De bestanden met extensie ".bc" vormen de open randen en hebben een nieuw format in D-HYDRO. Hierin zijn de afvoeren en waterstanden van alle open randen opgenomen. Alle overige bestanden (.tim) vormen de laterale afvoeren en onttrekkingen op de Rijntakken, overeenkomend met de laterale lozingen en onttrekkingen zoals genoemd in Tabel G.4.

20162017.bc  
 AR\_61.9L\_Prinses\_Marijkesluizen\_onttrekking.tim  
 AR\_62.2L\_Prinses\_Marijkesluizen\_lozing.tim  
 AR\_62.3R\_Inlaat\_Drielandenpunt.tim  
 AR\_64.7L\_Gemaal\_Rijkwijkse\_veld.tim  
 AR\_68.5L\_Gemaal\_van\_Beuningen\_Linge\_2.tim  
 AR\_69.0R\_RWZI\_Tiel.tim  
 AR\_71.0C\_Prins\_Bernhardsluis\_noord.tim  
 AR\_71.4C\_Prins\_Bernhardsluis\_zuid.tim  
 BO\_952.7B\_Sluis\_Andel.tim  
 BO\_952.7L\_Inlaat\_Woudrichem.tim  
 BO\_952.7L\_Pomp\_Andel.tim  
 BO\_954.6R\_Inlaat\_Gorinchem\_Benedenstad.tim  
 BO\_957.8L\_Gemaal\_Land\_van\_Heusden\_en\_Altena.tim  
 BR\_852.4L\_Beek\_Kalflack.tim  
 BR\_859.0L\_Beek\_Kellener\_Altrhein.tim  
 BR\_859.0L\_Beek\_Spoykanal.tim  
 LE\_950.0R\_Prinses\_Beatricesluizen.tim  
 LE\_950.4L\_Grote\_sluis\_Vianen.tim  
 LE\_950.5R\_Inlaat\_Oude\_Sluis\_Vreeswijk.tim

LE\_950.6R\_Koninginnensluis\_Vreeswijk.tim  
LE\_952.0R\_RWZI\_Nieuwegein\_buitendijks.tim  
LE\_962.0L\_Inlaat\_Ameide.tim  
LE\_962.5R\_RWZI\_Lopik\_buitendijks.tim  
LE\_965.0R\_Gemaal\_Lopikerwaard.tim  
LE\_971.0L\_RWZI\_Gelkenes\_buitendijks.tim  
LE\_980.1R\_Gemaal\_Krimpenerwaard.tim  
LE\_986.6L\_Gemaal\_RWZI\_Nw\_Lekkerland\_buitendijks.tim  
LE\_988.1L\_Gemaal\_Elshoutsluis.tim  
NR\_881.9R\_Gemaal\_t\_Broek\_Arnhem.tim  
NR\_882.8R\_Gemaal\_Sint\_Jansbeek.tim  
NR\_887.6L\_Gemaal\_Arnhem\_zuid.tim  
NR\_889.7R\_Beek\_Oosterbeekse\_Beken.tim  
NR\_897.0R\_Beek\_Heelsumse\_beken.tim  
NR\_897.5R\_RWZI\_Renkum\_buitendijks.tim  
NR\_899.5R\_Beek\_Renkumse\_beken.tim  
NR\_902.0L\_Gemaal\_Kuyk\_Linge\_1.tim  
NR\_908.0R\_Inlaat\_Valleikanaal.tim  
NR\_913.0R\_RWZI\_Rhenen\_buitendijks.tim  
NR\_919.0L\_RWZI\_Eck\_en\_Wiel\_buitendijks.tim  
NR\_927.0R\_Inlaat\_Kromme\_Rijn.tim  
NR\_929.0R\_Prinses\_Irenesluizen.tim  
PK\_870.3L\_Inlaat\_Doorneburg.tim  
PK\_873.5R\_Gemaal\_Kandia\_Rijnstrangen.tim  
PK\_876.2L\_Inlaatgemaal\_Vitens\_Arnhem-Zuid.tim  
TK\_0.8L\_Eefsebeek.tim  
TK\_3.2R\_Afleidingskanaal\_Berkel.tim  
TK\_3.3R\_Beek\_Twentekanaal\_Sluis\_Eefde.tim  
TK\_3.3R\_Pomp\_Onttrekking\_Twentekanaal.tim  
WL\_877.0R\_RWZI\_Millingen\_Gendt\_buitendijks.tim  
WL\_883.4L\_Beek\_Het\_Meertje.tim  
WL\_887.0L\_RWZI\_Nijmegen\_buitendijks.tim  
WL\_887.0L\_Sluis\_Weurt.tim  
WL\_904.3L\_RWZI\_Druten\_buitendijks.tim  
WL\_914.6R\_Inlaatgemaal\_Echteldsedijk\_Tiel.tim  
WL\_926.2L\_Sluis\_Sint\_Andries.tim  
WL\_933.0L\_RWZI\_Bommelerwaard-Oost\_buitendijks.tim  
WL\_936.0R\_RWZI\_Haaften\_buitendijks.tim  
WL\_943.0L\_RWZI\_Aalst.tim  
YS\_883.5R\_RWZI\_Nieuwgraaf.tim  
YS\_885.7L\_Gemaal\_Rozendaalsebeek\_Beekhuizerbeek.tim  
YS\_890.7L\_Gemaal\_Beekhuizerbeek\_Oost.tim  
YS\_897.2R\_Gemaal\_Liemers\_De\_Zwalm.tim  
YS\_901.8R\_Beek\_Oude\_IJssel.tim  
YS\_901.8R\_Gemaal\_Broekhuizerwater.tim  
YS\_904.8L\_Beek\_Havikerwaard\_.tim  
YS\_911.6L\_Inlaat\_sluis\_Dieren\_Apeldoorns\_kanaal.tim  
YS\_913.7L\_Gemaal\_Soerense\_beek.tim  
YS\_916.6R\_Gemaal\_Grote\_Beek.tim  
YS\_918.3L\_Gemaal\_Leuvenheimse\_beek.tim  
YS\_921.5R\_Gemaal\_Baakse\_Beek.tim



