

# Ruimte voor levende rivieren

Effect grootschalige rivierverruiming op  
bodemerrosie Waal

Opdrachtgevers



Rijkswaterstaat  
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat



Ministerie van Infrastructuur  
en Waterstaat



# Ruimte voor levende rivieren

Effect grootschalige rivierverruiming op  
bodemerrosie Waal

Eindrapport

**Auteurs**

Hermjan Barneveld (HKV)  
Alouette van Hove (HKV)  
Andries Paarlberg (HKV)  
Roy Daggenvoorde (HKV)  
Aukje Spruyt (Deltares)  
Asako Fujisaki (Deltares)  
Kees Sloff (Deltares)  
Willem Ottevanger (Deltares)  
Michiel van den Bergh (WWF)  
Ralph Schielen (RWS WVL)





# Samenvatting

De trend van de afgelopen decennia is dat de rivierbodem op de Boven-Waal met circa 2 centimeter per jaar erodeert en de rivierbodem sinds midden vorige eeuw met ruim een meter is gezakt. Deze bodemerosie is in gang gezet door de normalisaties in de 19<sup>e</sup> en 20<sup>ste</sup> eeuw in Nederland en Duitsland. De zakkende rivierbodem heeft niet alleen grote gevolgen voor de scheepvaart, die hinder ondervindt waar drempels ontstaan doordat bijvoorbeeld vaste lagen niet eroderen, maar ook voor natuur en winning van zoet water. In de visie "Ruimte voor Levende Rivieren" verkent WWF met vijf andere natuurorganisaties de mogelijkheden om met een integrale aanpak verschillende doelen te combineren, waaronder het creëren van meer ruimte en natuur langs de rivieren, het verbeteren van de hoogwaterveiligheid en het stoppen van de voortgaande bodemerosie.

In dit rapport is gekeken of rivierverruiming een bijdrage kan leveren aan het stoppen of afremmen van de bodemerosie. Met "verkennde berekeningen" is de invloed van (combinaties van) voorgestelde maatregelen op het sedimenttransport en lange termijn bodemontwikkeling van de Waal in kaart gebracht. Ook is gekeken wat naast rivierverruiming nodig is aan suppleties om de bodemerosie op de Waal geheel te kunnen stoppen en in hoeverre door verruiming de benodigde suppletievolumes afnemen.

Omdat we vooral geïnteresseerd zijn in de grootschalige effecten op lange termijn (75 tot 100 jaar) is de aanpak gebaseerd op 1D morfologische berekeningen. Hiervoor is eerst een referentiemodel opgezet in SOBEK-RE die de actuele geometrie representeert. Vervolgens zijn verschillende varianten doorgerekend, waarbij de uiterwaarden flink zijn verruimd. Deze verruimingen bestaan uit een algehele uiterwaardverlaging, verwijderen van zomerkades (en andere hoge lijn-elementen in de uiterwaarden) en verlagen van de nog niet verlaagde kribben. Hierbij wordt er wel voor gezorgd dat de vaardiepte in de rivier behouden blijft en dat er geen afgravingen plaatsvinden in de beschermde zone naast de dijk (keurzonering). Daarnaast is ook gekeken naar verschillende scenario's voor de bovenstroomse sedimentaanvoer.

Uit dit onderzoek volgt dat rivierverruiming werkt om de transportcapaciteit en erosie van de Waal op lange termijn (75 tot 100 jaar) te verminderen. Rivierverruiming dient op een relatief laag waterstandsniveau te worden toegepast om grootschalige morfologische effecten te realiseren. De stroomsnelheid in de hoofdgeul moet een groot deel van het jaar aanzienlijk worden verminderd om de bodemerosie te remmen. Hierbij is het van belang om een uniform patroon van erosie en sedimentatie in de langsrichting van de rivier na te streven (door middel van een 'kralensnoer' van rivierverruimende maatregelen, met lokale optimalisatie ten aanzien van de

mate van rivierverruiming), om te voorkomen dat de bevaarbaarheid lokaal verslechtert.

Hoewel bodemerosie kan worden geremd door rivierverruiming is een combinatie met suppleties waarschijnlijk noodzakelijk voor een stabiele bodemligging van de Waal. Uitgaande van een doorgaande bodemerosie van 2 cm per jaar op de Bovenwaal, is naar schatting een suppletievolume van circa 75.000 (in 2020) tot 350.000 m<sup>3</sup>/jr (in 2100) nodig voor het handhaven van de huidige bodemhoogte in de Boven-Waal. Door rivierverruimingsmaatregelen is naar schatting circa 25.000 tot 50.000 m<sup>3</sup>/jr minder suppletievolume nodig om de bodemligging van de Boven-Waal constant te houden. De ontwikkeling van de sedimenttoevoer vanuit Duitsland is onzeker, maar belangrijk voor de ontwikkeling van de bodemerosie en benodigde suppletievolumes.

Aanbeveling is om de berekeningen in de toekomst uit te voeren binnen de nieuwe modellenlijn van het D-Flow FM rekenhart. Hierbij is het raadzaam om het model te kalibreren voor lagere afvoerniveaus en waterstandseffecten. Daarnaast is het aan te bevelen om verder onderzoek te doen naar de verdeling van sediment over zomerbed en uiterwaard om beter inzicht te krijgen in de morfologische effecten ten gevolge van rivierverruimingsmaatregelen.

Dit project is onderdeel van het programma Rivers2Morrow ([www.waterenklimaat.nl/onderzoekslijnen/rivieren](http://www.waterenklimaat.nl/onderzoekslijnen/rivieren)).



Het is uitgevoerd door specialisten van Deltares en HKV voor en met Rijkswaterstaat en het Wereld Natuur Fonds (WWF). Gedurende het project is nauw samengewerkt tussen de deskundigen van alle organisaties.

# Inhoud

## Samenvatting

5

|          |                                                            |           |
|----------|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Inleiding</b>                                           | <b>1</b>  |
| 1.1      | Aanleiding onderzoek                                       | 1         |
| 1.2      | Doel onderzoek                                             | 3         |
| 1.3      | Projectteam                                                | 3         |
| 1.4      | Leeswijzer                                                 | 3         |
| <br>     |                                                            |           |
| <b>2</b> | <b>Aanpak</b>                                              | <b>5</b>  |
| 2.1      | Relatie bodemerosie, sedimenttransport en rivierversuiming | 5         |
| 2.2      | Oplossingsrichtingen: beïnvloeden sedimenttransport        | 8         |
| 2.3      | Verkennde berekeningen                                     | 10        |
| 2.4      | Globaal overzicht (morfologische) berekeningen             | 11        |
| 2.5      | Rivierenlab                                                | 11        |
| <br>     |                                                            |           |
| <b>3</b> | <b>Referentiemodel</b>                                     | <b>13</b> |
| 3.1      | Inleiding                                                  | 13        |
| 3.2      | Uitgangspunten en werkwijze                                | 13        |
| 3.3      | Randvoorwaarden en modelinstellingen SOBEK-RE              | 15        |
| 3.4      | Resultaten hydraulica                                      | 22        |
| 3.5      | Resultaten morfologie                                      | 24        |
| 3.6      | Conclusie                                                  | 26        |
| <br>     |                                                            |           |
| <b>4</b> | <b>Grootschalige versuiming Waal</b>                       | <b>27</b> |
| 4.1      | Inleiding                                                  | 27        |
| 4.2      | Basisvariant (variant 1)                                   | 27        |
| 4.3      | Afleiding 1D modelschematisatie (SOBEK-RE)                 | 32        |
| 4.4      | Resultaten                                                 | 34        |
| <br>     |                                                            |           |
| <b>5</b> | <b>Gevoelighedsanalyses</b>                                | <b>47</b> |
| 5.1      | Inleiding                                                  | 47        |
| 5.2      | Geen versuiming van de Beneden-Waal                        | 48        |
| 5.3      | Meer versuiming van de Boven-Waal: Stap 1                  | 50        |
| 5.4      | Meer versuiming van de Boven-Waal: Stap 2                  | 56        |
| 5.5      | Schatting benodigde suppletievolumes                       | 64        |
| <br>     |                                                            |           |
| <b>6</b> | <b>Synthese</b>                                            | <b>71</b> |

|     |                                                 |    |
|-----|-------------------------------------------------|----|
| 7   | Conclusies en aanbevelingen                     | 73 |
| 7.1 | Conclusies                                      | 73 |
| 7.2 | Aanbevelingen                                   | 73 |
| 8   | Referenties                                     | 75 |
|     | Bijlagen                                        | 77 |
| A   | Samenhang modellen                              | 79 |
| B   | Details variant 1                               | 81 |
| C   | WAQUA-berekeningen WAQ2Prof ruwheden            | 83 |
| D   | Bepaling afvoer zomerbed uit WAQUA-berekeningen | 85 |



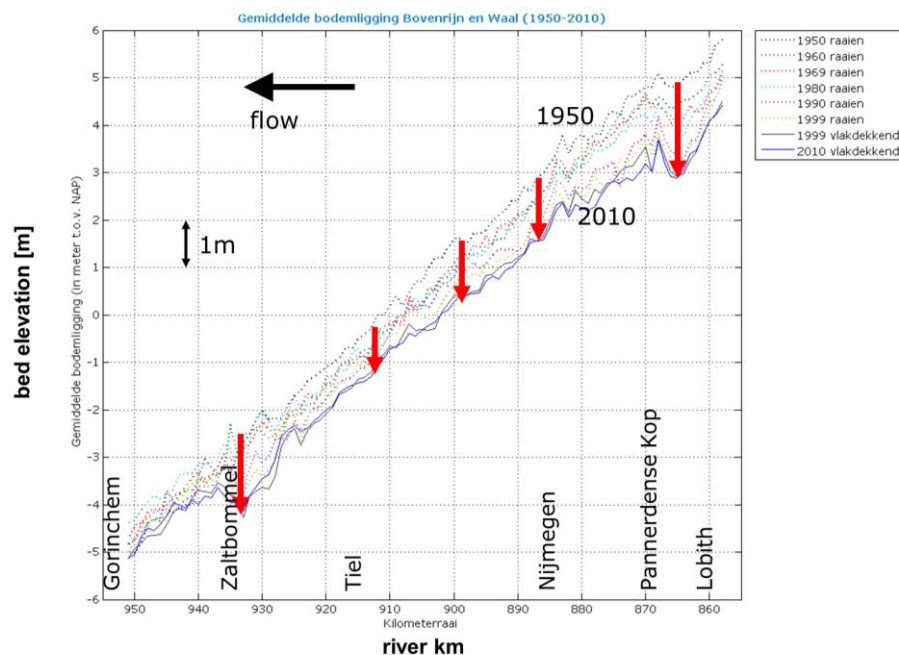
# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding onderzoek

In de visie "Ruimte voor Levende Rivieren"

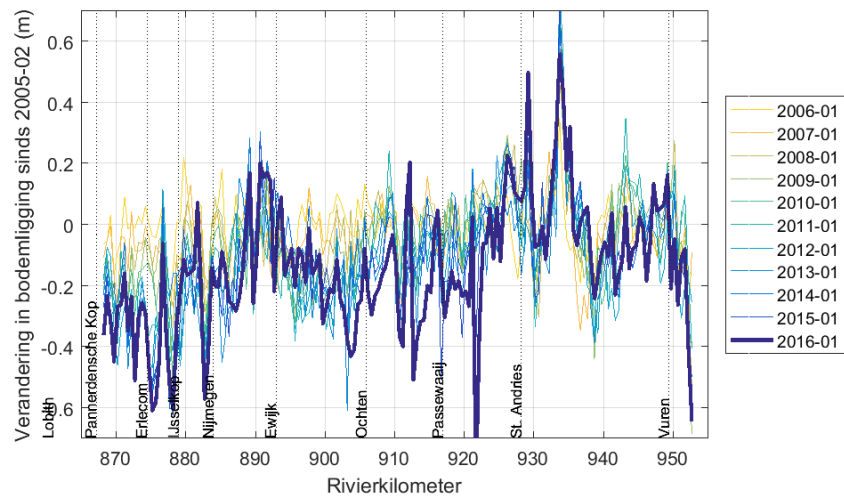
(<https://www.levenderivieren.nl/visie-ruimte-voor-levende-rivieren>) verkent het Wereld Natuur Fonds (WWF) met vijf andere natuurorganisaties de mogelijkheden om verschillende doelen te combineren: het creëren van meer ruimte en natuur langs de rivieren, het verbeteren van de hoogwaterveiligheid en het stoppen van de voortgaande bodemerosie. *Ofwel: een integrale aanpak.* "Met een integrale aanpak kan meer ruimte gecreëerd worden voor levende en klimaatbestendige rivieren, zodat natuur kan floreren en mensen veilig kunnen wonen, werken en recreëren", staat in het rapport 'Ruimte voor levende rivieren'. Deze filosofie van het volgen van een integrale aanpak en planvorming wordt, waar mogelijk, ook geadviseerd voor de (Boven) IJssel (Arcadis, 2018).

**Figuur 1:**  
Bodemerosie in de  
Boven-Rijn en de  
Waal over een  
periode van 60 jaar  
(bron:  
Rijkswaterstaat  
Oost-Nederland, zie  
ook Blom, 2016).



Voorliggend onderzoek focust op de mogelijkheid om door rivierverruiming de voortgaande bodemerosie op de Waal te stoppen. In Figuur 1 is te zien, dat tussen 1950 en 2010, de bodem op de Boven-Rijn en Waal met circa 2 centimeter per jaar erodeerde en dat de rivierbodem sinds midden vorige eeuw met ruim een meter is gezakt. Figuur 2 laat zien dat deze trend op de Boven-Rijn/Waal zich nog steeds (na 2010) doorzet (gemiddelde bodemligging in de vaarweg op basis van de jaarlijkse multibeampeilingen). Op het Pannerdensch kanaal, de IJssel en op de Neder-Rijn-Lek is hetzelfde beeld te zien (niet getoond).

*Figuur 2:  
Doorgaande  
bodemosie van de  
Waal vanaf 2000  
t/m 2016.*



Recentelijk (2018) is maar weer gebleken hoe problematisch (de gevolgen van) bodemosie (kunnen) zijn, zie Figuur 3. De zakkende rivierbodem heeft niet alleen grote gevolgen voor de scheepvaart, die hinder ondervindt omdat er drempels ontstaan (bijvoorbeeld door vaste lagen die niet eroderen), maar ook voor natuur en winning van zoet water.

*Figuur 3:  
Bodemosie in het  
nieuws (Nieuwsuur,  
2018).*



Door normalisaties in de 19<sup>e</sup> en 20<sup>ste</sup> eeuw begon de Rijn zich in te snijden. Dit proces is nog steeds gaande, maar wordt versterkt door een onbalans tussen transportcapaciteit en sedimentaanbod: vanuit Duitsland komt (steeds) minder sediment ons land binnen en bovendien verandert de samenstelling van het binnenkomende sediment (Blom, 2016). Dit zorgt ervoor dat bij een grotere sedimenttransportcapaciteit dan het sedimentaanbod van bovenstrooms, de bodem erodeert. Dit is verder toegelicht in paragraaf 2.1.

RWS (Verweij, 2016) heeft in het kader van "Duurzame Vaardiepte Rijndelta 2" (DVR2) een groot aantal onderzoeken laten uitvoeren en oplossingsrichtingen aangedragen om de bodemosie te stoppen. In het MIRT onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken (e.g., Arcadis, 2017 en Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2018) zijn maatregelen voor de korte en langere termijn onderzocht. Voor de langere termijn wordt naast

sedimentsuppleties ook het aanpassen van kribben (in de Boven-Waal) en het grootschalig toepassen van verruiming door langsdammen genoemd. In dit onderzoek richten we ons specifiek op de vraag of grootschalige rivierverruiming door een combinatie van uiterwaardverlaging, nevengeulen en/of langsdammen kan bijdragen als oplossing voor de gestage bodemerosie van met name de Boven- en Midden-Waal.

We gaan daarbij niet expliciet in op ecologische aspecten en hoogwaterveiligheid (het mag duidelijk zijn dat rivierverruiming bijdraagt aan hoogwaterveiligheid). Die aspecten zijn echter wel leidend geweest voor het opstellen van de type-oplossingsrichtingen die in dit project zijn uitgewerkt. Denk daarbij aan het creëren van frequentere inundatie van uiterwaarden en variatie in stroomsnelheden en waterdiepte door het aanpassen van uiterwaarden, maar ook het vergroten van hoogwaterveiligheid door de rivier meer ruimte te geven in het stroomvoerende profiel (uiterwaarden, maar ook bijvoorbeeld kribvakken).

## 1.2 Doel onderzoek

Het doel van dit project is om te onderzoeken of, en zo ja in welke mate, dat rivierverruiming een bijdrage kan leveren aan het stoppen of afremmen van de bodemerosie. Met verkennende berekeningen wordt de invloed van (combinaties van) voorgestelde maatregelen op het sedimenttransport en lange termijn bodemontwikkeling van de Waal in kaart gebracht. Ook brengen we in kaart wat naast rivierverruiming nodig is aan suppleties om de bodemerosie op de Waal geheel te kunnen stoppen en in hoeverre door verruiming de benodigde suppletievolumes afnemen.

## 1.3 Projectteam

Het project is uitgevoerd voor Rijkswaterstaat en het Wereld Natuur Fonds (WWF) door specialisten van Deltares en HKV. Vanuit RWS waren Ralph Schielen, Sjors van de Kamer, Saskia van Vuren en Arjan Sieben betrokken. Voor Deltares hebben Aukje Spruyt, Kees Sloff, Willem Ottevanger en Asako Fujisaki aan het project gewerkt. Voor HKV waren dat Hermjan Barneveld, Andries Paarlberg, Alouette van Hove en Roy Daggenvoorde.

Gedurende het project is nauw samengewerkt tussen de deskundigen van alle organisaties. Dit betrof samenwerking in het Rivierenlab (zie ook paragraaf 2.5) en werksessies.

## 1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de aanpak van dit onderzoek gepresenteerd. We bespreken de relatie tussen bodemerosie, sedimenttransport en rivierverruiming. Daarnaast wordt grootschalige rivierverruiming als oplossing

voor voortgaande erosie geïntroduceerd. In Hoofdstuk 1 bespreken we het referentiemodel. De opzet van het model en de resultaten worden gepresenteerd. De berekeningen van een model met grootschalige verruiming van de Waal worden behandeld in Hoofdstuk 1. We vergelijken de resultaten van het referentiemodel en de variant met rivierverruiming. Hoofdstuk 5 behandelt gevoeligheidsanalyses naar de bodemontwikkeling van de Waal door rivierverruiming. Hoofdstuk 6 bevat de synthese en Hoofdstuk 7 bevat de conclusies en aanbevelingen van het onderzoek.

## 2 Aanpak

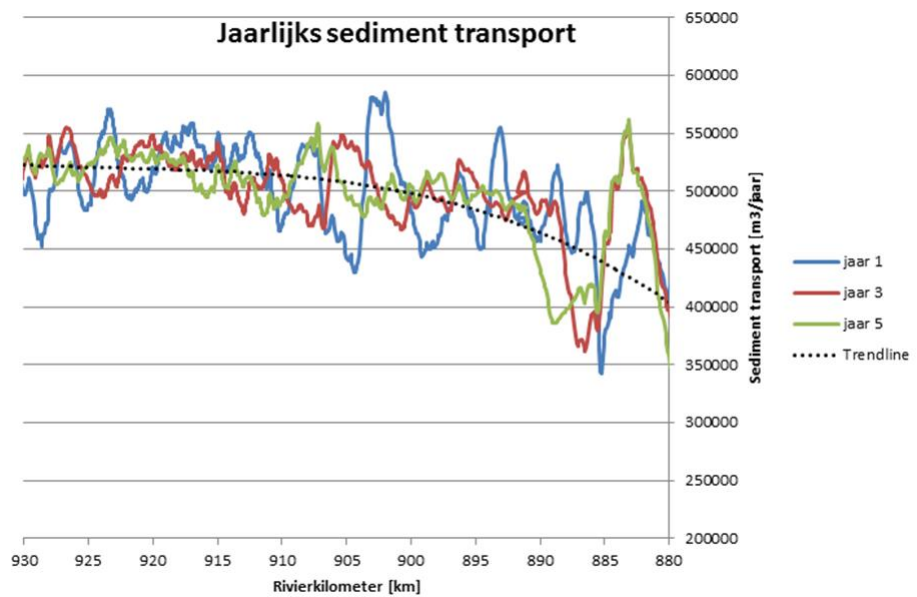
### 2.1 Relatie bodemerosie, sedimenttransport en rivierverruiming

Bodemerosie is in gang gezet door de normalisaties in de 19e en 20<sup>ste</sup> eeuw in Nederland en Duitsland. Met kribben werd de rivier op zijn plaats gehouden, meanderbochten werden afgesneden, nevengeulen werden afgesloten, grote hoeveelheden zand werden gebaggerd en afgevoerd, en de zomerkades langs de rivier werden op uniforme hoogte gebracht. Daardoor stroomden de uiterwaarden later in en overal ongeveer op hetzelfde moment. Dit is de rivier die we tegenwoordig in ons landschap zien.

Door de normalisaties begon de Rijn zich in te snijden. Bovendien nam de aanvoer van sediment vanuit Duitsland af door dammen in de zijrivieren van de Duitse Rijn en de mijnzakkingen in Duitsland tussen Duisburg en Wesel. Het aangevoerde sediment werd deels in dit traject van de mijnzakkingen gevangen en bereikte Nederland niet meer. Tot op de dag van vandaag is de aanvoer van sediment uit Duitsland minder dan de Rijn in Nederland kan transporteren. Door deze "sedimenthonger" wordt zand en grind van de bodem opgepikt en erodeert de rivierbodem nog steeds door.

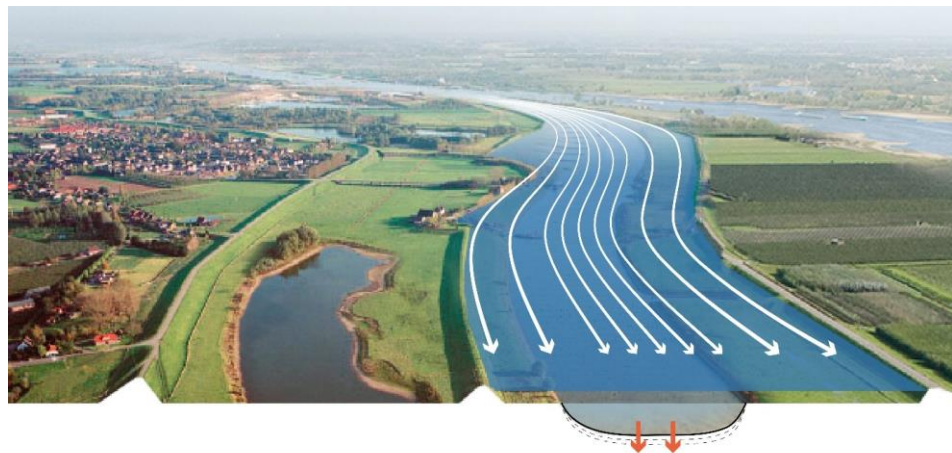
Uit bovenstaande is duidelijk dat de (voortgaande) bodemerosie een sterke relatie heeft met de sedimenttransportcapaciteit. Figuur 4 geeft een indicatie van het jaarlijks sedimenttransport in de Waal langs de rivier, zoals dat is berekend met het DVR model van de Waal (Huthoff et al, 2011). Hoewel het transport van jaar tot jaar verschilt, is er een duidelijke trend waarneembaar (zwarte streeplijn). Omdat er minder sediment in het systeem komt (rechts), erodeert de bodem om aan de transportcapaciteit te voldoen.

*Figuur 4:  
Jaarlijks  
sedimenttransport  
op de Waal. Dit is  
een indicatie van het  
jaarlijks  
sedimenttransport  
berekend met een  
Delft3D model. Dit  
figuur is bedoeld om  
een beeld te geven  
van het  
sedimenttransport  
over de lengte van  
de Waal (Huthoff et  
al, 2011).*



Onderstaande afbeeldingen van Bureau Strooming en WWF illustreren het principe van verruiming en hoe dat de sedimenthuishouding en dus erosietrends kan beïnvloeden. Figuur 5 laat zien hoe in de huidige situatie de zomerkades het water lang in het zomerbed houden. Stroomsnelheden blijven daardoor lang hoog en erosie van het zomerbed zet door. Als een nevengeul wordt gegraven, kan die al bij lagere afvoeren water afleiden en daarmee de snelheden in het zomerbed verlagen (Figuur 6). Als ook de zomerkades worden verlaagd of verwijderd, stroomt het water ook eerder over de uiterwaarden, waardoor de snelheden in het zomerbed verder afnemen (Figuur 7).

*Figuur 5:  
Effect zomerkades.  
De witte pijlen  
geven een indicatie  
van stroombanen.  
Oranje pijlen geven  
de bodemerosie aan.*

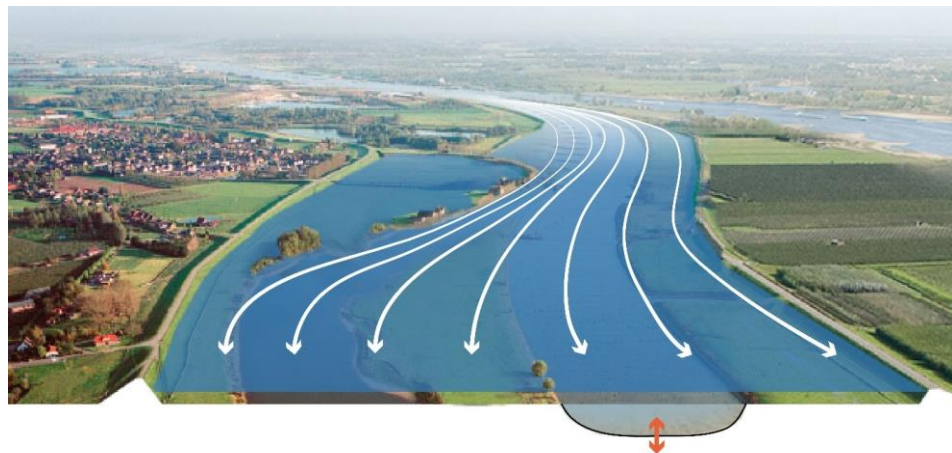




*Figuur 6:  
Meestromende  
nevengeulen. Erosie  
(oranje pijl) wordt  
afgeremd.*



*Figuur 7:  
Verlagen (of  
verwijderen) van  
zomerkades. Erosie  
(oranje pijl) wordt  
afgeremd.*



De hierboven beschreven rivierverruimingsstrategieën verlagen de stroomsnelheden in het zomerbed en daarmee de kracht van het water om sediment te transporteren. Bij gelijkblijvende aanvoer van sediment uit Duitsland zal dan de erosie van de bodem afnemen.

De verruiming kan worden gezien als een vervolg op de Ruimte voor de Rivier maatregelen. Deze laatste zijn bedoeld om meer ruimte te creëren in de uiterwaarden en nevengeulen zodat bij extreem hoge waterafvoeren de waterstanden dalen (voor hoogwaterveiligheid).

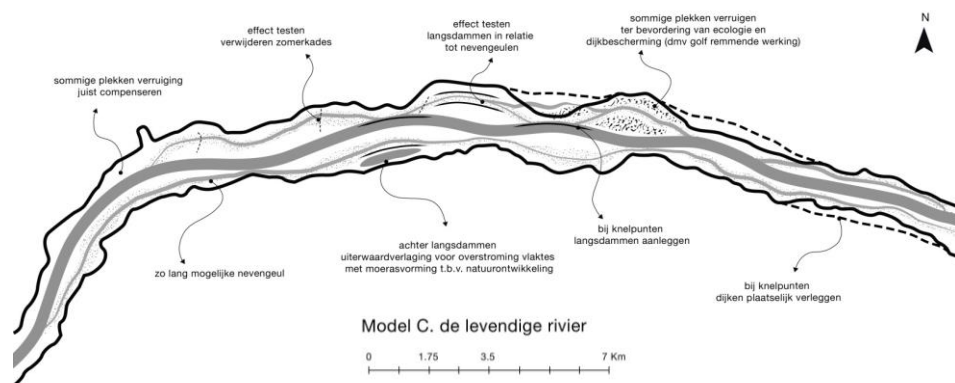
De in "Ruimte voor Levende Rivieren" voorgestelde maatregelen richten zich juist ook op gemiddelde waterafvoeren waarbij een groot deel van het jaarlijkse sedimenttransport door de rivier plaatsvindt (bij hoge afvoeren is het transport per dag weliswaar groter, maar deze hoogwaterperioden zijn kort van duur): ook dan moeten de verruimingen al meestromen. Bij lage afvoeren moet echter juist worden voorkomen dat de extra verruimingen meestromen (bijvoorbeeld door middel van inlaatdrempels) zodat de waterstand en waterdiepte in die situatie niet ook verder daalt in de hoofdgeul en daardoor scheepvaart zou hinderen. Langsdammen kunnen aanvullend helpen voor het handhaven van voldoende waterdiepte in deze omstandigheden. De inlaatdrempels in de langsdammen kunnen de regulerende werking bij lage afvoeren bieden en bovendien zelfs voor enige opstuwung van de waterstand zorgen voor het garanderen van een grotere

waterdiepte ten behoeve van de scheepvaart (doordat langsdammen de hoofdgeul versmallen). De oeversgeulen achter de langsdammen kunnen het verruimende effect van nevengeulen en andere winterbedmaatregelen vergroten en daarmee de vermindering van de bodemerosie verder versterken. Bovendien kunnen ze dwarsstroming van nevengeulen (waar de nevengeul en rivier in contact met elkaar staan) in de vaarweg beperken. Als suppleren aanvullend nodig is, zullen de volumes reduceren door de grootschalige rivierverruiming.

## 2.2 Oplossingsrichtingen: beïnvloeden sedimenttransport

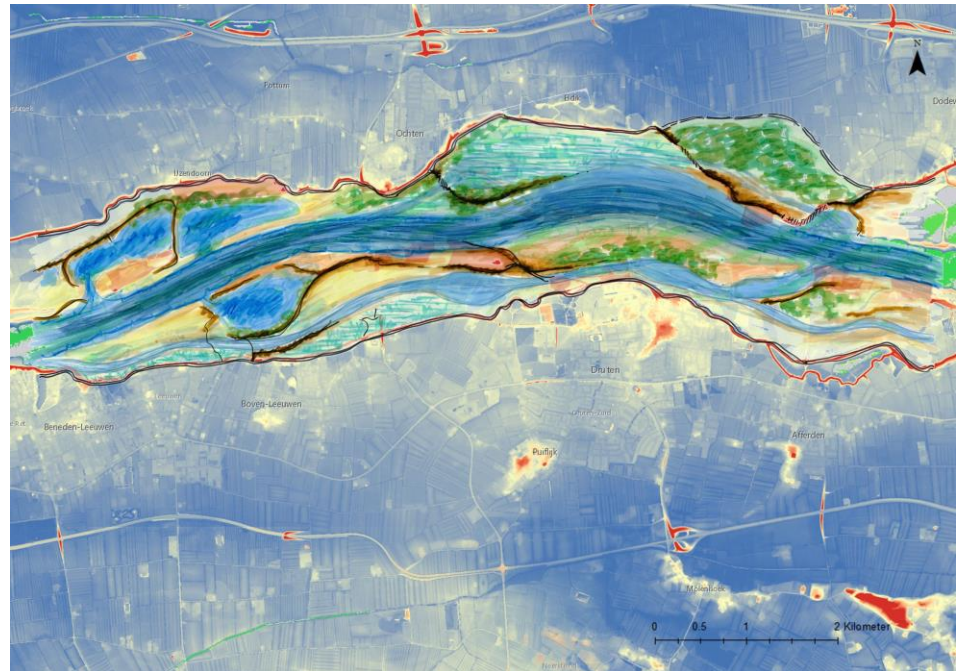
Barneveld & Wegman (2018) hebben in een eerste verkennend traject (pilot) mogelijke oplossingsrichtingen bedacht langs een 30 km traject van de Midden-Waal, zie ook [http://www.waterviewer.nl/#PR3633\\_11](http://www.waterviewer.nl/#PR3633_11). Figuur 8 en Figuur 9 geven een oplossingsrichting uit de pilot: de levendige rivier waarbij rivierverruiming en ecologie hand in hand gaan. Het achterliggende doel van de pilot is om met lokale maatregelen het (jaarlijks) sedimenttransport langs de rivier zo uniform mogelijk te maken.

*Figuur 8:  
Oplossingsrichting  
'Model C' uit  
Barneveld &  
Wegman (2018).*





*Figuur 9:  
Mogelijk beeld van  
verruimde rivier uit  
Barneveld &  
Wegman (2018).*



In de pilot is gekozen voor een traject van 30 km op de Waal (Figuur 8), grofweg van Nijmegen tot Dreumel.

De pilot (Barneveld & Wegman, 2018) heeft geresulteerd in twee mogelijke grootschalige oplossingsrichtingen om bodemerrosie te compenseren:

1. Met suppleties extra sediment inbrengen in de rivier (Figuur 10). Als dit op de juiste plekken gebeurt, kan voorkomen worden dat de bodem verder uitschuurt. Deze suppleties zullen wel regelmatig herhaald moeten worden.
2. Het systeem verduurzamen door de sedimenttransportcapaciteit benedenstrooms te verminderen (Figuur 11), waardoor het sedimenttransport over het interessegebied (=Waal) gelijk blijft. De trendlijn uit Figuur 4 zou dan horizontaal lopen bij ca. 400.000 tot 450.000 m<sup>3</sup>/jaar. Dit zou een vermindering in het jaarlijks sedimenttransport rond Dreumel van ongeveer 20% betekenen. Nota bene: het heeft alleen zin als de transportcapaciteit over langere trajecten wordt beïnvloedt, omdat anders drempels kunnen ontstaan die de scheepvaart hinderen.

