



RWS INFORMATIE

Hydraulische veranderingen in de Rijntakken

Datum 2 juli 2019
Versie 1.0
Status FINAL

Colofon

Uitgegeven door	Rijkswaterstaat, Oost-Nederland
Auteur	N.M. (Niels) Welsch

Begeleider RWS	D.R. (Daniël) van Putten
Begeleider UT	R.P. (Pepijn) van Denderen

Datum	2 juli 2019
Versie	1.0
Status	Final

Inhoud

1	Introductie 6
1.1	Probleem beschrijving 8
1.2	Onderzoeksdoel 8
1.3	Onderzoeksvragen 8
1.4	Methodologie 9
1.5	Leeswijzer 9
2	Veranderingen in de Rijntakken 10
2.1	Ruimte voor de Rivier 10
2.2	Veranderingen van de bodemhoogte 10
2.3	Vegetatieontwikkeling 11
3	Methode 12
3.1	Beschrijving Rijntakkensysteem 12
3.2	Baseline 13
3.3	SIMONA WAQUA 14
3.4	Schematisaties in Baseline 15
3.5	Randvoorwaarden WAQUA 16
4	Resultaten 18
4.1	Effecten op de afvoerverdeling 18
4.2	Effecten op de waterstanden 23
5	Discussie 30
5.1	Modelopzet en gebruik 30
5.2	Aanbevelingen 31
6	Conclusie 32
7	Referenties 33
8	Bijlagen 34

1 Introductie

Nederland is een land waar men al sinds jaar en dag bezig is het managen van water. Men hoeft niet ver in het verleden te kijken om te zien dat de waterproblematiek in Nederland erg divers is. In de winter van 2018 kreeg het deltaland nog te maken met hoogwater in de rivieren, met een piek van 14,65 +mNAP op de Rijn bij Lobith. Slechts een half jaar later bereikte de Rijn de laagste waterstand ooit, 6,89 +mNAP bij Lobith, als gevolg van een zeer droge zomer. Als onderdeel van het watermanagement zijn Nederlanders al honderden jaren bezig met ruimtelijke ingrepen in de rivier. Hierdoor verandert het riviersysteem voortdurend. Om meer duidelijkheid te krijgen in de veranderende afvoerverdeling en waterstanden van de grootste rivier in ons deltaland, de Rijn, is dit onderzoek uitgevoerd. In Figuur 1 zijn de grote rivieren in Nederland gegeven.



Figuur 1. De grote rivieren in Nederland.

Nadat de Rijn ontspringt in de Zwitserse Alpen, stroomt de Rijn door meerdere landen voordat deze haar delta bereikt in Nederland. Behalve haar oorsprong in de Alpen, wordt een groot deel van de afvoer toegevoerd uit niet-alpiene riviertakken. Samen met de bufferende werking van het Bodemeer zorgen deze riviertakken ervoor dat de afvoer van de rivier in haar delta stabiel is gedurende het hele jaar (Cioc, 2002).

Aangezien het stroomgebied van de Rijn een groot gebied beslaat door de vele riviertakken, is de afvoer gevoelig voor klimaatverandering. Middelkoop et al. (2001) concluderen dat de verwachting is dat de Rijn langzaam van een gecombineerde regen-smeltwater rivier zal veranderen in een regenrivier. Dit zal leiden tot hogere afvoeren in het voorjaar, het najaar en de winter, in tegenstelling tot lagere afvoeren in de zomer (KNMI, 2015; Middelkoop et al., 2001). Over het algemeen zullen deze hogere afvoeren leiden tot hogere waterstanden in de Rijn en, in haar delta, in de Waal, Nederrijn en IJssel (Middelkoop, 2000).

In haar delta splitst de Rijn zich tweemaal op Nederlands grondgebied. De eerste is de Pannerdensch Kop bij Pannerden, waar de Rijn splitst in de Waal en het Pannerdensch Kanaal. De tweede is de IJsselkop bij Arnhem, waar de laatstgenoemde splitst in de Nederrijn en de IJssel. Afhankelijk van de waterstand en de verhanglijnen bij deze splitsingen verdeelt het water zich vervolgens over de riviertakken.

Om de stijgende waterstanden het hoofd te kunnen bieden heeft het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat het programma 'Ruimte voor de Rivier' uitgevoerd. De aanleiding voor dit programma waren onder andere de twee hoogwaters in 1993 en 1995 die grote delen van de uiterwaarden onder water hebben gezet. In tegenstelling tot de eerdere aanpak van hoogwater bescherming lag de focus bij Ruimte voor de Rivier niet meer op het traditionele verhogen van dijken. Zoals de naam al suggereert lag de focus binnen dit programma op het creëren van ruimte zodat het water makkelijker afgevoerd kan worden naar de zee. Zo zijn er, onder andere, op diverse plekken uiterwaarden vergraven, dijken verlegd en hoogwatergeulen gegraven, zie Figuur 2.

In totaal programma bestaat het programma uit een dertigtal ruimtelijke ingrepen die gezamenlijk zijn uitgevoerd in de periode tussen 2014 en 2018. Het uitgangspunt voor dit programma was om een maatgevende afvoer van 16.000 m³/s bij Lobith te kunnen verwerken. Hierbij is uitgegaan van een afvoerverdeling over de Rijntakken zoals deze is vastgelegd in de Wet op Waterkering. Deze schrijft een verdeling voor van grofweg 10.165 m³/s naar de Waal, 3.375 m³/s naar de Nederrijn en 2.460 m³/s naar de IJssel (Schielen, Jesse, & Bolwidt, 2007). Mede om deze afvoerverdeling te kunnen bewerkstelligen zijn als onderdeel van het Ruimte voor de Rivier programma een nieuwe regelwerken gebouwd. Door met de regelwerken bij de Pannerdensch Kop en de IJsselkop de verhanglijnen te beïnvloeden kan Rijkswaterstaat de afvoerverdeling beïnvloeden.



Figuur 2. Een overzicht van de uitgevoerde projecten in het kader van het Ruimte voor de Rivier programma. (Ruimte voor de Rivier, 2014)

1.1 Probleem beschrijving

De bij wet vastgelegde afvoerverdeling geldt alleen bij maatgevende afvoer. Voor alle projecten uit het Ruimte voor de Rivier programma zijn de hydraulische effecten daarom alleen bepaald bij deze maatgevende afvoer. Bij andere afvoeren is onbekend hoe de afvoerverdeling nu is. De maatregelen uit het programma zullen namelijk bij verschillende afvoeren de waterstand veranderen. Hierdoor zal de afvoerverdeling ook anders zijn in het hele afvoerbereik.

Naast deze menselijke ingrepen vinden er ook autonome processen plaats in de rivier die de afvoerverdeling en waterstanden beïnvloeden. Deze processen bestaan voornamelijk uit bodemerosie en vegetatieontwikkeling in de uiterwaarden (Reeze et al., 2017). Door bodemerosie zullen de waterstanden in eerste instantie dalen. Deze daling zal leiden tot een toename van afvoer naar die riviertak, waardoor de waterstanden weer zullen stijgen (Kleinhans et al., 2013). De verwachting is dat veranderde vegetatie in de uiterwaarden zal leiden tot een toename van de ruwheid van de uiterwaarden. Dit leidt op haar beurt weer tot lagere stroomsnelheden en dus hogere waterstanden (Straatsma et al., 2017; ten Brinke, 2004).

Voor Rijkswaterstaat is het als beheerder van het Nederlandse stroomgebied van de Rijn belangrijk om te weten wat de afvoerverdeling is en welke waterstanden optreden bij bepaalde afvoeren. De ingrijpende maatregelen in het Ruimte voor de Rivier programma en de autonome processen hebben deze zodanig aangepast dat een nieuw inzicht gewenst is. Daarnaast is het gewenst om de verhouding tussen autonome processen en Ruimte voor de Rivier te begrijpen.

1.2 Onderzoeksdoel

Het doel van dit onderzoek is om de verandering van de afvoerverdeling en de waterstanden in het stroomgebied van de Rijn in Nederland in kaart te brengen. Hierbij ligt de focus specifiek op veranderingen door bodemverandering, vegetatieontwikkeling en het Ruimte voor de Rivier programma.

1.3 Onderzoeksvragen

Om een antwoord te kunnen geven op het onderzoeksdoel is de volgende hoofdvraag geformuleerd:

Hoe verhouden veranderingen in de afvoerverdeling en waterstanden in de Rijntakken als gevolg van het Ruimte voor de Rivier programma zich tot veranderingen veroorzaakt door autonome processen?

Om deze vraag te beantwoorden zijn er twee sub vragen opgesteld, waarbij er een uitsplitsing is gemaakt in de veranderingen in afvoerverdeling en de veranderingen in waterstand. Dit levert de volgende twee vragen op:

1. Wat is de impact van bodemerosie, vegetatieontwikkeling en het Ruimte voor de Rivier programma op de afvoerverdeling tussen de Rijntakken?
2. Wat is de impact van bodemerosie, vegetatieontwikkeling en het Ruimte voor de Rivier programma op de waterstanden in de Rijntakken?

1.4 Methodologie

In deze studie wordt gebruik gemaakt van numerieke modellen om een antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag. Er zullen vier verschillende modellen gemaakt worden van het stroomgebied van de Rijn. Als basis voor de modellen dient een referentie gemaakt te worden van het rivierengebied in 2017 zonder de Ruimte voor de Rivier maatregelen. Vervolgens zal van deze referentie drie afgeleide modellen opgesteld worden met respectievelijk een andere rivierbodem, vegetatietoestand en de toevoeging van Ruimte voor de Rivier. Deze modellen worden vervolgens ingeladen in een numeriek simulatieprogramma samen met diverse randvoorwaarden. Vervolgens zullen met de verkregen data de verschillen in afvoeren ten opzichte van de referentie worden geanalyseerd.

1.5 Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk van dit verslag zullen de veranderingen in de Rijntakken worden besproken. In Hoofdstuk 3 zal de gebruikte methodiek verder worden toegelicht. In Hoofdstuk 4 zullen vervolgens de resultaten worden toegelicht, waarna in Hoofdstuk 5 een discussie op het onderzoek zal plaatsvinden. In Hoofdstuk 6 zal vervolgens een conclusie worden gepresenteerd.

2 Veranderingen in de Rijntakken

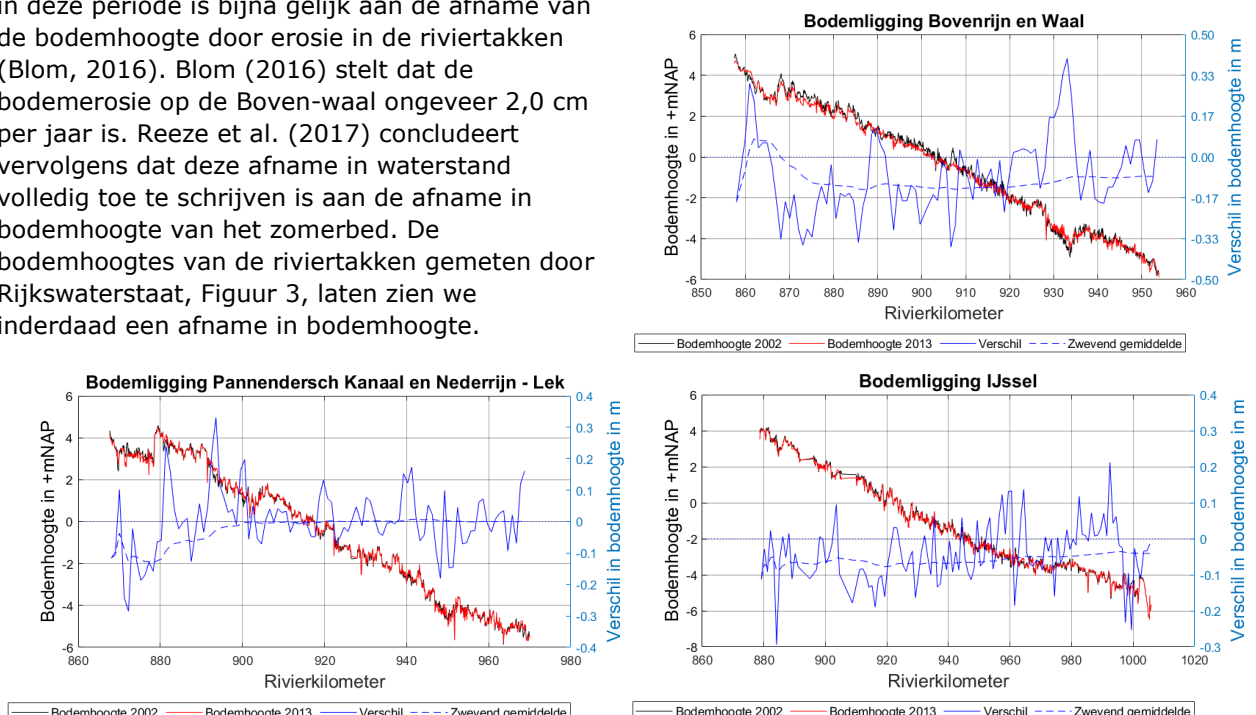
2.1 Ruimte voor de Rivier

Het complete Ruimte voor de Rivier programma bestaat uit 36 individuele projecten. Zeven projecten zijn uitgevoerd in de Maas en hebben dus geen effect op de waterstanden in de Rijntakken. In Figuur 2 en Bijlage 8A is een overzicht te zien van de maatregelen die zijn uitgevoerd. De taakstelling van dit programma was primair om het riviersysteem bestand te maken tegen hogere afvoeren in de toekomst. Tegelijkertijd had het programma ook de taakstelling om de waterstanden op de rivieren te verlagen. Hiervoor zijn een negental verschillende maatregelen ingezet: kribverlaging en langsdammen, zomerbedverlaging, waterberging, uiterwaardvergraving, ontpoldering, obstakelverwijdering, hoogwatergeulen, dijkverlegging en dijkverbetering.