YS\_923.5R\_Gemaal\_Groene\_kanaal.tim  
YS\_925.9L\_Gemaal\_Oekense\_bEEK\_Rhienderense\_bEEK.tim  
YS\_927.7R\_Gemaal\_Vierakkerse\_laak\_Berkel.tim  
YS\_932.4R\_BEEK\_Flierderbeek.tim  
YS\_935.2L\_Gemaal\_Voorsterbeek\_Lage\_Leiding.tim  
YS\_939.1R\_Gemaal\_Dommerbeek.tim  
YS\_942.3R\_BEEK\_Schipbeek.tim  
YS\_943.9R\_Gemaal\_Overijssels\_kanaal.tim  
YS\_948.8L\_Gemaal\_Toevoerkanaal\_Terwolde.tim  
YS\_958.0R\_RWZI\_Olst\_buitendijks.tim  
YS\_974.8R\_Inlaatgemaal\_Harculo.tim  
YS\_977.7L\_Gemaal\_Grote\_wetering\_Wapenveld.tim  
YS\_980.0R\_Gemaal\_Zwolle-zuid\_en\_polder\_Vijf\_marken.tim  
YS\_982.2L\_Gemaal\_Gelderse\_Stouwe.tim  
YS\_990.1L\_Gemaal\_Laag\_en\_hoog\_Zalk.tim  
YS\_999.0L\_RWZI\_Kampen.tim  
YS\_999.9R\_Gemaal\_Raasje.tim  
YS\_1001.R\_Gemaal\_Vosje.tim  
YS\_1002.R\_Gemaal\_t\_Katje.tim

### F.3 Data

Een beschrijving van de gebruikte data zal worden aangeleverd door RWS-ON. Het gaat dan om een beschrijving van:

- Randvoorwaarden open randen voor periodes kalibratie en validatie.
- Laterale afvoeren en onttrekkingen (invoer voor de RGWM voor de kalibratie- en validatieperiodes).
- Baselinedata.



## **G Definities modelbeoordeling**

### **G.1 Achtergrond**

In het kader van de ontwikkeling van de zesde-generatie modellen voor RWS wordt gestreefd naar een uniforme aanpak voor heel Nederland. In deze bijlage wordt een aantal definities voor de beoordeling van de modellen vastgelegd die voor alle modellen toegepast worden.

### **G.2 Definities**

Voor het beoordelen van modelschematisaties worden de termen kalibratie, validatie en verificatie gebruikt en hier wordt het volgende onder verstaan:

#### **G.2.1 Kalibratie**

De kalibratie bestaat uit het afregelen van onzekere of meest bepalende parameters, zodat modelresultaten overeenkomen met gemeten data. Kalibratie vindt doorgaans plaats onder (een aantal) representatieve omstandigheden (storm, hoog water, laag water, hoge afvoer, lage afvoer, etc.), maar het kunnen ook dagelijkse omstandigheden zijn (getij, gemiddelde afvoer, etc.) waarvoor gekalibreerd wordt. De mate van overeenkomst tussen modelresultaten en data wordt weergegeven door de Goodness-of-fit criteria. Uit de kalibratie volgt een set gekalibreerde parameters.

#### **G.2.2 Validatie**

De validatie bestaat uit het toetsen van de gekalibreerde parameters in een andere situatie dan tijdens de kalibratie gebruikte periode. Een succesvolle validatie geeft vertrouwen in de mate waarin de gekalibreerde parameters ook goede resultaten geven in andere situaties. Validatie is een wezenlijk onderdeel van het kalibratieproces. Er kunnen namelijk meerdere parametersets aan de kalibratiecriteria voldoen. De beste set is dan degene die tijdens de validatie het beste presteert. Na de validatie wordt bepaald of het model geschikt is voor de toepassing. Validatie kan ook plaatsvinden in dezelfde periode als de kalibratie, maar op andere locaties of op andere grootheden. Bijvoorbeeld op tussenliggende meetpunten, of op stroomsnelheden i.p.v. waterstanden.

#### **G.2.3 Verificatie**

Tijdens de verificatie wordt nagegaan of het geoperationaliseerde model nog steeds consistente uitkomsten geeft. Het model wordt beoordeeld op de resultaten van de eerder gekalibreerde en gevalideerde parameters.

### **G.3 Goodness-of-fit criteria**

Een goodness-of-fit (GOF) criterium is een maat voor de overeenkomst van twee dataseries. Voor het beoordelen van de resultaten worden verschillende criteria gebruikt. Deze worden in de volgende paragrafen weergegeven. Hierbij zijn de eerste drie: bias, standaardafwijking en RMSE, de belangrijkste.