*Figuur 10:  
Sedimentsuppleties  
in de Rijn.*



*Figuur 11:  
Beïnvloeden  
transportcapaciteit  
rivier.*



## 2.3 Verkennende berekeningen

In een workshop op 17 januari 2018 over de mogelijke alternatieven voor rivierverruiming zijn verschillende schetsen gemaakt. Destijds werd ook al duidelijk dat, als je met rivierverruiming de bodemerosie effectief wil bestrijden, er grootschalige en rigoureuze rivierverruiming nodig is. Een kralensnoer van nevengeulen van de omvang die tot de dag van vandaag zijn beschouwd, zal niet voldoende zijn. De hoekpunten moeten worden opgezocht, om de potentie van rivierverruiming voor afremmen van de bodemerosie in beeld te brengen.

In dit project brengen we de effecten van grootschalige verruiming op de Waal (benedenstrooms van Pannerdensche Kop) op bodemerosie in beeld met 1D morfologische berekeningen. Daarbij gaan we uit van een basisvariant waarin over de hele Waal een uniforme rivierverruiming wordt toegepast waarbij de uiterwaarden (en gestrekte oevers) waar mogelijk worden verlaagd, zomerkades worden verwijderd en de kribben in de Boven-

Waal worden verlaagd. Deze basisvariant vormt het uitgangspunt voor aanvullende berekeningen en analyses.

## 2.4 Globaal overzicht (morfologische) berekeningen

Omdat we vooral geïnteresseerd zijn in de grootschalige effecten op lange termijn (75 tot 100 jaar) is de aanpak gebaseerd op eendimensionale (1D) morfologische berekeningen. Met het 1D model zijn tijdsafhankelijke bodemveranderingen langs de rivier te berekenen met lengteschalen van orde enkele kilometers. Hoewel ook modellen voor tweedimensionale (2D) of quasi-driedimensionale (3D) morfologische berekeningen beschikbaar zijn, die inzicht kunnen bieden in de bodemligging in de breedte (bijvoorbeeld ondiepte binnenbochten), duren deze berekeningen te lang (denk aan een aantal weken rekentijd per scenario of variant) voor een verkennend onderzoek waarbij we veel verschillende scenario's willen simuleren. Dit soort berekeningen is wel heel zinvol in een later stadium wanneer een hoge precisie van de simulaties belangrijker is om specifieke maatregelen verder te onderzoeken.

Het referentiemodel bespreken we in Hoofdstuk 3, de basisvariant met grootschalige rivierverruiming in Hoofdstuk 4 en de gevoeligheidsanalyses in Hoofdstuk 5.

## 2.5 Rivierenlab

In het kader van dit project is in een parallel spoor ook gewerkt aan het opzetten van 1D morfologisch model van de Waal in de nieuwe softwarelijn D-HYDRO Suite. Deze werkzaamheden sluiten aan bij de ontwikkelingen die plaatsvinden in het kader van het Rivierenlab. Het Rivierenlab is opgezet in het kader van het onderzoeksprogramma Rivers2Morrow ([www.ncr-web.org/projects/rivers2morrow](http://www.ncr-web.org/projects/rivers2morrow)) als een numerieke experimentele faciliteit om samen te werken aan software en modellen voor onderzoek gerelateerd aan rivierdynamiek. Het belangrijkste onderwerp op dit moment is de ontwikkeling van een nieuwe morfologische 1D-modellenlijn binnen het rekenhart (D-Flow FM) van de D-HYDRO Suite waarmee de gewenste langjarige morfologische berekeningen kunnen worden uitgevoerd.

Om het rekenhart D-Flow FM volledig geschikt te maken voor toepassing op het plan "Ruimte voor Levende Rivieren" waren nog enige doorontwikkelingen noodzakelijk:

1. Het kunnen modelleren van zomerkades,
2. Inbouwen van diepte/afvoerafhankelijk ruwheid,
3. Uitbreiden van de functionaliteit met de (morfologische) randvoorwaarden,
4. Uitvoer van enkele berekende parameters.

De uiteindelijke keuze binnen dit project is geweest om de bestaande SOBEK-RE lijn toe te passen. Het SOBEK-RE modelsysteem is een voorloper van de huidige 1D lijn in D-Flow FM en uitvoerig toegepast voor morfologische verkenningen ten behoeve van Ruimte voor de Rivier en diverse rivierbeheer studies in de Rijntakken in de afgelopen decennia. De morfologische module van deze software is zeer krachtig en uitgebreid, en uitvoerig gevalideerd. Echter de ontwikkelingen in het RivierenLab voor D-Flow FM zijn voortgezet, zodat de morfologische effecten in de toekomst ook met de nieuwe modellenlijn kunnen worden berekend.

De opzet van het 1D morfologische model van de Waal in D-Flow FM en de eerste resultaten hiervan zijn beschreven in een separaat memo, zie Spruyt (2018). Hierin wordt ook een korte beschrijving gegeven van de noodzakelijke ontwikkelingen en aanpassingen in de software die zijn uitgevoerd om dit model op te kunnen zetten en te kunnen draaien.

Voor een overzicht hoe het D-Flow FM 1D model samenhangt met de andere modellen, zie Bijlage A.

## 3 Referentiemodel

### 3.1 Inleiding

Om een goede basis te hebben voor de modelberekeningen met grootschalige rivierverruiming, moet de huidige situatie (referentiesituatie) eerst goed kunnen worden doorgerekend.

Zoals uiteengezet in Hoofdstuk 2, gaan we uit van het bestaande 1D morfologisch SOBEK-RE model van de Rijntakken. De profielen en ruwheden van het winterbed worden geactualiseerd naar de meest recente situatie, maar het model wordt niet opnieuw afgeregeld. In dit hoofdstuk wordt uiteengezet hoe het model is opgezet en worden de hydrodynamische en morfologische resultaten besproken.

Om vertrouwen te krijgen in het (geactualiseerde) referentiemodel gaan we daarbij in op de volgende aspecten:

- Waterstanden: vergelijking met bestaande 2D en 1D modellen,
- Afvoerverdeling over zomer- en winterbed: vergelijking met bestaande 2D en 1D modellen,
- Morfologische veranderingen: nagaan of deze in lijn is met de gemeten morfologische trends.

### 3.2 Uitgangspunten en werkwijze

Startpunt is het bestaande SOBEK-RE model van de Rijntakken met gegradeerd sediment, zie Sloff (2006). Dit model is globaal morfologisch gekalibreerd<sup>1</sup> op basis van de periode 1990-2000. De berekeningen worden uitgevoerd op een rekenrooster met stapgrootte van gemiddeld orde 550 m, waarbij op ieder rekenpunt een karakteristiek dwarsprofiel is gedefinieerd. Voor toepassing binnen dit project is het model afgeknipt, zodat het alleen nog de Waal bevat (rivierkilometer 867,06 tot 961,0). De hydraulische ruwheden van het zomerbed en hydraulische parameters zijn ongewijzigd

<sup>1</sup> Het beschikbare gegradeerde model is niet volledige gekalibreerd op bodemveranderingen, sedimenttransport en voortplanting van lokale bodemverstoringen, zoals dit wel met de uniform sedimentversie is gedaan. In deze kalibratie is een keuze gemaakt voor een sedimenttransportformule die voldoende transport oplevert bij lage afvoeren, en een redelijke schatting geeft van het jaartransport. Verder is op riviersplitsingen onderscheid gemaakt in de verdeling per sedimentfractie, om de waargenomen trends in bodemsamenstelling te benaderen. Tenslotte is de dikte van de actieve laag (toplaag) in het gegradeerd-sediment model afgeregeld om te komen tot een redelijke weergave van de gecombineerde verandering in bodemsamenstelling en bodemligging (afregelen van tijdschalen van de processen). Tijdens de kalibratie heeft niet een verdere afregeling plaatsgevonden om gedetailleerde morfologische veranderingen te reproduceren (schaal van 1 à 2 kilometer). Desondanks geeft het model wel een redelijk inzicht in potentiële effecten op de bodemligging en bodemsamenstelling. Dat betekent dat alleen de veranderingen in bodemligging en bodemsamenstelling moeten worden beschouwd, en niet de absolute waarde. Het model is daarmee geschikt voor het maken van principeberekeningen voor de beoogde maatregelen in de Rijntakken.

overgenomen (zie ook Van Vuren & Sloff; 2006). De oorspronkelijke modelschematisatie is gebaseerd op bodempeilingen van 1997 en hydraulisch gekalibreerd in 2002 op de hoogwaterperiode van 1995 voor het afvoerbereik van 1.400 tot 12.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith, waarbij de nadruk ligt op de topwaterstanden (zie Van der Veen et al.; 2002). Er is geen nieuwe kalibratie van waterstanden uitgevoerd, aangezien voor het bepalen van morfologische effecten een goede beschrijving van de (effecten op) afvoerverdeling zomer/winterbed belangrijker is dan het exact voorspellen van waterstanden. Wel zijn in het model de profielen geactualiseerd met de actuele schematisatie van de Rijntakken.

Nieuwe SOBEK-profielen en winterbedruwheden kunnen worden afgeleid met de applicatie WAQ2PROF, ofwel WAQUA-stroombeelden worden gebruikt om profielen en ruwheden te bepalen. Voor dit project gebruiken we resultaten van het meest recente model van de Rijntakken, bestaande uit de volgende onderdelen:

- Baseline-rijn-j17\_5-v1 (geometrische schematisatie),
- Waqua-rijn-j17\_5-v1 (2D-WAQUA-model),
- Sobek-rijn-j17\_5-v1 (1D-SOBEK3-model).

Voor het referentiemodel is gekozen om de meest actuele modelschematisatie van de Rijntakken te gebruiken en niet de beschikbare beno-schematisatie (die gebruikt wordt voor beleidstoepassingen). Zie voor een samenhang tussen deze verschillende modellen het schema in Bijlage A. De belangrijkste reden hiervoor is dat van het actuele model ook een (hydrodynamisch afgeregeld) SOBEK3-model beschikbaar is dat als basis kan dienen voor de 1D morfologische berekeningen. Er is nog niet eerder een 1D-model afgeleid van een beno-schematisatie en er is geen zicht op welke moeilijkheden dit eventueel met zich mee kan brengen<sup>2</sup>.

Voor de referentiesituatie zijn de bestaande WAQUA-resultaten voor de vergelijking en het afleiden van profielen en ruwheden gebruikt. Dit betekent dat de profielen in de referentiesituatie zijn gebaseerd op bodempeilingen van 2016. Voor het afleiden van de profielen en de ruwheden met WAQ2Prof zijn de SOBEK-vakken gebruikt die bij het oorspronkelijke SOBEK-RE model horen. Alleen de profielen en winterbedruwheden zijn overgenomen in het SOBEK-RE-model (zie paragraaf 3.3.1). Voor het langsdammentraject op de Waal zijn de profielen afgeleid op basis van j16 (voor het overige deel op j17).

Bij het opzetten en doorrekenen van de modellen zijn de volgende softwareversies gebruikt:

- SOBEK-RE: 2.52.009C,
- WAQ2Prof: versie 4.42 voor de profielen, versie 4.25 voor de ruwheden,
- WAQUA: SIMONA 2016.

<sup>2</sup> Hierbij kan o.a. worden gedacht aan het gebruik van de vegetatielegger en hoogwatervrije terreinen in WAQUA en hoe dit zal uitpakken in de doorvertaling naar 1D-profielen.



## 3.3 Randvoorwaarden en modelinstellingen SOBEK-RE

### 3.3.1 Hydrodynamica

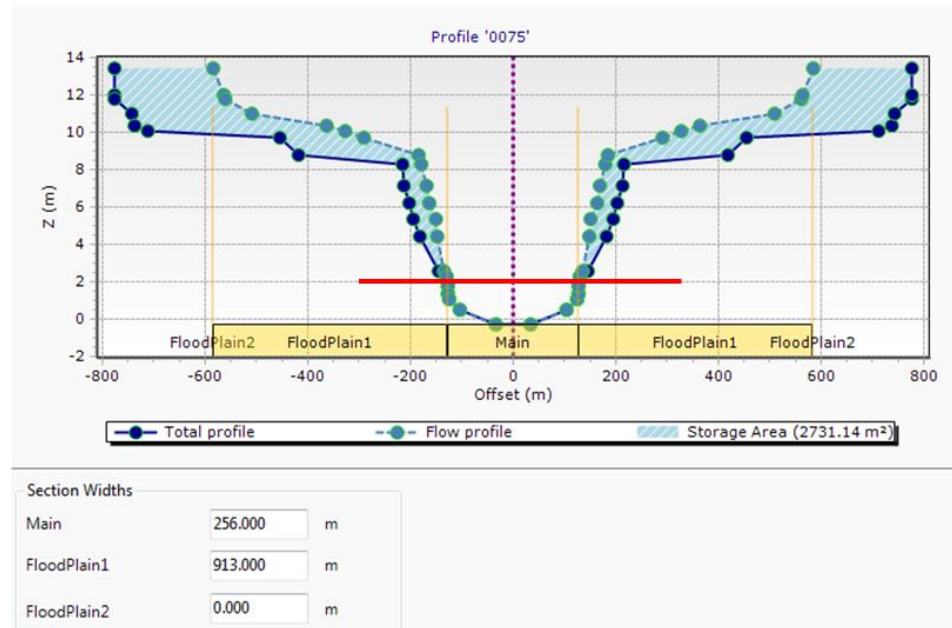
#### **Zomerkades**

WAQ2Prof berekent automatisch de hoogte en ligging van de zogeheten zomerkades in de profielen, en de bergende en stroomvoerende oppervlakte achter de zomerkades. Deze zijn rechtstreeks toegepast en verder niet aangepast. Deze verschillen dus wel van de hoogte van de zomerkades in het oorspronkelijke SOBEK-RE model, omdat deze nu zijn afgeleid van een veel actuelere geometrische beschrijving.

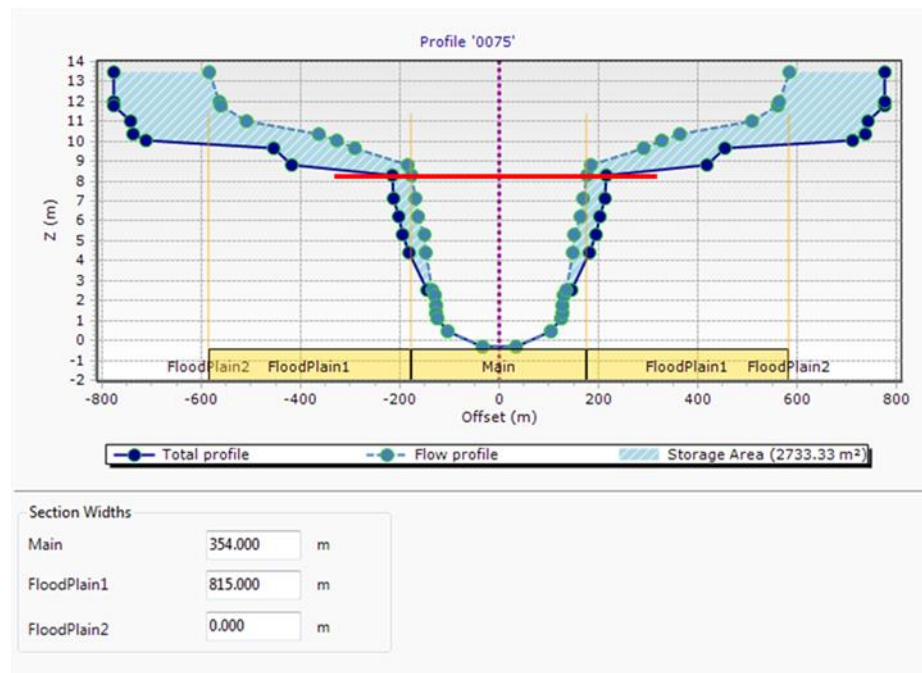
#### **Breedte zomerbed**

WAQ2Prof genereert de breedte van het zomerbed (main channel width) op basis van het sectie1-polygoon (zomerbed) uit Baseline, zie Figuur 12. In SOBEK-RE kan sedimentatie in profielen alleen plaatsvinden binnen de breedte die als zomerbed is gedefinieerd. De berekening stopt echter (met een foutmelding), zodra het zomerbed geheel is gevuld tot het niveau waar de maximale breedte van het zomerbed is bereikt. Dit komt overeen met een maximale mogelijke aanzanding tot de rode lijn in het voorbeeld in Figuur 12. Om er voor te zorgen dat er toch genoeg sedimentatie kan plaatsvinden (en de berekening hierdoor niet wordt beperkt) is de breedte van het zomerbed handmatig vergroot voor de morfologische simulaties zodat aanzanding over een grotere diepte kan plaatsvinden. Hiervoor is gekeken naar de vorm van het dwarsprofiel en de grens van zomerbed gelegd daar waar het profiel van de totale breedte opeens sterk toeneemt, zie Figuur 13. Hierdoor is er veel meer sedimentatie mogelijk, zie hiervoor het aangepaste niveau van de rode lijn in dit figuur. Het betekent echter ook dat de zomerbedruwheid op een groter stuk van het profiel wordt toegepast. Zowel voor de referentie als de varianten (zie volgende hoofdstukken) wordt dezelfde main channel width gebruikt.

Figuur 12:  
Originele output van  
een dwarsprofiel  
vanuit WAQ2Prof.



Figuur 13:  
Aangepast  
dwarsprofiel, waarbij  
de breedte van de  
main channel groter  
is gemaakt.



### Winterbedruwheid

In het oorspronkelijke SOBEK-RE model is er zowel een ruwheid beschikbaar voor Floodplain 1 (kribvakken: constante waarde) als Floodplain 2 (winterbed). Vanuit WAQ2Prof wordt echter maar één winterbedruwheid berekend. In het SOBEK-RE model is daarom (ten aanzien van de ruwheid) de oorspronkelijke Floodplain 1 samengevoegd met Floodplain 2, net zoals dit in het huidige SOBEK3-model wordt toegepast.

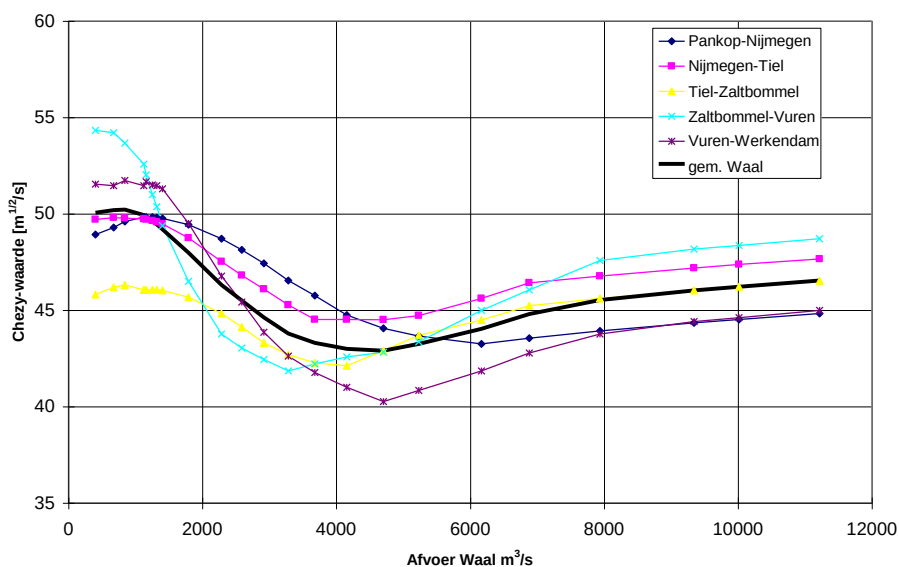


### Zomerbedruwheid

De zomerbedruwheid uit het oorspronkelijke SOBEK-RE model is toegepast, zie Figuur 14. Deze is hydraulisch gekalibreerd in 2002 (zie Van der Veen et al.; 2002) op het complete afvoerbereik, waarbij voor hoogwater de periode rond het hoogwater van januari 1995 (1-12-1994 t/m 28-2-1995) is aangehouden. Voor de verificatie is gebruik gemaakt van de hoogwaters van december 1993 en oktober/november 1998. De minimale afvoer bij Lobith in deze perioden bedroeg  $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$  en de maximale afvoer bedroeg  $12.100 \text{ m}^3/\text{s}$ . In een automatische kalibratieprocedure zijn de verschillen in waterstanden tussen gemeten en berekend geminimaliseerd. Tijdens de analyse van de kalibratie en de verificatie t.o.v. van metingen is in Van der Veen et al (2006) echter alleen gekeken naar topwaterstanden tijdens hoog water.

Om ervoor te zorgen dat er geen ongewenste morfologische effecten optreden is er voor gezorgd dat de overgang van de ruwheidswaarden tussen de verschillende trajecten waaruit het model is opgebouwd glad verloopt. Daarnaast is de ruwheid in het zomerbed, net als voor het winterbed, afvoerafhankelijk. Dit betekent dat er meerdere afvoerniveaus zijn gedefinieerd waaraan een ruwheid is toegekend en hiertussen wordt lineair geïnterpoleerd.

*Figuur 14:  
Zomerbedruwheden  
als functie van de  
afvoer voor de  
verschillende  
trajecten langs de  
Waal. Bron: Van der  
Veen et al (2002)*



### Numerieke instellingen

Er wordt gebruik gemaakt van een zogeheten steady-state solver, aangezien er alleen (quasi) stationaire berekeningen worden gedaan. De tijdstap die hiervoor wordt toegepast is 1 dag.

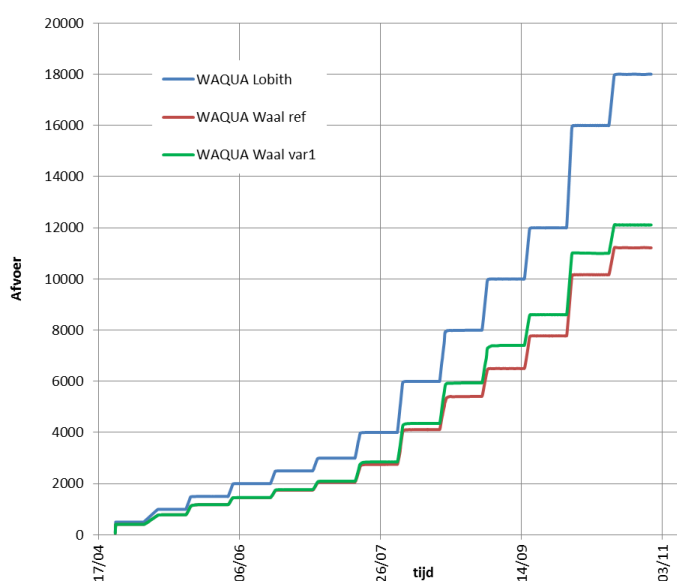
### Initiële condities

Voor een stabiele start van de berekening is gebruik gemaakt van een ingespeelde stationaire toestand voor een gemiddelde rivierafvoer bij Lobith.

### Randvoorwaarden

Voor de hydrodynamische analyse met SOBEK-RE wordt bovenstrooms van de Waal (bij de Pannerdensche kop) een trapsgewijze afvoerreeks opgelegd die identiek is aan de afvoerreeks in het bijbehorende WAQUA-model (zie de rode lijn in Figuur 15 voor de afvoer van het referentiemodel). Op deze wijze is de uitvoer van beide modellen voor hydraulische kenmerken bij verschillende afvoeren goed vergelijkbaar. Hierbij is aangesloten bij de al bestaande berekeningen en modelinvoer die wordt gebruikt als invoer voor WAQ2Prof. Voor een zuivere vergelijking van de SOBEK-resultaten met WAQUA-resultaten, zijn de uitvoertijdstippen op de uitvoerfiles van WAQUA verschoven om een betere stationaire toestand te verkrijgen (zie Bijlage C). Benedenstrooms is een Qh-relatie opgelegd: qh\_Werkendam\_j15\_5.

*Figuur 15:  
Bovenstroomse  
afvoer voor de  
hydrodynamische  
analyse.*

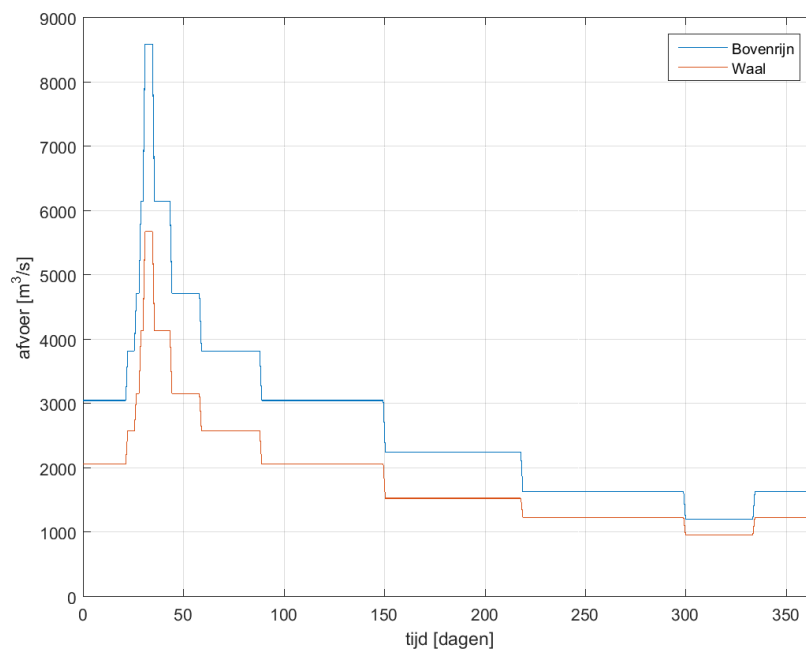


### 3.3.2

### Morfologie

Voor de morfologische sommen is een gemiddelde afvoerhydrograaf toegepast. De afvoerhydrograaf is een jaargemiddelde hydrograaf die is afgeleid op basis van Sieben (2014) zoals gebruikt in het DVR II model (Ottevanger et al, 2015). Hierbij is de Boven-Rijn-afvoer vertaald naar een Waal-afvoer op basis van Sloff et al. (2009). Het verloop van de hydrograaf is weergegeven in Figuur 16 en de gebruikte afvoerniveaus en het aantal dagen in Tabel 1. De waarden en het verloop zijn gegeven zowel voor de Boven-Rijn (Lobith) als de Waal (bovenrand model). Voor elk jaar wordt hetzelfde (gemiddelde) verloop gebruikt.

*Figuur 16:  
Gemiddeld  
afvoerverloop voor  
morfologische  
berekeningen.*



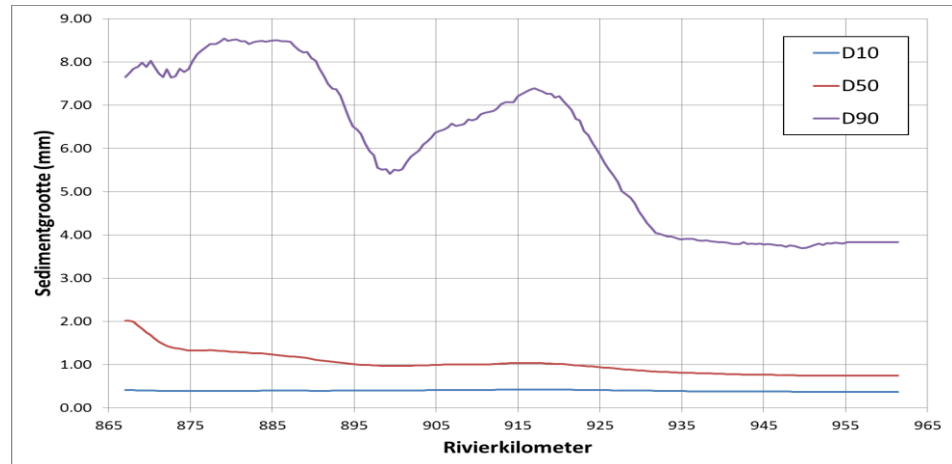
*Tabel 1:  
Afvoerhydrograaf  
morfologische  
berekeningen.*

| Afvoer Boven-Rijn<br>(m <sup>3</sup> /s) | Afvoer Waal (m <sup>3</sup> /s) | Aantal dagen |
|------------------------------------------|---------------------------------|--------------|
| 3053                                     | 2066                            | 15           |
| 3824                                     | 2580                            | 7,3          |
| 4717                                     | 3163                            | 4,3          |
| 6151                                     | 4137                            | 2,3          |
| 8592                                     | 5678                            | 2            |
| 6151                                     | 4137                            | 4,7          |
| 4717                                     | 3163                            | 8,7          |
| 3824                                     | 2580                            | 14,7         |
| 3053                                     | 2066                            | 30           |
| 2250                                     | 1533                            | 61,5         |
| 1635                                     | 1237                            | 68,5         |
| 1203                                     | 957                             | 81           |
| 1635                                     | 1237                            | 34,5         |
| 2250                                     | 1533                            | 30,5         |

### Bodemsamenstelling

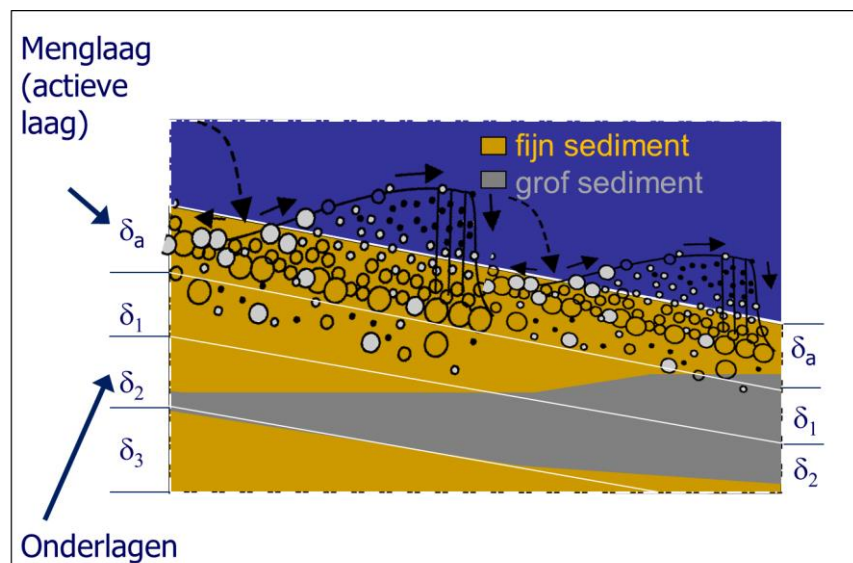
De initiële bodemsamenstelling is gebaseerd op in 1995 gemeten korrelverdelingen van de bodemsamenstelling (zie Sloff, 2006 en Figuur 17).

Figuur 17:  
Initiële  
korrelverdeling langs  
de Waal



Er worden hierbij 17 sedimentfracties gebruikt. In het rekenmodel wordt de ondergrond opgedeeld in een aantal lagen met een vaste dikte en positie, zie Figuur 18. Deze lagen vormen onderdeel van het boekhoudkundig systeem waarmee de samenstelling van het moedermateriaal variabel kan worden gemaakt. De dikte van de menglaag (actieve laag) wordt constant gehouden op 1,0 m in overeenstemming met de eerdere kalibratie en ervaringen met andere toepassingen van gegradeerd sediment in de Rijntakken. Er worden 10 onderlagen gebruikt met een dikte van 0,4 m. De samenstelling van de onderlagen is initieel gelijk genomen aan die van de menglaag. In de berekeningen zijn vaste lagen gedefinieerd ter plaatse van de drie niet-erodeerbare lagen in de Waal (bodemkribben bij Erlecom en vaste lagen bij Nijmegen en St. Andries). Hiervoor worden plaatselijk aan alle fracties in de onderlagen, behalve de grofste fractie, een waarde 0,0 toegekend. Bij het gebruik van aangepaste initiële dwarsprofielen moet ook de initiële hoogteligging van de onderlagen worden aangepast.

Figuur 18:  
Definitie van de  
menglaag ( $\delta_a$  en  
onderlagen ( $\delta_1$ - $\delta_{10}$ )).



### Sedimenttransport

Voor het berekenen van het sedimenttransport wordt de Meyer-Peter en Müller transportformule, aangepast voor gegradeerd sediment, gebruikt (MEY1). Hierbij worden de volgende coëfficiënten toegepast:

|               |         |                           |
|---------------|---------|---------------------------|
| $\alpha$      | = 0,40  | kalibratie coëfficiënt,   |
| $\mu$         | = 0,7   | ribbelfactor,             |
| $\theta_{cr}$ | = 0,025 | kritische shields waarde. |

Conform Sloff (2006) wordt het hiding/exposure effect berekend met de aangepaste Egiazaroff correctie functie volgens Ashida & Michiue (1972) op basis van de  $D_{50}$  (met default waardes  $\alpha_{max} = 0,4$  en  $\gamma = 2,0$ ).