Op de Waal zijn voornamelijk kribverlaging en uiterwaardvergravingen toegepast op een groot aantal plekken. Daarnaast is er bij Lent een grote nevengeul aangelegd, die in het geval van hoogwater de waterstanden in de Waalbocht bij Nijmegen moet verlagen. Op de Nederrijn en Lek zijn vooral veel uiterwaardvergravingen gedaan. Ook is er bij Elst sprake geweest van obstakelverwijdering: de machinistenschol is afgebroken. Op de IJssel is een combinatie van dijkverlegging en uiterwaardvergravingen toegepast. Ook is er tussen Veessen en Wapenveld een hoogwatergeul aangelegd.

2.2 Veranderingen van de bodemhoogte

In de periode tussen 1990 en 2014 zijn de waterstanden op de Rijn over het algemeen afgenomen, terwijl de afvoeren gelijk zijn gebleven. Deze afname is niet alleen zichtbaar bij hoge afvoeren, maar juist ook bij lage. De afname in waterstand in deze periode is bijna gelijk aan de afname van de bodemhoogte door erosie in de riviertakken (Blom, 2016). Blom (2016) stelt dat de bodemerosie op de Boven-waal ongeveer 2,0 cm per jaar is. Reeze et al. (2017) concludeert vervolgens dat deze afname in waterstand volledig toe te schrijven is aan de afname in bodemhoogte van het zomerbed. De bodemhoogtes van de riviertakken gemeten door Rijkswaterstaat, Figuur 3, laten zien we inderdaad een afname in bodemhoogte.



Figuur 3. De bodemontwikkeling in de periode tussen 2002 en 2013.

2.3

Vegetatieontwikkeling

De derde onderzochte parameter in dit onderzoek is de vegetatieontwikkeling in de uiterwaarden. In Tabel 1 is een overzicht weergegeven van de verandering in vegetatie in de periode tussen 1997 en 2013. Hierbij valt op dat er op de Boven-Rijn vooral een wisseling heeft plaatsgevonden van productiegrasland naar natuurlijk grasland. Op de Waal is ook een afname van productiegrasland te zien, waarbij natuurlijk grasland en droge ruigte aanzienlijk zijn toegenomen. Net zoals op de Boven-Rijn beslaat de droge ruigte in 2012 meer oppervlak dan in 1997. Daarbij zijn vooral akker- en productiegrasland in oppervlak gekrompen. In tegenstelling tot alle andere riviertakken is het oppervlak productiegrasland in de uiterwaarden van de Nederrijn – Lek enorm toegenomen, met een ruime 28 procentpunt toename ten opzichte van de vegetatiesamenstelling in 1997. Daarbij zien we tegelijkertijd een nog grotere afname in natuurlijk grasland. Ook is op te merken dat de oppervlakte verhard terrein op deze riviertak is afgenomen doordat er bebouwing hiervoor in de plaats is gekomen. Als laatste riviertak is er de IJssel, waarbij ook hier de oppervlakte in productiegrasland is afgenomen. Daarentegen is de oppervlakte van plassen en havens gestegen met ongeveer dezelfde ordegrootte. In Bijlage 8A zijn niet alleen de mutaties, maar ook de procentuele oppervlaktes per vegetatieklasse zichtbaar.

Tabel 1. Een overzicht van de verandering in vegetatie op de Rijntakken tussen de jaren 1997 en 2012. De vegetatie is opgedeeld in klassen waarbij de klasse meer dan 5% van de uiterwaarden beslaat of de mutatie groter is dan 5%-punt ten opzicht van de referentie.

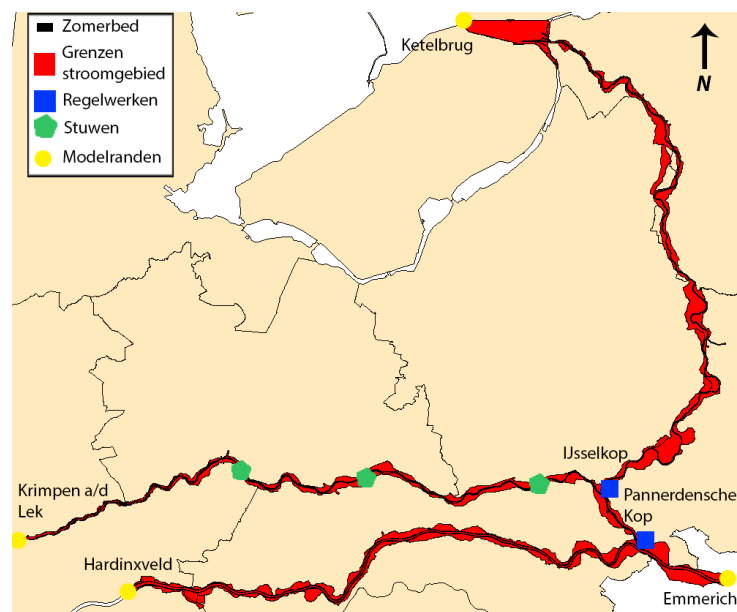
Vegetatieklasse	Ruwheidscoëfficiënt (k-Nikuradse)	Boven- Rijn	Waal	Pannderdensch Kanaal	Nederrijn – Lek	IJssel
Plas/haven	0,05	-3,79	-1,44	-1,36	12,58	20,63
Kribvakstrand	0,15	1,96	3,86	2,90	-10,47	-0,16
Bebouwd en verhard terrein	0,60	0,22	0,19	0,99	4,77	-0,72
Verhard terrein	0,20	-	-	-	-5,50	-0,70
Akker	0,20	-1,41	-1,32	-4,36	7,67	-1,53
Productiegrasland	1,8 met hoogte = 0,06, dichtheid = 45,	-32,52	-17,52	-3,97	28,38	-19,87
Natuurlijk grasland	1,8 met Hoogte = 0,10, Dichtheid = 12	36,37	7,08	-1,08	-31,12	4,60
Droge ruigte	1,8 met Hoogte = 0,56, Dichtheid = 0,23	0,60	5,08	5,43	-5,82	-0,71
Natte ruigte	1,8 met Hoogte = 0,35, Dichtheid = 0,23	-	0,18	-	-4,41	-
Zachthoutoobos	1,5 met Hoogte = 10,00, Dichtheid = 0,023	1,95	1,60	1,02	0,88	0,45
Overige		-3,38	2,30	0,45	3,04	-1,99
Totaal		0	0	0	0	0

3 Methode

Aangezien de antwoorden op de hoofd- en deelvragen van dit onderzoek niet direct meetbaar zijn, is dit onderzoek gebaseerd op modelsimulaties. Hiervoor zijn vier verschillende scenario's ontwikkeld, waarvan de resultaten met elkaar vergeleken zullen worden. Hierna zal eerst het modelgebied van het Rijntakkenstelsel worden toegelicht. Daarna zal ingegaan worden op de gebruikte software. Vervolgens zullen de gemaakte modellen worden besproken.

3.1 Beschrijving Rijntakkenstelsel

Het stroomgebied van de Rijn dat in deze studie onderzocht wordt is weergegeven in Figuur 4. Zoals te zien is begint het stroomgebied rechtsonder bij de brug bij Emmerich in Duitsland. Vervolgens komt de Boven-Rijn Nederland bij Lobith binnen. Na een kleine tien kilometer splits de Boven-Rijn zich op bij de Pannerdensch Kop in de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Veruit het grootste deel van de afvoer vindt zijn weg naar de zee via de Waal. De Waal eindigt in het modelgebied bij Hardinxveld. Het water dat via het Pannerdensch Kanaal verder stroomt, komt na elf kilometer aan bij de IJsselkop. Hier splitst de rivier zich opnieuw op in de Nederrijn-Lek en de IJssel. De Nederrijn-Lek eindigt in het model bij Krimpen aan de Lek en de IJssel stroomt via het Ketelmeer het model uit bij de Ketelbrug.



Figuur 4. Een overzicht van het modelgebied (rood) met de modelranden (geel), locaties van regelwerken (blauw) en stuwen (groen) (RWS-WVL & Deltares, 2018).

De riviertakken in Nederland bestaan naast een ruim zomerbed, ook uit ruime uiterwaarden. Deze uiterwaarden gaan allemaal bij verschillende afvoeren meestromen. Over het algemeen valt te zeggen dat de eerste uiterwaarden mee gaan stromen vanaf 4.000 m³/s bij Lobith.

Om de waterhuishouding in Nederland enigszins te sturen zijn er diverse kunstwerken in het stroomgebied aangelegd. Allereerst zijn er bij de splitsingspunten, zoals eerder genoemd, twee regelwerken aangelegd: het regelwerk Pannerden en het regelwerk Hondsbroekse Pleij. Deze regelwerken bestaan uit een aantal openingen waar betonnen schotten in geplaatst kunnen worden, zie Figuur 5. Met de plaatsing van betonnen schotten kan de afvoerverdeling enigszins gestuurd worden. Eenmaal per jaar wordt door Rijkswaterstaat de configuratie van deze schotten bepaald.



Figuur 5. De regelwerken in de Nederlandse Rijntakken: Het regelwerk Pannerden (links) en het regelwerk Hondsbroekse Pleij (rechts) (Pluim, (geen datum); Unknown, (no datum)).

Naast regelwerken zijn er ook drie stuwen aanwezig in de Nederrijn en de Lek. In volgorde van bovenstrooms naar benedenstrooms liggen de stuwen bij Driel, Amerongen en Hagestein (zie Figuur 4). Deze stuwen zijn aangebracht om in het lage afvoerbereik de Nederrijn – Lek te stuwen en voldoende afvoer naar de IJssel te bewerkstelligen. Daarom zijn deze stuwen actief bij een afvoer lager dan 3.600 m³/s bij Lobith. Bij afvoeren hierboven hoeft de Nederrijn-Lek niet meer gestuurd te worden, dus staan de stuwen volledig open.

3.2

Baseline

Het gebruik van Baseline de eerste stap in het onderzoek. Rijkswaterstaat maakt gebruik van dit programma om een schematisatie van haar beheersgebied bij te houden. Met dit programma is het namelijk mogelijk om verschillende geografische informatie uit diverse databases te combineren en visualiseren. Deze databases kunnen bijvoorbeeld een hoogtekkaart of een kaart van de aanwezige vegetatiesoorten zijn. Daarnaast is het mogelijk om al deze kaarten als het ware op elkaar te stapelen. Hierdoor kan een zeer uitgebreid bestand worden opgebouwd tot een schematisatie van de werkelijkheid. Voor dit onderzoek zijn ruwheden, kunstwerken, een hoogtekkaart, overlaten en bodemhoogtes van het zomerbed op elkaar gestapeld om tot een model te komen.

Baseline maakt het ook mogelijk om de verschillende ruimtelijke modelschematisaties geschikt te maken voor diverse simulatie programma's. Baseline doet dit door de schematisatie als numeriek model op te slaan. Daarnaast biedt Baseline de mogelijkheid om maatregelen in te mixen. Hierbij worden losse stukken schematisaties opgenomen in een groter model. Dit biedt als voordeel dat maatregelen buiten de schematisatie gemaakt kunnen worden en vervolgens gemakkelijk aan een schematisatie toegevoegd kunnen worden. Hierdoor is een gemaakte maatregel makkelijk reproduceerbaar. In dit onderzoek is ook gebruik gemaakt van deze mix functie.

3.3

SIMONA WAQUA

Nadat de schematisaties omgezet zijn, worden de schematisaties met behulp van een numeriek model gesimuleerd. Dit wordt gedaan met het simulatieprogramma WAQUA. WAQUA simuleert de variatie van waterstroming over de lengte en de breedte van een rivier. Omdat de stroming van het water over de diepte van het volume voor deze simulatie niet relevant is, is voor dit numerieke 2D-programma gekozen.

Naast een schematisatie zijn er ook een aantal randvoorwaarden vereist in WAQUA. Deze set randvoorwaarden bevat onder andere condities bij de zogenoemde open randen in het model. Dit zijn de modelgrenzen benedenstrooms van het model en de bovenrand bij Emmerich, zie Figuur 4. In deze studie zijn Qh-relaties gebruikt om de relatie tussen waterstand en afvoer te definiëren bij de benedenstroomse grenzen. Bij de bovenstroomse grens, zijn de afvoeren waarmee de modelschematisatie doorgerekend moet worden als invoer gebruikt. Dit is als een afvoertijdreeks worden ingevoerd.

Als derde heeft het programma een raster nodig waarmee het de simulatie uit kan voeren. Dit raster bepaalt als het ware de dichtheid waarmee WAQUA het model doorrekent. Het rooster bepaalt daarmee dus ook het aantal berekeningen dat per tijdstap gemaakt worden in het stroomgebied. Tijdens het simuleren gaat het programma het raster af. Voor iedere tijdstap wordt per rastercel de waterdiepte bepaald. Daarnaast wordt de stroomsnelheid van het water door de rasterranden berekend met behulp van Navier-Stokes vergelijkingen. Deze stroomsnelheid wordt onder andere beïnvloed door de bodemruwheid (afkomstig uit de schematisatie), die op zijn beurt weer afhankelijk is van de waterdiepte in de cel. Vanwege deze relatie bepaald WAQUA per iteratie ook opnieuw weer de bodemruwheid. Een fijnmaziger rooster zorgt hiermee dus voor een nauwkeuriger resultaat, maar tegelijkertijd ook voor een langere rekentijd.