Deze kunnen op een groot aantal verschillende (bewerkte/gefilterde) grootheden worden toegepast, zoals:

- waterstand;
- snelheid;
- debiet;
- zoutgehalte;
- watertemperatuur;
- timing en hoogte van hoogwaters;
- timing en hoogte van laagwaters;
- getijamplitude en fase (per component);
- scheve opzet;
- etc.

### G.3.1 Bias

De absolute bias wordt ook wel gemiddeld verschil (GV) genoemd:

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{sim,k} - y_{ref,k}$$

met  $n$  het totaal aantal datapunten in de periode waarover de bias berekend wordt,  $y_{sim}$  de gesimuleerde eenheid en  $y_{ref}$  de referentiewaarden (meestal metingen).

De bias is een maat om aan te geven of de resultaten systematisch worden overschat of onderschat. Alleen een kleine bias is echter nog geen garantie dat de overeenkomst van de datasets groot is. Als er grote schommelingen rond het gemiddelde plaatsvinden, levert dit een lage bias op, terwijl de fout lokaal wel groot kan zijn.

### G.3.2 Standaardafwijking

De standaardafwijking of  $\sigma$  (*StDev*) van de fout

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n ((y_{sim,k} - y_{ref,k}) - bias)^2}$$

Dit is een maat voor de afwijking van de resultaten vanaf de bias. Hierbij worden grotere afwijkingen zwaarder meegewogen dan kleinere. Alleen een kleine standaardafwijking is echter nog geen garantie dat de overeenkomst van de datasets groot is. De resultaten kunnen dan namelijk nog systematisch worden overschat of onderschat.

### G.3.3 Root Mean Square Error (RMSE)

De RMSE is een maat die zowel de bias als de standaardafwijking combineert:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_{sim,k} - y_{ref,k})^2} \approx \sqrt{\sigma^2 + bias^2}$$

Als er geen bias is, is de RMSE gelijk aan de standaardafwijking. En andersom is de RMSE gelijk aan de bias indien de standaardafwijking gelijk aan nul is. Een RMSE van nul is een garantie dat twee datasets exact met elkaar overeenkomen.

## G.3.4 Relatieve bias

Naast de absolute bias kan er ook worden gekeken naar de relatieve bias, wanneer het grote en onderling sterk verschillende waarden betreft:

$$\text{Relatieve Bias} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{y_{sim,k} - y_{ref,k}}{y_{ref,k}}$$

## G.3.5 Variatiecoëfficiënt

Naast de standaardafwijking kan er ook worden gekeken naar de variatiecoëfficiënt (coëfficiënt of variation, CV), wanneer het grote en onderling sterk verschillende waarden betreft:

$$CV = \frac{\sigma}{\text{gemiddelde}}$$

De variatiecoëfficiënt is een relatieve spreidingsmaat, wat inhoudt dat de spreiding gemeten wordt ten opzichte van het gemiddelde.

## G.3.6 Verschil in waarden rond extremen

Dit is een maat om aan te geven in hoeverre extreme waarden goed worden gerepresenteerd. Hierbij wordt vaak niet gekeken naar één enkele waarde, maar naar bijvoorbeeld een gemiddelde over waarden rond de piek (om zo toevallige uitschieters uit te sluiten). Dit kan zowel de maximale waarde zijn ( $\Delta\zeta_{max}$ ) of de minimale waarde ( $\Delta\zeta_{min}$ ):

$$\begin{aligned} \Delta\zeta_{max} &= \max(y_{sim,k}) - \max(y_{ref,k}) \\ \Delta\zeta_{min} &= \min(y_{sim,k}) - \min(y_{ref,k}) \end{aligned}$$

Deze maat kan o.a. worden gebruikt voor de amplitude van de getijbeweging, afvoergolven en bij stormpieken.

## G.3.7 Verschil in tijdstip van extremen

Dit is een maat om aan te geven in hoeverre de timing van de extreme waarden van verschillende datasets met elkaar overeenkomen. Er wordt dan gekeken naar het tijdstip waarop de maximale ( $t_{max}$ ) of minimale ( $t_{min}$ ) waarde voorkomt:

$$\begin{aligned} \Delta t_{max} &= t_{max}(y_{sim,k}) - t_{max}(y_{ref,k}) \\ \Delta t_{min} &= t_{min}(y_{sim,k}) - t_{min}(y_{ref,k}) \end{aligned}$$

Deze maat kan worden gebruikt om te bepalen hoe groot de faseverschuiving is.

## G.3.8 Overschrijdingsduur

Naast bias, RMSE en standaarddeviatie kan ook worden gekeken naar de duur van een bepaalde normoverschrijding of het aantal overschrijdingen. Dit geldt met name voor grootheden zoals saliniteit.

### G.3.9 Gemiddelde over stations

Naast waarden per afzonderlijk (meet)station kunnen de statistieken ook worden samengevat in zowel een gemiddelde over een aantal stations en het RMS (Root Mean Square)-gemiddelde. Voor dit laatste wordt de volgende formulering gebruikt:

$$Mean\_stations = \frac{\Sigma (Statistiek\ per\ station)}{Aantal\ stations}$$
$$RMS\_stations = \sqrt{\frac{\Sigma (Statistiek\ per\ station^2)}{Aantal\ stations}}$$

Het gebruik van RMS heeft als voordeel dat fouten niet tegen elkaar uitgemiddeld worden.