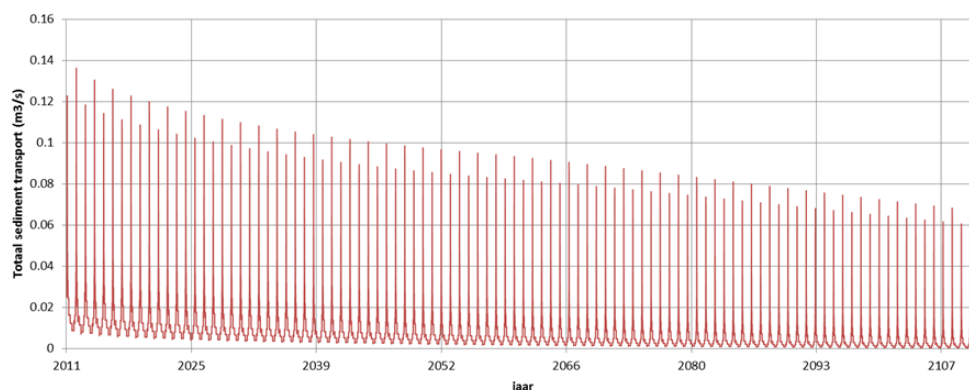
### Morfologische randvoorwaarden

Als startpunt is een morfologische randvoorwaarde gebruikt, waarbij er een bodemdaling van 2 cm per jaar op de rand wordt opgelegd (gedurende 100 jaar). Deze waarde is gekozen omdat de huidige morfologische trend een bodemdaling van gemiddeld ca. 2 cm per jaar laat zien op de Boven-Waal. Er is nu aangenomen dat deze trend de komende 100 jaar doorzet.

Op basis hiervan is de benodigde sedimentaanvoer bepaald (voor alle 17 fracties) en deze is opgelegd in de volgende berekeningen. Om er voor te zorgen dat de gemiddelde erosie op het bovenstroomse traject (dus niet alleen op de rand) na honderd jaar globaal gezien gemiddeld 2 meter is (dus ca. 2 cm per jaar), kan het noodzakelijk zijn om deze sedimentaanvoer met een factor te vermenigvuldigen. Deze aanpassing is uiteindelijk niet nodig gebleken.

Doordat het bodemverhang op Boven-Waal afneemt door de erosie, zit er een variatie in het sedimentaanbod in de tijd. De sedimenttransportcapaciteit neemt namelijk af en dus ook het benodigde resulterende aanbod. Om de 2 cm/jaar constant te houden ( $dz/dt = 2 \text{ cm/jaar} = -ds/dx$ ) is er dus steeds minder sediment op de bovenrand nodig, zie ook Figuur 19.

*Figuur 19:  
Totale opgelegde  
sedimentaanvoer als  
functie van de tijd.*



### 3.4

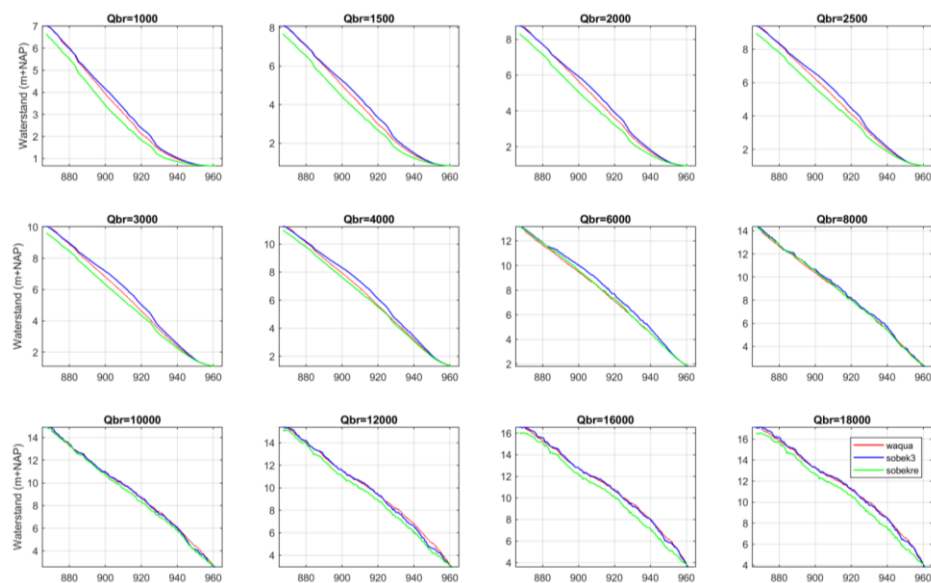
## Resultaten hydraulica

In deze paragraaf wordt gekeken naar de hydrodynamica van het SOBEK-RE model. Hierbij wordt de hydrodynamica vergeleken met de resultaten van het WAQUA-model en het bestaande SOBEK3-model.

### Waterstanden

De waterstanden langs de Waal voor verschillende afvoerniveaus en voor de verschillende modellen zijn weergegeven in Figuur 20 (de afvoeren in het figuur zijn Lobito afvoeren, zie 2<sup>e</sup> kolom in Tabel 2 voor overeenkomstige Waalafvoeren). Hierbij is te zien dat de waterstanden berekend door het SOBEK-RE model lager zijn dan die van het WAQUA en SOBEK3-model. Met name voor lage afvoeren zijn de verschillen relatief groot. Dit kan worden verklaard doordat in het SOBEK-RE model relatief hoge Chézy waarden (dus een lage ruwheid) worden gebruikt in het zomerbed voor lage afvoeren (oplopend tot een Chézy-waarde van 50 tot 53 m<sup>1/2</sup>/s, zie ook Figuur 14). Er dient hierbij te worden opgemerkt dat zowel het gebruikte WAQUA als SOBEK3 model niet zijn afgeregeld voor afvoerniveaus onder de 2700 m<sup>3</sup>/s en dat uit eerdere analyses is gebleken dat deze modellen de waterstanden bij lagere afvoeren overschatten (voor laag water periode in 2011: WAQUA: 10-15 cm, SOBEK3: 10-40 cm, zie ook Visser, 2017).

*Figuur 20:  
Waterstanden langs  
de Waal voor  
verschillende  
afvoerniveaus (bij  
Lobith) en  
verschillende  
modellen.  
Rood=WAQUA,  
blauw=SOBEK3,  
groen=SOBEK-RE.*



Het SOBEK-RE model is opgezet op basis van singlebeampeilingen uit 1997. De huidige (vijfde) generatie WAQUA en SOBEK3-modellen zijn echter opgezet op basis van multibeampeilingen. Om singlebeamresultaten om te zetten naar multibeam moet er een hoogtecorrectie worden uitgevoerd. In de huidige modellen wordt hiervoor op de Waal een correctie van -15 cm toegepast (al zou deze lokaal eigenlijk moeten oplopen naar -40 cm). Dit betekent dat de bodem in het oorspronkelijke SOBEK-RE model relatief aan de hoge kant is ten opzichte van de huidige modellen. In een eerder onderzoek is gebleken dat het toepassen van een grotere correctie (dus het verder verlagen van de bodem) in het huidige WAQUA model ervoor zorgt dat

de ruwheid omhoog moet om dezelfde waterstanden te bereiken tijdens de kalibratie. Dit betekent dat de zomerbedruwheid in het SOBEK-RE model nu afgeregeld is op het gebruik van een bodemligging afgeleid uit singlebeampeilingen, maar dat er eigenlijk een hogere ruwheid zou moeten worden toegepast, omdat de bodemligging van de actuele situatie gebaseerd is op multibeampeilingen. Daarnaast zijn er nog verdere verbeteringen doorgevoerd in de representatie van de geometrie in de huidige modellen, die invloed kunnen hebben op de kalibratie van het SOBEK-RE model.

Het viel buiten de scope van het project om een volledige hydrodynamische kalibratie voor SOBEK-RE uit te voeren, ook omdat in de toekomst dit model vervangen zal worden door D-Flow FM. Bij de keuze om niet te kalibreren speelde ook mee, dat voor het bepalen van morfologische effecten een goede beschrijving van de (effecten op) afvoerverdeling zomer/winterbed belangrijker is dan het exact voorspellen van waterstanden. Het is wel aan te bevelen om hieraan in een eventueel toekomstig traject met D-Flow FM aandacht te besteden. Voor het bepalen van effecten van maatregelen die effect hebben vanaf een bepaalde (lage) waterstand, dient er wel extra zorgvuldig te worden omgegaan met conclusies gebaseerd op de resultaten van het huidige SOBEK-RE model.

#### Conclusies:

- Waterstanden berekend door het SOBEK-RE model zijn lager dan die van het WAQUA en SOBEK3-model.
- Waterstandsverschillen zijn het grootst bij lage afvoeren.
- Effect van deze verschillen op de morfologie is beperkt. Er dient wel extra zorgvuldig te worden omgegaan met conclusies gebaseerd op de resultaten van het huidige SOBEK-RE model, bij maatregelen die effect hebben bij lage waterstanden.

#### Afvoerverdeling zomer- en winterbed

Zoals eerder aangegeven is de afvoerverdeling over zomer- en winterbed belangrijker voor de berekende morfologische effecten dan de absolute waterstanden. Dit heeft te maken met het feit dat alleen morfologische veranderingen in het zomerbed worden meegenomen en we vooral geïnteresseerd zijn in de morfologische veranderingen van de variant t.o.v. de referentie. In Bijlage D is beschreven hoe per dwarsraai de afvoer door het zomerbed is bepaald uit WAQUA-berekeningen, om de afvoerverdeling uit WAQUA goed te kunnen vergelijken met die uit SOBEK.

In Figuur 21 is de fractie van de zomerbedafvoer t.o.v. van de totale afvoer langs de Waal voor verschillende afvoerniveaus en de verschillende modellen weergegeven. Voor het SOBEK-RE model is hier de oorspronkelijke breedte van het zomerbed toegepast, zodat deze overeenkomt met hetgeen is toegepast in de andere modellen.

Wat hierin opvalt, is dat de algemene trends wel redelijk vergelijkbaar zijn, maar dat er lokaal grote verschillen kunnen optreden. Deze zijn per model en afvoerniveau verschillend. De 'dip' bij lage afvoeren rond rivierkilometer 920

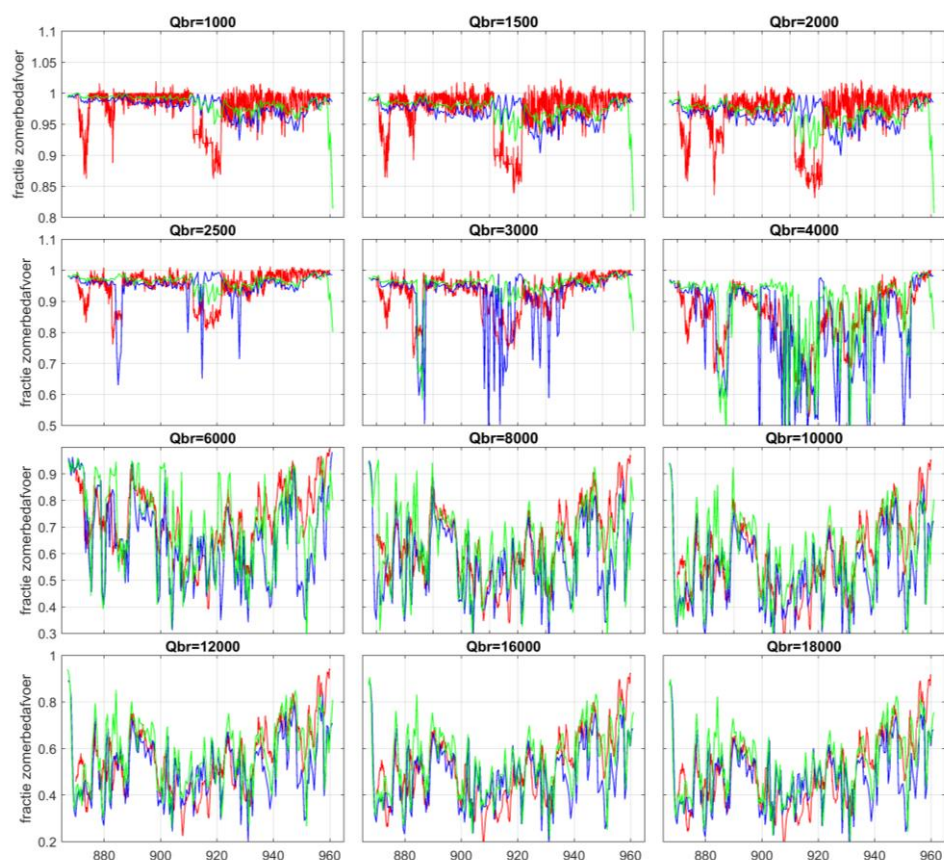


wordt veroorzaakt omdat daar langsdammen aanwezig zijn. Deze langsdammen worden in het 2D model (WAQUA) en de 1D-modellen (SOBEK3 en SOBEK-RE) op een andere manier meegenomen. Dat is ook de reden waarom de dip minder terug te zien is in de 1D-modellen (vooral SOBEK3). In het WAQUA-model zijn daarnaast de fluctuaties een stuk groter dan in de 1D-modellen. Dit wordt mede veroorzaakt doordat de resolutie van het WAQUA model (ca. 40 m rooster) fijner is dan de 1D-modellen (500 m).

Conclusies:

- Algemene trends voor de afvoerverdeling over zomer- en winterbed zijn vergelijkbaar tussen WAQUA en SOBEK-RE.
- Lokaal kunnen er grote verschillen optreden, o.a. bij de langsdammen.

*Figuur 21:  
Fractie  
zomerbedafvoer  
t.o.v. van de totale  
afvoer langs de Waal  
voor verschillende  
afvoerniveaus en  
verschillende  
modellen.  
Rood=WAQUA,  
blauw=SOBEK3,  
groen=SOBEK-RE*



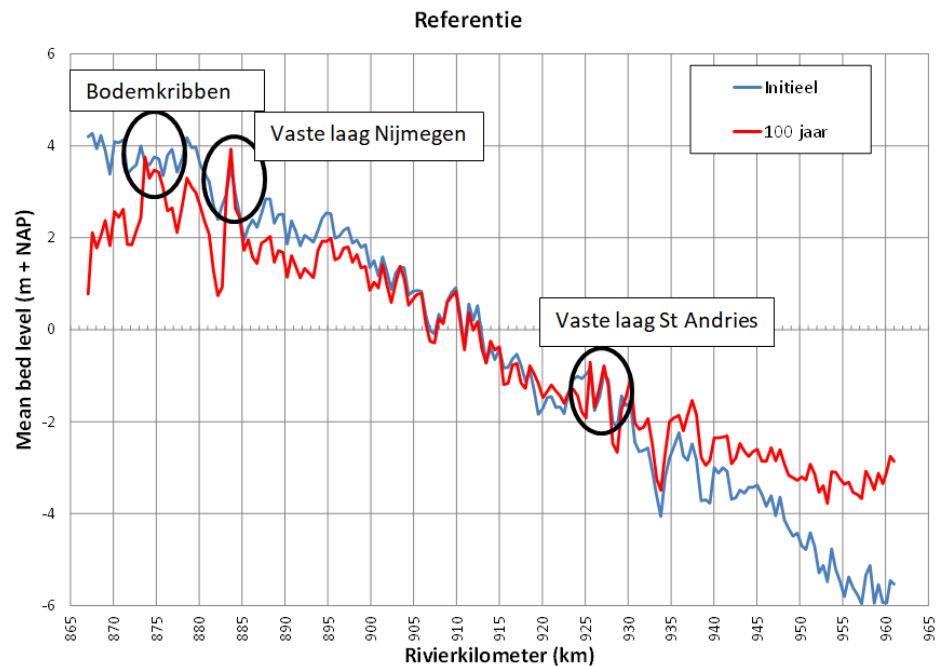
### 3.5

### Resultaten morfologie

Voor het bepalen van de referentiesituatie is het morfologische model 100 jaar doorgerekend. De initiële gemiddelde bodemligging en die aan het eind van de 100 jarige simulatie zijn weergegeven in Figuur 22.



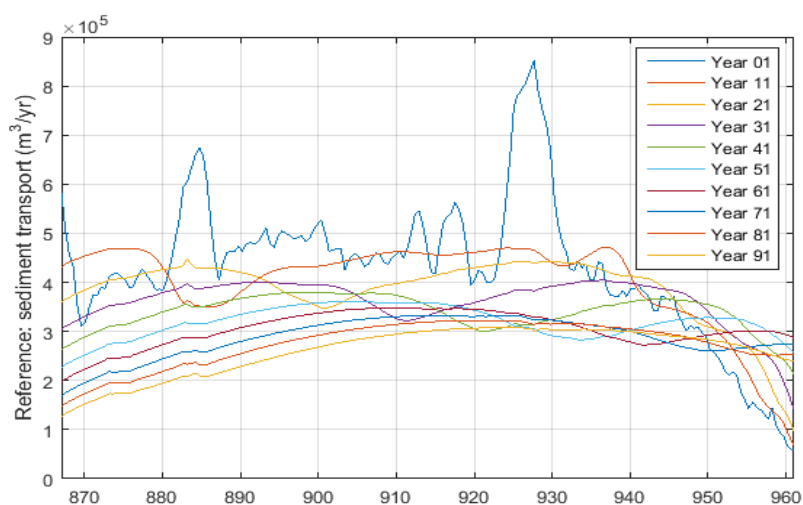
*Figuur 22:  
Gemiddeld  
bodempligging voor  
de referentie, als  
begintoestand en na  
100 jaar. De drie  
ellipsen geven de  
locatie van de  
bodembodden aan  
en de vaste lagen bij  
Nijmegen en St.  
Andries.*



De bodemerosie in het meest bovenstroomse traject is ongeveer 2 meter (in overeenstemming met de opgelegde bodemdaling van 2 cm/jaar, zie ook paragraaf 3.3.2). In benedenstroomse richting neemt de erosie af. Circa 35-50 km stroomafwaarts is er een stuk waar er bijna geen erosie of sedimentatie meer te zien is. Op het benedenstroomse traject zien we verhoogde sedimentatie, tot 3 m, ten opzichte van het initiële situatie. Deze resultaten zijn in overeenstemming met de huidige erosie- en sedimentatietrends in de Waal. Daarbij moet worden opgemerkt dat in de Beneden Waal en Boven Merwede zand wordt onttrokken waardoor de bodem daar eigenlijk minder stijgt.

Er loopt tevens een golf door het systeem (grootschalig) met een snelheid van orde 1 km/jaar (komt overeen met de verwachte voortplantingssnelheid van verstoringen in het systeem zoals afgeleid uit waarnemingen) die op lange termijn (na een periode van erosie) in de Midden Waal zorgt voor een tijdelijke aanzanding en dan wordt gevolgd door erosie, zie Figuur 23. Deze golf is niet toe te schrijven aan de initialisatie van de berekening, maar is inherent aan het systeem. Hierdoor kan de gevonden generieke trend in tussenliggende jaren variëren.

*Figuur 23:  
Jaarlijks  
sedimenttransport in  
langsrichting voor  
verschillende jaren.  
Fluctuaties in jaar 1  
zijn gevolg van  
inspeeleffecten.*



### 3.6

### Conclusie

Er is een 1D-morfologisch model opgezet van de Waal die de actuele geometrie representeert. Voor hogere, morfologisch relevante, afvoerniveaus zijn de waterstanden redelijk vergelijkbaar met het actuele 2D-model. De berekende waterstanden zijn relatief aan de lage kant voor de lagere afvoerniveaus en het verdient aanbeveling om hier in de toekomst verder naar te kijken. De afvoerdeling tussen zomer- en winterbed is in grote lijnen vergelijkbaar met het 2D-model (als dezelfde breedte van het zomerbed wordt toegepast), maar lokaal kunnen er grote verschillen optreden.

Voor het bepalen van de referentiesituatie is het morfologische model succesvol doorgerekend voor een periode van 100 jaar. De resultaten hiervan zijn in overeenstemming met de huidige erosie- en sedimentatietrends in de Waal.

# 4 Grootschalige verruiming Waal

## 4.1 Inleiding

Om bodemerosie van de Waal af te kunnen remmen is grootschalige rivierverruiming een mogelijkheid. In dit hoofdstuk wordt een 1D-modelschematisatie opgezet van de Waal waarin over de hele Waal de uiterwaarden worden verruimd. Deze modelschematisatie dient als basisvariant (variant 1) voor de verdere analyses en berekeningen. Het uitgangspunt is het referentiemodel uit Hoofdstuk 3. Met WAQ2Prof zijn voor variant 1 nieuwe profielen en ruwheden afgeleid (Baselinereferentie + maatregel = variant 1 → WAQUA-berekeningen → WAQ2Prof → SOBEK-profielen en ruwheden).

Paragraaf 4.2 beschrijft de basisvariant (variant 1), inclusief de opname daarvan in de Baseline Referentiedatabase (Baseline-rijn-j17\_5-v1). In Paragraaf 4.3 worden de SOBEK-RE-profielen en ruwheden afgeleid. Paragraaf 4.4 bespreekt de resultaten van variant 1, door de lange termijn (100 jaar) morfologische ontwikkeling te vergelijken met de referentieberekeningen uit Hoofdstuk 1.

## 4.2 Basisvariant (variant 1)

### 4.2.1 Achtergrond variant

Als grootschalige maatregelen in de Waal valt te denken aan de aanleg van nevengeulen en langsdammen, verwijderen van zomerkades en uiterwaardverlaging. Het schematiseren van langsdammen in Baseline en vervolgens, WAQUA, maar vooral in 1D is complex en relatief bewerkelijk. Daarom is in overleg tussen RWS, Deltares en HKV besloten om voor de basisvariant uit te gaan van ingrepen die relatief eenvoudig en eenduidig in Baseline/WAQUA te verwerken zijn, maar de transportcapaciteit in de hoofdgeul wel voldoende kunnen beïnvloeden. Dit pakket bestaat uit:

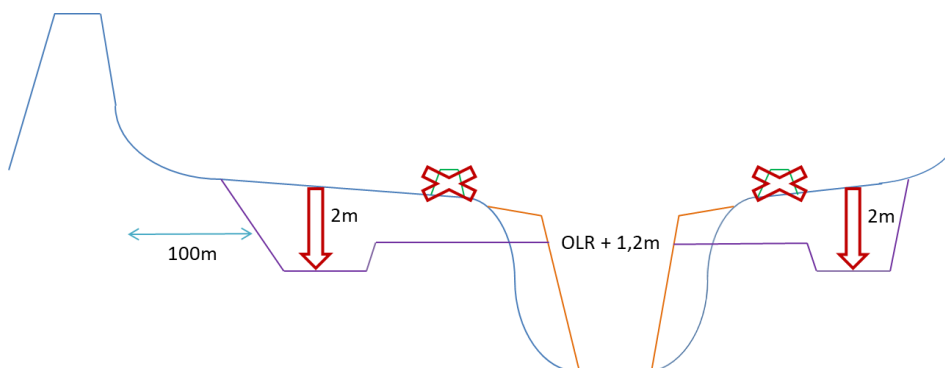
- Uiterwaardverlaging van 2 m (inclusief gestrekte oevers),
- Verwijderen zomerkades (en andere hoge lijn-elementen in de uiterwaarden),
- Niet verlaagde kribben in de Boven-Waal wel verlagen tot een zelfde niveau als in de rest van de Waal.

Daarnaast hanteren we de volgende randvoorwaarden:

- Behoud vaardiepte in rivier = bodemhoogte uiterwaard minimaal OLR (Overeengekomen Lage Rivierstand) + 1,2 m,

Bovenstaande is schematisch weergegeven in Figuur 24.

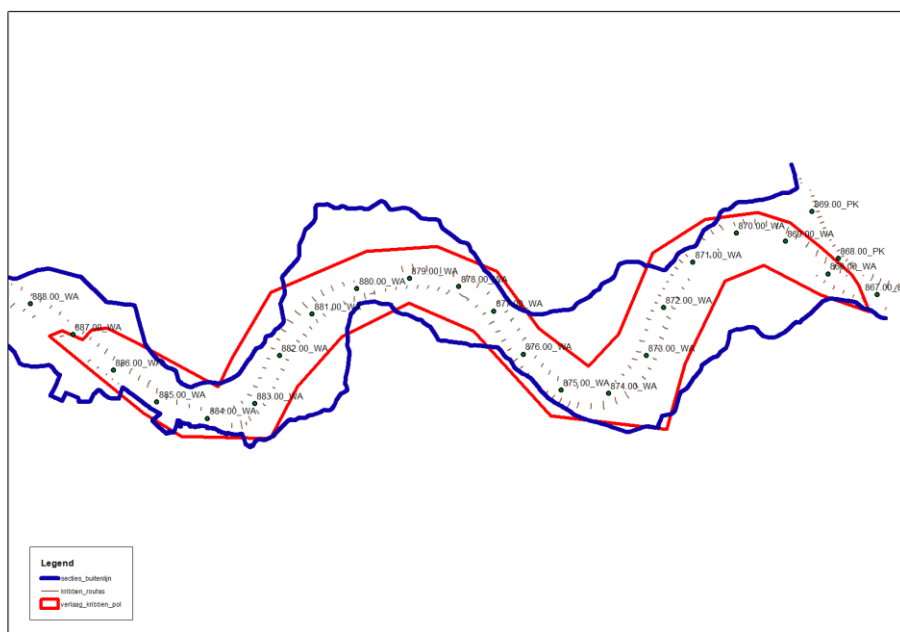
*Figuur 24:  
Schematische  
weergave  
aanpassingen  
dwarsprofiel in de  
basisvariant.*



## Schematisatie basisvariant (variant 1) in Baseline

In een groot deel van de Waal zijn de kribben in het kader van de PKB (Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier) al verlaagd tot een niveau van circa OLR+1,2 m. In de basisvariant worden de nog niet verlaagde kribben in de Boven-Waal ook verlaagd tot een zelfde niveau van OLR+1,2 m (hele krib), zie Figuur 25.

*Figuur 25:  
Kribverlaging Boven-  
Waal binnen de rode  
contour.*

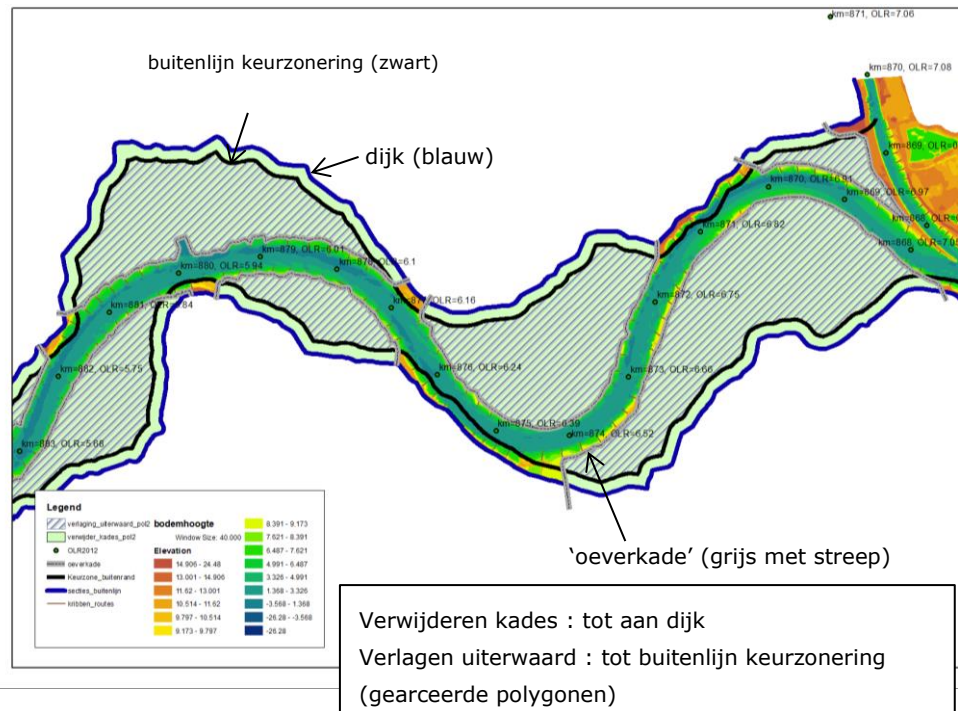


Om de vaardiepte in de rivier te behouden moet de bodemhoogte in de oeverzone minimaal  $OLR+1,2$  m zijn. Bij het verlagen van de uiterwaarden met 2 m kunnen er zones ontstaan waarbij de bodemhoogte in de oeverzone lager wordt dan  $OLR+1,2$  m. Om dit te voorkomen wordt iedere uiterwaardverlaging begrensd door een zogenaamde 'oeverkade': dit is een lijn waarover een overlaat komt dit liggen met een hoogte van  $OLR+1,2$  m, zonder energieverlies. Daarmee borgen we dat de uiterwaard niet al bij te lage afvoeren instroomt, waardoor de waterdiepten (vaardiepten) zouden

afnemen. In Bijlage B is beschreven hoe de oeverkade is geconstrueerd in GIS/Baseline. De oeverkade vormt de grens waarbinnen aanpassingen in de uiterwaarden worden uitgevoerd. Dit is geïllustreerd in Figuur 26:

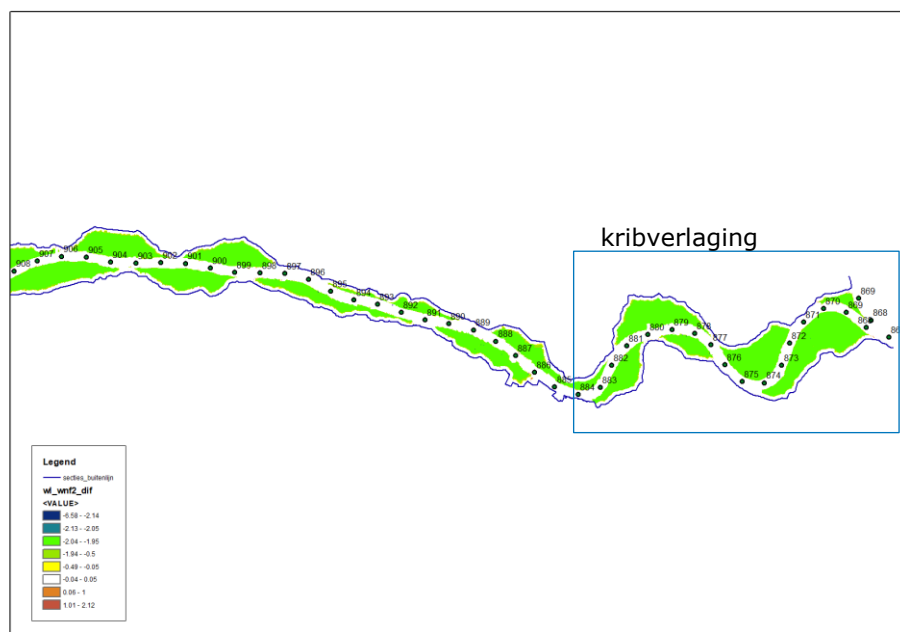
- Tussen de oeverkade en de modelgrens worden kades en hoge lijn-elementen verwijderd,
- Tussen de oeverkade en de buitenlijn van de keurzonering worden de uiterwaarden verlaagd met 2 m.

*Figuur 26:  
Basisvariant: zones  
waar kades worden  
verwijderd en  
uiterwaarden  
verlaagd.*

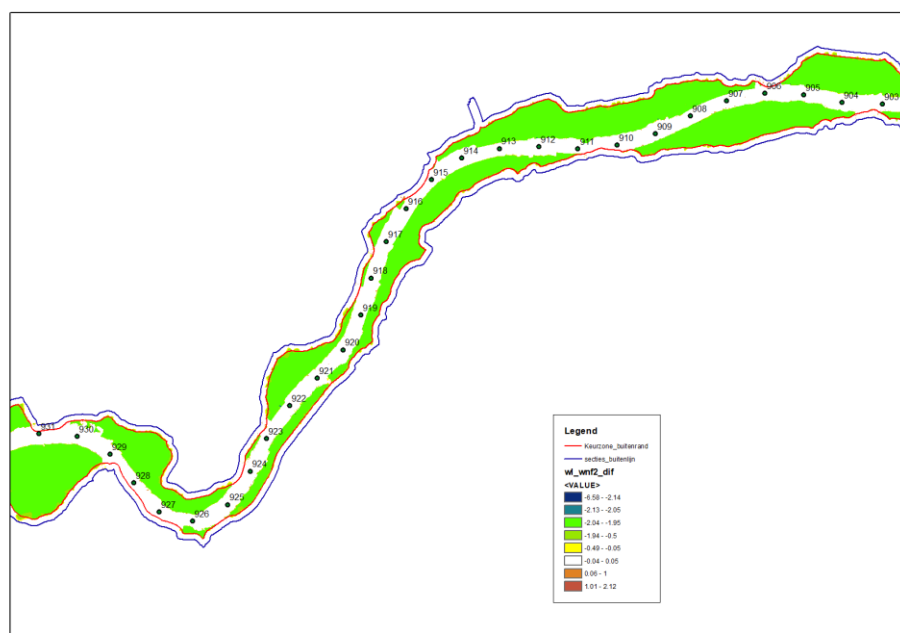


- Figuur 31: voorbeeld op de Beneden-Waal van een smalle riviersectie waar de uiterwaardverlaging bijna geen effect heeft op het dwarsprofiel.