Uiteindelijk wordt de relevante informatie door het programma weggeschreven in losse bestanden die gebruikt kunnen worden voor een analyse. Als de benodigde randvoorwaarden ingevoerd zijn, kan een simulatie gedaan worden.

3.4 Schematisaties in Baseline

Er worden voor dit onderzoek vier verschillende modelschematisaties gemaakt. De eerste schematisatie zal dienen als referentie situatie. Vanuit dit model zullen de drie andere modellen worden ontwikkeld. Dit wordt gedaan door verschillende ruimtelijke veranderingen in te voegen, oftewel in te mixen. In Tabel 2 is een overzicht te zien van de ontwikkelde modelschematisaties met hun doel. Ook is het verschil ten opzichte van de referentie weergegeven. In de komende paragrafen zal worden ingegaan op de verschillende schematisaties.

Tabel 2. Een overzicht met de modelschematisaties, hun doel en veranderde eigenschappen gegeven door het jaar waarin de data is verzameld.

Variant	Doel	Basismodel	Ruimte voor de Rivier	Bodem	Vegetatie
j18_5-ref	Referentie	j14_5tm18	Niet aanwezig	2013	2012
j18_5	Invloed van Ruimte voor de Rivier	-	2018	2017	2012
j18_5_zb02	Invloed van bodemerosie	j18_5_ref	Niet aanwezig	2002	2012
j18_5_eco97	Invloed van vegetatieontwikkeling	j18_5_ref	Niet aanwezig	2013	1997

3.4.1 Referentie

De drie verschillende onderzochte invloeden worden vergeleken met een referentie. Hiervoor is de modelschematisatie van het Rijntakkengebied j18_5-ref gemaakt. Voor deze schematisatie is een bestaand model gebruikt (Rijn-j18_5_exclRvdR). Om het model up-to-date te maken is het model geactualiseerd met alle maatregelen, uitgezonderd het Ruimte voor de Rivier programma, tussen 2014 en 2018 die nog niet verwerkt waren. De projecten uit het Ruimte voor de Rivier programma die zijn gerealiseerd voor 2013 zijn wel opgenomen het basismodel. Daarnaast is het regelwerk Pannerden vervangen door de voormalige overlaat bij Pannerden. Het nieuwe regelwerk is namelijk onderdeel van het Ruimte voor de Rivier programma en zal dus geen onderdeel zijn van de referentie situatie. Hierdoor ontstaat een actueel model van het Rijntakkengebied, waarbij de Ruimte voor de Rivier projecten na 2013 niet zijn opgenomen.

3.4.2 Ruimte voor de Rivier

De schematisatie j18_5 is het actuele model van het Rijntakkenstelsel dat gebruikt wordt door Rijkswaterstaat. Hierin zijn de meeste Ruimte voor de Rivier maatregelen in opgenomen. Naast de opname van de uitgevoerde projecten, is ook de bodem van 2017 hierin opgenomen. Door deze schematisatie te vergelijken met de referentie, is het mogelijk om conclusies te trekken over de invloed van het Ruimte voor de Rivier programma.

3.4.3 Bodemerosie

De schematisatie j18_5_zb02 is opgebouwd vanuit het referentie model Rijn-j18_5-ref. Hierbij is de bodem van het zomerbed van 2013 vervangen door de bodem van 2002. Er is gekozen voor de bodem van 2002 aangezien er vanaf dit jaar gebruik is gemaakt van dezelfde meetmethode als in 2013. Hierbij wordt gebruik gemaakt van multibeam systemen om de bodem te meten, welke aan schepen zijn bevestigd. Door verder terug te gaan ontstaat het risico dat de modeluitkomsten ook beïnvloed

kunnen worden door een verschil in meetmethode. Door deze schematisatie te vergelijken met de referentie, is het mogelijk om conclusies te trekken over de invloed van zomerbederosie en -sedimentatie in de periode tussen 2002 en 2018.

3.4.4 *Vegetatieontwikkeling*

De schematisatie j18_5_eco97 is opgebouwd vanuit het referentie model Rijn-j18_5-ref. Hierbij is de ecotopen kartering van 2012 vervangen door die uit 1997. Een ecotopen kartering is een kartering waarbij het land is opgedeeld in zogenoemde ruwheidsklassen. Voorbeelden hiervan zijn bijvoorbeeld: grasland, productie grasland en bebouwing. Vervolgens wordt er aan deze vegetatieklassen een ruwheid gekoppeld die in de berekeningen wordt gebruikt. De ecotopenkartering van 1997 is opgebouwd met een resolutie van 20m bij 20m. De ecotopenkartering van 2012 is opgebouwd met een resolutie van 5m bij 5m. Hierdoor ontstaat een resolutieverschil tussen deze variant en de referentie. Echter wordt de ecotopen kartering wordt eens per zeven jaar geactualiseerd. Dit maakt het niet mogelijk is om dezelfde periode aan te houden als bij de bodemerosie. Om toch een voldoende lange periode te kunnen evalueren is het jaar 1997 gekozen. Door deze schematisatie te vergelijken met de referentie, is het mogelijk om conclusies te trekken over de invloed van vegetatieontwikkeling in de periode tussen 1997 en 2012.

3.5 **Randvoorwaarden WAQUA**

Naast een modelschematisatie uit Baseline moeten er ook randvoorwaarden gesteld worden in WAQUA zoals vermeld in Paragraaf 3.3. Deze zullen hieronder behandeld worden.

3.5.1 *Afvoertijdreeks*

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen zullen er stationaire afvoeren worden gebruikt, om zo diverse verschijnselen, zoals het hysteresis effect, uit te sluiten. Deze afvoeren dienen dus ingevoerd te worden als randvoorwaarde in WAQUA. Omdat de relatie tussen afvoer en waterstand bij Lobith niet lineair is, wordt ervoor gekozen om de invoer van de afvoer te baseren op een lineaire verdeling in de waterstand bij Lobith. Hierdoor wordt voorkomen dat de te vergelijken waterstanden in het lage bereik ver uit elkaar liggen, terwijl er in het hoge bereik nauwelijks een waterstandsverschil optreedt. Er is gekozen voor een stapgrootte van 0,5m vanaf 7 +mNAP. De afvoeren behorend bij de gekozen waterstanden zullen hiervoor worden bepaald met behulp van de door Rijkswaterstaat opgestelde Qh-relatie uit 2018. Om een stationaire afvoer bij ieder afvoerniveau te garanderen zal de afvoer per stap minimaal 4 dagen vastgehouden worden, zodat er voldoende tijd is voor het systeem om een evenwicht te bereiken.

Om de effecten van de nevengeul bij Veessen-Wapenveld beter te bestuderen, wordt er een extra afvoerniveau toegevoegd. Hiermee wordt een waterstand bereikt welke net onder de drempelwaarde voor de activatie van de ruimtelijke ingreep ligt.

De Rijntakken worden in Nederland niet alleen gevoed vanuit de Rijn bij Lobith. Op diverse plekken wordt er water toegevoerd en onttrokken aan de Rijntakken door beken, kanalen en sluizen. De grootte van deze toe- en afvoeren is gecorreleerd aan de afvoer bij Lobith en ook als afvoertijdreeks ingevoerd in WAQUA.

Voor de randen benedenstrooms bij Hardinxveld, Krimpen aan de Lek en het Keteldiep zijn Qh-relaties gebruikt om randvoorwaarden op te stellen. Hiervoor zijn in alle simulaties de QH-relaties van 2015 gebruikt voor iedere beneden rand. Aangezien veranderingen in de rivier benedenstrooms van de modelgrenzen invloed

hebben op de Qh-relaties bij de randen, zal dit een onnauwkeurigheid opleveren bij alle simulaties. De verwachting is echter dat deze onnauwkeurigheid met name bij de Ruimte voor de Rivier significant is.

3.5.2 *Regelwerken*

Binnen het onderzoeksgebied bevinden zich een aantal regelwerken en stuwcomplexen, die gebruikt worden om de beleidsmatige afvoer te behalen. In de gebruikte modellen zijn deze dan ook opgenomen, zoals deze beleidsmatig worden ingezet. Om ervoor te zorgen dat er steeds een goede vergelijking mogelijk is, wordt het stuwprogramma op de Nederrijn en Lek gelijk gehouden bij alle simulaties.

Voor de regelwerken is de volgende aanpak gekozen. Het regelwerk Hondsbroekse Pleij wordt door Rijkswaterstaat éénmaal per jaar ingesteld. Het regelwerk is om die reden niet actief en gesloten ingesteld met een drempelwaarde van 15,19 +mNAP. Het regelwerk Pannerden is gebouwd als onderdeel van Ruimte voor de Rivier. Om die reden is in de modellen zonder Ruimte voor de Rivier dit regelwerk niet opgenomen. In de situatie met Ruimte voor de Rivier is het regelwerk gesloten ingesteld om te sturen op de beleidsmatige afvoerverdeling. Dit komt neer op een drempelhoogte van 13,32 +mNAP.

4 Resultaten

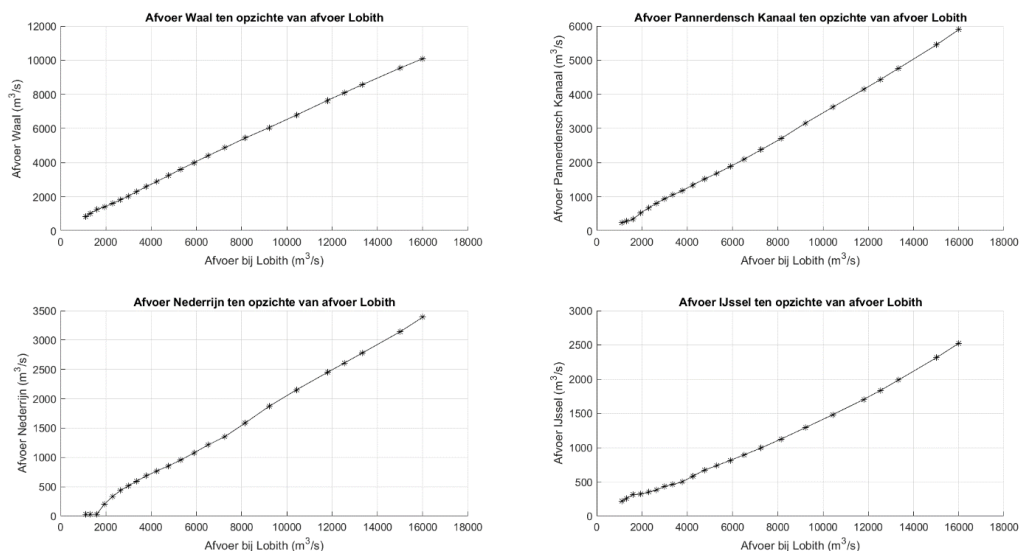
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de modelberekeningen uiteengezet. In Paragraaf 4.1 zullen de resultaten met betrekking tot de afvoerverdeling worden besproken. Daarna zullen in Paragraaf 4.2 de resultaten betreffende de waterstanden toegelicht worden.

4.1 Effecten op de afvoerverdeling

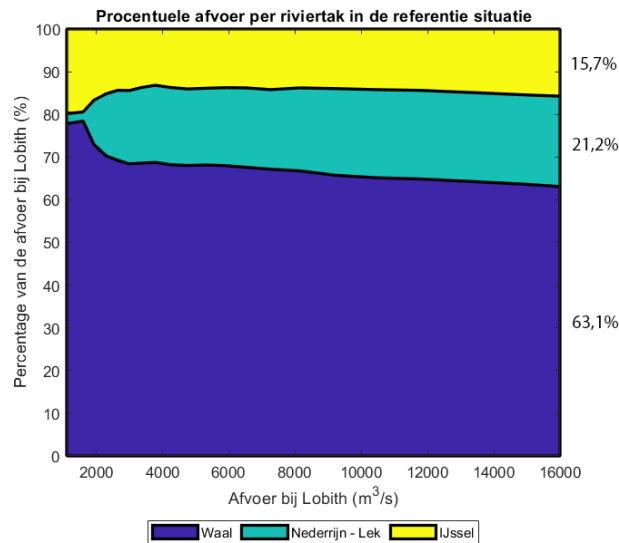
Om de veranderingen in de afvoerverdeling in verhouding te kunnen plaatsen, zal er eerst gekeken worden naar de afvoerverdeling in de referentie situatie. Vervolgens zal er per riviertak worden uitgelicht wat de invloeden zijn van de diverse processen. Omdat bij een afvoer onder 3.500 m³/s bij Lobith de stuwen op de Nederrijn en Lek nog actief stuwen, is het niet mogelijk om veranderingen in afvoerverdeling onder deze grens puur aan de onderzochte veranderingen toe te schrijven. Er zal daarom vooral naar het afvoerbereik boven 3.500 m³/s gekeken worden.

4.1.1 Referentie

In de referentie situatie was de beleidsmatige afvoer vastgelegd op 15.000 m³/s. Het regelwerk werd echter nog niet jaarlijks ingesteld op een bepaalde afvoerverdeling. Er is wel in Figuur 6 te zien dat de afvoer in de riviertakken bij een afvoer van 16.000 m³/s in de buurt komt van de beleidsmatige afvoer, zoals deze is opgesteld in de PKB Ruimte voor de Rivier deel 4 (Projectorganisatie Ruimte voor de Rivier, 2006). De lage afvoer naar de Nederrijn bij een afvoer onder 2.000 m³/s kan verklaard worden door de volledige stuwings door de stuwen volgens het stuwprotocol (zie Paragraaf 3.1). Vanaf de afvoer waarbij de stuwen niet meer ingezet worden (3.500 m³/s bij Lobith) is te zien dat de relatieve afvoer naar de Waal lichtelijk afneemt, zie Figuur 7. Het aandeel naar IJssel blijft constant, waardoor het aandeel naar de Nederrijn – Lek lichtelijk toeneemt.