### G.4 Middelingsduur variabelen

Van te voren moet goed worden afgesproken welke middelingsduur er wordt toegepast voor zowel de in- als uitvoervariabelen. Hanteer je bijvoorbeeld 10-minuutgemiddelden voor wind/waterstand, uurgemiddelden, 2-/3-/4-/6-uurgemiddelden.

Dit hangt sterk af van de specifieke toepassing en beschikbare data. Meteomodellen kunnen bijvoorbeeld fenomenen met tijdschalen kleiner dan een uur niet goed oppakken en dan is het ook niet te verwachten dat het waterstandsmodel schommelingen van deze tijdschaal (of kleiner) wel goed weergeeft. Hetzelfde geldt als voor historische afvoerreeksen alleen uurwaarden (of soms alleen dagwaarden) beschikbaar zijn. Anderzijds moet de middelingsduur niet te groot worden gekozen in verband met het goed kunnen weergeven van de nodige fysische processen (zoals getij).

Algemeen kan worden gezegd dat je voor de middeling de kleinste tijdschaal wilt gebruiken die op basis van de data nog verantwoord is.

### G.5 Nauwkeurigheidscriterium

Het nauwkeurigheidscriterium bepaalt welke waarde voor de goodness-of-fit criteria gehaald moet worden om te kunnen spreken van een geslaagde kalibratie of validatie. Afhankelijk van het model, toepassing, grootte en periode kan er worden gekeken naar de GOF-criteria voor verschillende situaties, zoals:

- Stormpiek
- Hoge afvoer
- Lage afvoer
- Gemiddeld getij
- Springvloed
- Hoogwater seizoen
- Heel jaar

## H Kalibratie en validatie

### H.1 Resultaten L1

#### H.1.1 Waal en (Neder-Rijn) Lek

Start met OpenDA matrices waarin de bias en RMSE per meetstation worden weergegeven.

##### Observaties:

- Run 41 is de laatste convergerende som. Tijdens deze simulatie zijn er aanpassingen geweest in de modelinvoer (gedeeld met andere takken / periodes). Daarom hebben de opvolgende runs niet kunnen initialiseren en zijn deze niet bruikbaar. Voor de voorlopige analyse wordt uitgegaan van run 41 (*Sim41<sub>conv</sub>*).
- Ondanks convergentie valt bias nog niet binnen het kalibratiecriterium van 5 mm. Met name de trajecten Nijmegen-Dodewaard, Dodewaard-Tiel en Zaltbommel-Vuren vertonen nog een relatief grote bias van 2 – 3 cm. Overzicht biases in run 41 (in meters):

Pankopp	Nijmegen	Dodewaard	Tiel	Zaltbommel	Vuren	Hagestein	Schoonh
0.020	0.029	0.028	0.018	0.026	0.001	-0.003	0.007

- Ook de tweede convergentie-som (*Sim09<sub>conv</sub>*) toont al goede resultaten op de Waal:

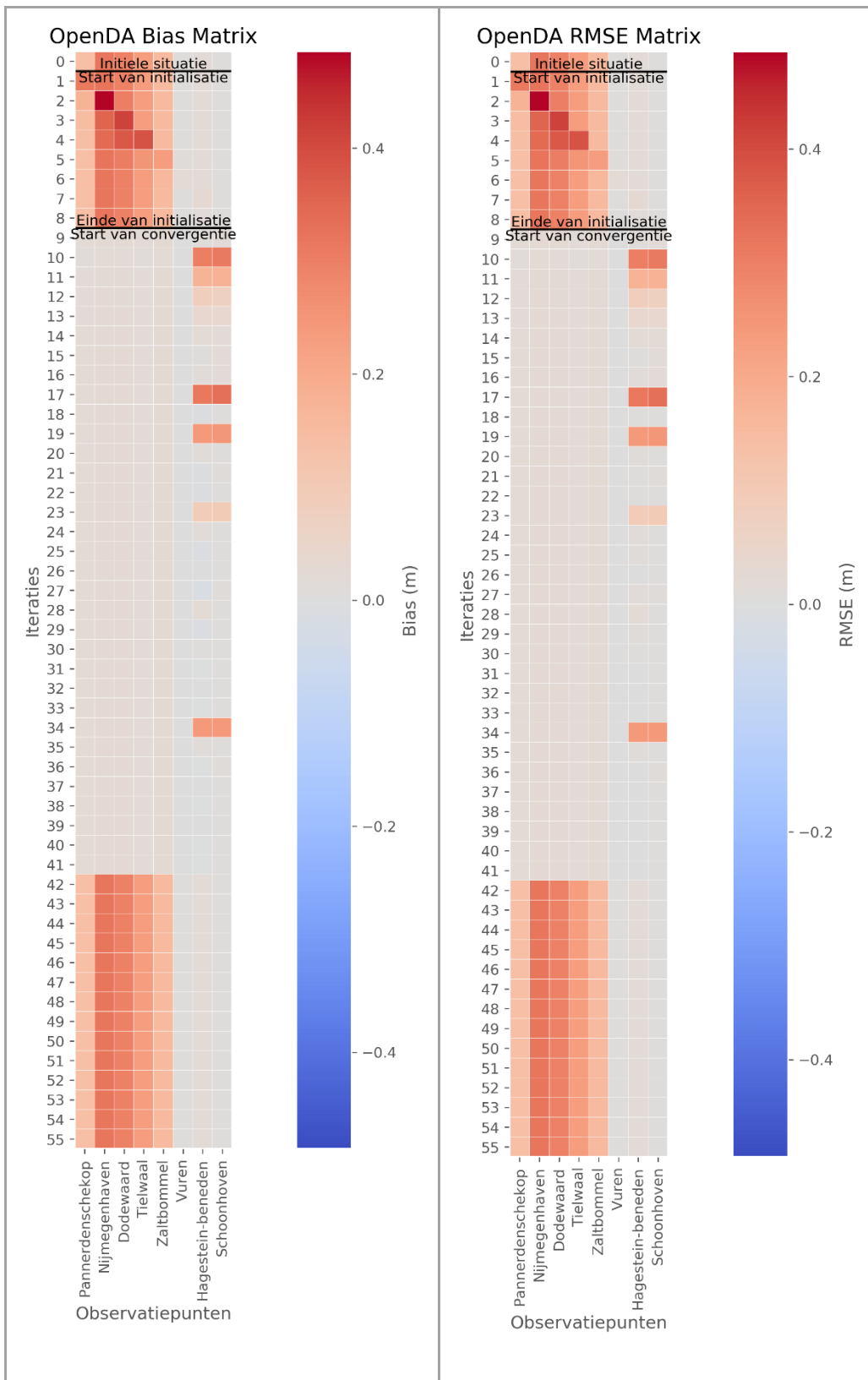
Pankopp	Nijmegen	Dodewaard	Tiel	Zaltbommel	Vuren	Hagestein	Schoonh
0.015	0.022	0.022	0.014	0.021	0.001	0.303	0.314