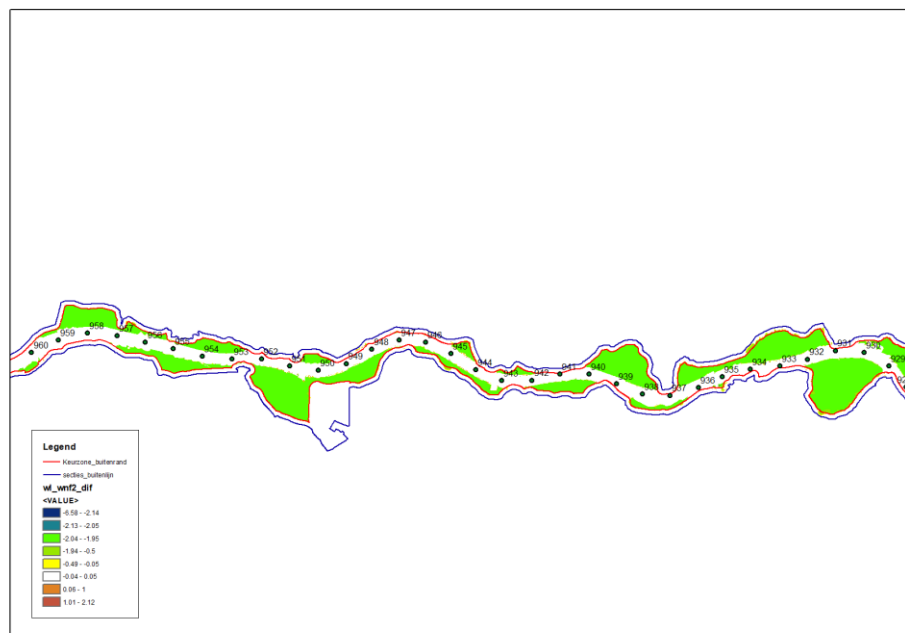
*Figuur 27:  
Uiterwaardverlaging  
en kribverlaging  
Boven-Waal.*



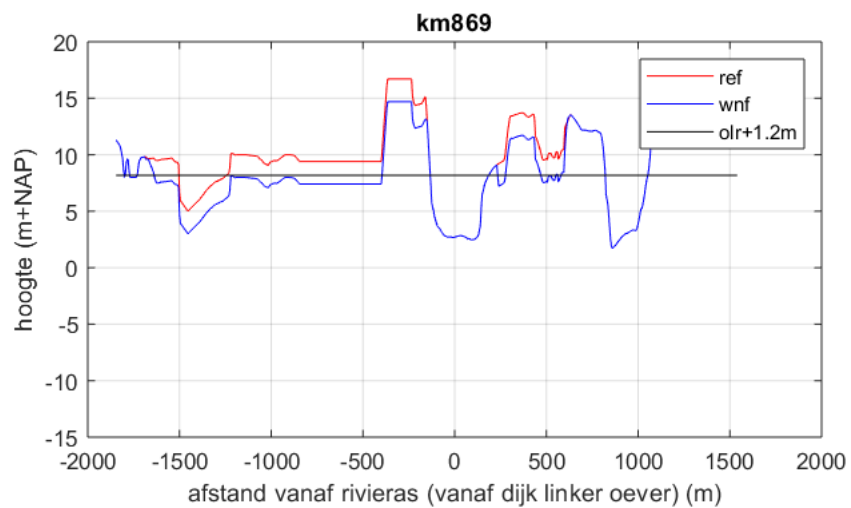
*Figuur 28:  
Uiterwaardverlaging  
Midden-Waal.*



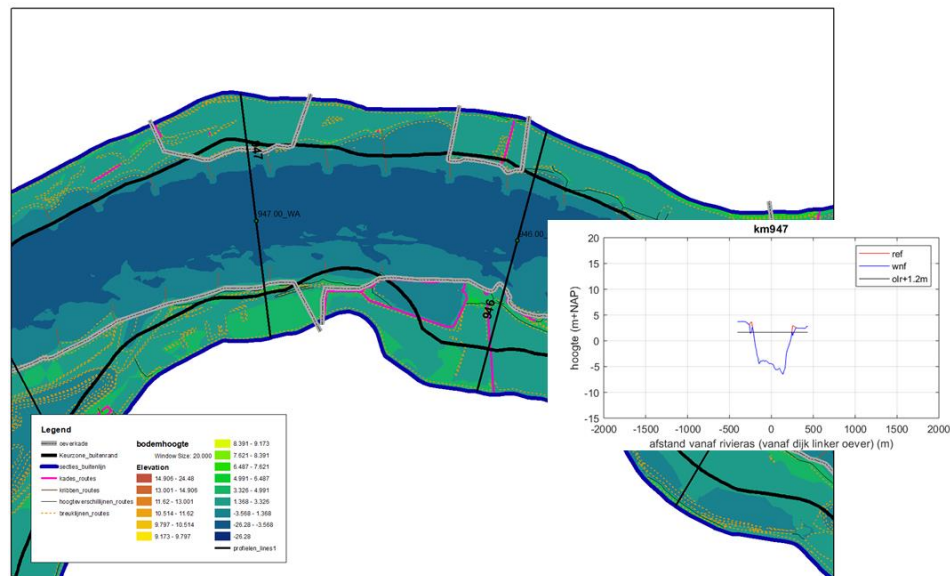
*Figuur 29:  
Uiterwaardverlaging  
Beneden-Waal.*



*Figuur 30:  
Voorbeeld  
aanpassing  
dwarsprofiel km  
869(.06) in Baseline.  
Zie Figuur 32 voor  
het bijbehorende  
profiel, waarbij ook  
de gegevens van de  
zomerkades zijn  
toegevoegd.*



Figuur 31:  
Voorbeeld smal  
profiel, verlaging  
bijna geen effect in  
dwarsprofiel.



## 4.3

### Afleiding 1D modelschematisatie (SOBEK-RE)

Voor het afleiden van de 1D-modelschematisatie hanteren we de werkwijze zoals deze standaard wordt toegepast; die bestaat globaal uit de volgende stappen:

- Opbouw 2-dimensionaal WAQUA-model en berekeningen met
  - a. 13 trapsgewijs oplopende afvoerniveaus;
  - b. Een lineair oplopende afvoer (van zeer lage naar hoge afvoer),
- Genereren SOBEK-ruwheden (op basis van berekening a) en profielen (op basis van berekening b) via WAQ2Prof,
- Opbouw SOBEK-model.

#### 4.3.1

#### WAQUA

De WAQUA-modelschematisatie is in de basis gelijk aan het toegeleverde model: Waqua-rijn-j17\_5-v1 (40 m rooster: rij40m\_5-v6.rgf).

De enige aanpassingen zijn aan de bodem en overlaten. De schotjes zijn niet aangepast (was niet nodig om hoogwatervrije terreinen in de uiterwaarden te verwijderen) en de ruwheden/vegetatie zijn ook niet aangepast.

#### 4.3.2

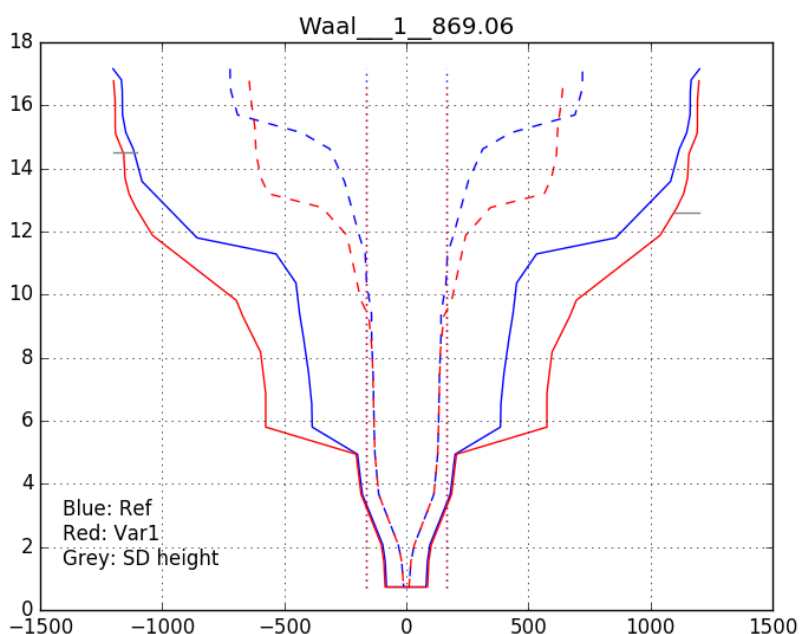
#### WAQ2PROF

Voor het toepassen van WAQ2Prof is dezelfde werkwijze gevolgd als voor het referentiemodel, zie paragraaf 3.2. Figuur 32 en Figuur 33 vergelijken voor 2 profielen variant 1 met de referentie; de verlagingen van de uiterwaarden komen conform verwachting tot uiting in zowel het totale – als het stroomvoerende profiel. Net als voor de referentie, zijn voor de zomerbedruwheid de waarden uit het oorspronkelijke SOBEK-RE model

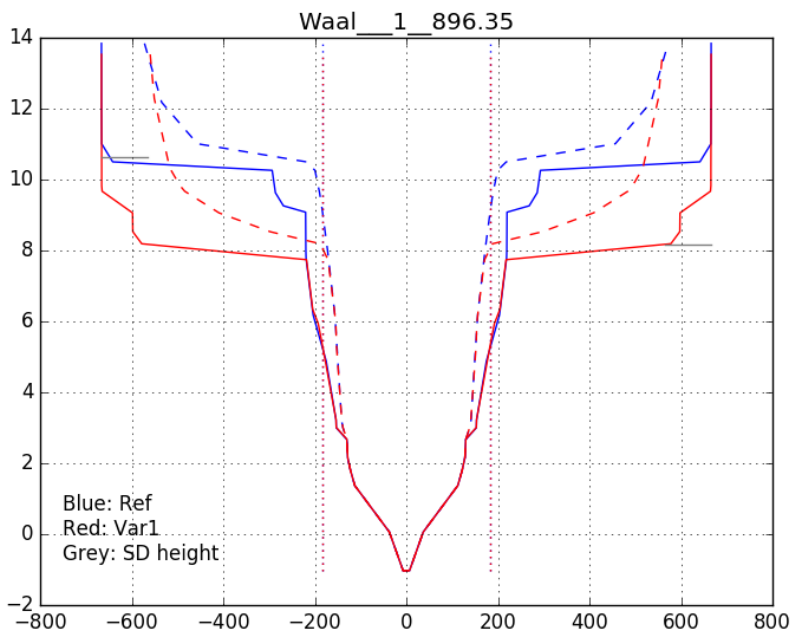


overgenomen. De zomerkades zijn in de basisvariant met 2 meter verlaagd. Dit komt in het SOBEK-RE dwarsprofiel tot uiting in zowel de hoogte van de zomerkade (dc), maar ook in het stroomvoerende volume achter de zomerkade (df). De waarden voor deze parameters zijn toegevoegd in het bijschrift van de figuren.

*Figuur 32:  
Voorbeeld SOBEK-  
profiel Boven-Waal.  
Gestippeld is  
stroomvoerend  
profiel;  
doorgetrokken totale  
profiel.  
De kruinhoogte van  
de zomerkades (dc)  
en het  
stroomvoerende  
oppervlak achter de  
zomerkades (df) zijn  
voor de referentie  
(ref)  $dc=14,33$   
 $m+NAP$  en  $df=1999$   
 $m^2$  en voor variant 1  
(Var1='wnf')  
 $dc=12,46$   $m+NAP$  en  
 $df=1818$   $m^2$ .*



*Figuur 33:  
Voorbeeld SOBEK-  
profiel Midden-Waal.  
De kruinhoogte van  
de zomerkades (dc)  
en het  
stroomvoerende  
oppervlak achter de  
zomerkades (df) zijn  
voor de referentie  
(ref)  $dc=10,71$   
 $m+NAP$  en  $df=1207$   
 $m^2$  en voor variant 1  
(Var1='wnf')  
 $dc=8,24$   $m+NAP$  en  
 $df=864$   $m^2$ .*



### 4.3.3

### SOBEK-RE

Alle modelinstellingen, inclusief initiële en randvoorwaarden, voor de morfologische berekeningen van variant 1 zijn overgenomen van het referentiemodel (zie Hoofdstuk 3).

## 4.4

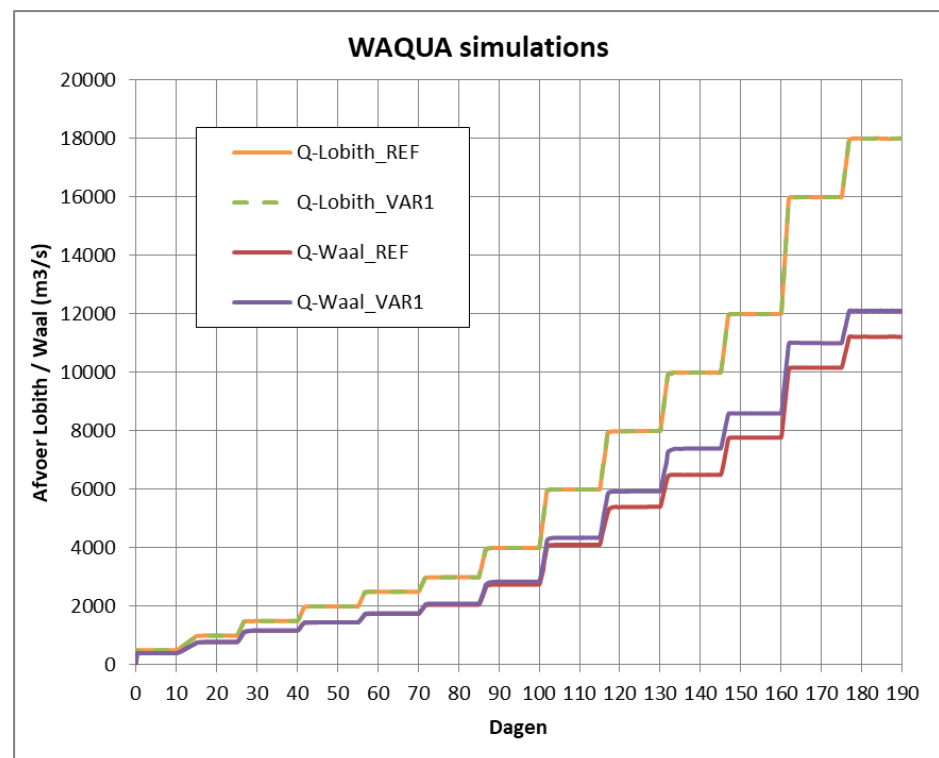
## Resultaten

### 4.4.1

### Hydraulica: vergelijking SOBEK-RE en WAQUA

De met SOBEK-RE berekende waterstanden zijn vergeleken met WAQUA. Daartoe is de Waalafvoer die volgt uit het WAQUA-Rijntakkenmodel, opgelegd aan het SOBEK-RE-model, zodat dezelfde Waalafvoeren worden gesimuleerd in het 2D (WAQUA) en 1D (SOBEK-RE) model. Het WAQUA model rekent met de volledige Rijntakken, en dus inclusief het splitsingspunt de Pannerdensch Kop, waarbij de afvoerdivisie wordt bepaald door de condities in de benedenstroomse takken. De berekende Waalafvoer in het WAQUA model is daarom verschillend in de referentie en de basisvariant, doordat de Waal in de variant is verruimd, en deze daardoor meer afvoer trekt dan in de referentie. Om hier inzicht in te krijgen zijn SOBEK-RE-berekeningen gemaakt voor dezelfde afvoerniveaus in de Waal als door WAQUA zijn berekend (Figuur 34). De methodiek voor het bepalen van de zomerbedafvoer uit WAQUA-berekeningen is beschreven in paragraaf 3.3.1.

*Figuur 34:  
Afvoer in WAQUA-  
berekeningen.*



De bijbehorende afvoerniveaus zijn weergegeven in Tabel 2. Daar is in de laatste kolom ook het verschil in afvoer weergegeven tussen variant en referentie (i.e. het verschil tussen de rode en paarse lijn in Figuur 34).

Tabel 2:  
Afvoeren voor  
vergelijking SOBEK  
en WAQUA.

| Afvoer<br>Boven-Rijn<br>(m <sup>3</sup> /s) | Afvoer Waal<br>(m <sup>3</sup> /s)<br>Referentie | Afvoer Waal<br>(m <sup>3</sup> /s)<br>Variant 1 | Vershil<br>(m <sup>3</sup> /s) var<br>minus ref |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 500                                         | 407                                              | 407                                             | 0                                               |
| 1.000                                       | 784                                              | 784                                             | 0                                               |
| 1500                                        | 1.180                                            | 1.179                                           | 0                                               |
| 2.000                                       | 1.454                                            | 1.456                                           | +2                                              |
| 2.500                                       | 1.746                                            | 1.765                                           | +19                                             |
| 3.000                                       | 2.061                                            | 2.097                                           | +35                                             |
| 4.000                                       | 2.753                                            | 2.849                                           | +96                                             |
| 6.000                                       | 4.112                                            | 4.353                                           | +241                                            |
| 8.000                                       | 5.412                                            | 5.935                                           | +524                                            |
| 10.000                                      | 6.499                                            | 7.405                                           | +906                                            |
| 12.000                                      | 7.777                                            | 8.605                                           | +828                                            |
| 16.000                                      | 10.167                                           | 11.004                                          | +836                                            |
| 18.000                                      | 11.222                                           | 12.112                                          | +890                                            |

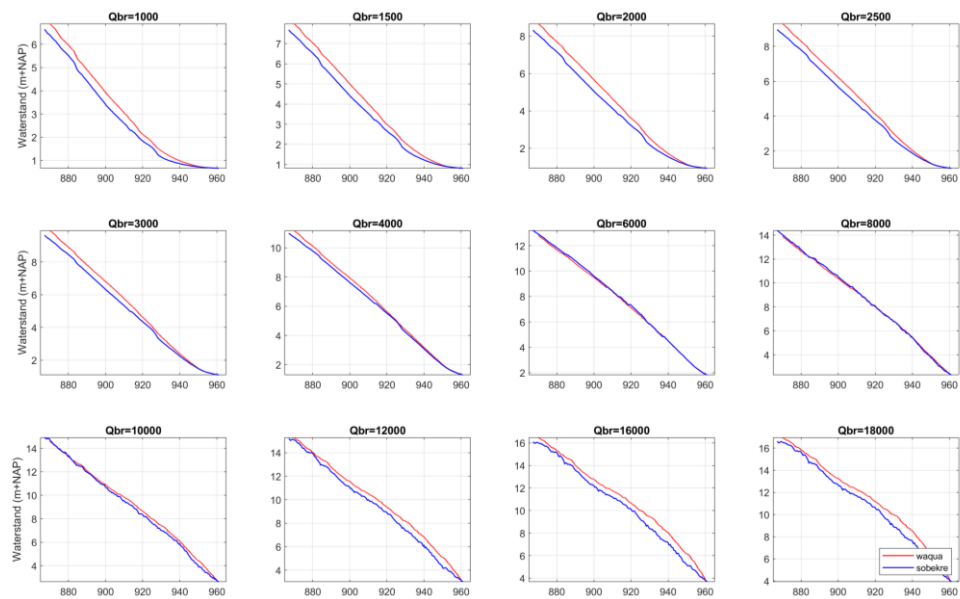
Het is vooral van belang dat het 1D-model het effect van de variant op de afvoerverdeling tussen hoofdgeul en uiterwaard goed (hier: zo goed mogelijk in overeenstemming met WAQUA) modelleert. Daarnaast moeten de waterstanden min of meer overeenkomen.

### Waterstanden

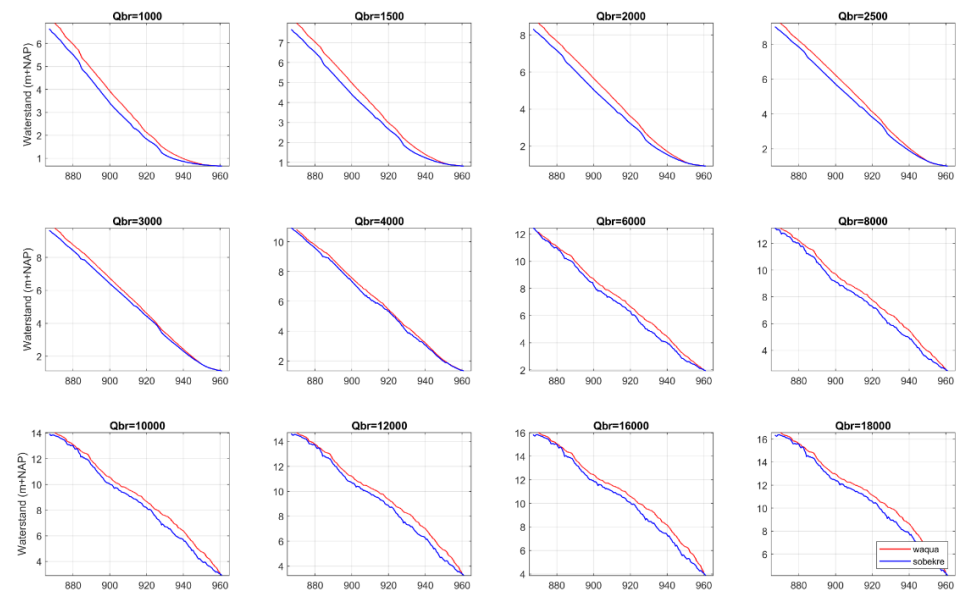
In hoofdstuk 1 is WAQUA vergeleken met zowel SOBEK-RE als het bestaande en vigerende SOBEK-3-model. Hier vergelijken we alleen de waterstanden tussen SOBEK-RE en WAQUA. Daarom is ook de referentie opnieuw opgenomen.

Figuur 35 geeft de waterstanden weer voor SOBEK-RE en WAQUA voor de referentie, en Figuur 36 voor variant 1. Zoals in Hoofdstuk 1 al is beschreven en toegelicht is de waterstand in SOBEK-RE voor lage en hoge afvoeren structureel lager dan in WAQUA. Dat geldt voor zowel de referentie als de basisvariant.

*Figuur 35:  
Waterstanden voor  
de referentie,  
SOBEK-RE en  
WAQUA.*



*Figuur 36:  
Waterstanden voor  
variant 1, SOBEK-RE  
en WAQUA.*

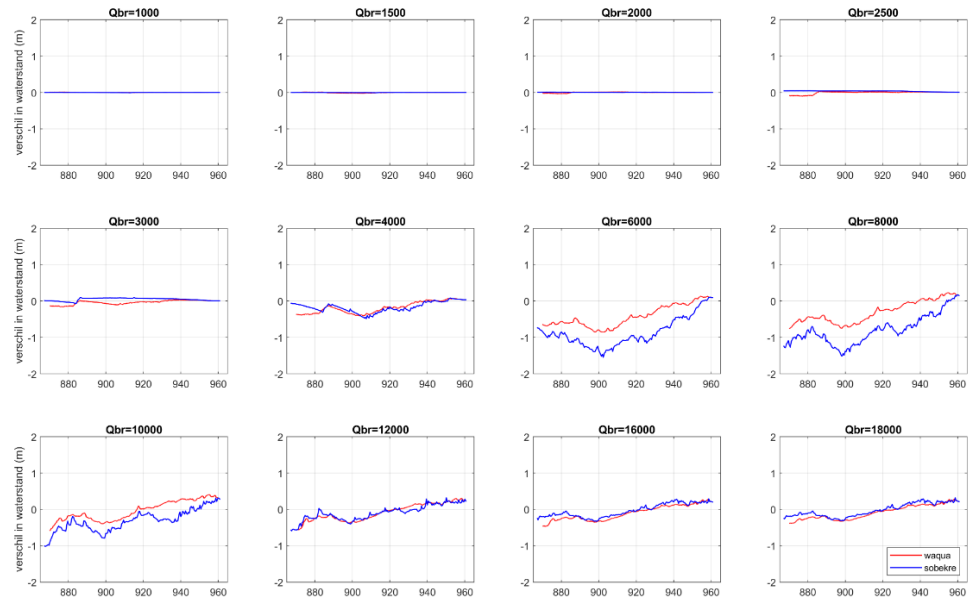


Eerder is al opgemerkt dat de referentie en de variant met verschillende afvoeren zijn doorgerekend, om te kunnen analyseren in hoeverre de waterstanden berekend met WAQUA en SOBEK-RE overeenkomen. Desalniettemin, is het effect van de variant op de waterstanden bij gelijke Boven-Rijnafvoer (voor WAQUA en SOBEK-RE), weergegeven in Figuur 37. Hierin valt op dat het effect bij Boven-Rijnafvoeren 6.000 en 8.000 m<sup>3</sup>/s in SOBEK-RE groter is dan in WAQUA, maar het patroon is wel gelijk (zie ook Figuur 38). Bij een Boven-Rijnafvoer van 8.000 m<sup>3</sup>/s, is de Waalafvoer voor variant1 ruim 500 m<sup>3</sup>/s groter dan voor de referentie (Tabel 2), Daarom ligt de waterstand hier kennelijk 1 à 2 decimeter hoger op de benedenrand.

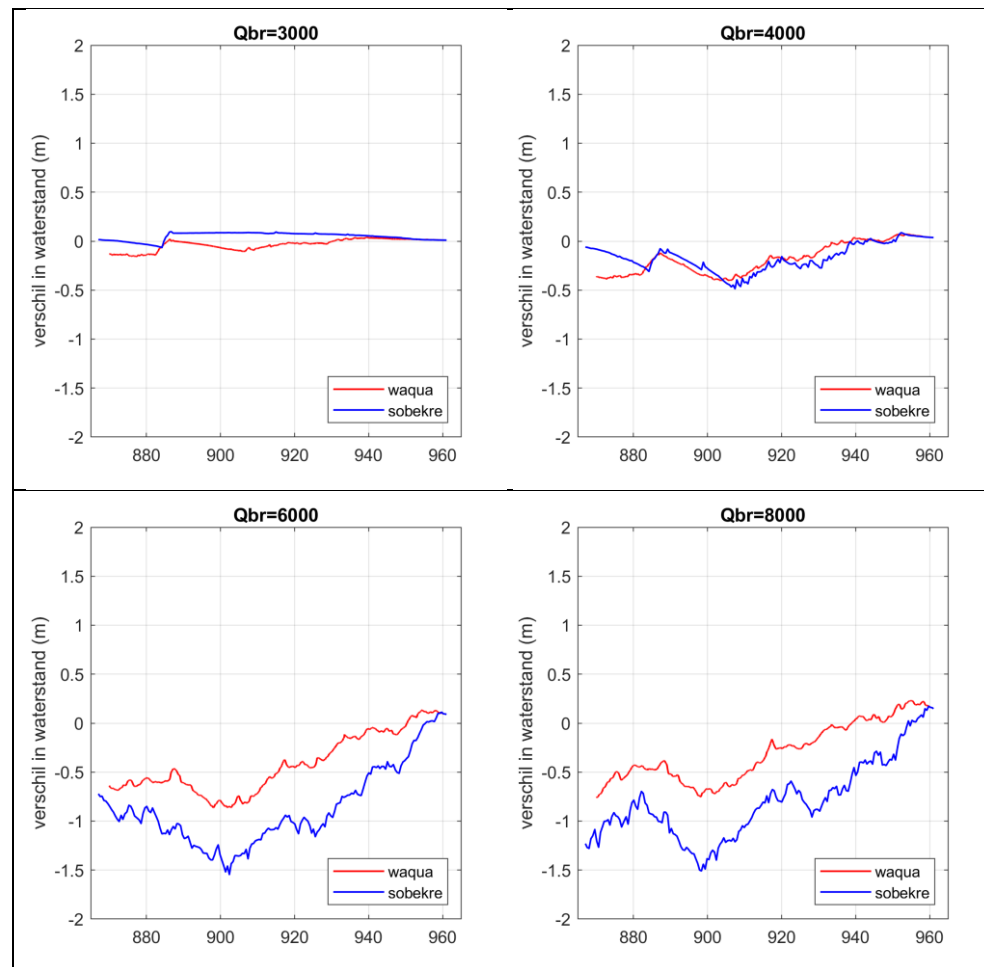
Een andere mogelijke verklaring voor de verschillen in effect bij de midden-hoge afvoeren van 6.000 en 8.000 m<sup>3</sup>/s is de invloed van de zomerkades.

Juist bij deze afvoeren stromen die juist wel of niet over in de referentie en variant. SOBEK en WAQUA verschillen aanzienlijk in de berekening van het effect. Hoewel de sedimenttransporten bij deze afvoeren groot zijn, is de gemiddelde duur ervan beperkt (9 dagen, zie ook Tabel 1), waardoor het effect op de totale morfologische respons beperkt is.

*Figuur 37:  
Effect variant 1 op  
waterstand (variant  
1 minus referentie).  
NB: de referentie en  
variant zijn niet met  
dezelfde Waalafvoer  
doorgerekend.*



*Figuur 38:  
Effect waterstand,  
uitvergroting.*

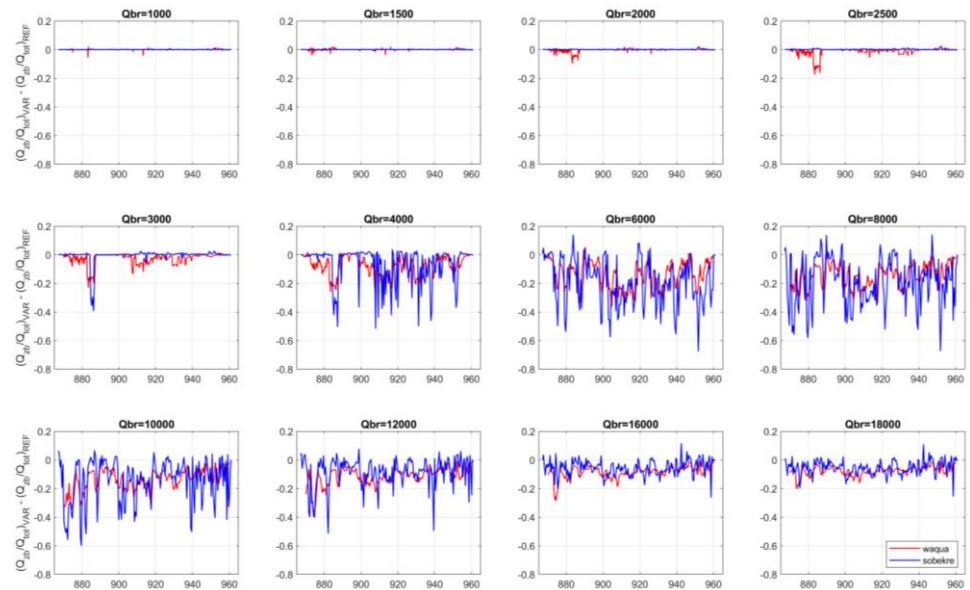


### Afvoer hoofdgeul/uiterwaard

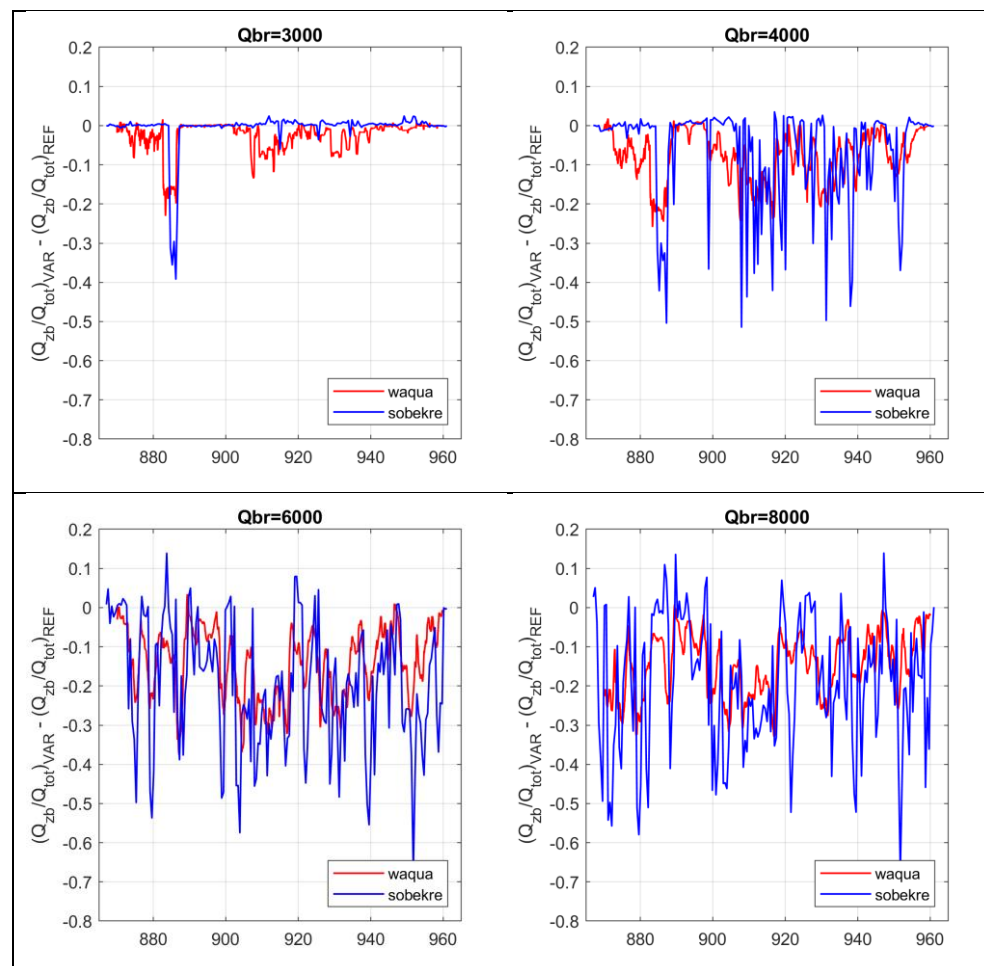
Figuur 39 vergelijkt het effect van variant 1 op de afvoerverdeling tussen hoofdgeul en uiterwaard. Dit is per dwarsprofiel berekend als  $(Q = \text{afvoer})$ :  $(Q_{\text{zomerbed}} / Q_{\text{totaal}})_{\text{VARIANT}}$  minus  $(Q_{\text{zomerbed}} / Q_{\text{totaal}})_{\text{REFERENTIE}}$ , ofwel (in figuur):  $(Q_{\text{zb}}/Q_{\text{tot}})_{\text{VAR}} - (Q_{\text{zb}}/Q_{\text{tot}})_{\text{REF}}$ .