Figuur 6. De afvoerverdeling voor alle riviertakken van de Rijn in de referentie situatie.



Figuur 7. De procentuele afvoer per riviertak in de referentie situatie als gestapelde grafiek.

4.1.2

Ruimte voor de Rivier

In Figuur 8 en Figuur 9 zijn voor de drie cases de veranderingen in afvoerverdeling ten opzichte van de referentie situatie weergegeven. Figuur 8 geeft de afvoerverandering in procentpunt ten opzichte van de referentie, Figuur 9 geeft de absolute veranderingen. Zoals te zien is in Figuur 8 krijgt de Waal een hogere afvoer te verwerken bij afvoeren onder 10.000 m³/s. De grootte van de afvoerverandering blijft echter beperkt tot een maximum van 1,17%-punt bij een afvoer van 1930 m³/s. Daarnaast krijgt de IJssel in vrijwel het hele afvoerbereik een lagere afvoer te verwerken. De toename van het afvoeraandeel in de Waal is verwacht, aangezien er een toename nodig is ten opzichte van de referentie om te voldoen aan de beleidsmatige afvoerverdeling. Ook kan de toename in afvoer naar de Waal verklaard worden door de aanleg van diverse projecten. Zo draagt de uiterwaardvergraving van de Millingerwaard bij aan een waterstandsverlaging op de Pannerdensche Kop. Ook levert de nevengeul bij Lent vanaf 4.000 m³/s een waterstandsverlaging op die nog invloed heeft op de waterstanden bij het splitsingspunt. Hierdoor trekt de Waal meer water aan. De projecten die benedenstrooms op de andere riviertakken zijn uitgevoerd liggen of verder weg van het splitsingspunt of hebben een kleinere waterstandsverlaging als gevolg. Hierdoor trekken ze in mindere mate water richting de andere riviertakken.

Vanaf een afvoer van 10.000 m³/s neemt de Nederrijn – Lek in afvoer toe ten opzicht van de referentie. Dit is mogelijk te wijten aan de ruimtelijke ingrepen die gedaan zijn in het bovenstroomse gedeelte van deze riviertak zoals de uiterwaardvergravingen van de Huissensche Waarden en Meinerswijk, die vanaf dit moment mee gaan stromen.

4.1.3

Bodemerosie

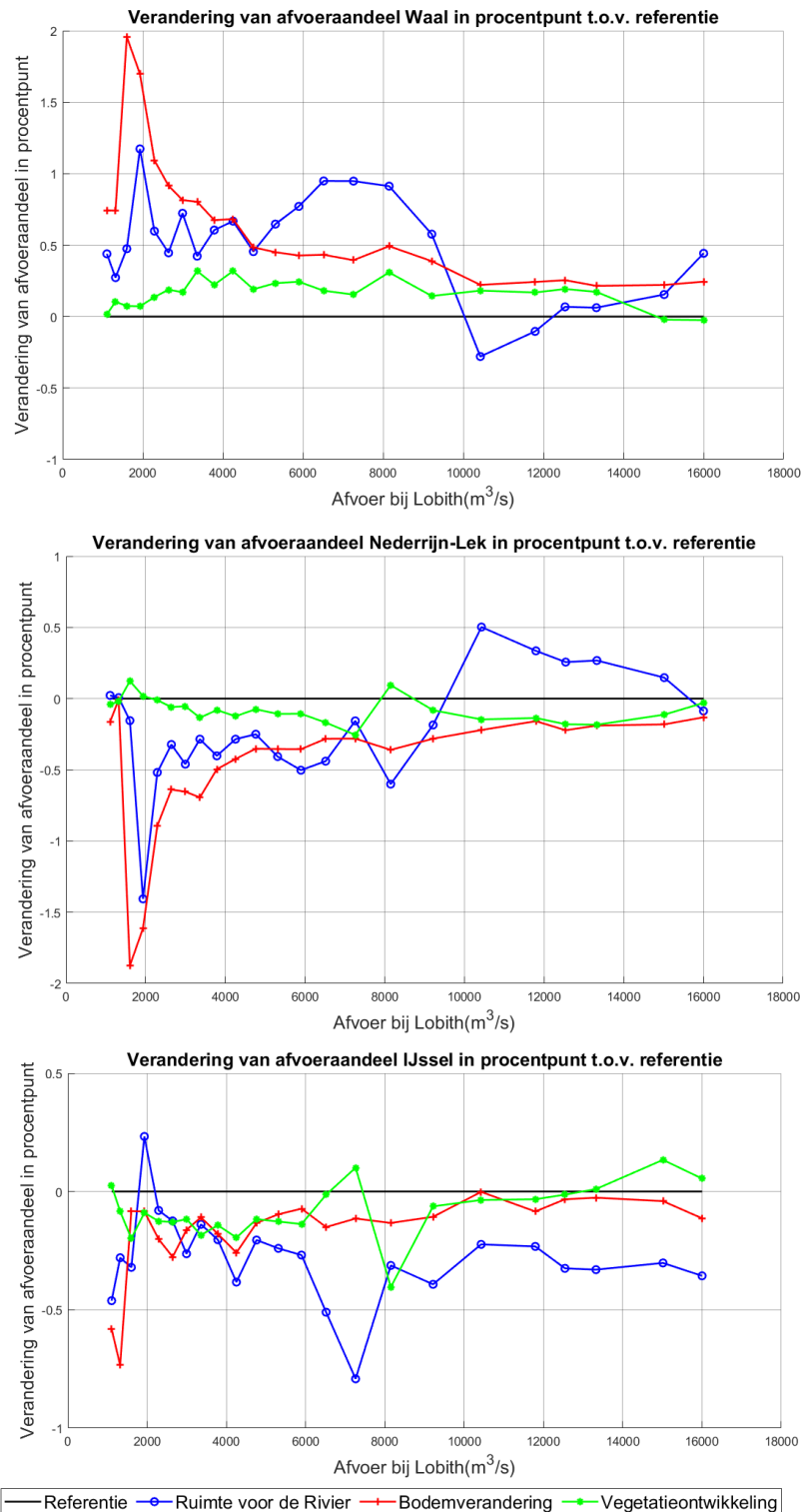
De uitkomsten van de modelberekeningen met het zomerbed van 2002 zijn te zien in Figuur 8. Hierbij valt op te merken dat de Waal in het hele afvoerbereik hogere afvoeren te verwerken krijgt, waarbij de grootte van het verschil relatief afneemt naarmate de afvoer bij Lobith toeneemt. De toename gaat in het hele afvoerbereik ten koste van de afvoer op beide andere riviertakken. Deze ontwikkeling is in lijn

met de verwachting door de bodemerosie. Zoals genoemd in Paragraaf 1.3 erodeert het bovenstroomse deel van de Waal in de onderzochte periode met ongeveer 9 cm. Het Pannerdensch Kanaal erodeert in dezelfde periode nog meer, echter is het kanaal een stuk minder breed. Hierdoor trekt de Waal een grotere hoeveelheid water aan en verliest het Pannerdensch Kanaal een deel van haar afvoer. Wat daarnaast te zien is, is dat de IJssel minder van haar relatieve afvoer verliest dan de Nederrijn – Lek. Ook dit kan aan de bodemverandering worden toegeschreven. Door een lichte bodemstijging op de Nederrijn en een bodemdaling op de IJssel trekt de IJssel op de IJsselkop meer water aan dan de Nederrijn. Hierdoor blijft het verlies in relatieve afvoer op de IJssel beperkt, ondanks de afname van afvoer naar het Pannerdensch Kanaal.

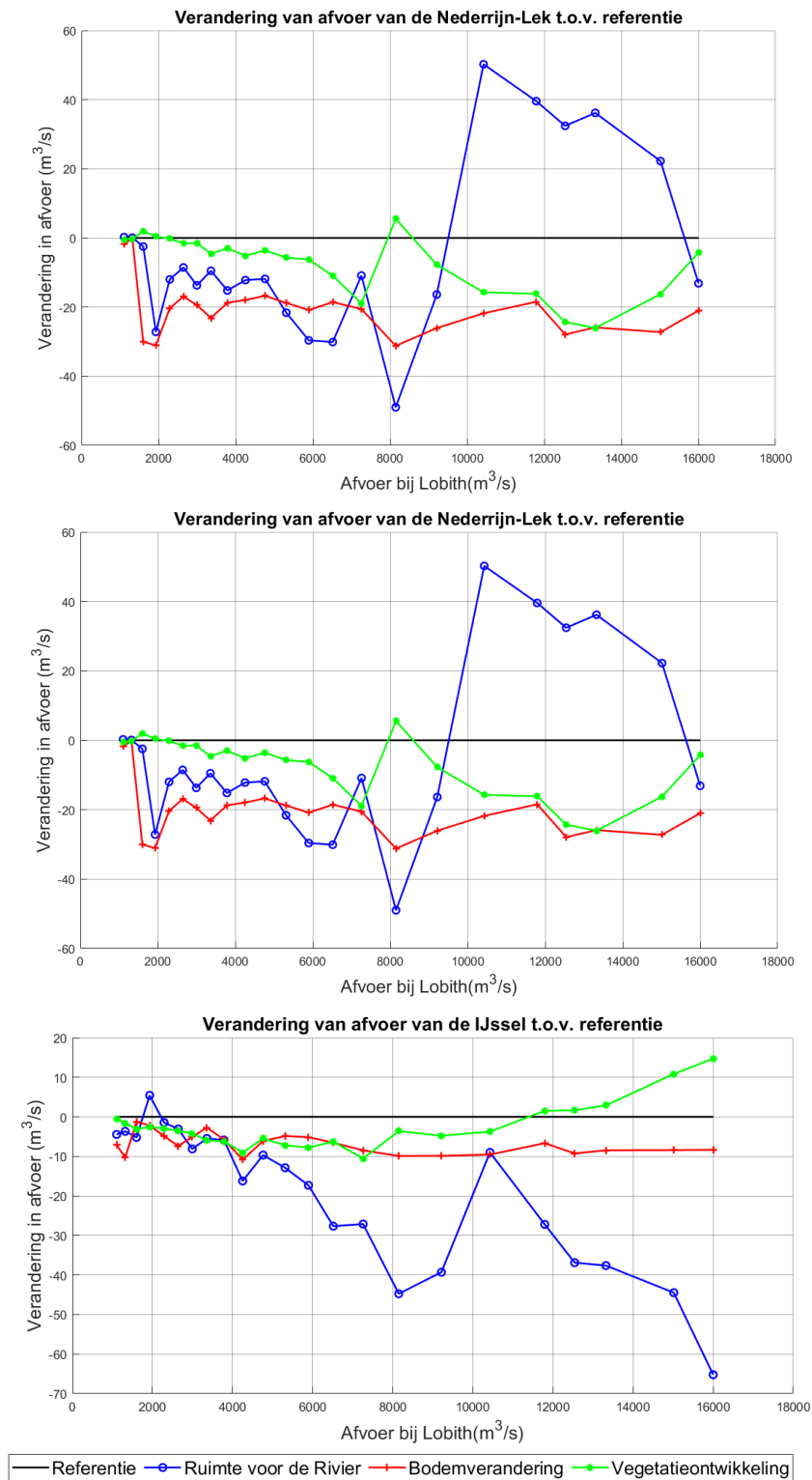
4.1.4

Vegetatieontwikkeling

Ook ten gevolge van de vegetatieontwikkeling in de uiterwaarden van de riviertakken is een verandering in de afvoerverdeling zichtbaar. De ordegrootte van de afwijkingen is echter zeer klein, zoals te zien in Figuur 8 en Figuur 9. Zoals gesteld in Paragraaf 2.1 is op te merken dat de uiterwaarden pas vanaf 4.000 m³/s mee beginnen te stromen. Vanaf deze afvoer is er echter geen grote verschuiving in afvoerverdeling zichtbaar. Dit kan mede komen door het feit dat alle uiterwaarden op verschillende momenten mee gaan stromen. Als gevolg hiervan wordt de verandering in afvoerverdeling beperkt gehouden.



Figuur 8. De verandering in afvoerverdeling in procentpunt ten opzichte van de referentie per riviertak voor de drie cases.



Figuur 9. De verandering in afvoer in absolute hoeveelheid ten opzichte van de referentie per riviervak voor de drie cases.

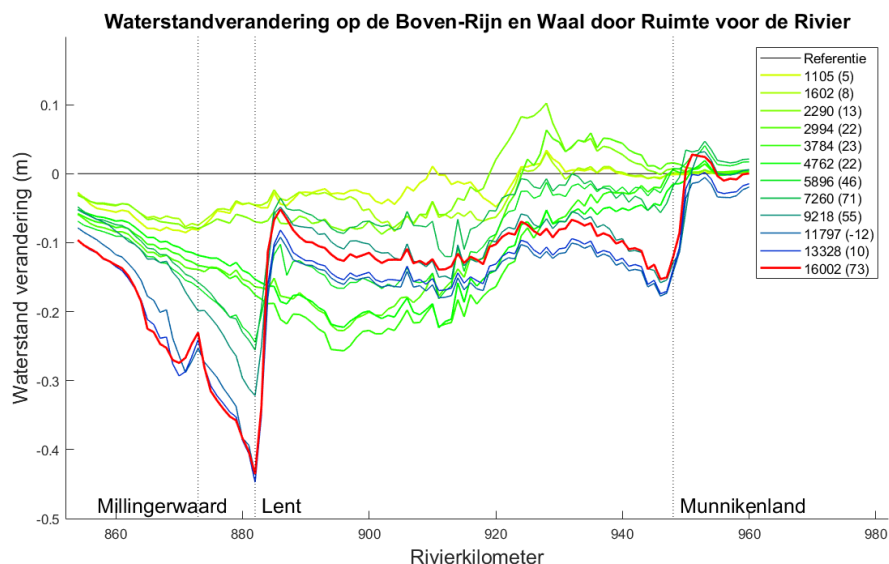
4.2 Effecten op de waterstanden

Naast effecten op de afvoerverdeling, zijn er ook effecten zichtbaar op de waterstanden in de riviertakken. In deze paragraaf zullen deze effecten besproken worden. Er zal per situatie naar iedere riviertak gekeken worden. De figuren in deze paragraaf bevatten slechts de helft van de afvoeren welke zijn gemodelleerd, omwille van de overzichtelijkheid. In Bijlage 8C zijn de figuren met de volledige datasets weergegeven.