Op de Waal doet deze som het zelfs iets beter dan de laatste simulatie. De bias op de Lek is echter nog groot met de gebruikte kalibratiefactoren in deze som. Omdat aanpassen van de ruwheden op de Lek in dit geval niet zou moeten leiden tot andere resultaten op de Waal (stuw Hagestein wordt immers gestuurd op afvoer), wordt voorgesteld om een losse simulatie te starten met de kalibratiefactoren van *Sim41<sub>conv</sub>* op de Waal en de kalibratiefactoren van *Sim09<sub>conv</sub>* op de Lek.

- De kalibratiefactoren zijn als volgt (*Sim41<sub>conv</sub>*):

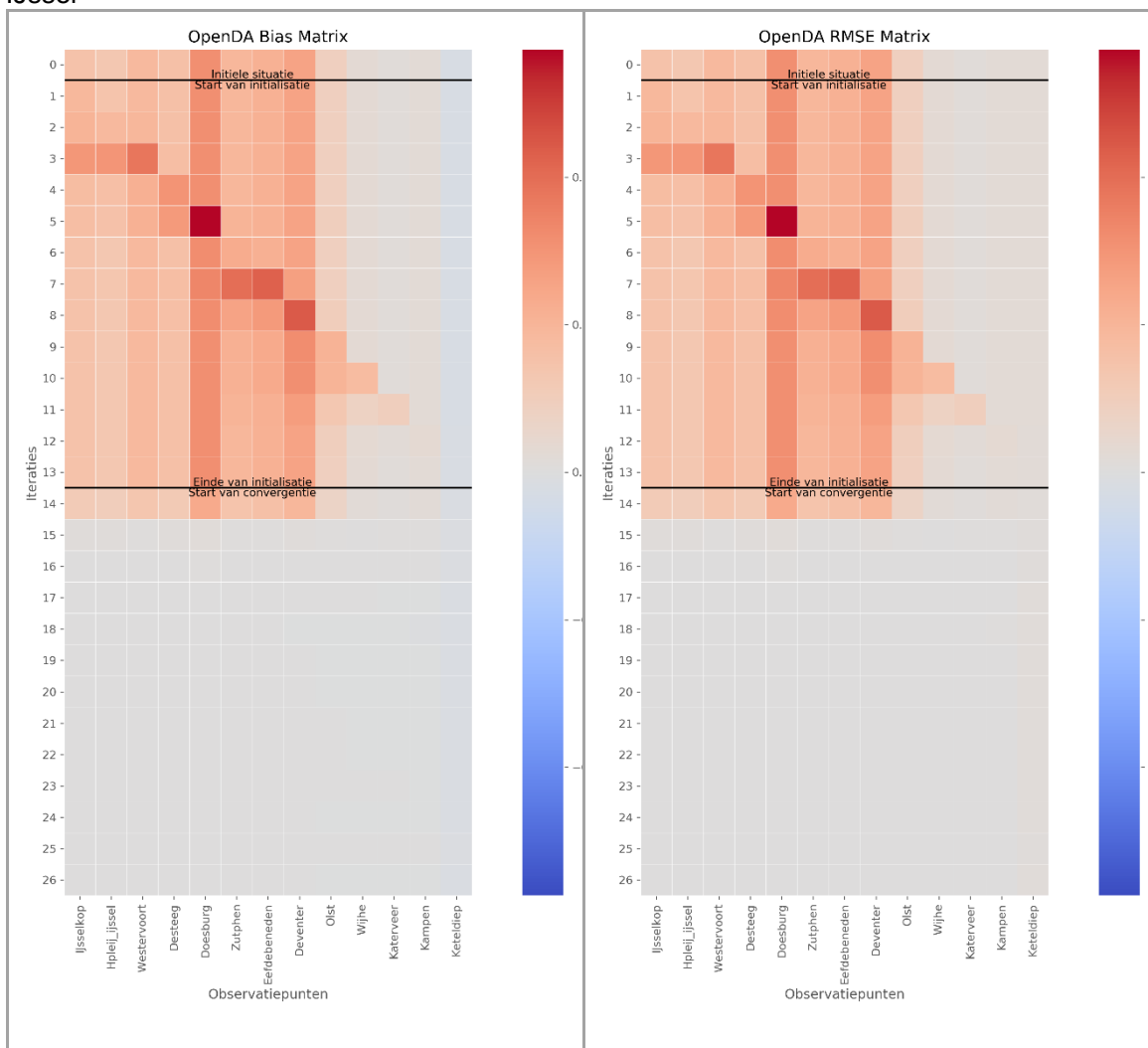
Pankopp- Nijmegen	Nijmegen- Dodewaard	Dodewaard- Tiel	Tiel- Zaltbommel	Zaltbommel- Vuren	Vuren- Werkendam	Hagestein- Schoonh	Schoonh- Krimpen
0.966	0.867	0.866	0.886	0.837	0.953	1.131	1.816