Ook voor deze vergelijking geldt dat in de berekeningen de totale Waalafvoer voor de referentie en variant verschilt. De verschillen uit Figuur 39 zijn dus niet alleen het gevolg van de ingreep. Vanaf ongeveer 3.000 m<sup>3</sup>/s Boven-Rijnaafvoer (zie Tabel 2) heeft de rivierverruiming een effect op de afvoerverdeling. Figuur 40 geeft een uitvergroting voor 'morfologisch relevante' afvoeren.

*Figuur 39:  
Effect variant 1 op  
afvoerdeling  
hoofdgeul/  
uiterwaard (variant  
1 minus referentie).*



*Figuur 40:  
Uitvergroting van  
Figuur 39.*



De resultaten laten zien dat de berekende waterstanden in SOBEK-RE en WAQUA kunnen afwijken, maar dat de waterstandseffecten van verruiming voor een groot deel van het afvoerbereik in lijn liggen met elkaar. In het

afvoerbereik van Bovenrijnafvoeren van 6.000 m<sup>3</sup>/s en hoger worden de waterstandseffecten met SOBEK-RE overschat. Omdat die afvoeren in het gemiddeld jaarlijkse afvoerregime minder dan 10 dagen per jaar voorkomen, is het de verwachting dat dat voor de grootschalige morfologische respons geen grote consequenties heeft.

Voor een goede voorspeling van het morfologische effect van rivierverruiming is vooral (het effect op) de afvoerverdeling tussen hoofdgeul en uiterwaard van belang. Aangezien deze afvoerverdeling in WAQUA en SOBEK-RE voor een groot deel van het jaar redelijk in lijn liggen, is de verwachting dat de grootschalige morfologische effecten van rivierverruiming met de gevolgde aanpak goed voorspeld kunnen worden.

Daarbij zijn wel enige kanttekeningen te plaatsen. Bij de lagere afvoeren (Boven-Rijnafvoer tot 4.000 m<sup>3</sup>/s) zijn er vooral verschillen in waterstanden en afvoerverdeling op de Boven-Waal. Deze verschillen ontstaan waarschijnlijk doordat (neven)geulen lastig te vertalen zijn van 2D naar 1D, wat (bijvoorbeeld) kan leiden tot een verschillend moment van instromen, en daarmee ook een ander waterstandseffect en een andere afvoerverdeling. Meer waterstandsdeling (in SOBEK in vergelijking met WAQUA) bij hoge afvoeren geeft aan dat de verruiming in SOBEK meer effectief is. Het zal dus misschien een te optimistisch resultaat opleveren. Het geeft echter ook een overschatting van de stuweffecten die doorwerken in de Boven-Waal, en geeft daarmee juist een te negatief beeld van de verruiming daar.

#### 4.4.2

#### Effect variant 1 in SOBEK-RE

In de vorige paragraaf is geanalyseerd hoe (goed) de SOBEK-RE-resultaten overeenkomen met WAQUA. Daarbij verschilt echter de Waalafvoer tussen referentie en variant, omdat het uitgangspunt een WAQUA-Rijntakken-model is, waarbij de afvoerverdeling op het splitsingspunt niet is vastgelegd. De morfologische berekeningen worden voor referentie en variant(en) uitgevoerd met steeds een zelfde representatieve hydrograaf (Figuur 16). Om het effect van variant 1 zo zuiver mogelijk in beeld te brengen vergelijken we ook een aantal hydraulische parameters uit het eerste jaar van een morfologische berekening voor de 8 afvoerniveaus uit de hydrograaf; de morfologische aanpassingen in het systeem zijn dan nog beperkt.

Het effect van variant 1 (ten opzichte van de referentie) is voor de 8 afvoeren uit de jaarhydrograaf weergegeven in de volgende figuren:

- Figuur 41: absolute waterstanden voor referentie en variant,
- Figuur 42: effect op de waterstand,
- Figuur 43 en Figuur 44: effect op de stroomsnelheid in de hoofdgeul.

Figuur 42 geeft aan dat de basisvariant (= Variant 1) een flinke waterstandsverlaging in de Waal oplevert vanaf een Boven-Rijnafvoer van ongeveer 3.000 m<sup>3</sup>/s, wat betekent dat de rivierverruiming effectief is. Bij lagere afvoerniveaus blijft de waterstand, zoals gewenst, ongeveer gelijk aan die in de referentie. In Figuur 43 is goed te zien dat bij de hogere

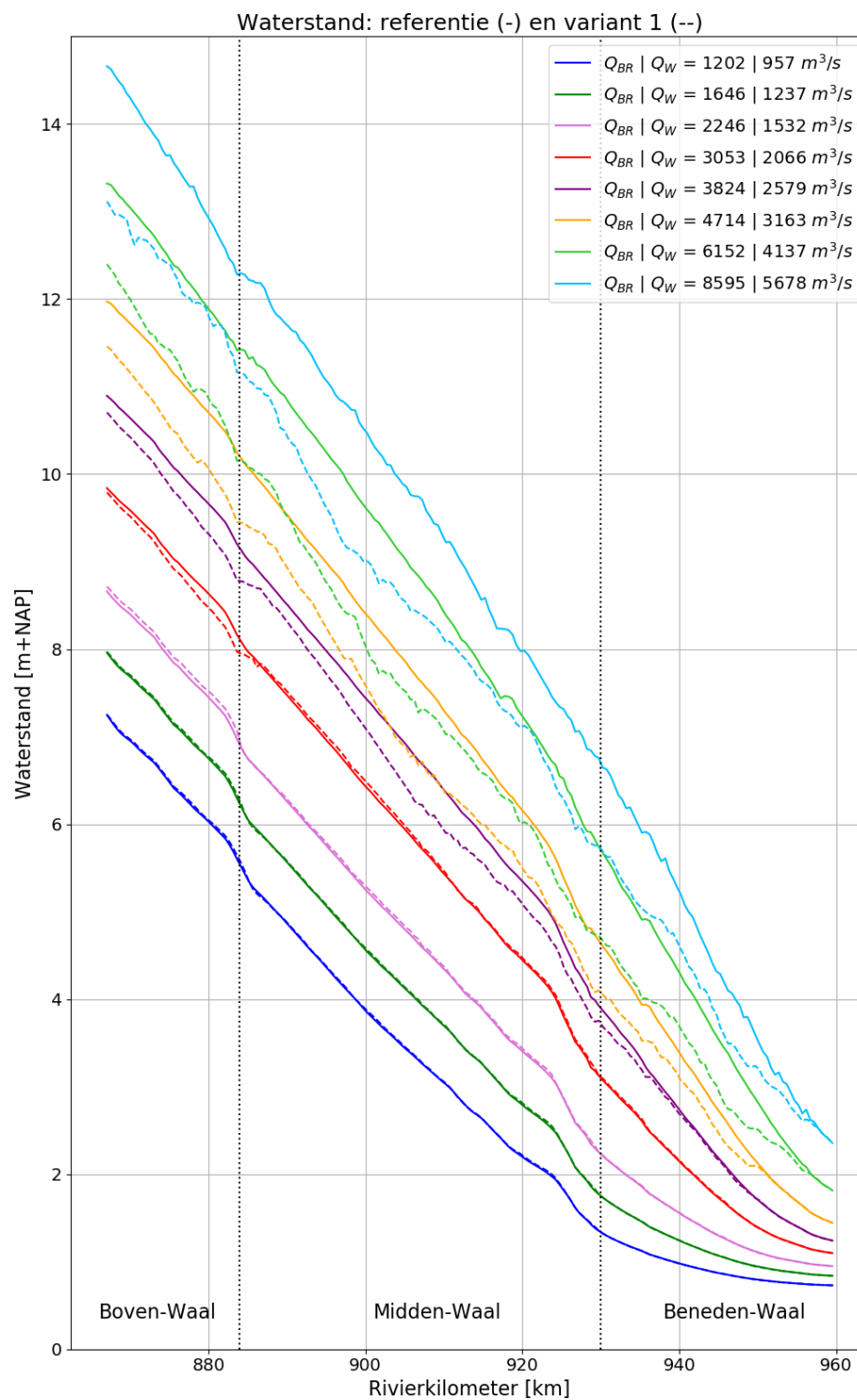


afvoerniveaus de verruiming leidt tot (de gewenste) afname van de stroomsnelheid in de hoofdgeul. Figuur 44 laat zien dat in de basisvariant de nevengeul Lent (bij lagere afvoeren) eerder meestroomt dan in de referentie; dit komt door de verlaging van de uiterwaard.

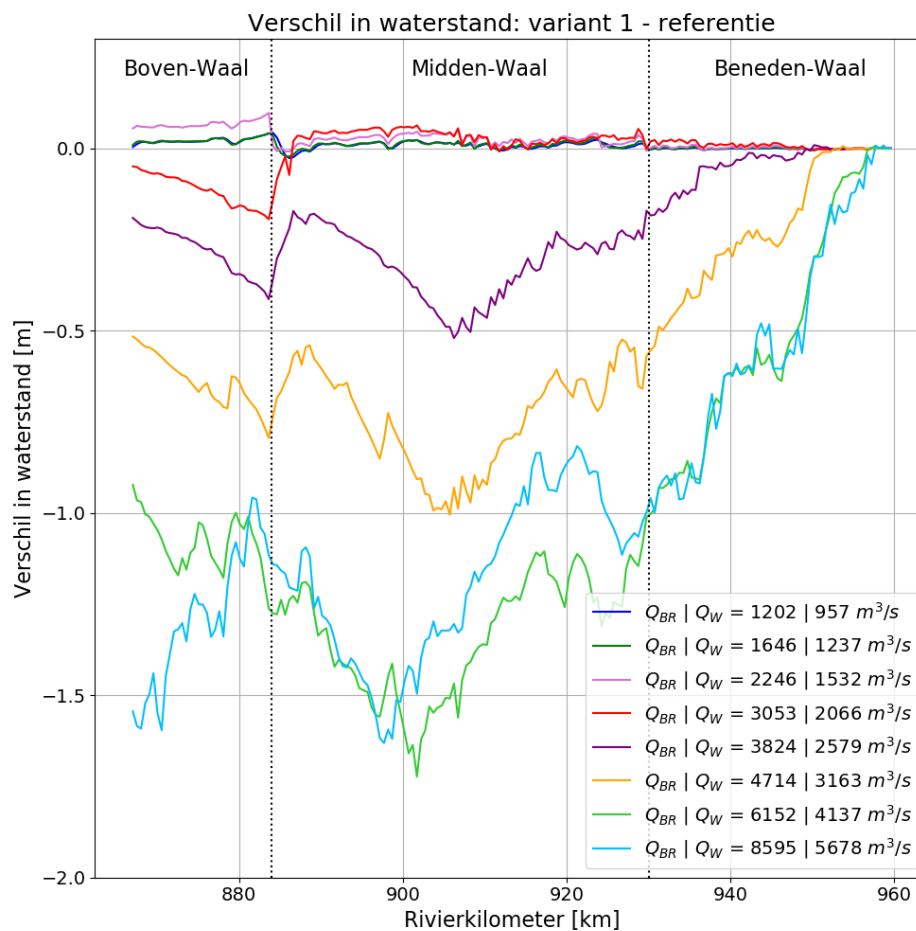
De waterstandsverlaging en verlaging van stroomsnelheden is het grootst op de Midden Waal tussen km 900 en km 920. Deze verlaging werkt bovenstrooms door ten gevolge van het stuweffect: de verlaagde waterstanden trekken de waterstanden bovenstrooms over tientallen kilometers ook omlaag. In de Boven-Waal zijn de waterstanden derhalve verlaagd en heeft de verruiming minder effect. Op de Boven-Waal nemen de stroomsnelheden in het zomerbed hierdoor zelf iets toe in plaats van af. De sedimenttransportcapaciteit neemt daarmee ook toe, wat leidt tot een versterking van het erosiegedrag.

In de figuren is ook te zien dat het effect op stroomsnelheden (en dus sedimenttransport) sterk variabel is over de Waal. Dat uit zich naar verwachting ook in de effecten op de bodemontwikkeling.

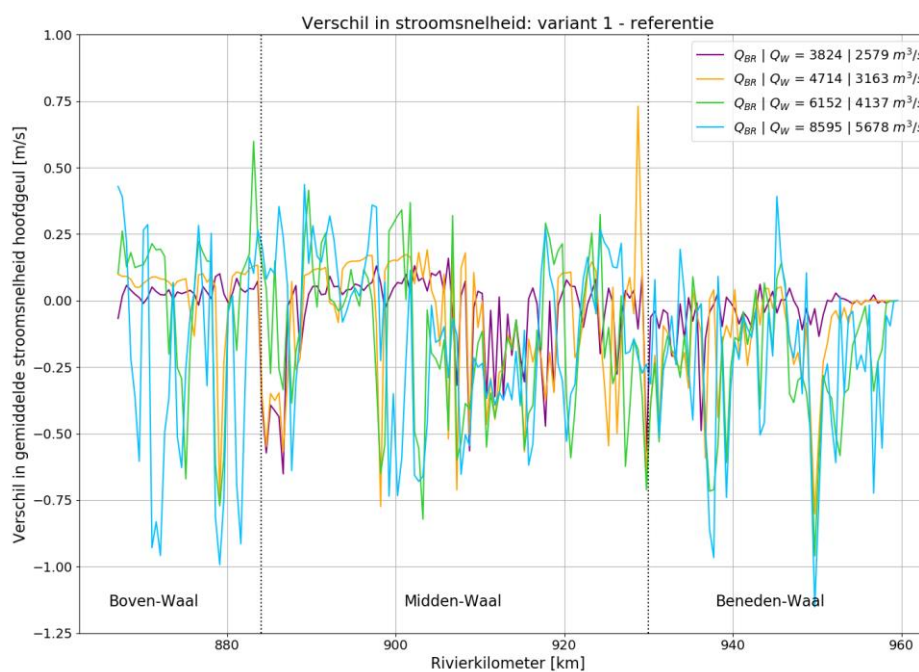
*Figuur 41:  
Waterstand voor  
referentie en variant  
1 voor 8  
afvoerniveaus uit de  
hydrograaf die is  
gebruikt voor de  
morfologische  
berekeningen.*



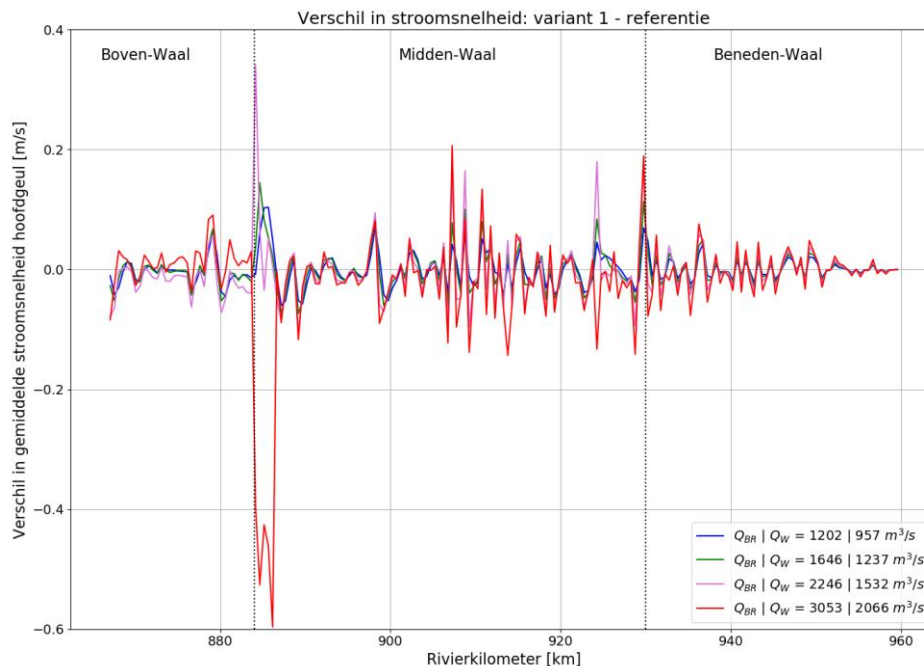
**Figuur 42:**  
Waterstandseffect  
voor variant 1 voor  
8 afvoerniveaus uit  
de morfologische  
hydrograaf.



**Figuur 43:**  
Effect op  
stroomsnelheid in  
hoofdgeul voor  
variant 1 voor 4  
hoogste  
afvoerniveaus uit  
hydrograaf.



**Figuur 44:**  
Effect op  
stroomsnelheid in  
hoofdgeul voor  
variant 1 voor 4  
laagste  
afvoerniveaus uit  
hydrograaf.

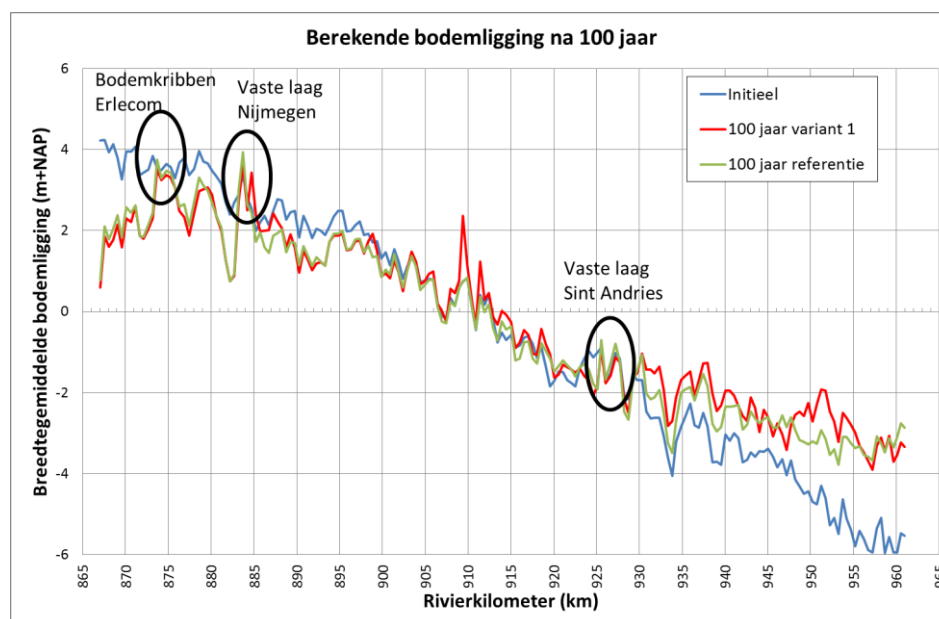


#### 4.4.3

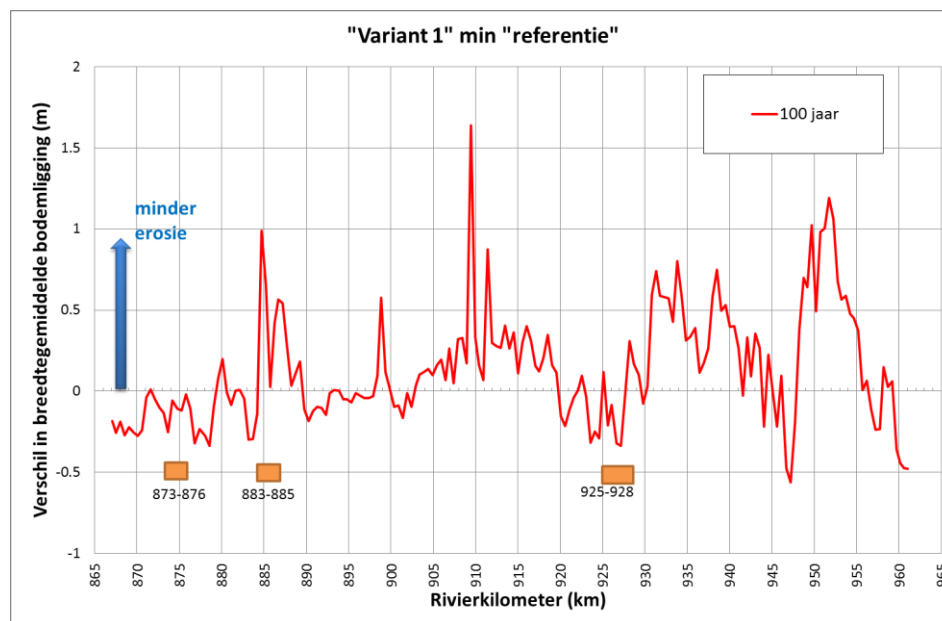
#### Effect op morfologie

Figuur 45 presenteert de bodemverandering over een periode van 100 jaar voor de referentie en de variant. Figuur 46 geeft het verschil tussen de variant en de referentie weer voor de situatie na 100 jaar. De figuur toont dat op de Boven-Waal de erosie door de verruiming van Variant 1 inderdaad toeneemt, omdat de stroomsnelheden op de Boven-Waal toenemen door de grote waterstandsverlaging op de Midden-Waal (zie voorgaande paragraaf).

**Figuur 45:**  
Ontwikkeling  
bodemligging variant  
1 na 100 jaar.

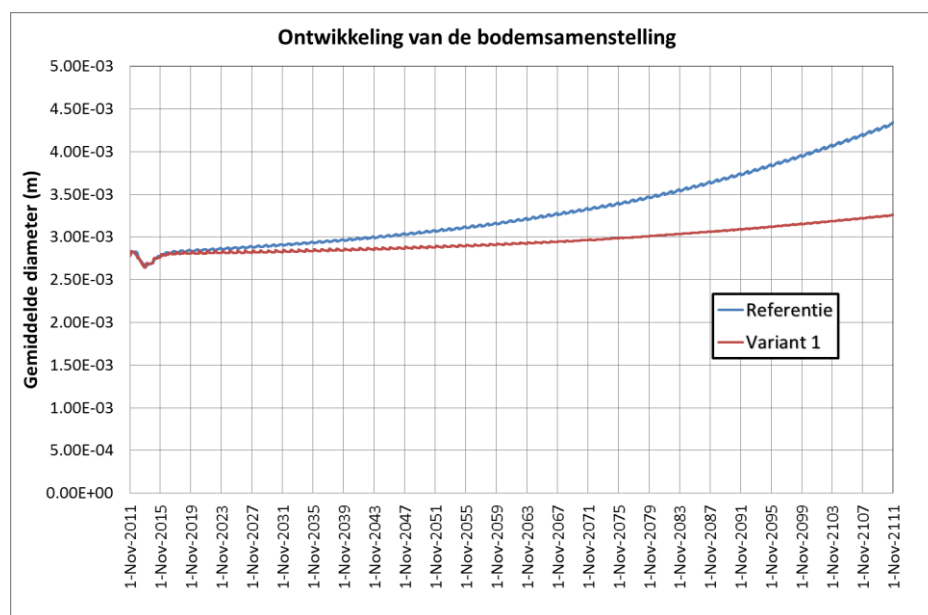


Figuur 46:  
Verschil in  
bodempligging  
(variant 1 minus  
referentie).



Figuur 47 geeft het verloop van de berekende gemiddelde korreldiameter als functie van tijd op de Boven-Waal, 3 km vanaf de bovenrand. De figuur toont dat door de verruiming de bodemsamenstelling in de tijd minder grof wordt in vergelijking met de referentie.

Figuur 47:  
Verloop van de  
berekende  
gemiddelde  
korreldiameter als  
functie van tijd op  
km 870.12 (Boven  
Waal), 3 km vanaf  
de bovenrand.



De volgende conclusies zijn getrokken ten aanzien van de morfologische aanpassingen Boven-Waal:

- De verruiming leidt niet tot reductie van de erosie, maar leidt zelfs lokaal tot méér erosie. De oorzaak van deze toename ligt deels in de forse verruiming en waterstandsval in de Midden-Waal. Dit zorgt voor verhoogde stroomsnelheden in de minder verruimde Boven-Waal door stuweffecten.

- De bodemsamenstelling op dit traject toont een geringere vergroving in Variant 1 dan in de referentie (Figuur 47). De transportcapaciteit blijft daardoor hoger, ondanks de verruiming. Dit effect van een afwijkende bodemsamenstelling draagt ook bij aan de geringere effectiviteit van de verruiming dan verwacht zou worden.

Conclusies ten aanzien van de morfologische veranderingen bij de vaste laag bij Nijmegen (km 883-885) zijn:

- Benedenstrooms van de vaste laag leidt de verruiming tot een flinke afname van de erosie.
- De waterstanden op de vaste laag worden vooral bepaald door de ontwikkeling van de waterstanden (en dus bodemligging) over een traject van enkele tientallen kilometers benedenstrooms van de vaste laag. De waargenomen reductie van erosie op dit traject zorgt dat waterdiepte op de laag minder snel afneemt.

Conclusies ten aanzien van het traject benedenstrooms vanaf circa km 900:

- De Midden-Waal (tot km 920) toont gemiddeld een reductie van de erosie, en zelfs op een aantal locaties een extra sedimentatie. Op het aanzandingstraject benedenstrooms van circa km 930 neemt de sedimentatie nog verder toe na de verruiming. Op het traject tussen km 920 en km 930 is sprake van een geringe afname van de sedimentatie en enige extra erosie na 100 jaar in Variant 1.

De algehele conclusie voor de morfologie voor Variant 1, ten opzichte van de referentie, na een periode van 100 jaar:

- Verruiming werkt in tegengaan erosie in de Midden-Waal, maar in mindere mate voor de Boven-Waal.
- De morfologie is gevoelig voor de variatie in verruiming en daaruit volgende veranderingen in stroomsnelheid. De invloed op het reduceren van de erosie is dus variabel langs de rivier.
- Uitdaging is het vinden van de juiste balans van de verruiming (welke afvoer start het, welke mate) en de mate van morfologische verandering. Dit is verder onderzocht in het volgende hoofdstuk.

# 5 Gevoeligheidsanalyses

## 5.1 Inleiding

Op basis van het referentiemodel (Hoofdstuk 1) en de basisvariant (Hoofdstuk 1), onderzoeken we in dit hoofdstuk verschillende maatregelen om bodemerosie van de Waal te remmen. Hierbij onderscheiden we verschillende trajecten van de rivier:

- Boven-Waal: tot 884 kilometer,
- Midden-Waal: van 884 tot 930 kilometer,
- Beneden-Waal: na 930 kilometer.

De simulatieresultaten van de basisvariant (Figuur 45) laten zien dat het erosieproces van de Midden-Waal kan worden geremd door grootschalige verruiming van de uiterwaarden. We observeren dat rivierverruiming een gering of averechts effect heeft op het erosieproces van de Boven-Waal. Op dit traject is de bodemerosie van de basisvariant versterkt ten opzichte van de bodemontwikkeling van het referentiemodel. De bodemhoogte van de Beneden-Waal neemt in beide simulaties toe over een periode van 100 jaar. Op de Beneden-Waal leidt rivierverruiming (basisvariant) tot meer sedimentatie dan handhaving van de huidige bodemligging (referentiemodel).

Een gelijkmatige verandering van het systeem helpt om ongewenste erosie en aanzanding op de Waal tegen te gaan. Dit hoofdstuk betreft een gevoeligheidsanalyse naar de bodemontwikkeling van de Waal door rivierverruiming. We kijken hierbij naar het verruimen van verschillende trajecten van de Waal, en naar het niveau waarop rivierverruiming wordt toegepast.

De focus van deze studie ligt op het tegengaan van bodemerosie. Omdat de simulatieresultaten duiden op sedimentatie van de Beneden-Waal voor zowel het referentiemodel als de basisvariant, onderzoeken we in deze studie rivierverruiming op de Beneden-Waal niet verder. In Paragraaf 5.2 berekenen we de bodemontwikkeling bij verruiming van de Boven- en Midden-Waal, maar handhaving van de huidige bodemligging van de Beneden-Waal.

In Paragraaf 5.3 onderzoeken we of meer rivierverruiming van de Boven-Waal leidt tot remming van het erosieproces op dit traject, en welke effecten deze maatregel heeft op de bodemontwikkeling van de Midden-Waal. Door rivierverruiming op een lager hoogteniveau wordt de stroomsnelheid in het zomerbed ook bij lagere afvoeren van de Waal verminderd wat kan leiden tot minder erosie. Deze maatregel duiden we aan met extra verruiming stap 1. In Paragraaf 5.4 onderzoeken we het effect van extra verruiming van het rivierbed ten opzichte van de rivierverruiming in stap 1. Deze maatregel duiden we aan met extra rivierverruiming stap 2. Hiermee kijken we naar de

bodemontwikkeling wanneer de afvoer voor nog langere periodes van het jaar deels door de verruimde uiterwaarden stroomt.

Rivierverruiming is niet voldoende om het erosieproces van de Waal volledig tegen te gaan. In Paragraaf 5.5 onderzoeken we de combinatie van rivierverruiming met sediment management, zoals ook wordt voorgesteld door Verweij (2016) als uitkomst van de MIRT-verkenning DVRII. We maken een schatting van het benodigde suppletievolume om de bodemhoogte van de Waal stabiel te houden (met en zonder de aanname dat de rivierverruiming ook wordt uitgevoerd). Een vergelijking tussen beide analyses geeft aan hoeveel suppletievolume 'bespaard' kan worden door ook rivierverruiming uit te voeren.

## 5.2 Geen verruiming van de Beneden-Waal

Op basis van simulatieresultaten wordt verwacht dat de bodemhoogte van de Beneden-Waal de komende 100 jaar toeneemt, ongeacht rivierverruiming of handhaving van de huidige bodem (referentie: Figuur 22 en variant 1: Figuur 45). Daarom onderzoeken we in deze paragraaf de bodemontwikkeling van de Waal wanneer de Boven- en Midden-Waal worden verruimd, maar de Beneden-Waal niet.

### 5.2.1 Variant 2 – Boven-Waal: VAR1, Midden-Waal: VAR1, Beneden-Waal: REF

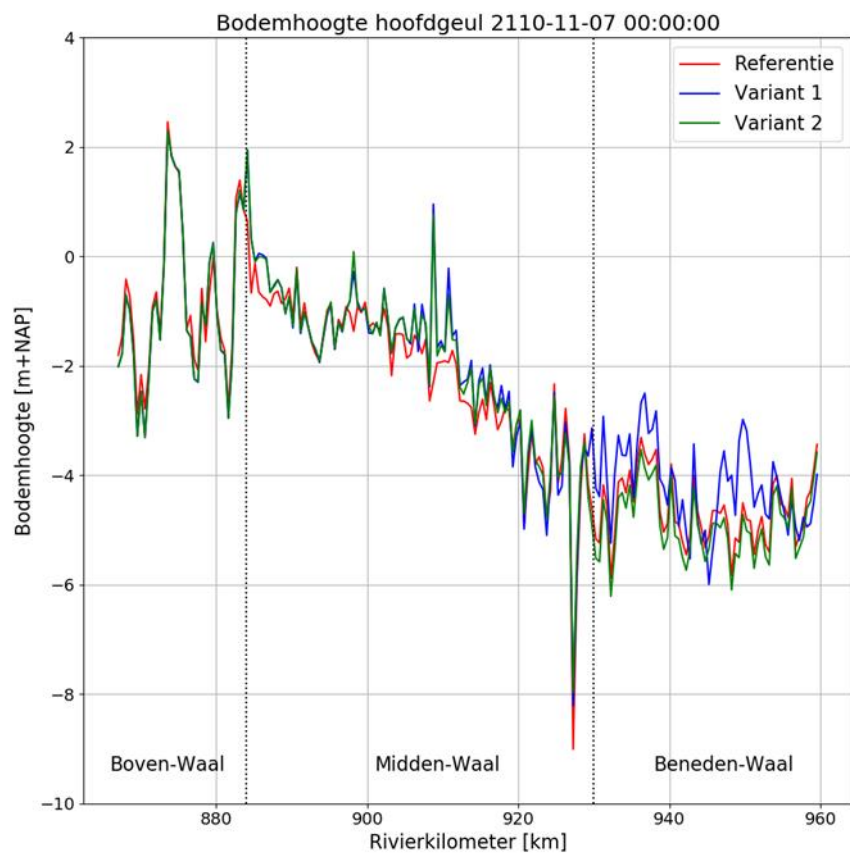
De simulatieresultaten in Figuur 48 en Figuur 49 laten zien dat de remming van erosie op de Midden-Waal intact blijft wanneer de Beneden-Waal niet wordt verruimd. Door enkel de Boven- en Midden-Waal te verruimen (variant 2) vindt minder sedimentatie plaats op de Beneden-Waal. Dit heeft twee oorzaken:

- In vergelijking met het referentiemodel is door de verruiming het sedimenttransport op de Midden-Waal lager en daarmee de erosie minder. Hierdoor stroomt minder sediment naar de Beneden-Waal en treedt op dit traject minder sedimentatie op.
- In vergelijking met de basisvariant (variant 1) is er geen verruiming van de Beneden-Waal. De sedimenttransportcapaciteit blijft daar dan gelijk aan de referentiesituatie, waardoor er op dit traject geen extra aanzanding plaats vindt.

De simulatieresultaten laten zien dat variant 2 niet of nauwelijks leidt tot een extra reductie van erosie van de Boven- en Midden-Waal in vergelijking met variant 1. Daaruit kan worden geconcludeerd dat de invloed van ingrepen op de Beneden-Waal op deze tijdschaal beperkt zijn. In volgende simulaties in dit hoofdstuk onderzoeken we het effect van meer rivierverruiming op het proces van erosie en sedimentatie.