4.2.1 Ruimte voor de Rivier

4.2.1.1 Boven-Rijn en Waal

Ondanks de hogere afvoeren op de Boven-Rijn en Waal is in Figuur 10 te zien dat de Ruimte voor de Rivier projecten in bijna het gehele afvoerbereik hebben geleid tot lagere waterstanden op de Waal. Vanaf rkm 920 tot rkm 964 treedt echter een waterstandsverhoging op. Deze verhoging treedt eerst op bij afvoeren tot 3784 m³/s, echter is de verhoging benedenstrooms ook zichtbaar tot afvoeren van 10.427 m³/s.



Figuur 10. De verandering in waterstand op de Boven-Rijn en de Waal door het Ruimte voor de Rivier programma. Achter de afvoeren in de legenda is tussen haakjes de toegenomen afname van afvoer ten opzichte van de referentie gegeven. Met de stippellijnen zijn de locaties van projecten uit Ruimte voor de Rivier aangegeven die volgens de PKB minimaal 10 cm waterstandsverlaging moeten opleveren..

Naast de algemene afname in waterstand zijn er enkele grote waterstandsverlagingen. Op het riviertraject tussen rkm 862 en 882 zien we een grote afname in de waterstand. De oorzaak van deze grote verlaging is de combinatie van de uiterwaardvergraving bij Millingerwaard en de nevengeul bij Lent. Op het riviertraject bovenstrooms van de Millingerwaard is al een grote waterstandsverlaging te zien. Daarnaast heeft ook nevengeul bij Lent een waterstandsverlaging tot gevolg. De waterstand blijft tussen Lent en de Millingerwaard ruim onder de referentie. Dit duidt erop dat het project bij Lent ook nog doorwerkt bij de Millingerwaard en de projecten elkaar hierdoor versterken.

Op het riviertraject tussen Nijmegen (rkm 886) en Gorinchem (rkm 955) is het resultaat van de langsdammen en kribverlaging zichtbaar. Aangezien het uitgevoerde werk zich over een lang traject uitspreidt is het logisch dat hier geen sterke lokale verlaging zichtbaar is, maar eerder een constante verlaging. Verder benedenstrooms op de Waal is ook het effect van de uiterwaardvergraving bij Munnikerland zichtbaar in de resultaten. Dit project is uitgevoerd rond rkm 947 en heeft zoals te zien is een verlaging in de waterstand van 15 cm als gevolg bij maatgevende afvoer.

4.2.1.2

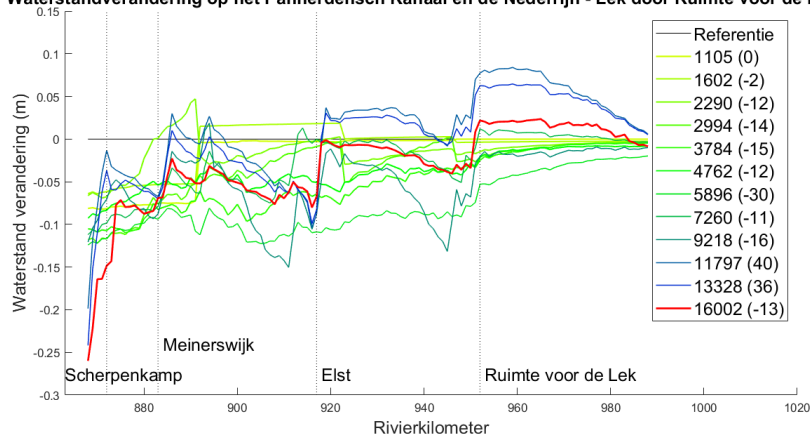
Pannerdensch Kanaal en Nederrijn – Lek

Ook op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn – Lek is er een waterstandsverlaging zichtbaar, zie Figuur 11. De grootte van deze waterstandsverlaging is echter van een kleinere mate dan op de Waal. In het lage bereik is zijn er ook een paar grote sprongen in de waterstand zichtbaar. Deze sprongen zijn het resultaat van het stuwprotocol. Door de veranderde waterstand nemen de stuwen bij dezelfde afvoeren andere standen aan, waardoor deze sprongen zichtbaar worden. De afvoeren onder 4.000 m³/s worden daarom buiten beschouwing gelaten.

Kijken we naar lokale waterstandsverlagingen kunnen we ook hier het resultaat terugzien van enkele ruimtelijke ingrepen. De eerste waterstandsverlaging die optreedt is de kadeverlaging van de Huuissensche Waarden bij Scherpenkamp. Hier is de zomerkade verlaagd, waardoor de uiterwaarden eerder mee gaan stromen. Een waterstandsverlaging zou dus ook bij lagere afvoeren op moeten treden, dit is ook terug te zien in de grafiek. Verder benedenstrooms zijn kleine verdere waterstandsverlagingen te zien. Dit is het gevolg van de diverse uiterwaardvergravingen die hebben plaatsgevonden. Vervolgens is een grote waterstandsval te zien tussen rkm 914 en rkm 917. Hier heeft de obstakelverwijdering bij Elst plaatsgevonden. Het is duidelijk te zien dat deze ingreep ook nog stroomopwaarts invloed heeft op de verlaagde waterstanden. Op het traject tussen Amerongen (rkm 920) en Vianen (rkm 950) is de laatste waterstandsverlaging op de Lek te zien bij maatgevende afvoer. De oorzaak hiervan is het Ruimte voor de Lek project. Te zien is dat dit project een ruime afstand bovenstrooms al een effect heeft.

Wat daarnaast opvalt is de waterstandsverhoging benedenstrooms van Elst bij de hoge afvoeren, met name voorbij Vianen. De oorzaak hiervan ligt waarschijnlijk in de toegenomen afvoer op de riviertak en niet zo zeer bij de ruimtelijke ingrepen.

Waterstandverandering op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn - Lek door Ruimte voor de Rivier



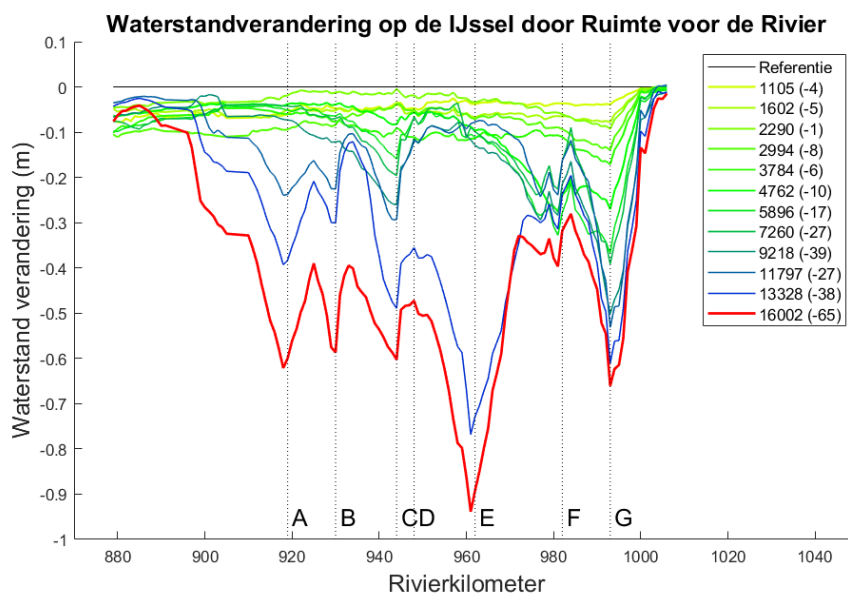
Figuur 11. De verandering in waterstand op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn - Lek door het Ruimte voor de Rivier programma. Achter de afvoeren is tussen haakjes de toe- en afname van afvoer op de Nederrijn ten opzichte van de referentie gegeven. Met de stippellijnen zijn de locaties van projecten uit Ruimte voor de Rivier aangegeven.

4.2.1.3 IJssel

Bij de IJssel valt vooral op dat de waterstand bij afvoeren boven 10.427 m³/s afneemt tot een maximum van 93 cm bij de maatgevende afvoer. Bij afvoeren lager dan deze afvoer is er ook een afname te zien, maar blijft deze beperkt tot 20 cm.

De grote afname in waterstand bij hoge afvoeren is logisch te verklaren door de aanleg van de hoogwatergeul tussen Veessen en Wapenveld. Hoewel benedenstrooms van dit project een kleine waterstandsverlaging te zien is als gevolg van de dijkverlegging bij Westenholte, heeft de hoogwatergeul de grootste impact op de waterstand bovenstrooms op de IJssel. De hoogwatergeul stroomt pas mee vanaf afvoeren boven 12.545 m³/s, waarbij het effect tot ver bovenstrooms zichtbaar is. Daarnaast zijn er bovenstrooms nog een aantal individuele projecten zichtbaar in de vorm van een waterstandsval. Rond rkm 943 zijn dit de uiterwaardvergravingen Deventer. De eerstgenoemde heeft hierbij de grootste impact. Verder bovenstrooms volgt dan de dijkverlegging Voorster Klei en de dijkverlegging bij Cortenoever.

Duidelijk is te zien dat bovengenoemde projecten elkaar versterken. De hoogwatergeul is hierbij het meest verantwoordelijk voor waterstandsval. Bij de afvoeren waar deze niet meestroomt neemt namelijk het effect van de andere maatregelen af. Bij afvoeren onder 7.260 m³/s zijn de losse projecten zelfs niet meer te onderscheiden in de resultaten.

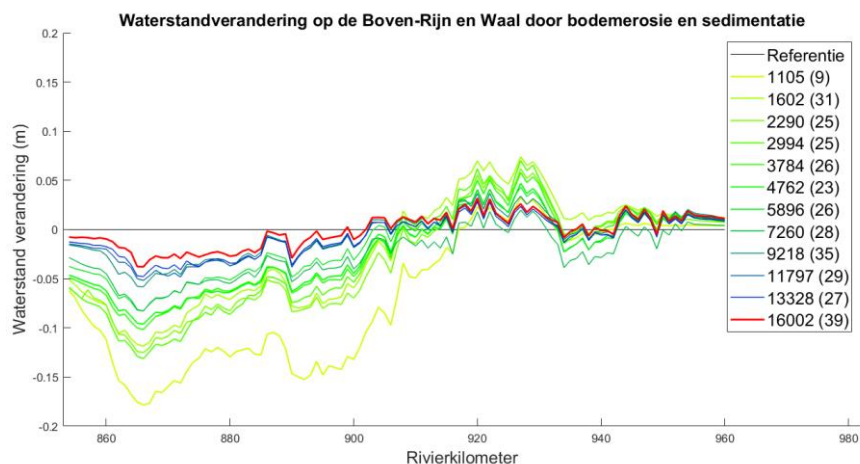


Figuur 12. De verandering in waterstand op de IJssel door het Ruimte voor de Rivier programma. Achter de afvoeren is tussen haakjes de afname van afvoer ten opzicht van de referentie gegeven. Met de stippellijnen zijn de locaties van projecten uit Ruimte voor de Rivier aangegeven: A. Dijkverlegging Cortenoever. B. Dijkverlegging Voorster Klei. C. en D. Uiterwaardvergraving Deventer. E. Hoogwatergeul Veessen – Wapenveld. F. Ruimte voor de Rivier Zwolle. G. Ruimte voor de Rivier IJsseldelta

4.2.2 Bodemerrosie en sedimentatie

4.2.2.1 Boven-Rijn en Waal

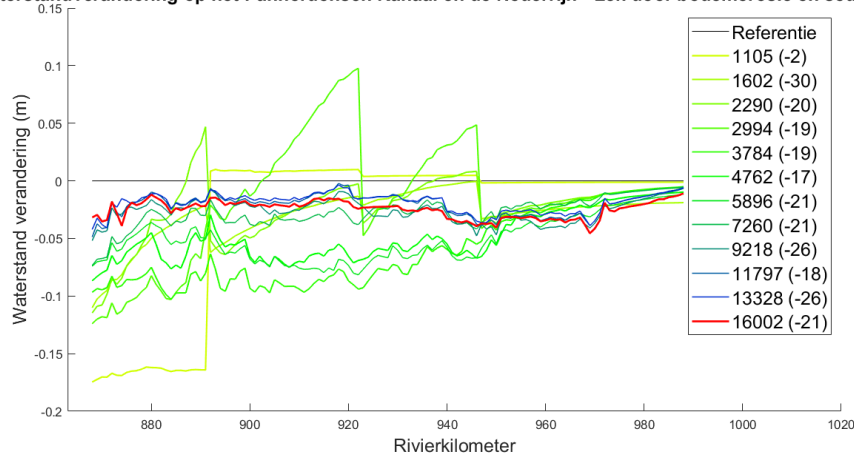
Zoals eerder gesteld is er op de Waal sprake van een bodemdaling. In Figuur 13 is te zien dat deze bodemdaling ook een waterstandsval tot gevolg heeft. In dit figuur zien we dat er tussen rkm 918 tot rkm 937 een waterstandsverhoging is bij alle onderzochte afvoeren. Als we terugkijken naar Figuur 3 zien we dat tussen rkm 930 en rkm 937 sterke sedimentatie heeft plaatsgevonden. De waterstandsstijging is dus waarschijnlijk een gevolg van deze bodemverandering.