De kalibratiefactoren op de Lek zijn hoog. In *Sim09<sub>conv</sub>* zijn ze zelfs nog hoger, met 1.278 en 3.475 respectievelijk. De kalibratiefactoren op de Waal zijn vergelijkbaar met *Sim41<sub>conv</sub>*.





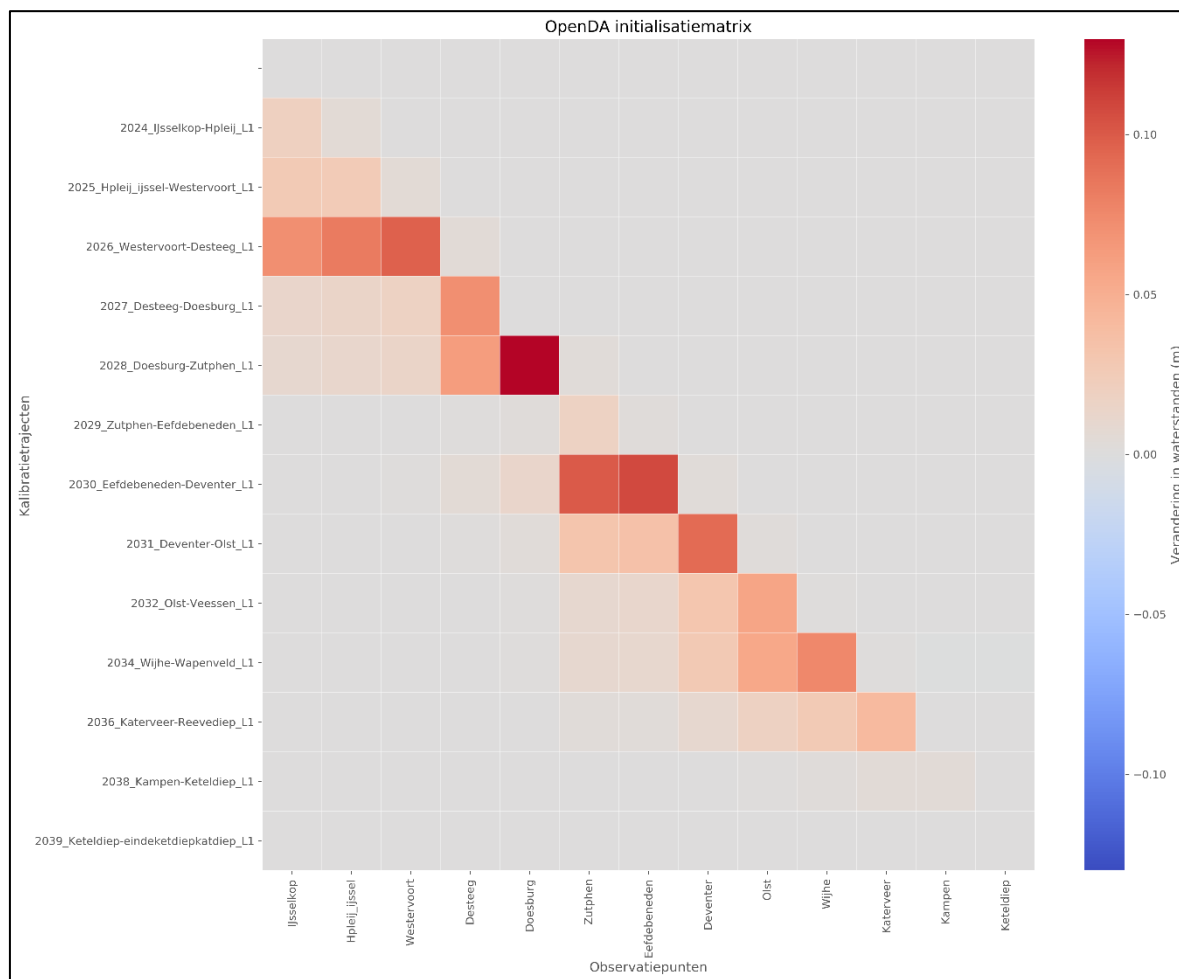
## H.1.2 IJssel

Observaties:

- OpenDA doet precies waar OpenDA voor bedoeld is: namelijk na de initialisatiesommen, de kalibratiefactor zó aanpassen dat de fout op de meetstations geminimaliseerd wordt. Het verschil tussen de tweede en de laatste convergentiesom is minimaal.
- Uit de initialisatiesommen (volgende pagina) blijkt dat:
  - Het aanpassen van de kalibratiefactoren op de eerste twee (korte) trajecten, IJsselkop – Hpleij en Hpleij – Westervoort, een zichtbaar effect hebben op de waterstand op meetstation IJsselkop. Het effect van de kalibratiefactor over het traject Westervoort – DeSteeg is echter groter. Hetzelfde geldt voor meetstation Zutphen, wat beïnvloed wordt door het korte traject Zutphen – Eefde, maar meer door het verder benedenstroomse traject Eefde – Deventer.
  - Meetpunt Kampen en meetpunt Keteldiep zeer ongevoelig zijn voor aanpassen van de kalibratietrajecten. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de korte afstand tussen de meetpunten en de benedenrand en het kleine verhang over deze trajecten.

- De uiteindelijke bias is zeer klein op alle stations:

IJsselkop	Hpleij_ijssel	Westervoort	Desteeg	Doesburg	Zutphen	Eefdebeneden
0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0	0
Deventer	Olst	Wijhe	Katerveer	Kampen	Keteldiep	
0	0	0	-0.001	-0.001	-0.007	



- De uiteindelijke ruwheidswaarden zijn als volgt:

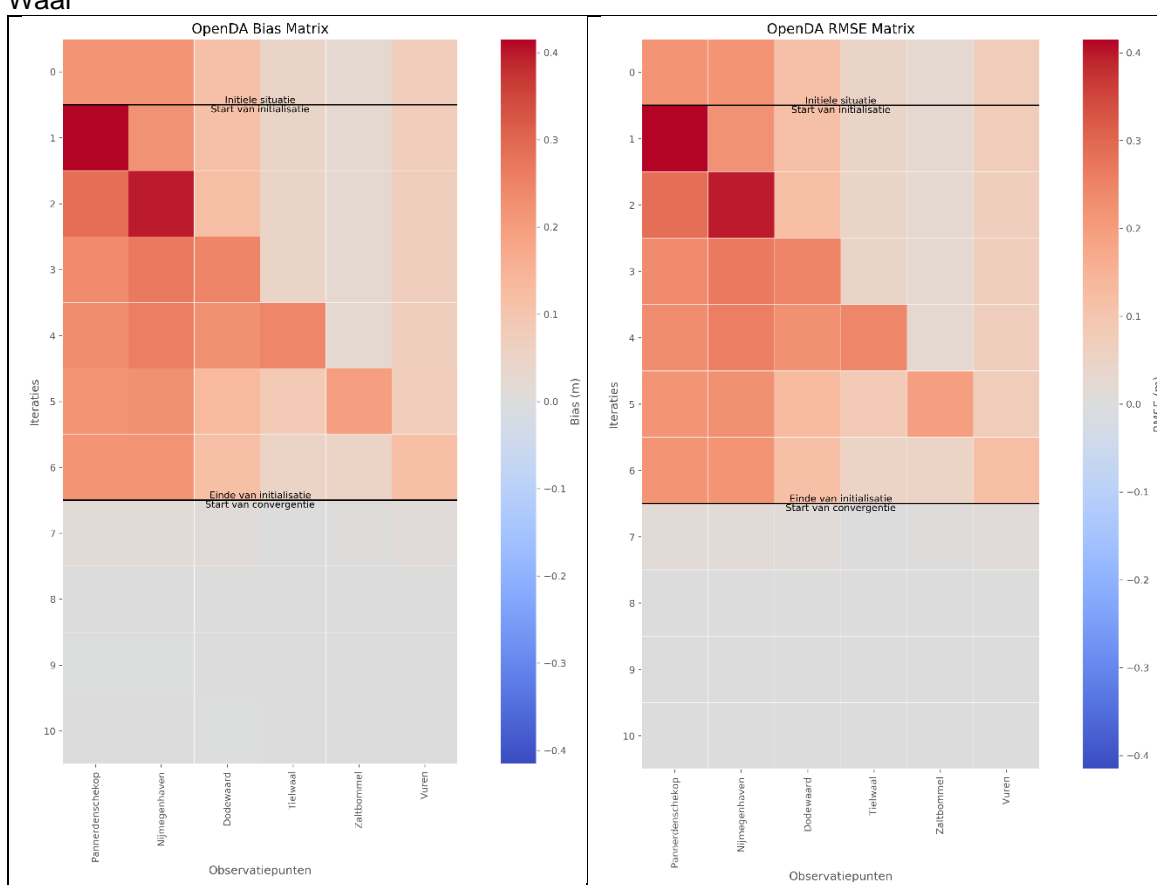
2024_IJsselkop-Hpleij_L1	2025_Hpleij_ijssel-Westervoort_L1	2026_Westervoort-Desteeg_L1	2027_Desteeg-Doesburg_L1	2028_Doesburg-Zutphen_L1	2029_Zutphen-Eefdebeneden_L1	2030_Eefdebeneden-Deventer_L1
0.842219	1.075651	0.911144	0.987792	0.87483	1.008694	0.940227
2031_Deventer-Olst_L1	2032_Olst-Veessen_L1	2034_Wijhe-Wapenveld_L1	2036_Katerveer-Reevediep_L1	2038_Kampen-Keteldiep_L1	2039_Keteldiep-eindeketdiepkatdiep_L1	
0.873898	0.932354	0.988382	1.009356	0.049464	5.368926	

- Over het algemeen zijn deze ruwheidswaarden acceptabel; ze liggen dicht bij 1, wat betekent dat de ruwheid dicht bij de basisruwheid ligt. Uitzonderingen zijn de trajecten Kampen-Keteldiep en Keteldiep-EindeKeteldiep. Voorgesteld wordt om deze waarden voor de kalibratie van M1 terug te zetten naar 1, zodat interpolatiefouten worden voorkomen. Met een kalibratiefactor van 1 (initialisatiesimulaties) zijn de biases op meetstations Kampen en Keteldiep +1.2 en -1.2 cm respectievelijk.