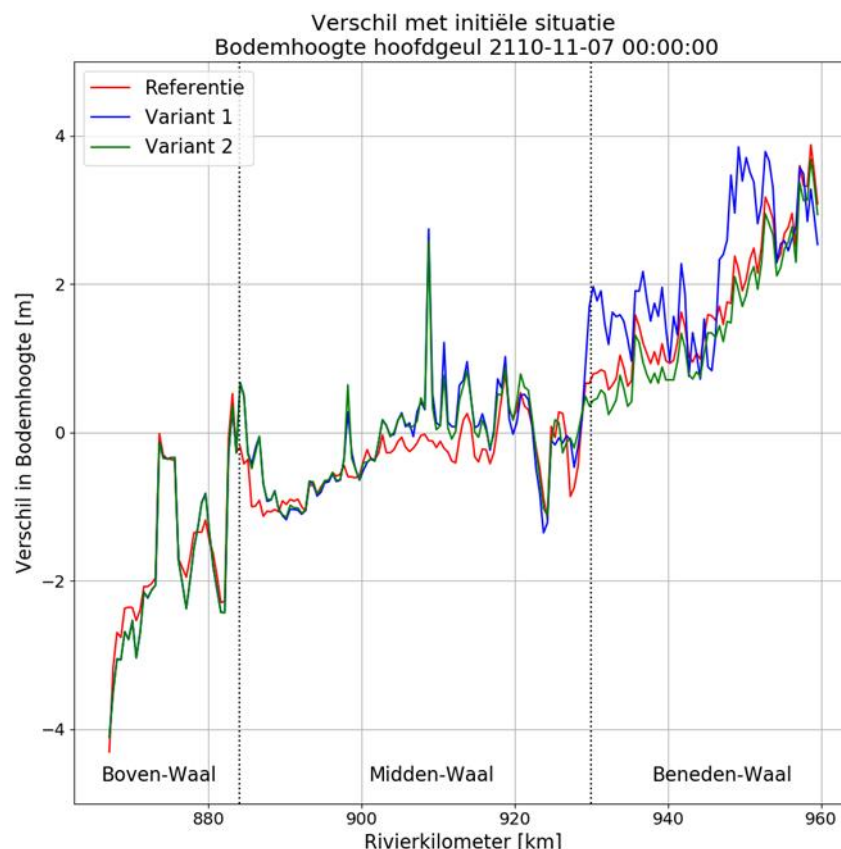


*Figuur 48:  
Bodemhoogte van  
de hoofdgeul na 100  
jaar<sup>4</sup> voor het  
referentiemodel,  
variant 1 en variant  
2.*



<sup>4</sup> Doordat de hydrograaf voor 365 dagen loopt in plaats van 365,25 dagen, is dit niet precies het effect na 100 jaar maar na 99 jaar.

*Figuur 49:  
Verschil van de  
bodemhoogte van de  
hoofdgeul na 100  
jaar met de initiële  
situatie voor het  
referentiemodel,  
variant 1 en variant  
2.*



## 5.3

### Meer verruiming van de Boven-Waal: Stap 1

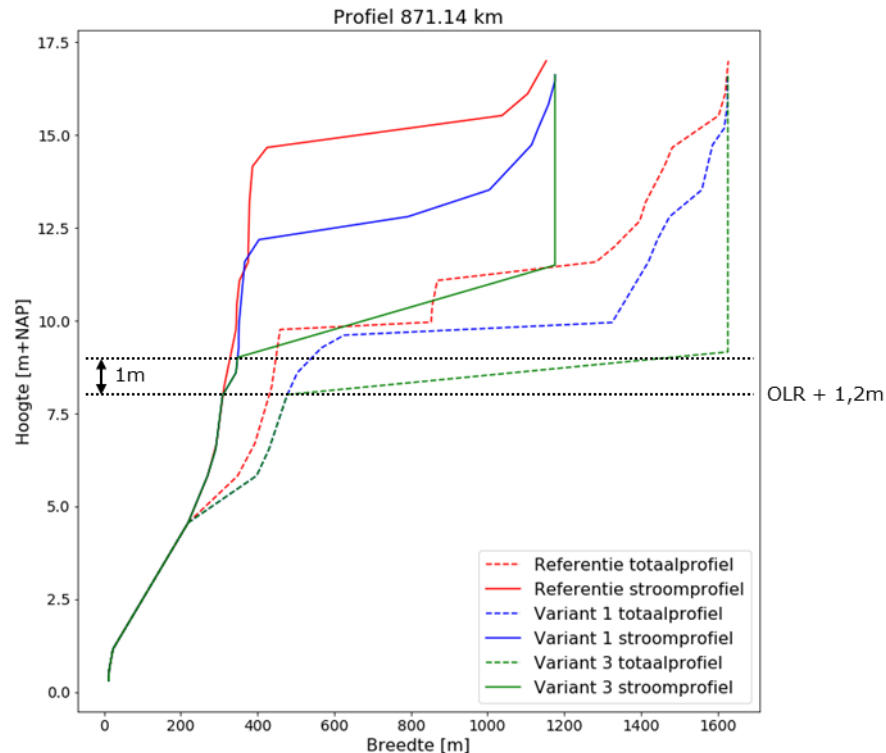
In de simulatieresultaten van variant 1 en 2 observeren we geen reductie van erosie of zelfs een geringe toename van erosie van de Boven-Waal (Figuur 48 en Figuur 49). In deze paragraaf onderzoeken we of meer rivierverruiming leidt tot remming van erosie op dit traject. Hiervoor worden nieuwe, meer verruimde, bodemprofielen gegenereerd. Hierbij maken we geen gebruik van Baseline of WAQ2PROF maar passen we de SOBEK-profielen direct aan met behulp van een Python-script. Verder gaan we er weer vanuit dat de afvoerverdeling op de Pannerdensche Kop niet wijzigt, bijvoorbeeld doordat op andere takken tegelijkertijd wordt verruimd. Deze gevoeligheidsberekeningen zijn bedoeld om het effect van grootschalige rivierverruiming op een lager niveau in beeld te brengen.

We verruimen de stroomvoerende bodemprofielen van de Boven-Waal vanaf een niveau van OLR+2,2 meter. Hierbij worden de OLR-standen van 2012 gebruikt<sup>5</sup>. Figuur 50 laat het nieuwe bodemprofiel (variant 3), en de profielen van het referentiemodel en variant 1 op rivierkilometer 871.14 km zien. Het nieuwe stroomvoerende bodemprofiel heeft een minimale dwarshelling van 3:1000 op het vlakke deel van de uiterwaard. Deze dwarsverhoudingen zijn gekozen omdat het voor SOBEK noodzakelijk is dat opeenvolgende niveaus in

<sup>5</sup> De OLR-standen worden iedere 10 jaar officieel vastgesteld. OLR2012 is het vigerende OLR.

de breedte-diepte tabellen voor dwarsprofielen altijd oplopend moeten zijn. De oppervlaktes achter de zomerkades zijn verwijderd uit de nieuwe bodemprofielen. De aanname is gedaan dat er geen zomerkades meer blijven staan bij deze enorme verruimingen en de extra stroomvoering erachter dus al in de verruimde profielen is opgenomen.

*Figuur 50:  
Bodemprofielen van  
referentie, variant 1  
en variant 3 op  
rivierkilometer  
871.14 km.*



### 5.3.1

#### Variant 3 – Boven-Waal: VAR3, Midden-Waal: VAR1, Beneden-Waal: REF

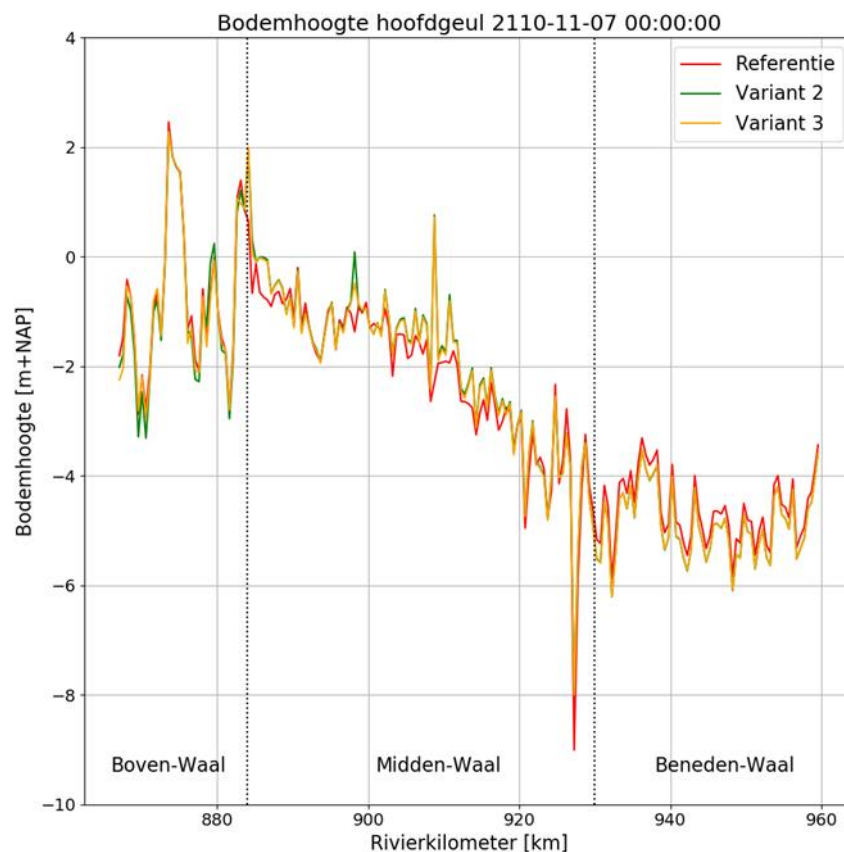
We vergelijken de resultaten van variant 2 met verdere rivierverruiming van de Boven-Waal (variant 3). Figuur 51 en Figuur 52 laten zien dat meer rivierverruiming nauwelijks effect heeft op het afremmen van erosie van de Boven-Waal. De resultaten van variant 3 zijn vergelijkbaar met de resultaten van variant 2.

Mogelijke oorzaken hiervan:

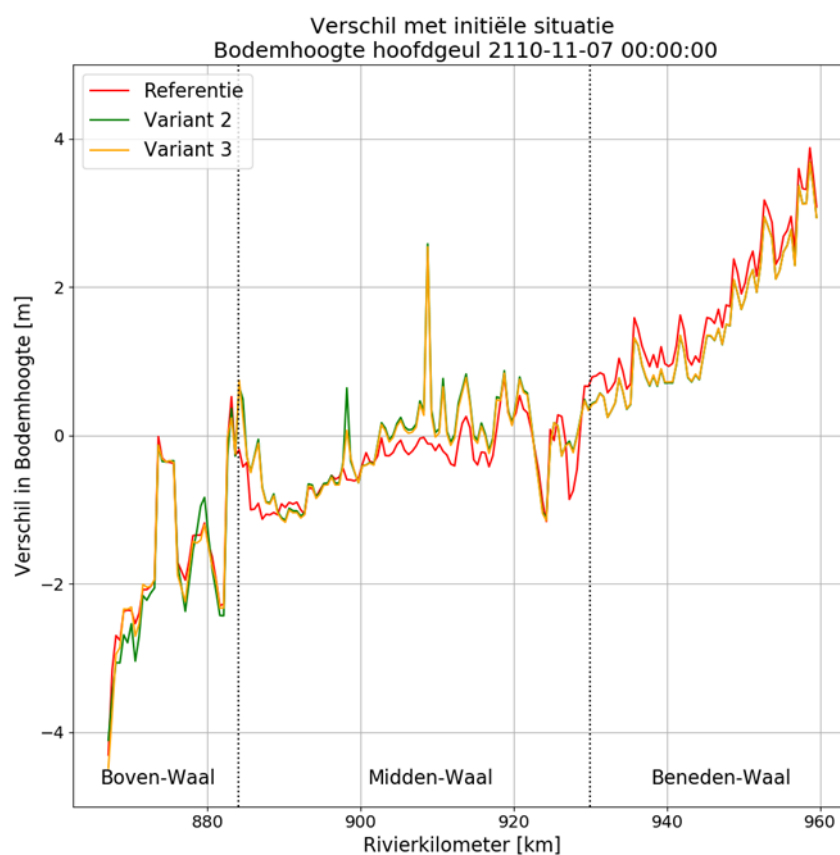
- Invloed van verandering in bodemsamenstelling die bijdragen aan het gelijk blijven van de sedimenttransportgradiënten die de bodemverandering aandrijven.
- Te korte periodes van hoge afvoer waarbij een deel van de Waal-afvoer door de uiterwaarden stroomt, zodat grootschalige morfologische effecten beperkt blijven. Figuur 53 toont de waterstanden op rivierkilometer 871.14 km als functie van de tijd voor verschillende afvoerniveaus. De rivierverruiming stroomt in bij waterstanden hoger dan OLR+2,2 m+NAP. De hoge afvoerniveaus waarbij dit gebeurt, vinden maar korte periodes van het jaar plaats.

- Doorgaande bodemerosie van de Boven-Waal zorgt ervoor dat de stroming zich steeds meer terugtrekt in het zomerbed. De verruiming van het profiel wordt daardoor niet benut. Figuur 53 toont dat de waterstanden op rivierkilometer 871.14 km steeds lager worden door bodemerosie. Voortgaande bodemerosie heeft als gevolg dat de rivierverruiming bij afvoerniveau  $Q_{\text{Waal}} = 2.066 \text{ m}^3/\text{s}$  na 100 jaar niet meer instroomt.
- Door verruiming van de Midden-Waal nemen de waterstanden op de Boven-Waal ook af, waardoor het effect van verruiming op morfologisch relevante afvoeren op de Boven-Waal kleiner is. Dit wordt verder onderzocht in variant 4 door de Midden-Waal niet te verruimen maar daar (net als voor de Beneden-Waal) de huidige bodemligging (profielen van het referentiemodel) te handhaven.

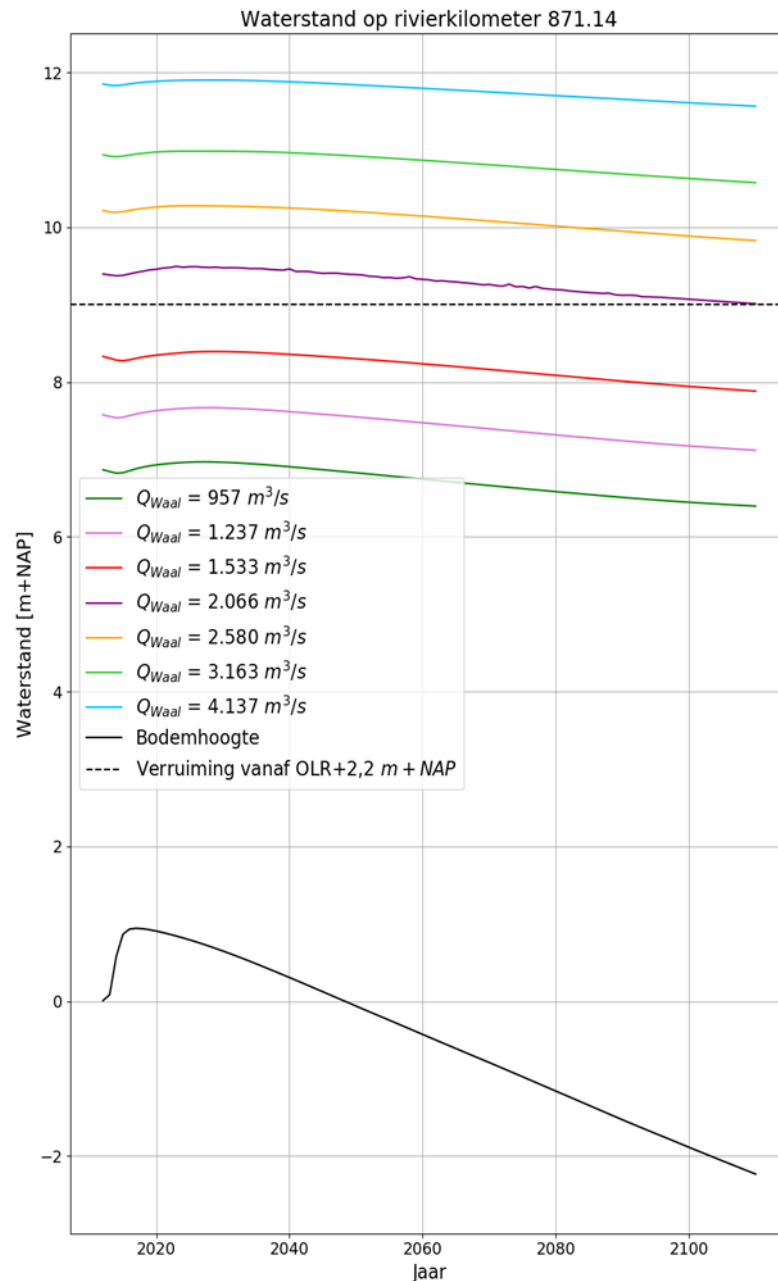
*Figuur 51:  
Bodemhoogte van  
de hoofdgeul na 100  
jaar voor het  
referentiemodel,  
variant 2 en variant  
3.*



*Figuur 52:  
Verskil van de  
bodemhoogte van de  
hoofdgeul na 100  
jaar met de initiële  
situatie voor het  
referentiemodel,  
variant 2 en variant  
3.*



**Figuur 53:**  
Waterstanden op  
rivierkilometer  
871,14 km als  
functie van de tijd  
voor verschillende  
afvoeren van de  
Waal voor variant 3.  
Rivierverruiming  
vanaf een niveau  
van OLR + 2,2 m =  
9 m.

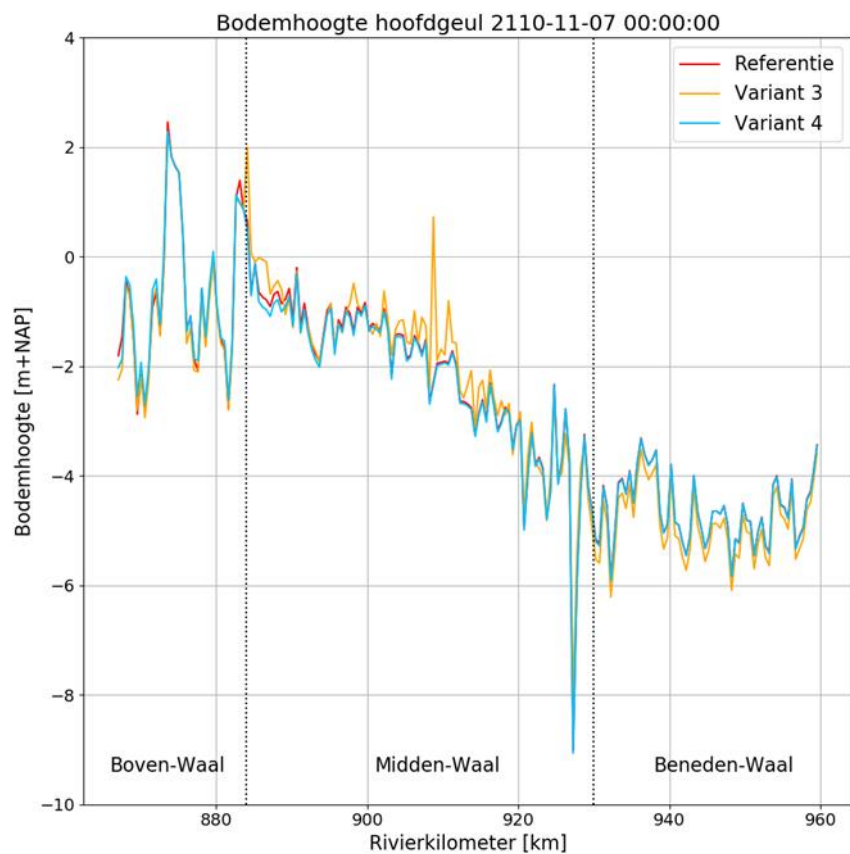


### 5.3.2

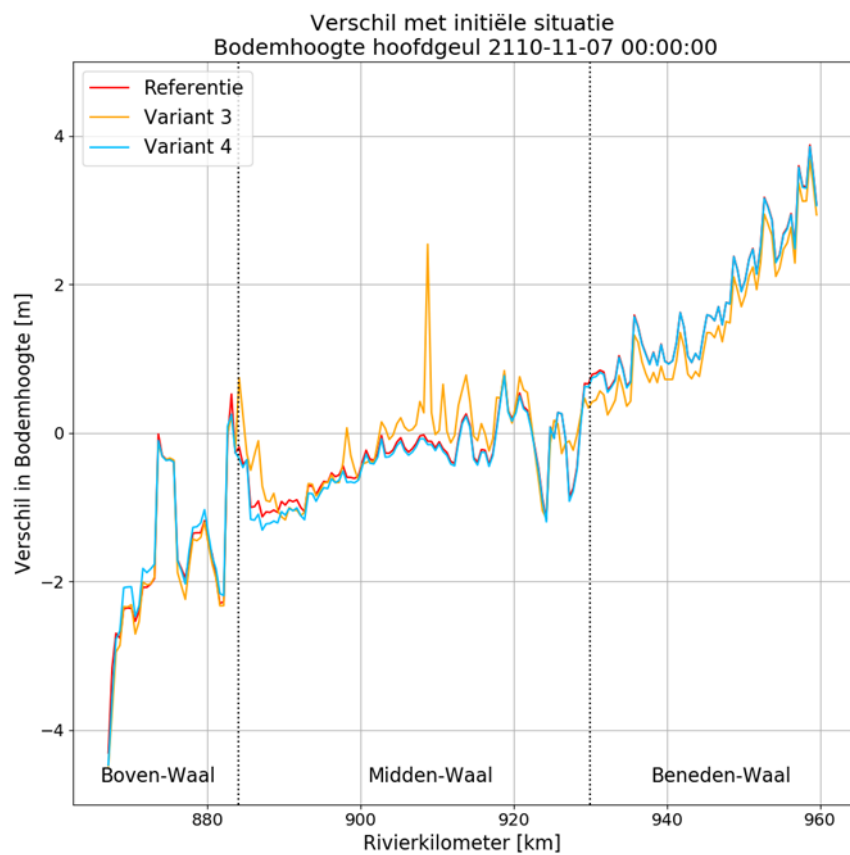
#### Variant 4 – Boven-Waal: VAR3, Midden-Waal: REF, Beneden-Waal: REF

Deze variant is vergelijkbaar met variant 3, alleen wordt de huidige bodemligging op de Midden-Waal gehandhaafd. Figuur 54 en Figuur 55 laten zien dat de resultaten van variant 4 vergelijkbaar zijn met de resultaten van het referentiemodel. Op de Boven-Waal wordt erosie iets geremd door rivierverruiming maar de effecten zijn lokaal en relatief beperkt. Door handhaving van de huidige bodemligging op de Midden-Waal vindt meer sedimentatie plaats op de Boven-Waal in vergelijking met variant 3 waarin ook de Midden-Waal is verruimd.

**Figuur 54:**  
Bodemhoogte van  
de hoofdgeul na 100  
jaar voor het  
referentiemodel,  
variant 3 en variant  
4.

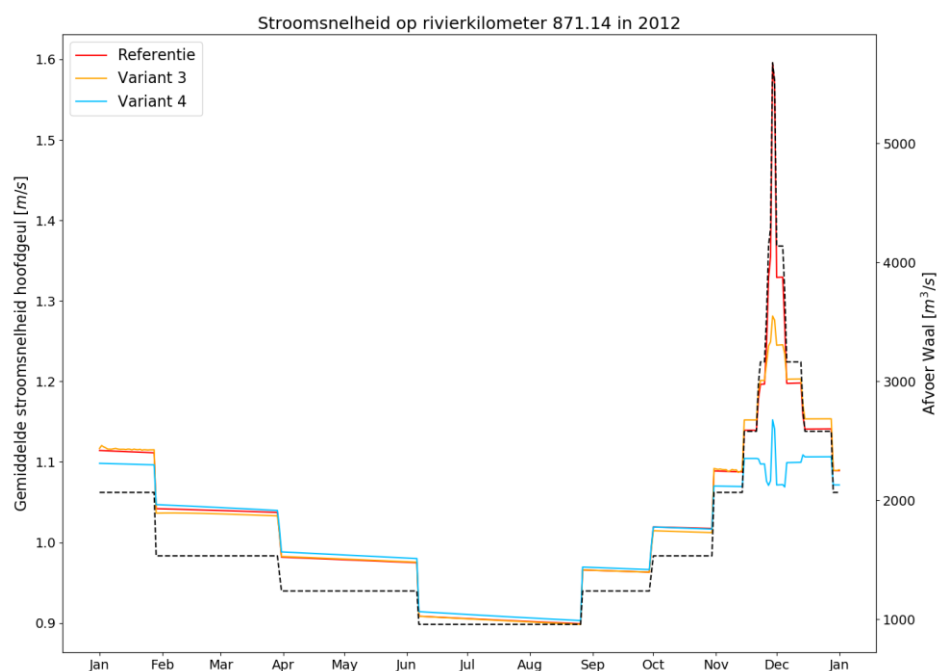


**Figuur 55:**  
Verschil van de  
bodemhoogte van de  
hoofdgeul na 100  
jaar met de initiële  
situatie voor het  
referentiemodel,  
variant 3 en variant  
4.



Over het algemeen hebben de maatregelen van variant 3 en variant 4 weinig effect op de reductie van erosie op de Boven-Waal. Figuur 56 laat zien dat de Waal in variant 4 deels door de uiterwaarden stroomt bij een afvoerniveau  $Q_{\text{Waal}} > 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . De gemiddelde stroomsnelheid in de hoofdgeul wordt dan verlaagd. Een afvoer  $Q_{\text{Waal}} > 2000$  geldt voor 89 dagen per jaar (31 oktober t/m 27 januari) voor de gekozen hydrograaf. Ondanks deze substantiële periode en aanzienlijke invloed op het jaartransport van de hoge afvoeren, leidt dit niet tot een substantiële afname van de berekende erosie over een periode van 100 jaar. Hierbij speelt het complexe samenspel van bodemverandering en bodemsamenstelling een rol. Kennelijk is een duur van 89 dagen per jaar te weinig om substantiële morfologische veranderingen teweeg te brengen. Het aantal dagen per jaar met een afvoer  $Q_{\text{Waal}} > 2000$  is kennelijk een belangrijke parameter.

*Figuur 56:  
Stroomsnelheid op  
rivierkilometer  
871.14 km  
gedurende 2012.  
Zwart gestreepte lijn  
is de afvoer van de  
Waal (op rechter-  
as).*



Om rivierverruiming een groter deel van het jaar de erosie en sedimentatie te laten beïnvloeden, moet de rivierverruiming een groter deel van het jaar meestromen. Om dit te realiseren moet verruiming worden gerealiseerd vanaf een lager waterstandsniveau. Dit onderzoeken we verder in Paragraaf 5.4.

## 5.4

### Meer verruiming van de Boven-Waal: Stap 2

In Figuur 35 zijn de gesimuleerde waterstanden door SOBEK-RE en WAQUA voor verschillende afvoerniveaus van de Boven-Rijn vergeleken. Over het algemeen geldt bij hoge afvoeren<sup>6</sup>:

$$Q_{\text{Waal}} \approx \frac{2}{3} Q_{\text{Boven-Rijn}}$$

<sup>6</sup> Bij afvoeren bij Lobith lager dan ca.  $4.000 \text{ m}^3/\text{s}$  gaat er relatief meer water naar de Waal door de werking van stuw Driel.

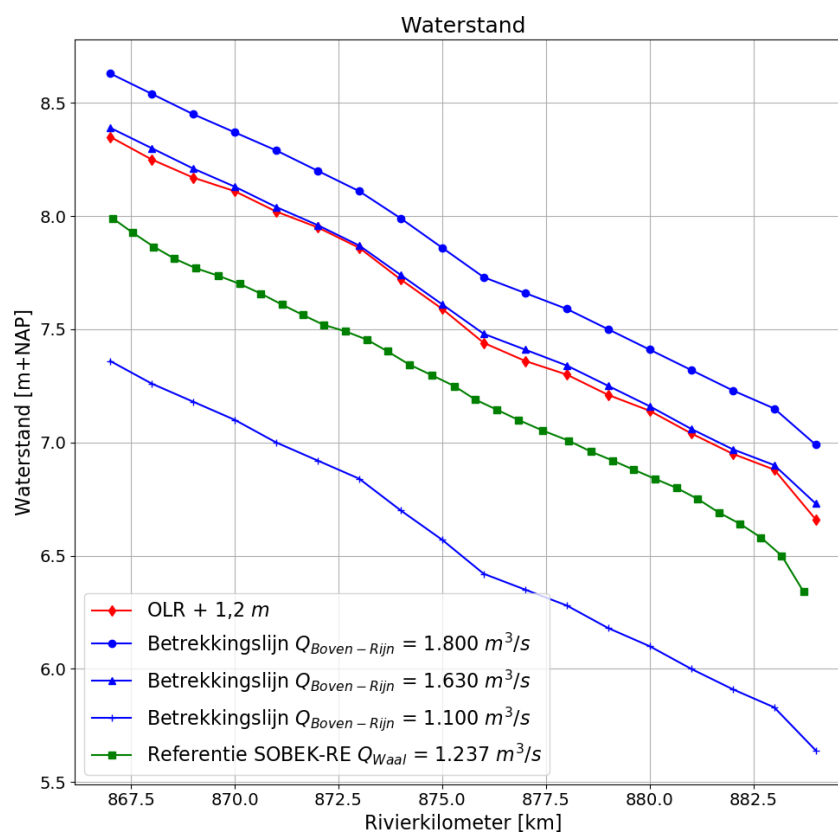


De hydrograaf van ons model varieert tussen  $Q_{\text{Waal}} = 957 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $Q_{\text{Waal}} = 5.678 \text{ m}^3/\text{s}$  (zie Figuur 56). Dit komt overeen met een afvoer van de Boven-Rijn tussen  $Q_{\text{Boven-Rijn}} = 1.186 \text{ m}^3/\text{s}$  en  $Q_{\text{Boven-Rijn}} = 8.597 \text{ m}^3/\text{s}$ . In Figuur 35 observeren we dat de gesimuleerde waterstanden met SOBEK-RE lager zijn dan de gesimuleerde waterstanden met WAQUA voor  $Q_{\text{Boven-Rijn}} < 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Bijvoorbeeld, voor  $Q_{\text{Boven-Rijn}} = 2.000 \text{ m}^3/\text{s}$  liggen de gesimuleerde waterstanden door SOBEK-RE meer dan 50 cm lager op de Boven- en Midden-Waal dan de gesimuleerde waterstanden met WAQUA.

Figuur 57 toont drie betrekkinglijnen voor verschillende afvoerniveaus van de Boven-Rijn. Deze betrekkinglijnen zijn gebaseerd op gemeten waterstanden. Daarnaast toont Figuur 57 de waterstanden voor het referentiemodel van SOBEK-RE bij een afvoer  $Q_{\text{Waal}} = 1.237 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dit komt overeen met een afvoer  $Q_{\text{Boven-Rijn}} \approx 1.555 \text{ m}^3/\text{s}$ . Door beide lijnen te vergelijken, observeren we dat SOBEK-RE de waterstand met circa 20 tot 30 cm onderschat bij dergelijke rivierafvoeren. Als gevolg daarvan ligt het niveau OLR + 1,2 m in SOBEK-RE ook 20 tot 30 cm lager dan de waarden op basis van metingen.

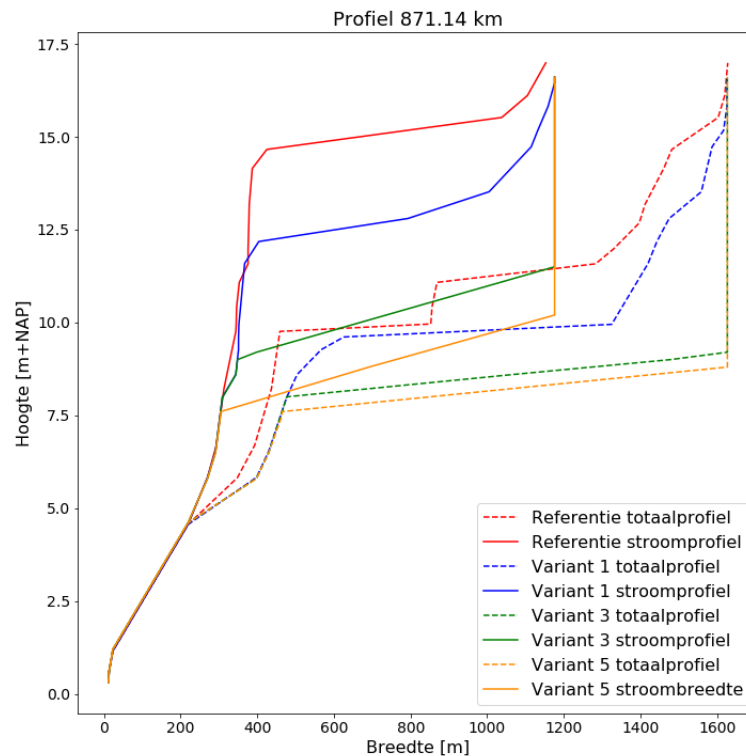
We genereren nieuwe profielen waarbij het totaalprofiel en de stroomvoerende breedte worden verruimd vanaf een berekende waterstand bij  $Q_{\text{Waal}} = 1.237 \text{ m}^3/\text{s}$ . Met behulp van Figuur 57 kan worden bepaald dat het niveau OLR + 1,2 m ca. 10 cm hoger ligt dan de waterstanden bij  $Q_{\text{Waal}} = 1.237 \text{ m}^3/\text{s}$ . Het niveau van verruiming in de nieuwe profielen komt dus in werkelijkheid overeen met een niveau van OLR+1,0 m à OLR+1,1 m ( $\text{OLR}+1,2 + 0,1 - 0,3 = \text{OLR}+1,0$  en  $\text{OLR}+1,2 + 0,1 - 0,2 = \text{OLR}+1,1$ ). Ofwel, de keuze van verruimen vanaf een Waalafvoer van  $1.237 \text{ m}^3/\text{s}$  komt ongeveer overeen met verruimen vanaf OLR+1,2 m+NAP.