Figuur 13. De verandering in waterstand op de Boven-Rijn en de Waal door bodemerrosie en sedimentatie. Achter de afvoeren is tussen haakjes de toename van afvoer ten opzichte van de referentie gegeven.

4.2.2.2 Pannerdensch Kanaal en Nederrijn – Lek

In Figuur 14 zijn de resultaten te zien van de verandering van de waterstanden op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn – Lek door de bodemontwikkeling. Hier zien we echter wel enkele uitschieters. Dit komt door de stuwen op de riviertak, zie Figuur 4. De uitschieters zijn dus waarschijnlijk een gevolg hiervan en niet van de bodemverandering. Net als op de Waal is de algemene trend hier dat de waterstanden dalen. De daling in waterstand varieert tussen 0 – 13 cm afhankelijk van de afvoer. Als we namelijk kijken naar de verandering in bodemligging van de Nederrijn – Lek (Bijlage 8A), zien we geen eenduidige trend in erosie of sedimentatie. Deze lage waterstanden zijn dus waarschijnlijk het gevolg van een afname in afvoer op deze riviertak.

Waterstandverandering op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn - Lek door bodemerrosie en sedimentatie

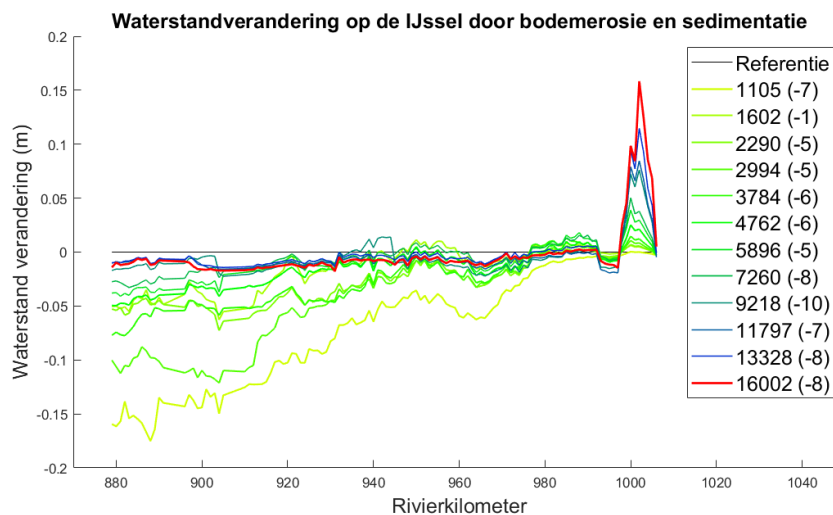
Figuur 14. De verandering in waterstand op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn - Lek door bodemerrosie en sedimentatie. Achter de afvoeren is tussen haakjes de afname van afvoer ten opzichte van de referentie gegeven.

4.2.2.3

IJssel

Ook op de IJssel nemen de waterstanden af tot aan rkm 1001 zoals te zien is in Figuur 15. De afname op deze riviervak is van dezelfde orde grootte als op de Nederrijn. Alleen in de laagste twee afvoeren die gemodelleerd zijn, 1105 m³/s en 1320 m³/s, is de afname nog groter. Hier is de afname bij de IJsselkop 15 cm ten opzichte van de referentie situatie.

Vanaf rkm 1001 is er sprake van een toename in waterstand bij maatgevende afvoer. Deze sterke toename heeft geen verklaarbare aanleiding. Daarnaast valt ook op dat de waterstandstoename op dit riviertraject juist optreedt bij hoge afvoeren, terwijl op de rest van het riviertraject de lage afvoeren de grootste waterstandsverandering optreedt. Deze toename in de waterstand wordt beschouwd als een misser in de schematisatie.



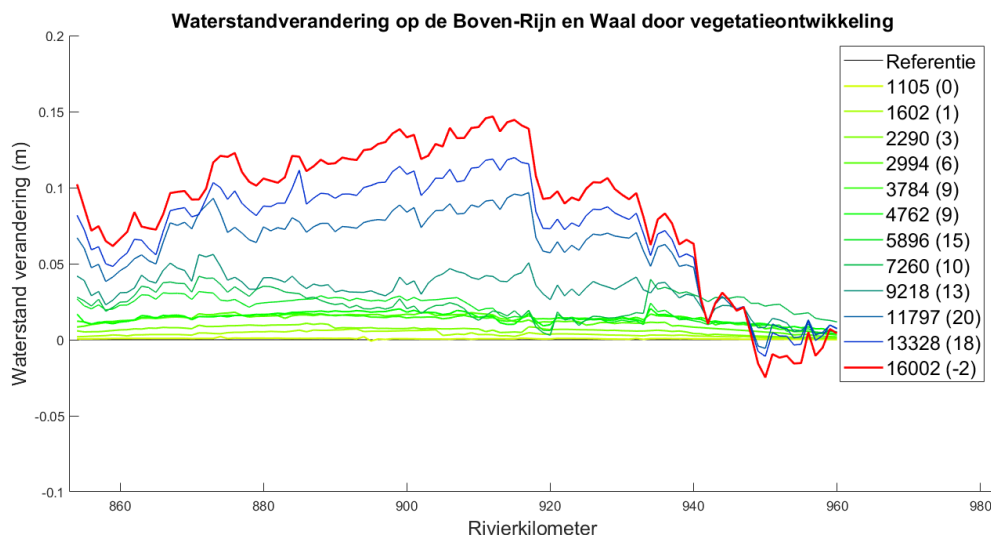
Figuur 15. De verandering in waterstand op de IJssel door bodemerrosie en sedimentatie. Achter de afvoeren is tussen haakjes de afname van afvoer ten opzichte van de referentie gegeven.

4.2.3 Vegetatieontwikkeling

4.2.3.1 Boven-Rijn en Waal

Zoals te zien is in Figuur 16 leidt de vegetatieontwikkeling tussen 1997 en 2014 tot hogere waterstanden op de Boven-Rijn en de Waal. Voor de afvoeren onder 7.260 m³/s is de verhoging in waterstand echter minimaal, met 2 cm als maximum. Dit is logisch, aangezien de eerste uiterwaarden pas vanaf 4.000 m³/s mee gaan stromen. Er is daarna echter nog een toename in afvoer nodig voordat alle uiterwaarden geheel onder water staan en meestromen. Voor de hogere afvoeren wordt bij rkm 918 een maximum van 13 cm waterstandsverhoging bereikt. Benedenstrooms treedt er ook een kleine waterstandsverlaging op, echter alleen bij een afvoer van 16.000 m³/s.

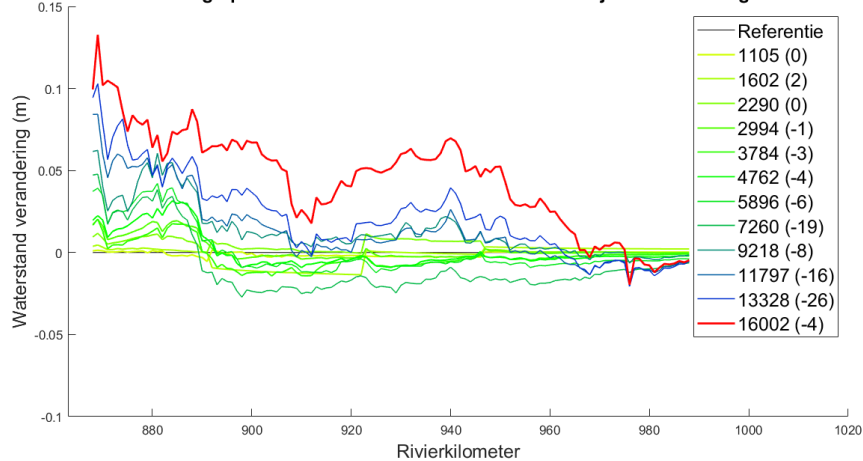
In het figuur zijn er op diverse plekken 'sprongen' in de waterstanden te zien, bijvoorbeeld bij rkm 918 en rkm 940. Deze sprongen zijn waarschijnlijk het gevolg van het verruwen van de uiterwaarden. Door de verruwing van de uiterwaarden kan de waterstand lokaal erg opgestuwd worden, wat in de grafiek tot uiting komt als sprongen. De waterstandsverlaging benedenstrooms zou het gevolg kunnen zijn van de toename in waterspiegelverhang op de Waal. Door de toename van dit verhang stroomt het rivierwater sneller, waardoor de waterstand daalt bij een gelijke afvoer. Een harde conclusie is hier echter niet aan te verbinden.



Figuur 16. De verandering in waterstand op de Boven-Rijn en de Waal door vegetatieontwikkeling. Achter de afvoeren is tussen haakjes de toe- en afname van afvoer ten opzicht van de referentie aangeven.

4.2.3.2 Pannerdensch Kanaal en Nederrijn – Lek

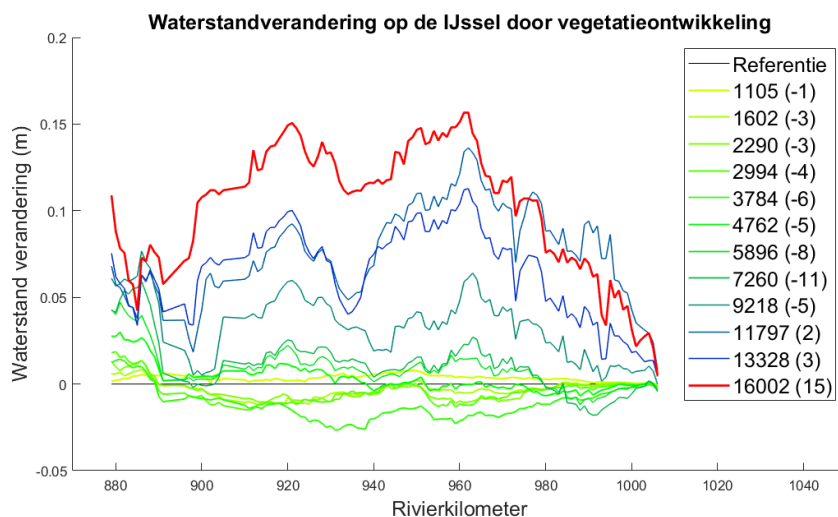
De vegetatieontwikkeling tussen 1997 en 2012 leidt op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn – Lek nauwelijks tot een verandering in de waterstand bij afvoeren onder 9.218 m³/s, zoals te zien is in Figuur 17. Bij hogere afvoeren is wel degelijk een verandering in de waterstand zichtbaar, met een maximale toename van 13 cm op het Pannerdensch Kanaal en 10 cm op de Nederrijn. Er valt op te merken dat de vegetatieontwikkeling niet leidt tot andere stuwstanden bij dezelfde afvoeren, zoals wel te zien is bij bodemerosie en Ruimte voor de Rivier. Ook op de Lek neemt het waterstandsverschil richting benedenstrooms af, totdat de verschillen minimaal zijn bij de modelrand. Dit minimale verschil aan de modelrand is het gevolg van de gelijk gebleven Qh-relaties, zoals eerder vermeld.

Waterstandverandering op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn - Lek door vegetatieontwikkeling

Figuur 17. De verandering in waterstand op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn - Lek door vegetatieontwikkeling. Achter de afvoeren is tussen haakjes de toe- en afname van afvoer ten opzicht van de referentie gegeven.

4.2.3.3 IJssel

In Figuur 18 zijn de waterstandsverschillen door vegetatieontwikkeling op de IJssel te zien. Net als op de Nederrijn – Lek vertoont deze riviertak vooral bij afvoeren boven 9.260 m³/s een toename in waterstand door vegetatieontwikkeling. De toename in waterstand op de IJssel is echter wel groter. Bij maatgevende afvoer is de toename over het grootste deel van de riviertak meer dan 10 cm. Verder benedenstrooms neemt de verandering in waterstand echter weer af, tot er geen verandering in waterstand meer zichtbaar is. Dit zou verklaarbaar kunnen zijn doordat er benedenstrooms op de IJssel nog maar weinig uiterwaarden zijn. Daarnaast eindigt de IJssel in het Ketelmeer, waar vegetatieontwikkeling geen rol meer speelt.

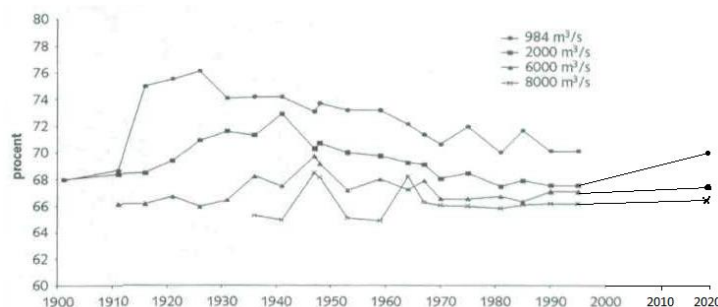


Figuur 18. De verandering in waterstand op de IJssel door vegetatieontwikkeling. Achter de afvoeren is tussen haakjes de toe- en afname van afvoer ten opzicht van de referentie gegeven.