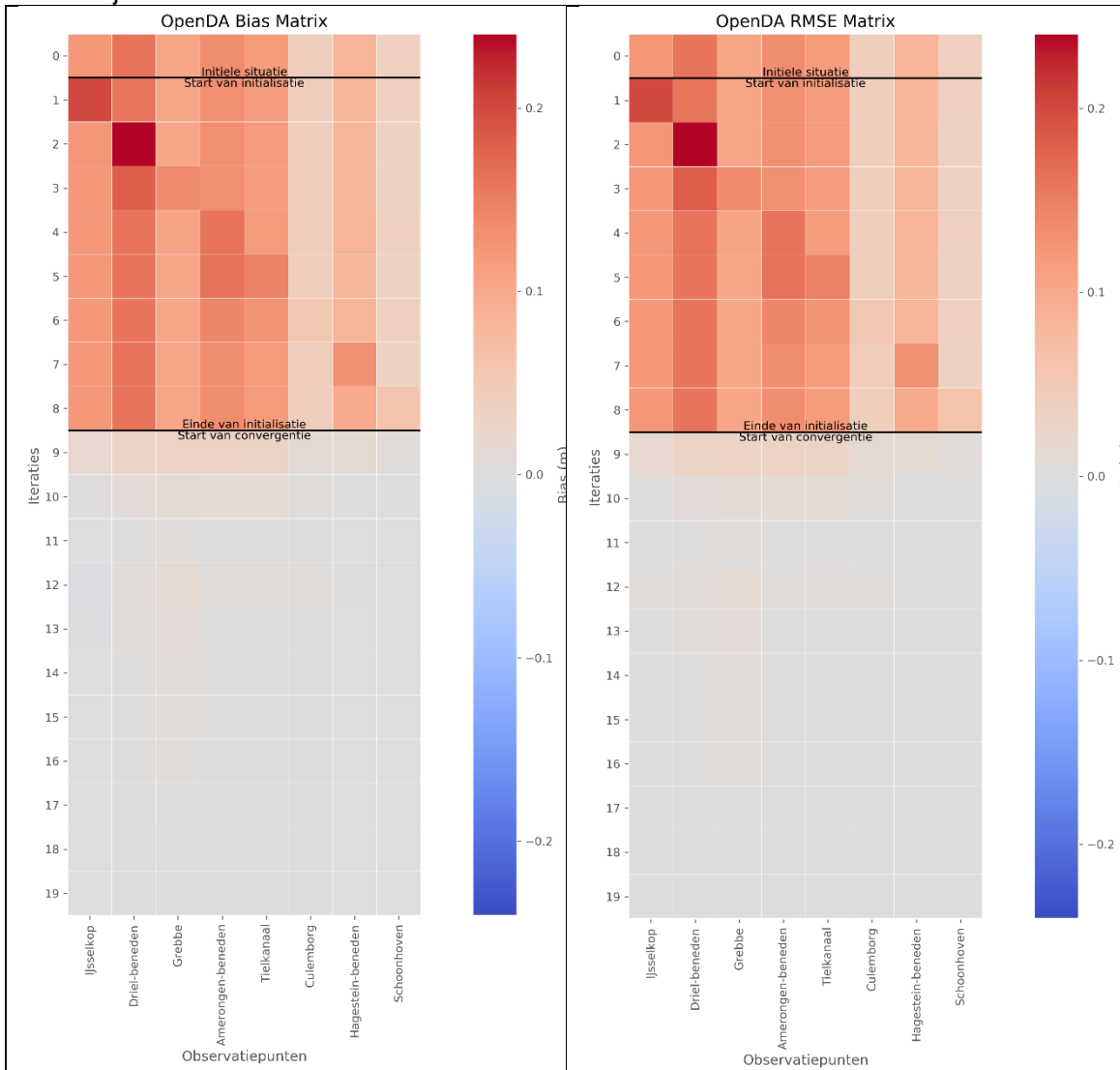
- Uit een snelle validatiesom op de laagwaterperiode in oktober 2016 blijkt dat de resulterende kalibratiefactoren toch nog grote afwijkingen (orde grootte 10 cm) opleveren op de Midden-IJssel (zie onderstaand figuur). Dit kan meerdere oorzaken hebben; vermoed wordt dat in één van beide periodes de modelinvoer (gemeten waterstanden en afvoeren) verschilt van de werkelijke afvoeren en waterstanden. Daarom is een langere kalibratiesom gestart waarin wordt gekalibreerd op alle lage afvoeren tussen 8 oktober 2016 en 11 januari 2017. De afvoervensters zijn onveranderd.

## H.2 Resultaten M1

### H.2.1 Waal



## H.2.2 Neder-Rijn Lek



H.2.3 IJssel