Figuur 57:  
Betrekkingslijnen  
voor verschillende  
afvoeren van de  
Boven-Rijn, OLR +  
1,2 m en de  
waterstanden van  
het referentiemodel.



Figuur 58 toont het nieuwe profiel (variant 5) op rivierkilometer 871.14 km. Zowel het totaalprofiel als het stroomvoerende profiel zijn vanaf een waterstandsniveau bij een afvoer van  $Q_{Waal} = 1.237 \text{ m}^3/\text{s}$  verruimd. Het minimale dwarsverhang van het bodemprofiel in de uiterwaard is voor het stroomvoerende profiel 3:1000.

*Figuur 58:  
Bodemprofielen van  
referentie, variant 1,  
variant 3 en variant  
5 op rivierkilometer  
874.14 km.*



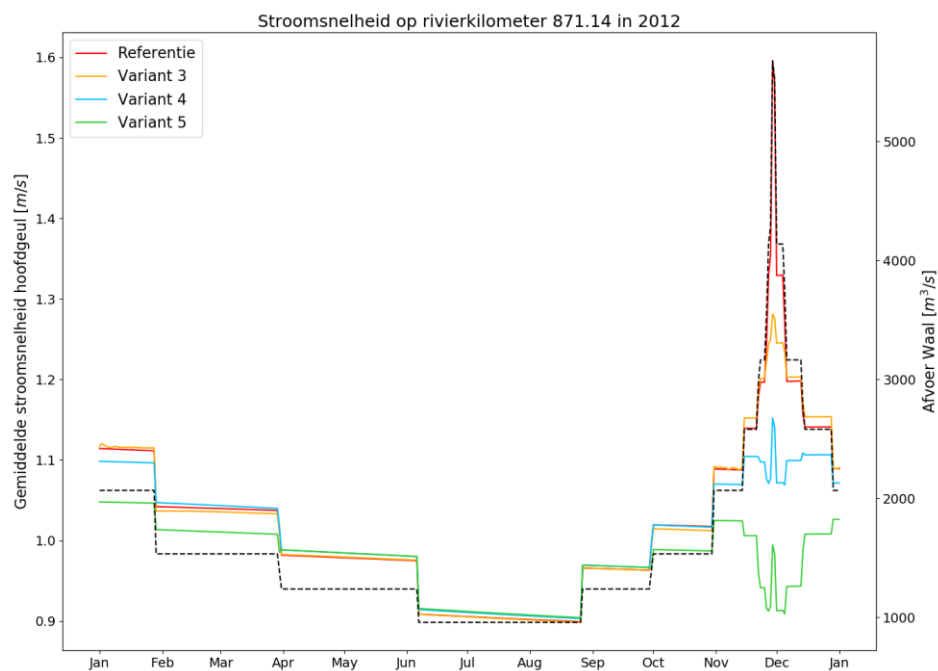
#### 5.4.1

#### Variant 5 – Boven-Waal: VAR5, Midden-Waal: REF, Beneden-Waal: REF

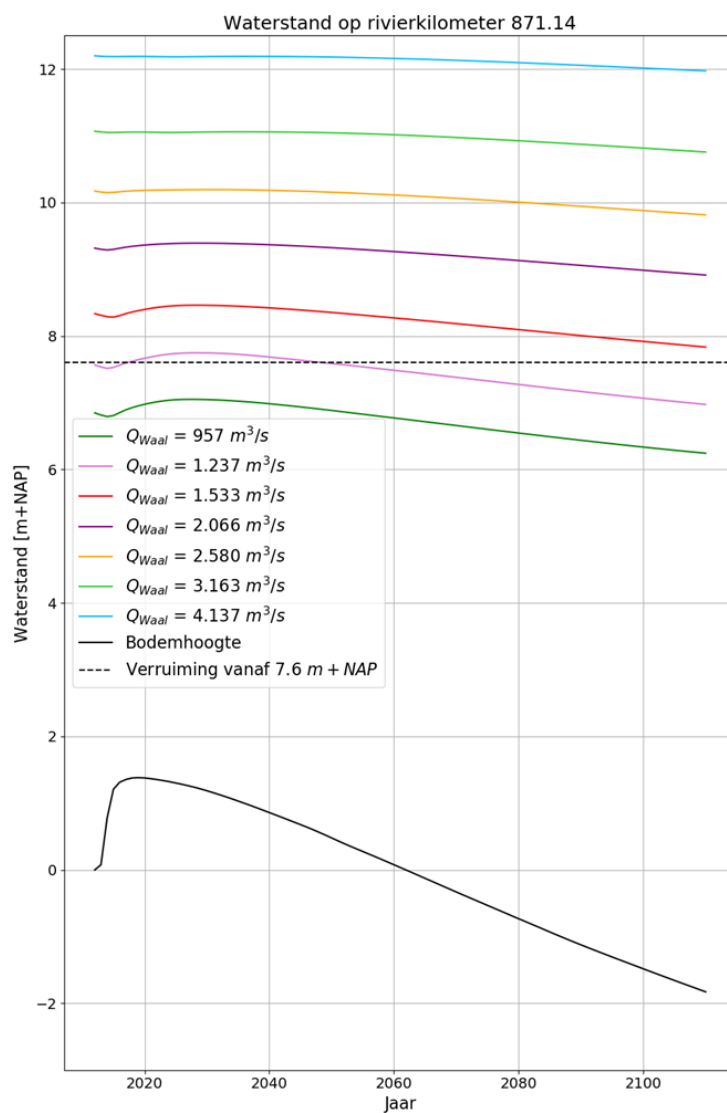
Figuur 59 laat zien dat de gemiddelde stroomsnelheid in de hoofdgeul op rivierkilometer 871.14 km wordt verlaagd voor  $Q_{\text{Waal}} > 1.500 \text{ m}^3/\text{s}$ . De stroomsnelheid wordt verlaagd voor 180 dagen per jaar (1 oktober t/m 29 maart) voor de gekozen hydrograaf. Figuur 60 laat zien dat in 2012 de Waal afvoer  $Q_{\text{Waal}} = 1.237 \text{ m}^3/\text{s}$  niet door de uiterwaarden stroomde. Als gevolg van sedimentatie stromen de uiterwaarden van circa 2018 tot 2050 bij dit afvoerniveau enigszins in. Door erosie neemt de bodemhoogte af waardoor de rivier zich verder terugtrekt in het zomerbed. Vanaf 2050 stroomt de verruiming niet meer in bij het afvoerniveau  $Q_{\text{Waal}} = 1.237 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figuur 61 en Figuur 62 laten zien dat het erosieproces op sommige locaties van de Boven-Waal wordt geremd door deze extra verruiming van de rivier.

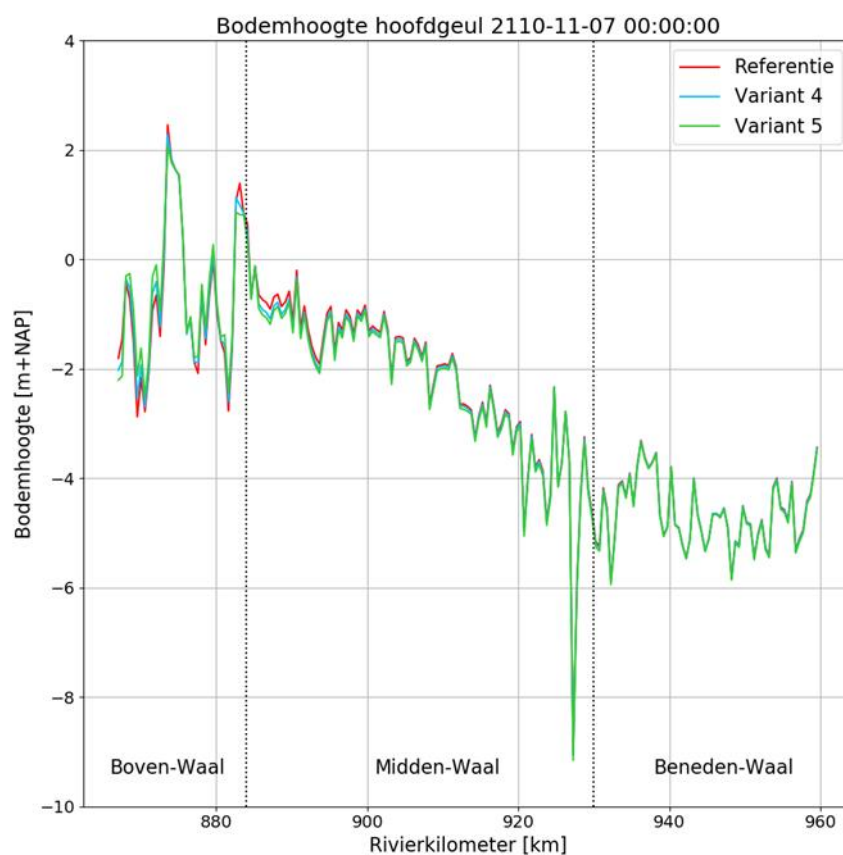
*Figuur 59:  
Stroomsnelheid op  
rivierkilometer  
871.14 km  
gedurende 2012.  
Zwart gestreepte lijn  
is de afvoer van de  
Waal (op rechter-  
as).*



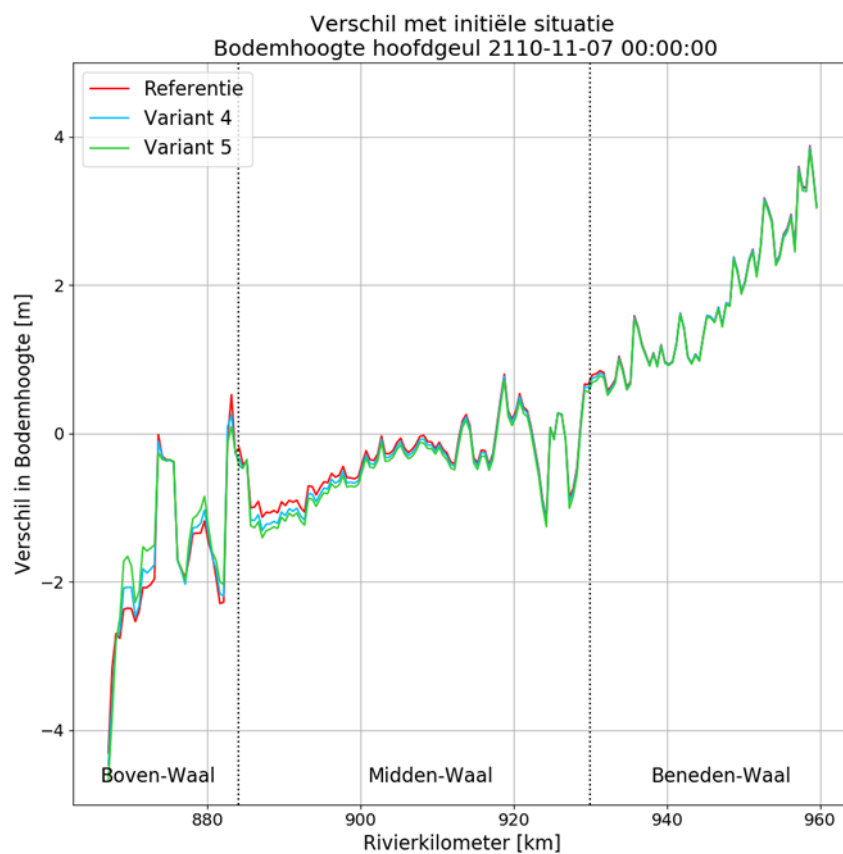
*Figuur 60:  
Waterstanden op  
rivierkilometer  
871,14 km als  
functie van de tijd  
voor verschillende  
afvoeren van de  
Waal voor variant 5.  
Rivierverruiming  
vanaf een niveau  
van 7,6 m.*



*Figuur 61:  
Bodemhoogte van  
de hoofdgeul na 100  
jaar voor het  
referentiemodel,  
variant 4 en variant  
5.*

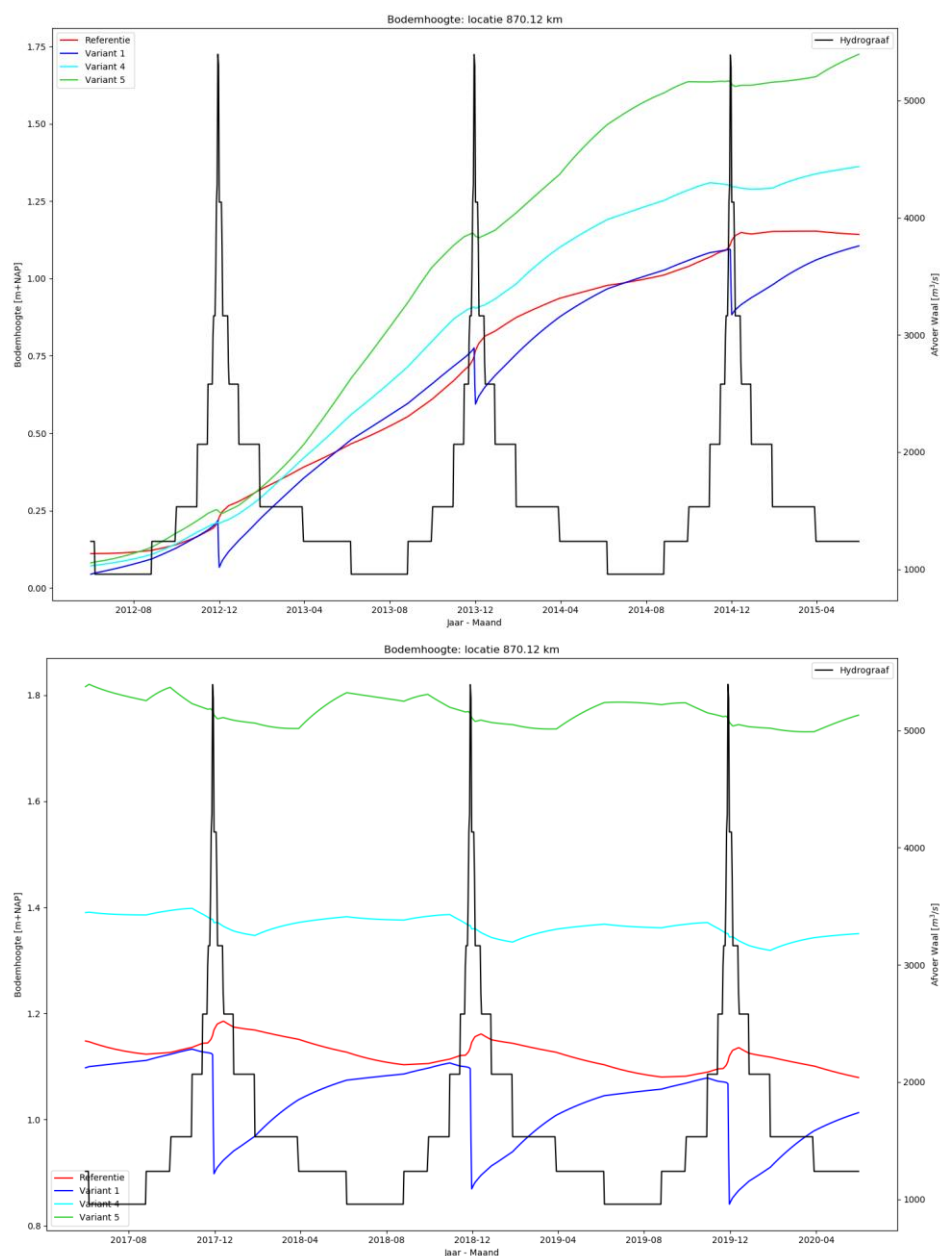


*Figuur 62:  
Verschil van de  
bodemhoogte van de  
hoofdgeul na 100  
jaar met de initiële  
situatie voor het  
referentiemodel,  
variant 4 en variant  
5.*



De simulaties laten zien dat de extra verruiming in Variant 5, waardoor ook bij lagere afvoeren de verruimingen meestromen, effectief zijn om de bodemerosie af te remmen. In Figuur 63 is dit voor een locatie in de Boven-Waal (kmr 870.12) geïllustreerd. In de bovenste figuur is duidelijk te zien dat in Variant 5 de bodemveranderingstrend in de periode van lagere afvoeren steiler (meer aanzanding) is dan voor Variant 4. De onderste figuur toont dat door de grotere verruiming in Variant 5 de bodem op een hoger niveau blijft dan in de referentie en andere varianten (1 en 4).

*Figuur 63:  
Illustratie verloop  
bodemonwikkeling  
voor twee perioden  
van drie jaar en een  
aantal varianten.*



## 5.5

## Schatting benodigde suppletievolumes

Sedimentsuppletie is een 'zachte' maatregel om de voortgaande bodemerosie af te remmen of te stoppen. Bij suppletie met gebiedseigen materiaal is het benodigde suppletievolume daarbij gelijk aan de sedimentthong, ofwel het verschil tussen sedimentaanvoer en sedimenttransportcapaciteit.

In voorgaande simulaties hebben we gezien dat rivierverruiming niet voldoende is om het erosieproces van de Waal volledig tegen te gaan. In deze paragraaf maken we een schatting van het benodigde suppletievolume bij handhaving van de huidige bodemligging op de Waal (referentiemodel) en in een combinatie met rivierverruiming (variant 5).

## 5.5.1

## Constate bodemhoogte bovenrand

We passen de randvoorwaarden van het referentiemodel en variant 5 aan om een schatting te maken van benodigde suppletievolumes. In Hoofdstuk 1 is de sedimentaanvoer bepaald voor een toekomstscenario waarbij de bodem van de Boven-Waal erodeert met circa 2 cm/jr. Vervolgens is dezelfde sedimentaanvoer gebruikt als randvoorwaarde om de bodemontwikkeling van de Waal te simuleren bij rivierverruiming.

We simuleren de bodemontwikkeling van de Waal bij handhaving van de huidige bodemligging (referentiemodel) en rivierverruiming (variant 5) met een constante bodemhoogte als randvoorwaarde (geen erosie). Het benodigd suppletievolume ( $\text{m}^3/\text{j}$ ) om erosie volledig tegen te gaan wordt geschat door:

*Benodigd suppletievolume  $\approx$  sedimentaanvoer bij geen bodemerosie bovenrand – sedimentaanvoer bij bodemerosie Boven-Waal van 2 cm/jr.*

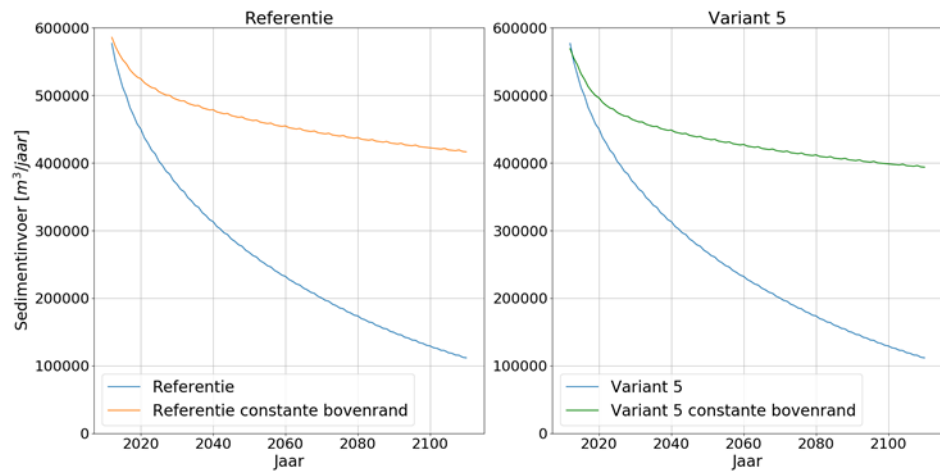
Figuur 64 laat zien dat de sedimentaanvoer aan de bovenrand sterk afneemt in de tijd voor het originele referentiemodel en variant 5 waarbij de Boven-Waal erodeert met circa 2 cm/jr (blauwe lijn). De sedimentaanvoer neemt in 100 jaar af tot circa 20% van de huidige sedimentaanvoer (van 577.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  tot 112.000  $\text{m}^3/\text{jr}$ ). Een hogere sedimentaanvoer is nodig om de bodemhoogte op de bovenrand constant te houden. Bij handhaving van de huidige bodemligging (oranje lijn) neemt de sedimentaanvoer af van circa 586.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  tot 416.00  $\text{m}^3/\text{jr}$  in 100 jaar. De sedimentaanvoer voor variant 5 (groene lijn) neemt af van circa 569.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  tot 394.000  $\text{m}^3/\text{jr}$ .

Figuur 65 toont de schatting voor het benodigd suppletievolume om de bodem op de Boven-Waal stabiel te houden. Het benodigd suppletievolume neemt gedurende 100 jaar toe (het verschil tussen de lijnen in figuur 64 wordt steeds groter). De resultaten laten zien dat het benodigd suppletievolume toeneemt tot circa 305.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  voor de referentie en 282.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  voor variant 5 om de bodemhoogte op de bovenrand constant te houden. De reductie in het benodigd suppletievolume door rivierverruiming (variant 5) is naar schatting circa 25.000  $\text{m}^3/\text{jr}$  (groene lijn in Figuur 65). Tabel 3 geeft een overzicht van de geschatte reductie in suppletievolume

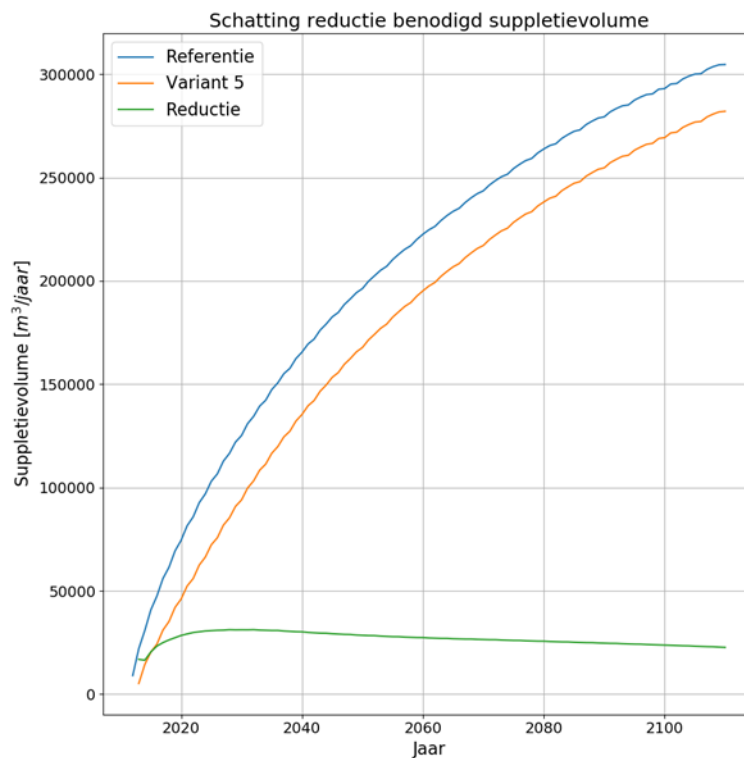


voor specifieke jaren. Op langere termijn is de procentuele reductie relatief laag door de toename in benodigd suppletievolumen om erosie volledig tegen te gaan.

Figuur 64:  
Sedimentinvoer  
bovenrand.



Figuur 65:  
Schatting reductie  
benodigd  
suppletievolumen  
door  
rivierverruiming. De  
blauwe lijn is het  
verschil van beide  
lijnen uit het linker  
figuur van Figuur  
64; de oranje lijn is  
het verschil van de  
beide lijnen uit het  
rechterfiguur van  
Figuur 64. De  
groene lijn in dit  
figuur is het verschil  
tussen de blauwe en  
oranje lijn.



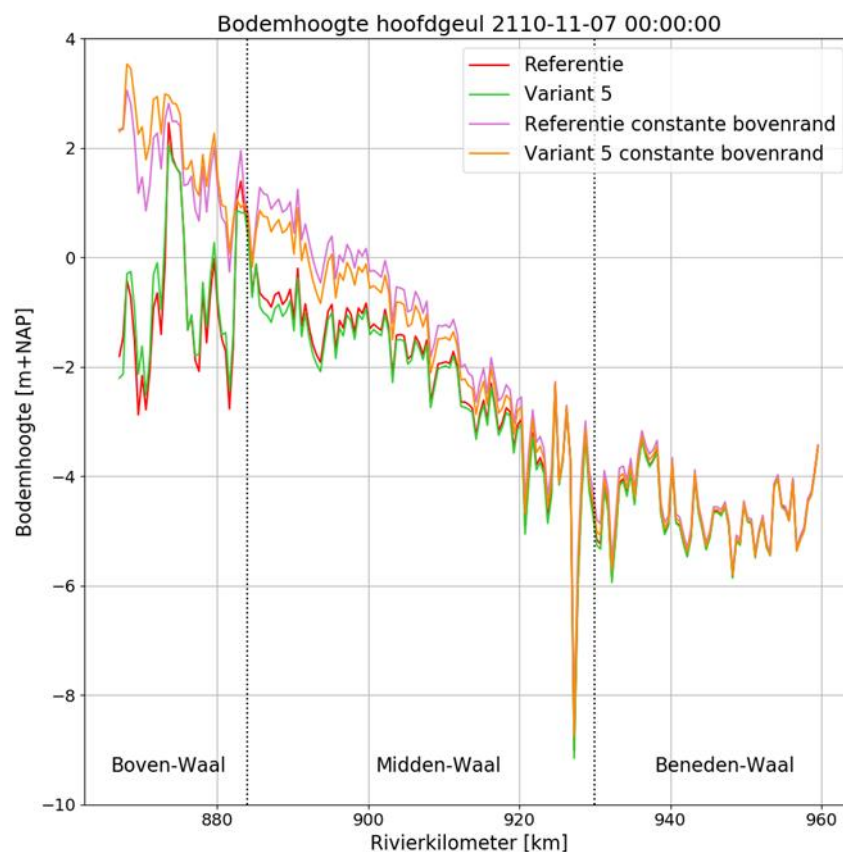
Tabel 3:  
Procentuele reductie  
van het  
suppletievolumen  
door  
rivierverruiming  
uitgaande van  
doorgaande  
bodemerrosie van  
2 cm/jr

| Jaar             | Schatting reductie in suppletievolumen (%) |
|------------------|--------------------------------------------|
| 2016 (na 5 jr)   | 49 %                                       |
| 2021 (na 10 jr)  | 36 %                                       |
| 2031 (na 20 jr)  | 24 %                                       |
| 2061 (na 50 jr)  | 12 %                                       |
| 2111 (na 100 jr) | 7 %                                        |

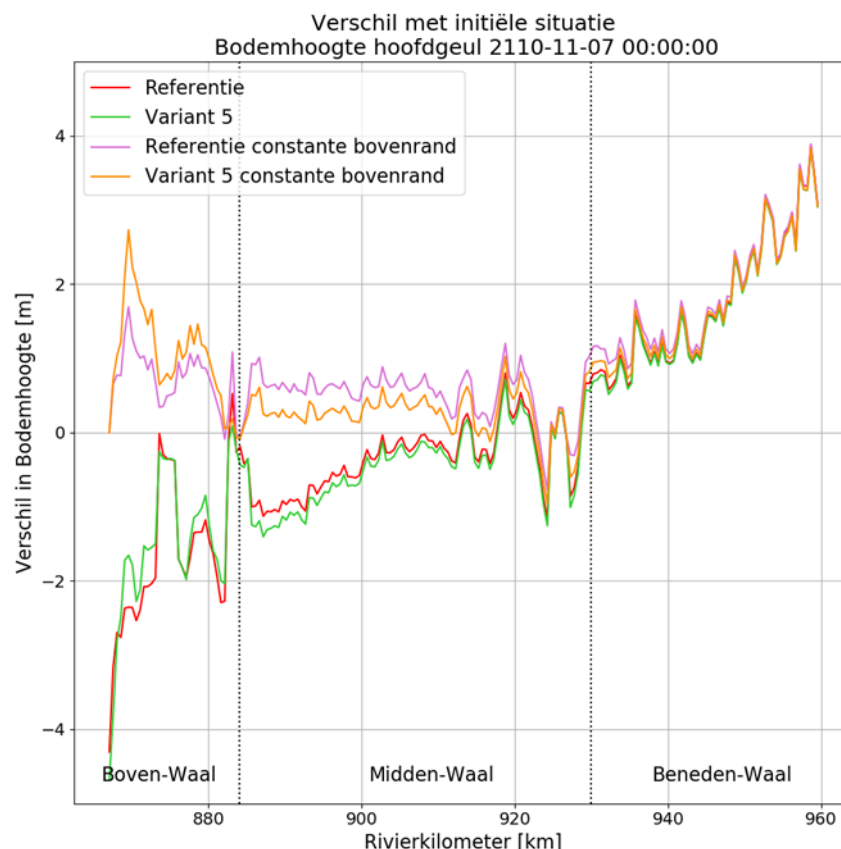
Figuur 66 en Figuur 67 laten zien dat sedimentatie optreedt op elk traject van de Waal wanneer de bovenrand van het model constant wordt gehouden. Figuur 67 toont dat de bodemligging van de Boven-Waal toeneemt met circa 1 meter in 100 jaar bij de berekende sedimentaanvoer (zie Figuur 64). De benodigde sedimentaanvoer om de bodemligging van de Boven-Waal stabiel te houden wordt met de gekozen randvoorwaarde wellicht overschat. We zien dat met de berekende sedimentaanvoer om de bovenrand van het model constant te houden, de bodemligging van de hoofdgeul toeneemt. Dit betekent dat het benodigd suppletievolume waarschijnlijk ook wordt overschat met de berekende sedimentaanvoer.

In Paragraaf 5.5.2 onderzoeken we de benodigde sedimentaanvoer en daarmee het verwachte suppletievolume om de bodemhoogte van de Boven- en Midden-Waal constant te houden voor scenario's waarin de sedimenttoevoer vanuit Duitsland in de loop van de jaren constant blijft.

*Figuur 66:  
Bodemhoogte van  
de hoofdgeul na 100  
jaar voor het  
referentiemodel en  
variant 5.*



*Figuur 67:  
Verskil van de  
bodemhoogte van de  
hoofdgeul na 100  
jaar met de initiële  
situatie voor het  
referentiemodel en  
variant 5.*



### 5.5.2

#### Jaarlijks constante sedimentaanvoer

We onderzoeken het benodigd suppletievolume door een realistisch scenario te hanteren voor de benodigde sedimentaanvoer waarbij de bodemligging op de Waal ongeveer stabiel blijft in de toekomst. Hierbij wordt aangenomen dat een jaarlijks constante sedimentaanvoer meer realistisch is dan de forse jaarlijkse afname in sedimentinvoer (Figuur 68, blauwe lijn). Door simulaties met verschillende hoeveelheden sedimentaanvoer (circa 300.000 m<sup>3</sup>/jr, 350.000 m<sup>3</sup>/jr, 400.000 m<sup>3</sup>/jr) uit te voeren, onderzoeken we bij welke sedimentaanvoer de bodemhoogte van de Boven- en Midden-Waal constant blijft. Bovenstaande hoeveelheden liggen in lijn met de hoeveelheden uit de sedimentbalans voor de gehele Rijn (CHR, 2017), waaruit voor de Waal ca. 350.000-400.000 m<sup>3</sup>/jaar voor de zand- en grindfractie volgt. Het berekende verschil in de benodigde sedimentinvoer op de bovenrand geeft een indicatie van de reductie in benodigd suppletievolume door rivierverruiming.

Figuur 69 toont dat de bodemhoogte van de Boven- en Midden-Waal voor het referentiemodel stabiel blijft over 100 jaar bij een constante sedimentinvoer van circa 350.000 m<sup>3</sup>/jr. Figuur 70 laat zien dat de bodemhoogte van de Boven-Waal voor variant 5 stabiel blijft over 100 jaar bij een constante sedimentinvoer van circa 300.000 m<sup>3</sup>/jr. Bij deze sedimentaanvoer erodeert de bodem van de Midden-Waal echter enigszins. Om erosie op de Midden-

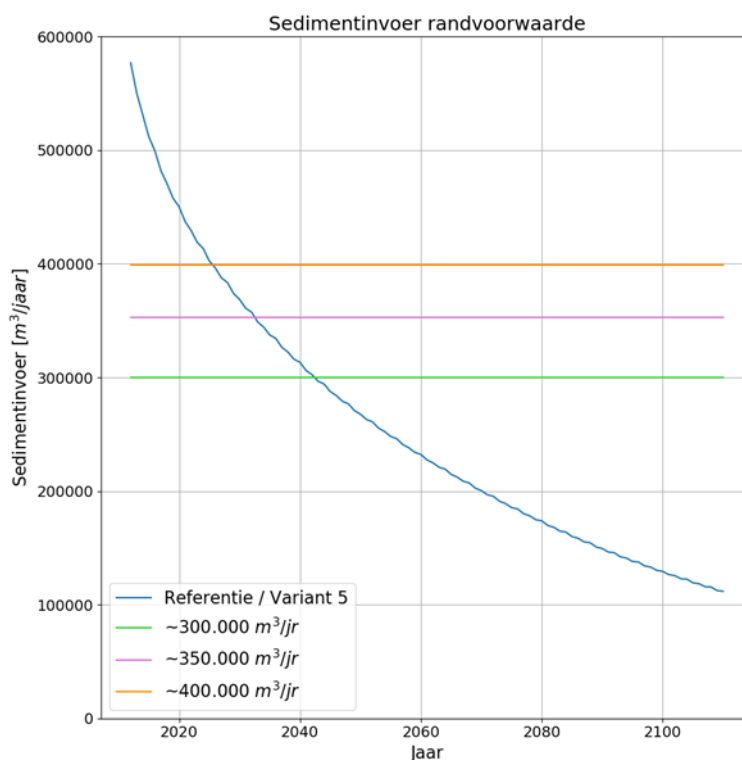
Waal te voorkomen zal ook op dit traject moeten worden verruimd. In de praktijk zal de benodigde sedimentaanvoer voor een constante bodemligging niet geheel vanuit Duitsland worden aangevoerd. Een deel van het benodigd sediment zal moeten worden gesuppleerd. De reductie in benodigd suppletievolume wordt geschat door naar het verschil in benodigde sedimentinvoer te kijken om een constante bodemligging te behouden. Het verschil van 50.000 m<sup>3</sup>/s (350.000 – 300.000) is een indicatie van de reductie in benodigd suppletievolume door rivierverruiming.