5 Discussie

De resultaten van dit onderzoek dienen met enige bedachtzaamheid te worden geïnterpreteerd vanwege een aantal redenen. Om te beginnen is er de directe relatie tussen waterstanden en afvoerverdeling. Door de verandering in afvoerverdeling in de verschillende varianten krijgen de individuele riviertakken verschillende afvoeren te verwerken. Hierdoor kan er niet direct een conclusie getrokken worden over de invloed van de onderzochte parameters op de waterstand. De precieze veranderingen zijn dus niet volledig toe te kennen aan de veranderde parameters. Voor dit onderzoek levert de verandering in afvoer op de riviertakken echter geen problemen op. Het doel is immers om het algehele effect van autonome processen en menselijke ingrepen te onderzoeken. Bij een vervolgstudie zouden de riviertakken voor iedere schematisatie individueel gemodelleerd worden, waarbij de afvoerverdeling wordt vastgezet op de verdeling in de referentie. Hierdoor zijn de waterstanden tussen de varianten en de referentie één op één te vergelijken.

We kunnen de verkregen resultaten ook in perspectief plaatsen met eerdere onderzoeken. Als we de ontwikkelingen zoals beschreven door Schropp (1999) doortrekken zien we dat de afvoer verandering op de Waal door de natuurlijke processen ongeveer in lijn ligt met de trend over de afgelopen honderd jaar, zie Figuur 19.



Figuur 19. De relatieve afvoeren op de Waal naar de studie van Schropp (1999) aangevuld met de resultaten uit deze studie.

5.1 Modelopzet en gebruik

Naast de afwijking in de resultaten kan er ook een discussiepunt benoemd worden in de opzet van het model. Er is tijdens het modelleren voor gekozen om aan de modelranden Qh-relaties te gebruiken. Deze zijn in alle situaties gelijk gehouden. Met het Ruimte voor de Rivier programma zijn er echter ook ruimtelijke ingrepen gedaan benedenstrooms van deze modelranden. Een gevolg hiervan is dat de Qh-relatie bovenstrooms van deze projecten is komen te veranderen. Door deze niet aan te passen in het model is er een onnauwkeurigheid aan de modelranden ontstaan. De verwachting is dat door de ruimtelijke ingrepen buiten het model de waterstanden aan de randen in werkelijkheid enkele centimeters lager liggen. Concreet betekent dit dat de waterstandsverlaging voor de Ruimte voor de Rivier projecten nog groter zou kunnen zijn dan uit de resultaten blijkt. Deze onnauwkeurigheid geldt ook voor de andere situaties, echter zijn hier de waterstandsverschillen kleiner. Hierdoor is ook de onnauwkeurigheid kleiner aan de modelranden.

Ook de opbouw van de schematisaties bevat een aantal onjuistheden. Om de effecten van het Ruimte voor de Rivier programma te bestuderen zijn de ruimtelijke ingrepen die zijn uitgevoerd onder andere programma's opgenomen in de referentie. Aangezien vanuit deze referentie de schematisaties voor autonome processen zijn ontwikkeld, bevatten deze ruimtelijke ingrepen die er niet waren voor 2014. Deze ingrepen zijn voornamelijk gedaan in het kader van waterstandsverlaging. Daarom zullen de absolute waterstanden uit de modellen van de referentie en autonome processen lager zijn dan in werkelijkheid. Voor het doel van dit onderzoek, een vergelijking is dit geen belemmering. Omdat de afwijking in beide situaties aanwezig is, komt deze niet tot uiting in het resultaat.

Naast de onjuistheden in de ruimtelijke ingrepen in de schematisaties, is er ook bij de gebruikte datasets een kanttekening te plaatsen. In de schematisatie van het Ruimte voor de Rivier programma is namelijk de bodem van 2017 opgenomen. Hierdoor zijn de gepresenteerde effecten dus niet alleen toe te kennen aan de ruimtelijke ingrepen, maar ook aan de bodemontwikkeling tussen 2012 en 2017. Voor de schematisatie van de vegetatieontwikkeling is er sprake van een andere resolutie tussen de ecotopenkartering in de referentie en de case. Ook dit leidt tot een onzekerheid, aangezien een hogere resolutie over het algemeen leidt tot een beter onderscheid tussen ruwheden. In dit onderzoek is de verwachting dat de hogere resolutie op zichzelf al zal leiden tot een hogere ruwheid van de uiterwaarden.

Het is ook belangrijk om te benadrukken dat dit onderzoek is gebaseerd op een modelstudie. Hierdoor blijft er altijd een onzekerheid door de gebruikte software. Het gebruik van Baseline in combinatie met GIS biedt een stabiele basis voor de opbouw van de modellen. De resultaten uit WAQUA dienen echter wel met enige terughoudendheid te worden geïnterpreteerd. Het is duidelijk dat de software een grote set parameters gebruikt om tot resultaten te komen. Deze parameters vormen slechts een benadering van de werkelijkheid. De waterstanden en afvoeren in dit onderzoek zullen daardoor ook een bepaalde onzekerheid bevatten. In de situaties waarbij waardes met elkaar vergeleken worden zal het verschil minder aan de onzekerheid onderhevig zijn. Dit omdat de onzekerheid in beide van de vergeleken waardes aanwezig is. Aan de vergelijking van de situaties kan daarom wel een hoge betrouwbaarheid worden verbonden.

5.2 Aanbevelingen

Een toevoeging aan deze studie zou het gebruik van metingen kunnen zijn. Deze metingen zijn echter alleen beschikbaar in het lage afvoerbereik ($< 8.000 \text{ m}^3/\text{s}$). Daarnaast is de onzekerheid op deze metingen vrij hoog, waardoor ze geen betrouwbaar beeld schetsen. Aangezien de metingen het ook niet mogelijk maken om te corrigeren voor uitgevoerde werken buiten Ruimte voor de Rivier, is er bij deze studie geen gebruik van gemaakt. Door het gebruik van metingen in het lage bereik wordt het mogelijk om de referentie schematisatie te valideren.

Een andere toevoeging aan de studie zou het zijn om een herkalibratie toe te passen op de gebruikte ecotopenkartering. In de huidige schematisaties zijn, zoals eerder vermeld, twee verschillende resoluties gebruikt voor de ecotopenkartering. Door een hogere resolutie in de referentie situatie is het mogelijk om nauwkeuriger onderscheid te maken tussen ruwheden, met als gevolg een niet geheel representatieve vergelijking op basis van beide ecotopen karteringen.

6 Conclusie

In dit rapport is er onderzoek gedaan naar de volgende onderzoeksvraag:

Hoe verhouden veranderingen in de afvoerverdeling en waterstanden in de Rijn als gevolg van het Ruimte voor de Rivier programma zich tot veranderingen als gevolg van autonome processen?

Om hier een antwoord op te geven is de vraag opgedeeld naar de veranderingen in de afvoerverdeling en aan de andere kant de veranderingen in de waterstand. In dit hoofdstuk zal de conclusie op beide vragen worden toegelicht.

1. Wat is de impact van bodemerosie, vegetatieontwikkeling en het Ruimte voor de Rivier programma op de afvoerverdeling in de Rijn?

Wanneer we het Ruimte voor de Rivier programma met de autonome processen vergelijken, zien we dat in alle gevallen dezelfde ontwikkeling plaatsvindt: het afvoeraandeel van de Waal neemt toe. Wel zien we daarbij dat het Ruimte voor de Rivier programma een grotere afvoerverandering tot gevolg heeft ten opzichte van de autonome processen. Het is vooral de IJssel die door deze toename op de Waal in afvoer moet inleveren. Als we de autonome processen ook opsplitsen, zien we dat beide in dezelfde richting werken. Van beide onderzochte autonome processen is wel te zien dat de bodemontwikkeling een grotere afvoerverschuiving tot gevolg heeft.

2. Wat is de impact van bodemerosie, vegetatieontwikkeling en het Ruimte voor de Rivier programma op de waterstanden in de Rijn?

Vergelijken we de veranderingen door menselijk ingrijpen hier met de autonome processen, kunnen we concluderen dat het Ruimte voor de Rivier programma de grootste waterstandsverlaging teweeg heeft gebracht. De impact van de individuele projecten op de waterstanden is goed te zien. Er is daarnaast ook goed te zien dat de maatregelen elkaar versterken. De uitgevoerde projecten voeren elkaar namelijk op binnen de aanpassingslengte van de individuele riviertakken. In het geval van de autonome processen, zien we bij de bodemerosie dat de waterstandsverschillen veel minder lokaal zijn. De ordegrrootte van de ontwikkelingen door autonome processen is ook een stuk kleiner dan bij Ruimte voor de Rivier. Kijken we naar de verschillen tussen de autonome processen, zien we dat deze tegengesteld zijn aan elkaar. De bodemerosie werkt over het algemeen waterstandverlagend, waar vegetatieontwikkeling juist waterstandverhogend werkt.

Samenvattend kunnen we dus concluderen dat de veranderingen in zowel de afvoerverdeling als de waterstanden ten gevolge van het Ruimte voor de Rivier programma overwegend groter zijn dan de gevolgen van de autonome processen. In alle gevallen neemt de afvoer op de Waal toe, ten koste van de andere riviertakken. Waar het Ruimte voor de Rivier programma daarnaast op alle riviertakken de waterstand verlaagd, zien we dat de bodemontwikkeling over het algemeen ook een waterstandsverlaging teweeg brengt. De vegetatieontwikkeling leidt in tegenstelling hiertoe tot een waterstandsverhoging op alle riviertakken.

Referenties

- Cioc, M. (2002). *The Rhine: an eco-biography, 1815-2000*. United States of America: University of Washington Press.
- Kleinhans, M., Klijn, F., Cohen, K. & Middelkoop, H. (2013). *Wat wil de rivier zelf eigenlijk?*. The Netherlands: Deltares.
- KNMI. (2015). *KNMI '14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie*. KNMI.
- Middelkoop, H. (2000). *The impact of climate change on the river Rhine and the implications for water management in the Netherlands*. The Netherlands: Netherlands Centre for River Studies; IRMA.
- Middelkoop, H., Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J., Lang, H. ... Wilke, K. (2001). *Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Pluim, M. Regelwerk Pannerden. Verkregen 10 juni 2019 van <http://www.rijnwaardenseuiterwaarden.nl/pages/regelwerk-pannerden.aspx?bIF=0>
- Projectorganisatie Ruimte voor de Rivier. (2006). *Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier, deel 4: vastgesteld besluit, nota van toelichting*. Den Haag: Projectorganisatie Ruimte voor de Rivier.
- Reeze, B., van Winden, A., Postma, J., Pot, R., Hop, J. & Liefveld, W. (2017), *Watersysteemrapportage Rijntakken 1990-2015. Ontwikkelingen waterkwaliteit en ecologie*. Harderwijk, Bart Reeze Water & Ecologie.
- Regelwerk Hondsbroekse Pleij. Verkregen 10 juni 2019 van <http://www.pannerden.info/index.php/heden/pannerden-actueel/407-rijkswaterstaat-start-met-bouw-nieuwe-regelkraan-bij-belangrijke-riviersplitsing-in-nederland>
- Ruimte voor de Rivier. (2014). *Maatregelenkaart*. Retrieved from: https://issuu.com/ruimtevoorderivier/docs/vv_kaart_rvdr_450x297_0613_hr300dpi
- RWS-WVL & Deltares. (2019). *Beschrijving Modelschematisatie Rijn 5e-generatie*. Delft: Deltares.
- Schielen, R. M., Jesse, P. & Botwilt, L. J. (2007). On the use of flexible spillways to control the discharge ratio of the Rhine in the Netherlands: hydraulic and morphological observations. *Netherlands Journal of Geosciences*, 86(1), 77–88. <https://doi.org/10.1017/s0016774600021338>
- Schropp, M.H.I. (1999). *Regelbereik afvoerverdeling Rijntakken. Een verkenning bij Maatgevend Hoogwater*. Arnhem: RIZA.
- Straatsma, M. W., Bloecker, A. M., Lenders, H. J. R., Leuven, R. S. E. W. & Kleinhans, M. G. (2017). Biodiversity recovery following delta-wide measures for flood risk reduction. *Science Advances*, 3(11), e1602762. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602762>
- Ten Brinke, W. (2004). *De betugelde rivier: Bovenrijn, Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn-Lek en IJssel in vorm*. Diemen: Veen Magazines. ISBN: 907698865X.