Dit getal is lastig uit te drukken in een percentage omdat het uitgangspunt in deze paragraaf is dat de sedimentaanvoer vanuit Duitsland onbekend is en we onderzoeken bij welke sedimentaanvoer op de bovenrand de bodemhoogte constant blijft. Bij een bekende sedimentaanvoer vanuit Duitsland kan het percentage wel worden berekend. Een rekenvoorbeeld:

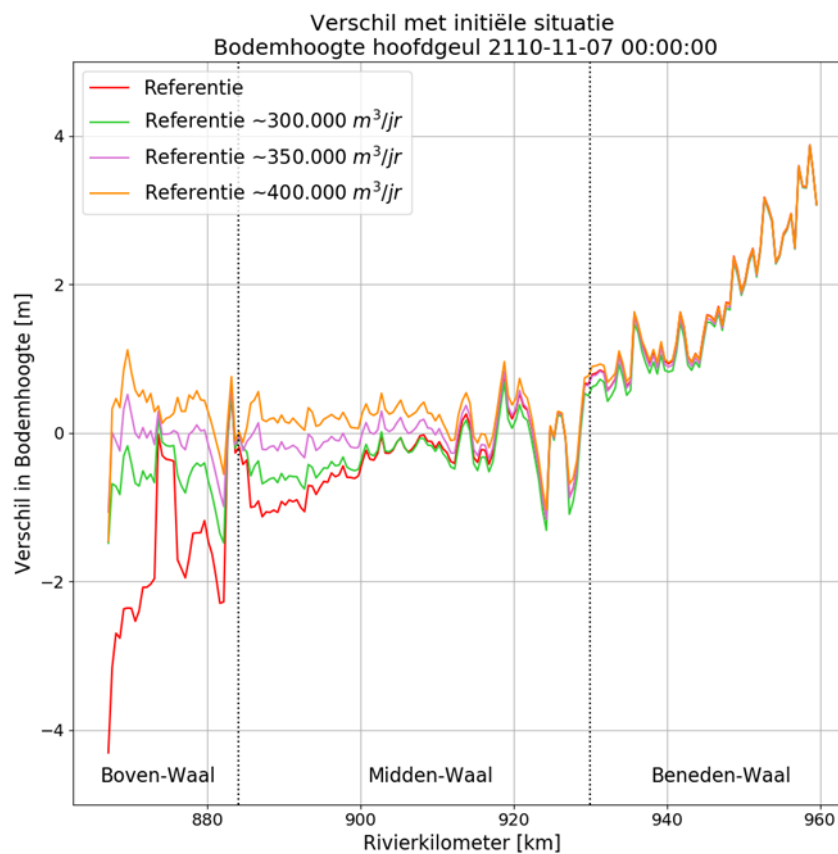
- Aannee: de sedimentaanvoer vanuit Duitsland is 200.000 m<sup>3</sup>/jr,
- Als gevolg moet 350.000 – 200.000 = 150.000 m<sup>3</sup>/jr worden gesuppleerd voor een constante bodemhoogte voor de referentie situatie, en 300.000 – 200.000 = 100.000 m<sup>3</sup>/jr moet worden gesuppleerd voor variant 5,
- De reductie in benodigde suppletievolume is 50.000 m<sup>3</sup>/jr. Dit is een reductie van 33 % door rivierverruiming (variant 5) ten opzichte van het behouden van de huidige situatie (referentie).

Als de sedimentaanvoer vanuit Duitsland 250.000 m<sup>3</sup>/jaar is, kan op vergelijkbare wijze worden beredeneerd dat de reductie in benodigd suppletievolume circa 50 % kan zijn (50.000 / 100.000 \* 100).

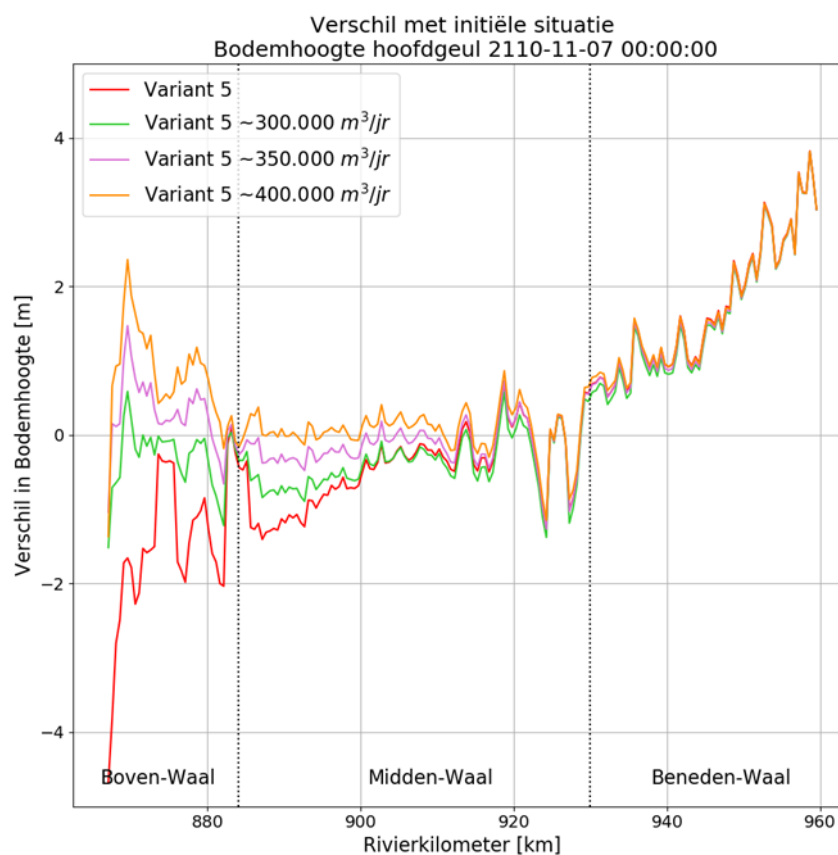
*Figuur 68:  
Sedimentinvoer  
bovenrand.*



**Figuur 69:**  
Verskil van de bodemhoogte van de hoofdgeul na 100 jaar voor het referentiemodel.



**Figuur 70:**  
Verskil van de bodemhoogte van de hoofdgeul na 100 jaar met de initiële situatie voor variant 5.





## 6 Synthese

In dit project onderzochten we de mogelijkheden om bodemerosie op de Waal te stoppen. Hierbij lag de focus op de effecten van rivierverruiming en suppleties. Een goede mix van structurele (rivierverruiming) en flexibele (suppleties) maatregelen lijkt kansrijk om erosie van de Waal te remmen.

De simulatieresultaten tonen dat grootschalige verruiming een verschil kan maken in de bodemontwikkeling op lange termijn (75 tot 100 jaar). Uit de gevoeligheidsanalyse volgt dat voor grootschalige morfologische effecten aan de volgende drie voorwaarden moet worden voldaan:

1. De verruiming wordt over een lang traject doorgevoerd;
2. De afvoerdeling over de hoofdgeul en uiterwaarden wordt aanzienlijk gewijzigd;
3. De rivierafvoer stroomt een groot deel van het jaar deels door de uiterwaarden.

Uit de analyses volgt dat de rivier dient te worden verruimd op een relatief laag waterstandniveau. Op deze manier wordt aan de twee laatste voorwaarden voldaan. Ten eerste, de stroomsnelheid in de hoofdgeul wordt zo aanmerkelijk verminderd doordat een aanzienlijk deel van de afvoer door de uiterwaarden stroomt. Ten tweede, de stroomsnelheid en dus sedimenttransportcapaciteit wordt op deze manier een groot deel van het jaar verminderd.

Naast de bovenstaande voorwaarden dient de rivierverruiming gelijkmatig over het riviertraject te worden gerealiseerd. Dit betekent dat langs het hele traject de verruiming ongeveer bij eenzelfde rivierafvoer gaat meestromen en dat de mate van verruiming op verschillende locaties vergelijkbaar is. Daardoor worden ongewenste lokale aanzanding en erosie voorkomen. Dergelijke erosiekuilen en sedimentatiebulten kunnen de scheepvaart hinderen en leiden tot extra baggerwerk.

Verder mogen de waterdieptes bij (zeer) lage afvoeren niet afnemen door rivierverruiming, zodat scheepvaart gedurende het gehele jaar mogelijk blijft. Naast de afremming van de erosie in het verruimingstraject wordt de morfologie benedenstrooms (vermindering aanzanding) en bovenstrooms (vermindering erosie) ook beïnvloed.

Om bodemerosie te remmen door rivierverruiming, en gunstige condities voor de scheepvaart te creëren, is maatwerk noodzakelijk. Rivierverruiming kan worden gerealiseerd via bijvoorbeeld nevengeulen, verlaagde uiterwaarden en zomerkades, en/of (grote) oeversgeulen achter langsdammen. Door slimme combinaties van maatregelen op de juiste locatie kunnen natuur, hoogwaterveiligheid en scheepvaart worden bediend. Hoewel grote verlaging van hoogwaterstanden aantrekkelijk is vanuit het oogpunt

van de hoogwaterveiligheid, is een te grote daling ongunstig voor de vermindering van de bodemerosie. De lagere waterstanden werken namelijk ook bovenstrooms door, waardoor daar de stroomsnelheden in de hoofdgeul kunnen toenemen en daarmee de erosieve kracht (meer erosie). Ook hiervoor is dus maatwerk en afstemming nodig: grote verandering van de afvoerverdeling over hoofdgeul en uiterwaard, zonder dat de waterstanden teveel zakken.

Voor een stabiele bodemligging van de Waal zijn suppleties noodzakelijk naast eventuele structurele maatregelen. Suppleties op specifieke locaties vullen de tekorten aan sedimentaanvoer van bovenstrooms aan. Het benodigde suppletievolume is dan ook deels afhankelijk van de ontwikkelingen in Duitsland.



# 7

## Conclusies en aanbevelingen

### 7.1

#### Conclusies

Uit dit onderzoek volgt dat rivierverruiming werkt om de transportcapaciteit en erosie van de Waal op lange termijn (75 tot 100 jaar) te verminderen. Rivierverruiming dient op een relatief laag waterstandsniveau te worden toegepast om grootschalige morfologische effecten te realiseren. De stroomsnelheid in de hoofdgeul moet een groot deel van het jaar aanzienlijk worden verminderd om de bodemerosie te remmen. Hierbij is een goede balans nodig tussen verruiming in de langsrichting, om erosiekuilen en sedimentatiebulten te voorkomen.

Hoewel bodemerosie kan worden geremd door rivierverruiming is een combinatie met suppleties waarschijnlijk noodzakelijk voor een stabiele bodemligging van de Waal. Uitgaande van een doorgaande bodemerosie van 2 cm per jaar op de Bovenwaal, is naar schatting op termijn een suppletievolume van circa 75.000 (in jaar 2020) tot mogelijk 350.000 m<sup>3</sup>/jr (in 2100) nodig voor het handhaven van de huidige bodemhoogte in de Boven-Waal. Door rivierverruimingsmaatregelen kan het suppletievolume naar verwachting circa 25.000 tot 50.000 m<sup>3</sup>/jr lager zijn om de bodemligging van de Boven-Waal constant te houden. Bovenstaande is gebaseerd op een afnemende sedimenttoevoer vanuit Duitsland in de komende eeuw, die leidt tot een voortgaande bodemerosie van 2 cm/jaar. Dit geeft een bovengrens aan de benodigde suppletievolumes. In een waarschijnlijker scenario, waarin de sedimenttoevoer vanuit Duitsland in de tijd veel minder of niet afneemt, zijn de benodigde jaarlijkse suppletievolumes lager. Als grootschalige rivierverruiming dit jaarlijkse suppletievolume met dezelfde omvang kan terugbrengen (25.000-50.000 m<sup>3</sup>/jaar) kan dat naar verwachting een reductie zijn van 25-50%. Ofwel flink groter dan de reductie 14-33% bij het scenario, waarbij de bodem op de Boven-Waal met 2 cm per jaar blijft eroderen.

### 7.2

#### Aanbevelingen

Nauwkeurige rekenmodellen zijn essentieel om de effecten van rivierverruimingsmaatregelen te onderzoeken. In dit project is gekozen voor simulatie met het bestaande (1D) SOBEK-RE model omdat enige toepassingen in de nieuwe modellenlijn binnen het D-Flow FM rekenhart niet tijdig beschikbaar waren. Verdere ontwikkeling van het D-Flow FM model is gewenst om morfologische effecten in de toekomst met de nieuwe modellenlijn te kunnen berekenen. Verdere operationaliseren van het

RivierenLab biedt de mogelijkheid voor ontwikkeling en verbetering van modellen voor morfologische simulaties.

Twee-dimensionale (2D) morfologische berekeningen duren te lang voor een verkennend onderzoek waarbij veel verschillende scenario's zijn doorgerekend. Dit soort berekeningen is wel heel zinvol in een later stadium wanneer een hoge precisie van de simulaties belangrijker is om specifieke maatregelen verder te onderzoeken.

In het SOBEK-RE model zijn de berekende waterstanden voor verschillende afvoerniveaus lager dan de berekende waterstanden van WAQUA en SOBEK3. Voor lage afvoerniveaus is dit verschil 0,2-0,3 m. In de verdere ontwikkeling van D-Flow FM is het raadzaam om het model te kalibreren voor lagere afvoerniveaus en waterstandseffecten.

Om beter inzicht in morfologische effecten te krijgen als gevolg van rivierverruimingsmaatregelen is verder onderzoek naar de verdeling van sediment over het zomerbed en de uiterwaard aanbevolen. Hierbij kan worden onderzocht welke invloed de verdeling van sediment heeft op de grootschalige morfologie van het zomerbed.

Naast modelberekeningen kan er in het veld door middel van pilots worden gemonitord wat de effecten zijn van bijvoorbeeld nevengeulen op de sedimenttransporten en bodemveranderingen in de hoofdgeul. Hierbij is het cruciaal dat het om flinke geulen gaat die voor het grootste deel van het jaar meestromen en een aanzienlijk afvoercapaciteit hebben (minimaal enkele procenten van de hoofdgeul).

Tot slot: de aanvoer en samenstelling van sediment uit Duitsland is belangrijk voor de ontwikkeling van de bodemerosie in Nederland en de benodigde maatregelen om die erosie te stoppen. Om een realistischer beeld te krijgen van de toekomstige sedimentaanvoer vanuit Duitsland (zowel volume als samenstelling) wordt aanbevolen om:

1. historische trends van de sedimentaanvoer te onderzoeken; en
2. scenario's voor de komende periode af te leiden.

## 8 Referenties

### **Arcadis (2017).**

Bijlage werkzaamheid maatregelen MO-DBR, 11 december 2017.  
Behorend bij rapport 'Bouwstenen Duurzame Bodemligging Rijntakken' in het MIRT-onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken

### **Arcadis (2018).**

Quick Scan Boven-IJssel. Referentie 079965613 A.9, 28 september 2018

### **Barneveld H, Wegman C, 2018.**

Ruimte voor levende rivieren: Een pilot op de Middenwaal. Wereld Natuur Fonds. HKV project PR3633.10.

### **Blom A, 2016.**

Bodemerosie in de Rijn. <http://flowsplatform.nl/#/bodemosie-in-de-rijn-1476873029138>

### **CHR, 2017.**

Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991-2010, CHR-rapport No II-22.

### **Huthoff F, Paarlberg AJ, Barneveld H, Wal M van der, 2011**

Rivierkundig onderzoek WaalSamen, Pilotstudie Langsdammen, HKV-rapport PR2096.10, juni 2011.

### **Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2018**

MIRT Onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken  
Eindrapportage - "De Rivierbodem is de basis van alle belangen", mei 2018

### **Nieuwsuur, 2018.**

Bodems Nederlandse rivieren slijten steeds verder weg.  
<https://nos.nl/nieuwsuur/artikel/2258400-bodems-nederlandse-rivieren-slijten-steeds-verder-weg.html>.

### **Ottevanger W, Giri S, Sloff CJ, 2015**

Sustainable fairway Rhinedelta II : effects of yearly bed stabilisation nourishments, Delta Program measures and training walls, Deltares rapport 1209175, April 2015

### **Sieben J, (2014)**

Notitie afvoerhydrograaf.

**Sloff CJ, 2006.**

Uitbreiding SOBEK-RT model naar niet-uniform sediment. WL | Delft Hydraulics, Rapport Q4130.10.

**Sloff CJ, Paarlberg AJ, Spruyt A, Yossef MFM, 2009**

Voorspelinstrument duurzame vaardiepte Rijndelta: continued development and application of morphological model DVR Part 2: model adjustment, Deltares rapport 002069-002-ZWS-0005.

**Spruyt A, 2018.**

Setting up a 1D-morphological model of the Waal in D-Flow FM. Deltares memo 11202191-003-ZWS-0002.

**Veen R van der, Pakes U, Schutte L, 2002.**

Bouw en calibratie SOBEK-Rijn. Versie 2000.1 t/m 2000.3. RIZA rapport 2002.039. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraal Generaal Rijkswaterstaat, RIZA.

**Verweij H, 2016.**

Duurzame Vaardiepte Rijntakken (DVR2). Studie naar problematiek en mogelijke aanpak van bodemerosie en aanzanding in het zomerbed van de Rijntakken in Oost-Nederland. RWS. r160226.eindrapport DVR2.pdf.

**Visser T, 2017.**

Validatie laagwaterperiode (WAQUA + SOBEK3) Rijntakken, Deltares memo 11200569-004-ZWS-0031.

**Vuren S van, Sloff CJ, 2006.**

Verbetering 1-D Rijntakkenmodel vanaf Andernach. WL | Delft Hydraulics, Rapport Q4130.00.

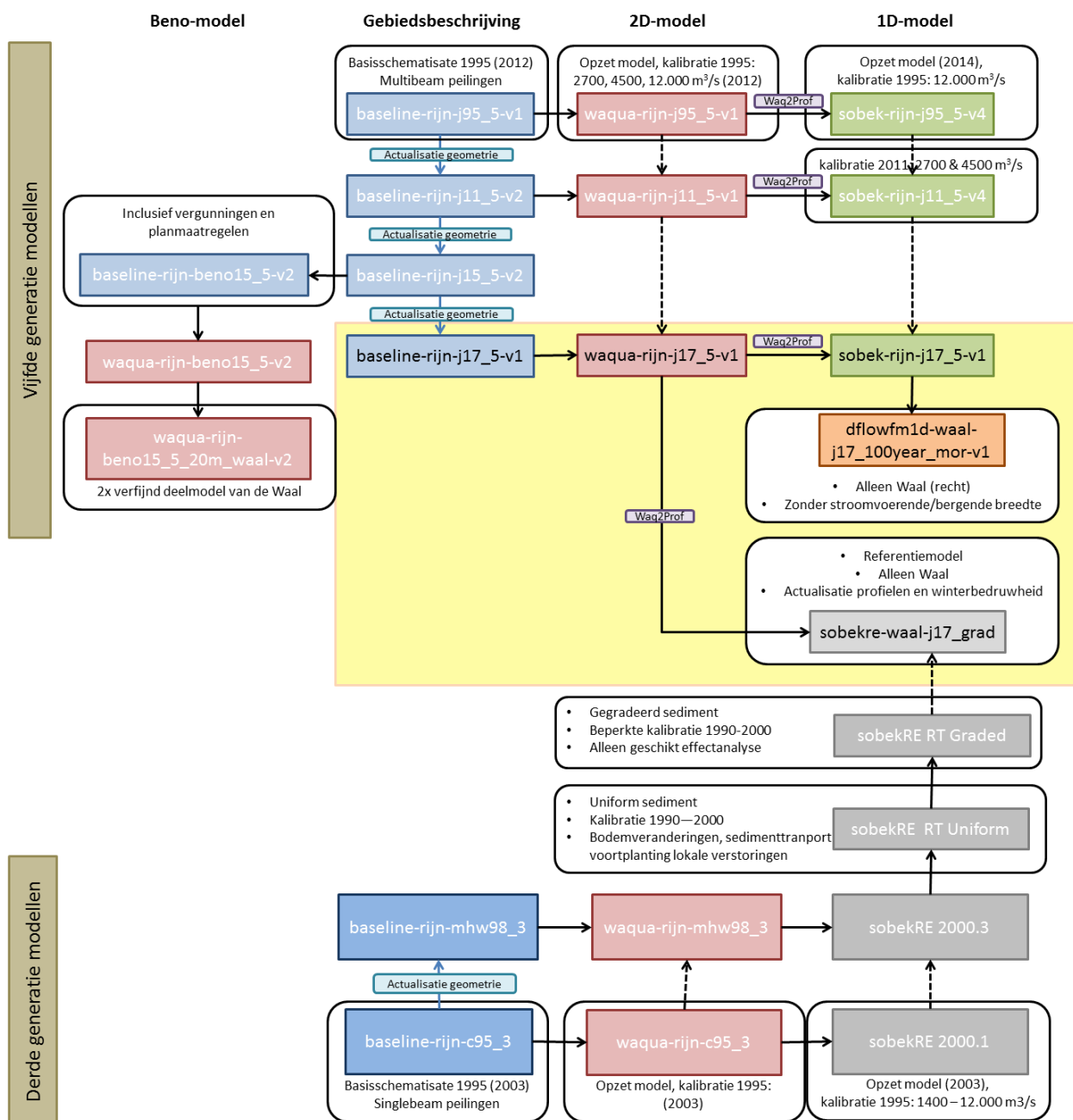
# Bijlagen



# A

## Samenhang modellen

In onderstaand schema is weergegeven hoe de verschillende (referentie) modelschematisaties die in deze studie zijn gebruikt zijn opgebouwd en met elkaar samenhangen. In deze studie zijn alleen de modelschematisaties in het gele vlak daadwerkelijk gebruikt (voor het doorrekenen van de varianten, zijn hier modellen van afgeleid). Er is in het schema een onderscheid gemaakt tussen de gebiedsbeschrijvingen (Baseline 5: vijfde generatie (lichtblauw), Baseline 3: derde generatie (donkerblauw)), 2D modellen (rood; WAQUA) en 1D modellen (SOBEK3: vijfde generatie (groen), SOBEK-RE: derde generatie (grijs) en D-Flow FM 1D: RivierenLab (oranje).



- De 'jxx' (of 'cxx' en 'mhwxx') geeft aan op welk jaar de geometrie is gebaseerd (dus 'j17' is een zo goed mogelijke representatie van de geometrie in 2017).
- In het schema zijn alleen de relevante modelschematisaties opgenomen en niet alle tussenliggende stappen.
- Gestippelde lijnen geven aan dat de modelstructuur (rooster/takkenstructuur etc.) en kalibratiewaarden (zomerbed) zijn overgenomen.
- Bij het toepassen van Waq2Prof worden de profielen en winterbedruwheden voor het 1D-model opnieuw afgeleid uit het 2D-model.
- Er is een onderscheid tussen de opbouw van de huidige (vijfde generatie) hydraulische modellen (basisschematisatie opgezet in 2012) en de morfologische SOBEK-RE modellen. Deze laatste stammen af van derde generatie hydraulische modellen (basisschematisatie opgezet in 2003).
- Het zogeheten 'beno-model' wordt toegepast voor beleidsdoeleinden en bevat ook alle afgegeven vergunningen en vastgestelde planmaatregelen. Hiervoor zijn geen 1D-modellen afgeleid, maar wel 2D modellen met een 2x verfijnd rooster (voor de verschillende riviertakken).



## B

De 'oeverkade' is handmatig getekend in GIS, langs beide oevers van de Waal (zie ook Figuur 26). Deze lijn vormt de grens waarbinnen aanpassingen in de uiterwaarden worden uitgevoerd. Op de oeverkade liggen:

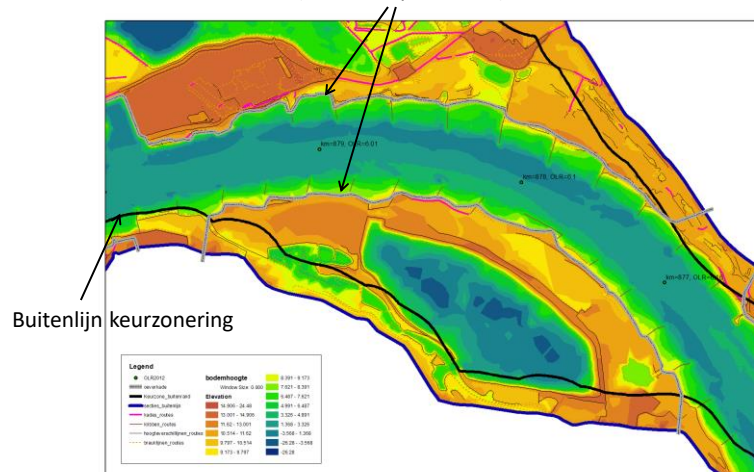
- Breuklijnen met punten om de 10 m met de hoogte uit de referentie,
- Kadelijnen met punten om de 10 m met de hoogte  $OLR+1,2$  ( $K=L=R$  dus geen energieverlies).

Vervolgens voeren we de volgende stappen uit in Baseline/Python:

- Tussen oeverkade & modelgrens: verwijder kades en hoge lijnelementen,
- Tussen oeverkade & buitenlijn keurzonering: verlaag uiterwaard met 2 m (breuklijnen, hverschillijnen, hoogtepunten),
- Aanbrengen oeverkade & verwijderen kades: via Baseline,
- Kribverlaging & verlagen uiterwaarden: via Python,
- Oeverkade loopt door bij aangetakte plassen/geulen,
- Oevergeulen langsdammen niet verlaagd,
- Plassen e.d. in uiterwaarden ook verlaagd.

## Oeverkade als uitgangspunt

Oeverkade (overlaat op OLR+1,2)



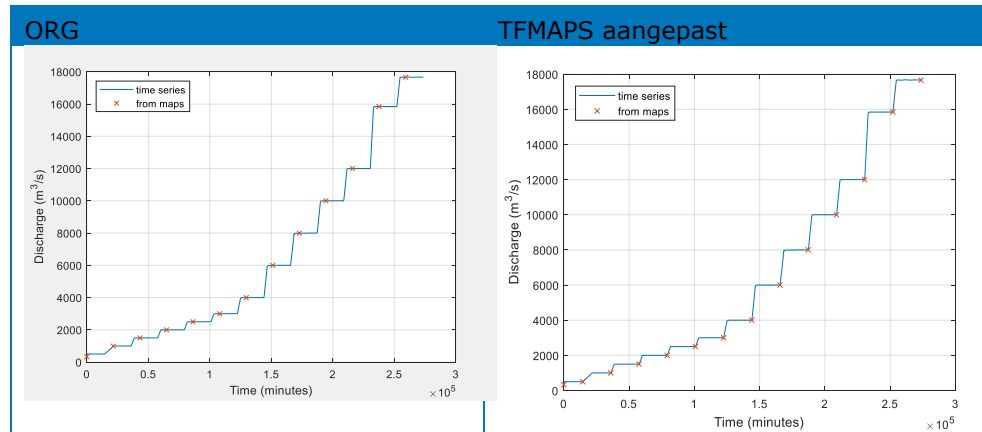


# C WAQUA-berekeningen WAQ2Prof ruwheden

Om afvoeren zomerbed/winterbed te vergelijken gebruiken we de MAPS info van een SDS file. Die zit in de basis WAQ2PROF-berekeningen van RWS bij de rode kruisjes in de linker plot van Figuur 71. Dat is wat ongelukkig gekozen, door een extra toegevoegde 10 dagen inspeeltijd aan het begin van een simulatie. Resultaat is dat de stroming in vooral de Waal dan nog niet stationair is en dat maakt vergelijken met stationaire berekeningen uit SOBEK niet mogelijk. Daarom is in extra WAQUA-berekeningen de parameter TFMAPS aangepast, zie de rechter plot van Figuur 71.

N.B. WAQ2Prof is gedraaid met berekeningen waarbij de instellingen van de MAPS ongewijzigd zijn gelaten, omdat dat in het vigerende referentiemodel van RWS ook het geval is.

*Figuur 71:  
Map-times in  
WAQUA WAQ2Prof-  
berekening.*



Links: ORG tijdreeks (QBR) WAQ2prof (ruwheden), zie onderstaand figuur.  
Rechts: TFMAPS aangepast tijdreeks (QBR) WAQ2prof (ruwheden)

Dit levert de volgende afvoeren (met correctie TFMAPS).

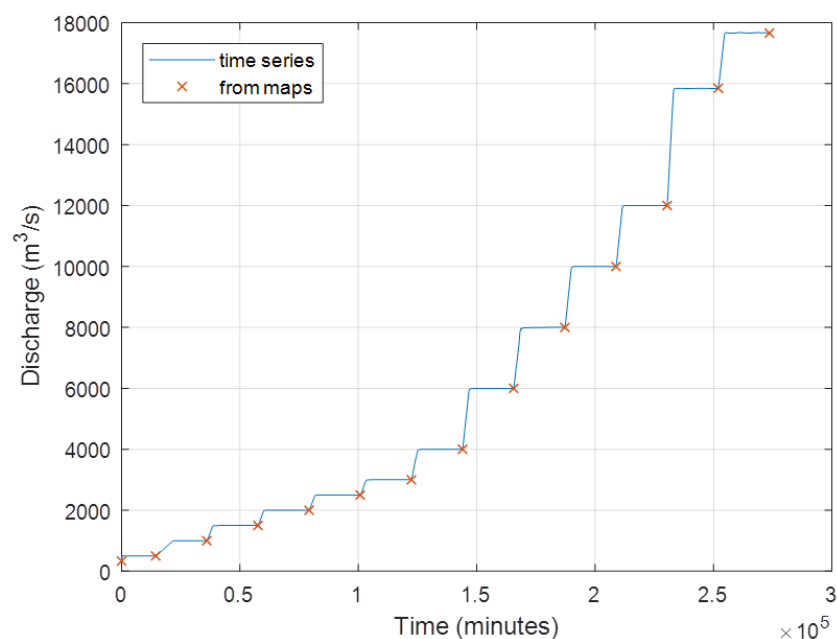
Tabel 4:  
Tijden op SDS voor  
aangepaste siminp

| Tijd in min op SDS | QBR    | Mapnr |
|--------------------|--------|-------|
| 0                  | 500    | 1     |
| 14400              | 500    | 2     |
| 36000              | 1.000  | 3     |
| 57600              | 1.500  | 4     |
| 79200              | 2.000  | 5     |
| 100800             | 2.500  | 6     |
| 122400             | 3.000  | 7     |
| 144000             | 4.000  | 8     |
| 165600             | 6.000  | 9     |
| 187200             | 8.000  | 10    |
| 208800             | 10.000 | 11    |
| 230400             | 12.000 | 12    |
| 252000             | 16.000 | 13    |
| 273600             | 18.000 | 14    |

# D Bepaling afvoer zomerbed uit WAQUA-berekeningen

In de 2D WAQUA-berekeningen die worden gebruikt voor de vergelijking van waterstanden en afvoerverdeling is in de uitvoer geen expliciet onderscheid gemaakt in de afvoer door het zomerbed en het totale profiel. Deze informatie is met een nabewerking per afvoerniveau afgeleid uit de MAPS die wél opgeslagen zijn op de WAQUA-uitvoer. Daarbij gebruiken we het zogenaamde 'secties'-bestand uit Baseline, die ook is gebruikt als invoer voor WAQ2Prof. Voor ieder afvoerniveau sommeren we de afvoer over - delen van - roosterlijnen die dwars op de rivier georiënteerd zijn (n-roosterlijnen). Voor de totale afvoer gebruiken we de roosterzellen begrensd door de modelrand langs beide uiterwaarden (sectie 3) en voor de zomerbedafvoer de randen van het zomerbed (sectie 1). Voor de totale afvoer is dit principe geïllustreerd voor meetpunt 'Q-Lobith-hw-meting' in Figuur 72.

*Figuur 72:  
Vergelijking afvoer  
uit tijdserie en  
afgeleid uit 2D-grid  
voor 'Q-Lobith-hw-  
meting'*



**Hoofdkantoor**

HKV lijn in water BV  
Botter 11-29  
8232 JN Lelystad

**Nevenvestiging**

Informaticalaan 8  
2628 ZD Delft

0320 294242  
[info@hkv.nl](mailto:info@hkv.nl)  
[www.hkv.nl](http://www.hkv.nl)