8 Bijlagen

A. Ruimte voor de Rivier projecten zoals opgenomen in het PKB Ruimte voor de Rivier deel 4.

Tabel 3. Ruimte voor de Rivier projecten zoals opgenomen in het PKB Ruimte voor de Rivier deel 4 (Projectorganisatie Ruimte voor de Rivier, 2006)

Naam maatregel	Codering/Locatie	Minimale Hydraulische taakstelling m	op rivier km	Grondgebruik
Boven-Rijn/Waal				
Obstakelverwijdering Suikerdam en polderkade naar de Zandberg	1503	-0,08	870,8-871,8	natuur
Extra uiterwaardvergraving Millingerwaard	1504	-0,09	870 - 872	natuur
Dijkverlegging Lent	50009a	-0,27	881,5-882,5	water, wonen, natuur
Kribverlaging Waalbochten	Krib-W1a	-0,08	866,5-867,5	n.v.t.
Kribverlaging Midden-Waal	Krib-W2	-0,12	887,0-888,0	n.v.t.
Kribverlaging Waal Fort St. Andries	Krib-W3	-0,08	915,5-916,5	n.v.t.
Kribverlaging Beneden Waal	Krib-W4	-0,06	933,5-934,5	n.v.t.
Uiterwaardvergraving Brakelse Benedenwaarden en Dijkverlegging Buitenpolder Het Munikenland	W45-W48-4a	-0,11	947,3-948,3	natuur
Mierwedes, Bergsche Maas, Amer, Rijn-Maasmondingsgebied				
Uiterwaardvergraving Bedrijventerrein Avelingen	MW8_2a	-0,05	955	water
Ontpoldering Noordwaard (meestromend)	MW18_1	-0,30	955	landbouw, natuur
Ontpoldering Overdiepsche Polder (meestromend)	M31	-0,30	239,5	landbouw
Kadeverlaging Biesbosch	M30a	-0,01	252	natuur
Dijkverbetering Amer/Donge	dijkring 35, dijkvak km. 246-247	-	-	n.v.t.
Dijkverbetering Steurgat/Land van Altena	dijkring 24, dijkvak rond km. 963, 964-966, 968-970	-	-	n.v.t.
Dijkverbetering Bergsche Maas/Land van Altena	dijkring 24, dijkvak rond km. 247-249	-	-	n.v.t.
Dijkverbetering Oude Maas/Hoeksche Waard	dijkring 21, dijkvak rond km. 993-995	-	-	n.v.t.
Dijkverbetering Oude Maas/Voornse Putten	dijkring 20, dijkvak rond km. 993,5	-	-	n.v.t.
Berging op het Volkerak Zoommeer	M40_3a	-0,10	1015	n.v.t.
		-0,03	976-978	
Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek				
Uiterwaardvergraving Huissensche Waarden	R05-R06_2a	-0,08	870,5-871,5	natuur
Uiterwaardvergraving Meinerswijk	R09-3	-0,07	882 - 883	natuur
Uiterwaardvergraving Doorwerthsche Waarden	R13-3c	-0,02	892,2-893,2	natuur
Uiterwaardvergraving Middelwaard	R22-2	-0,03	907,2-908,2	natuur
Uiterwaardvergraving De Tollevaard	R24-1b	-0,06	910,7-911,7	natuur
Obstakelverwijdering Machinistenschool Bst	5301b	-0,05	916,0-917,0	natuur
Uiterwaardvergraving Honsvlietwaarden, stuweiland Hagstein, Hagsteinsche Uiterwaard en Heerenwaard	R43-R44-R46-R49_3	-0,06	945,2-946,2	natuur, recreatie
Dijkverbetering Neder-Rijn/Geldersche Vallei	dijkring 45, dijkvak rond km. 905-907	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Dijkverbetering Neder-Rijn/Betuwe/	dijkring 43, dijkvakken rond km 878, 879-881, 892,	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Tiel- en Culemborgwaard	904,5, 906, 907, 908-910, 910,5, 913-914, 915, 916-917, 922-924, 925-928			
Dijkverbetering Neder-Rijn/Arnhemse- en Velpsebroek	dijkring 47, dijkvak rond km. 881-883	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Dijkverbetering Lek/Betuwe/Tiel- en Culemborgwaard	dijkring 43, dijkvakken rond km. 930-931, 932-936, 937-938, 939, 942	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Dijkverbetering Lek/Alblasserwaard en de Vijfheerenlanden	dijkring 16, dijkvakken rond km. 943-948, 949, 950-956, 958-965, 966-972, 980	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Dijkverbetering Lek/Lopiker- en Kilpenerwaard	dijkring 15, dijkvakken rond km. 958, 959-960, 961,5, 963-964, 965-967, 968-969, 971	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
IJssel				
Dijkverlegging Cortenoever	50007c	-0,35	917,8-918,8	landbouw
Dijkverlegging Voorster Klei	20505d	-0,29	929,1-930,1	landbouw
Uiterwaardvergraving Bolwerksplas, Worp en Ossenwaard	Y31-Y33-Y34_1a	-0,17	942,5-943,5	natuur
Uiterwaardvergraving Keizers- en Stobbenwaarden en Ossenwaarden	Y36-Y37-Y39-2b	-0,10	946,5-947,5	natuur
Hoogwatergeul Veessen-Wapenveld	50006c	-0,63	960,7-961,7	landbouw
Uiterwaardvergraving Scheller en Oldenseler Buitenwaarden	Y49-2b	-0,08	976,2-977,2	natuur
Dijkverlegging Westenhofte	20509d	-0,15	980,1-981,1	natuur
Zomerbedverlaging Beneden-IJssel*	Zb1	-0,29	979,0-980,0	n.v.t.

* in combinatie met natuurmitigatiemaatregelen in uiterwaarden

B. Veranderingen in vegetatieklassen op de Rijntakken

Tabel 4. De procentuele samenstelling van vegetatieklassen op de Boven-Rijn in 1997 en 2012. Daarnaast is ook de verandering in procentpunt tussen beide jaren gegeven.

Vegetatieklasse	Ruwheidscoëfficiënt	Boven-Rijn		
		Aandeel ecotopen 1997 (%)	Aandeel referentie (%)	Mutatie (%-punt)
Plas/haven	0,05	16,22	12,42	-3,79
Kribvakstrand	0,15	0,47	2,43	1,96
Bebouwd en verhard terrein	0,60	3,50	3,72	0,22
Verhard terrein	0,20	-	-	-
Akker	0,20	10,70	9,29	-1,41
Productiegrasland	1,8 met hoogte = 0,06, dichtheid = 45,	40,73	8,20	-32,52
Natuurlijk grasland	1,8 met Hoogte = 0,10, Dichtheid = 12	11,74	48,11	36,37
Droge ruigte	1,8 met Hoogte = 0,56, Dichtheid = 0,23	4,14	4,74	0,60
Natte ruigte	1,8 met Hoogte = 0,35, Dichtheid = 0,23	-	-	-
Zachthoutooibos	1,5 met Hoogte = 10,00, Dichtheid = 0,023	2,59	4,54	1,95
Overige		9,93	6,55	-3,38
Totaal		100	100	0

Tabel 5. De procentuele samenstelling van vegetatieklassen op de Waal in 1997 en 2012. Daarnaast is ook de verandering in procentpunt tussen beide jaren gegeven.

Vegetatieklasse	Ruwheidscoëfficiënt	Waal		
		Aandeel ecotopen 1997 (%)	Aandeel referentie (%)	Mutatie (%-punt)
Plas/haven	0,05	15,93	14,49	-1,44
Kribvakstrand	0,15	0,68	4,53	3,86
Bebouwd en verhard terrein	0,60	4,72	4,91	0,19
Verhard terrein	0,20	-	-	-
Akker	0,20	5,38	4,06	-1,32
Productiegrasland	1,8 met hoogte = 0,06, dichtheid = 45,	39,09	21,57	-17,52
Natuurlijk grasland	1,8 met Hoogte = 0,10, Dichtheid = 12	14,33	21,41	7,08
Droge ruigte	1,8 met Hoogte = 0,56, Dichtheid = 0,23	4,27	9,35	5,08
Natte ruigte	1,8 met Hoogte = 0,35, Dichtheid = 0,23	0,00	0,18	0,18
Zachthoutooibos	1,5 met Hoogte = 10,00, Dichtheid = 0,023	3,17	4,78	1,60
Overige		12,42	14,72	2,30
Totaal		100	100	0

Tabel 6. De procentuele samenstelling van vegetatieklassen op het Pannerdensch Kanaal in 1997 en 2012. Daarnaast is ook de verandering in procentpunt tussen beide jaren gegeven.

Vegetatieklasse	Ruwheidscoëfficiënt	Pannerdensch kanaal		
		Aandeel ecotopen 1997 (%)	Aandeel referentie (%)	Mutatie (%-punt)
Plas/haven	0,05	9,11	7,75	-1,36
Kribvakstrand	0,15	0,07	2,97	2,90
Bebouwd en verhard terrein	0,60	3,06	4,05	0,99
Verhard terrein	0,20	-	-	--
Akker	0,20	15,95	11,59	-4,36
Productiegrasland	1,8 met hoogte = 0,06, dichtheid = 45,	46,74	42,76	-3,97
Natuurlijk grasland	1,8 met Hoogte = 0,10, Dichtheid = 12	13,16	12,08	-1,08
Droge ruigte	1,8 met Hoogte = 0,56, Dichtheid = 0,23	3,22	8,65	5,43
Natte ruigte	1,8 met Hoogte = 0,35, Dichtheid = 0,23	-	-	-
Zachthoutooibos	1,5 met Hoogte = 10,00, Dichtheid = 0,023	0,95	1,97	1,02
Overige		7,73	8,18	0,45
Totaal		100	100	0

Tabel 7. De procentuele samenstelling van vegetatieklassen op de Nederrijn - Lek in 1997 en 2012. Daarnaast is ook de verandering in procentpunt tussen beide jaren gegeven.

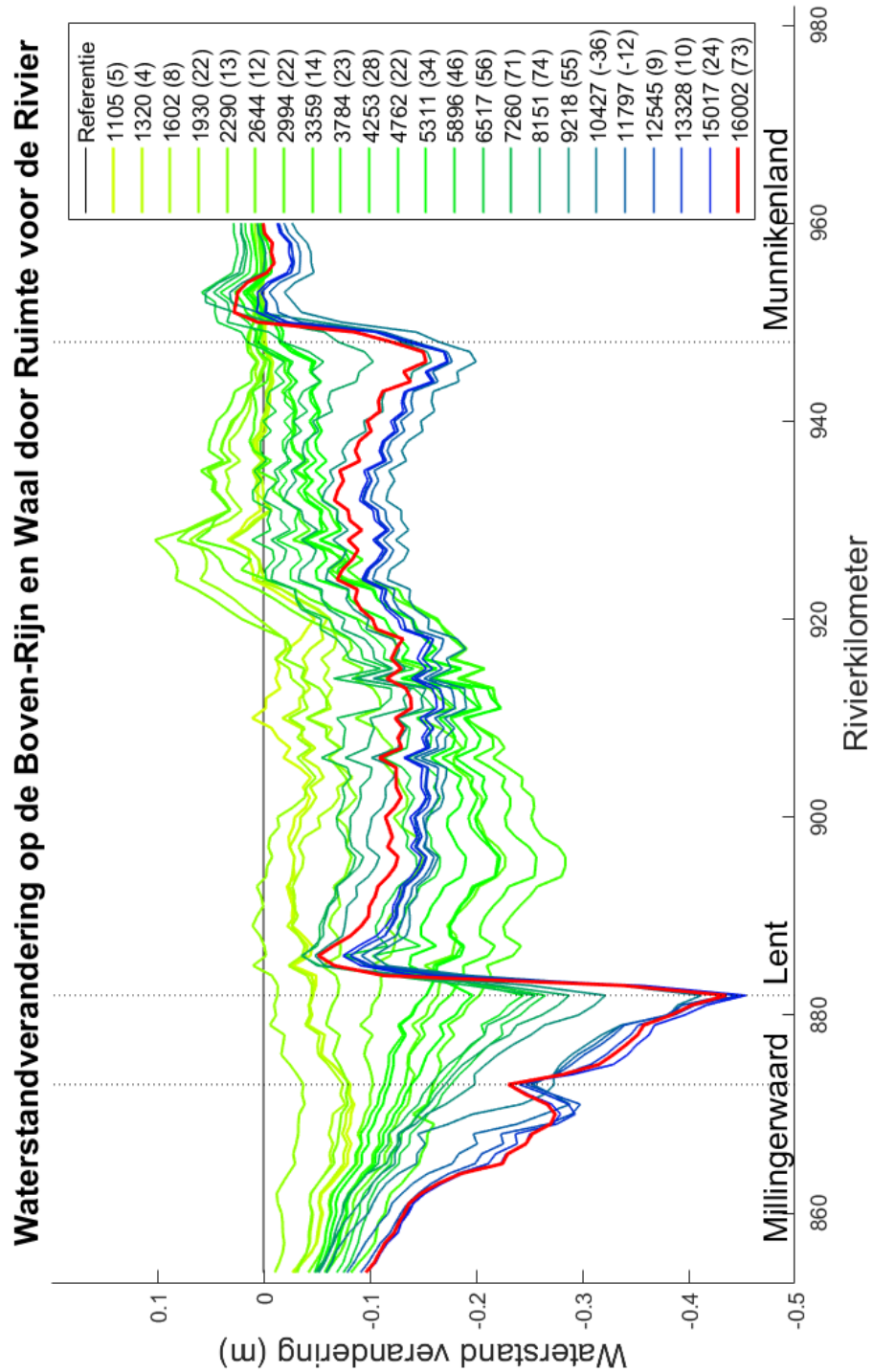
Vegetatieklasse	Ruwheidscoëfficiënt	Nederrijn - Lek		
		Aandeel ecotopen 1997 (%)	Aandeel referentie (%)	Mutatie (%-punt)
Plas/haven	0,05	0,07	12,65	12,58
Kribvakstrand	0,15	11,88	1,41	-10,47
Bebouwd en verhard terrein	0,60	0,39	5,16	4,77
Verhard terrein	0,20	5,52	0,02	-5,50
Akker	0,20	0,01	7,68	7,67
Productiegrasland	1,8 met hoogte = 0,06, dichtheid = 45,	5,15	33,53	28,38
Natuurlijk grasland	1,8 met Hoogte = 0,10, Dichtheid = 12	52,96	51,84	-31,12
Droge ruigte	1,8 met Hoogte = 0,56, Dichtheid = 0,23	10,71	4,89	-5,82
Natte ruigte	1,8 met Hoogte = 0,35, Dichtheid = 0,23	4,41	0,00	-4,41
Zachthoutooibos	1,5 met Hoogte = 10,00, Dichtheid = 0,023	1,34	2,23	0,88
Overige		7,54	10,58	3,04
Totaal		100	100	0

Tabel 8. De procentuele samenstelling van vegetatieklassen op de IJssel in 1997 en 2012. Daarnaast is ook de verandering in procentpunt tussen beide jaren gegeven.

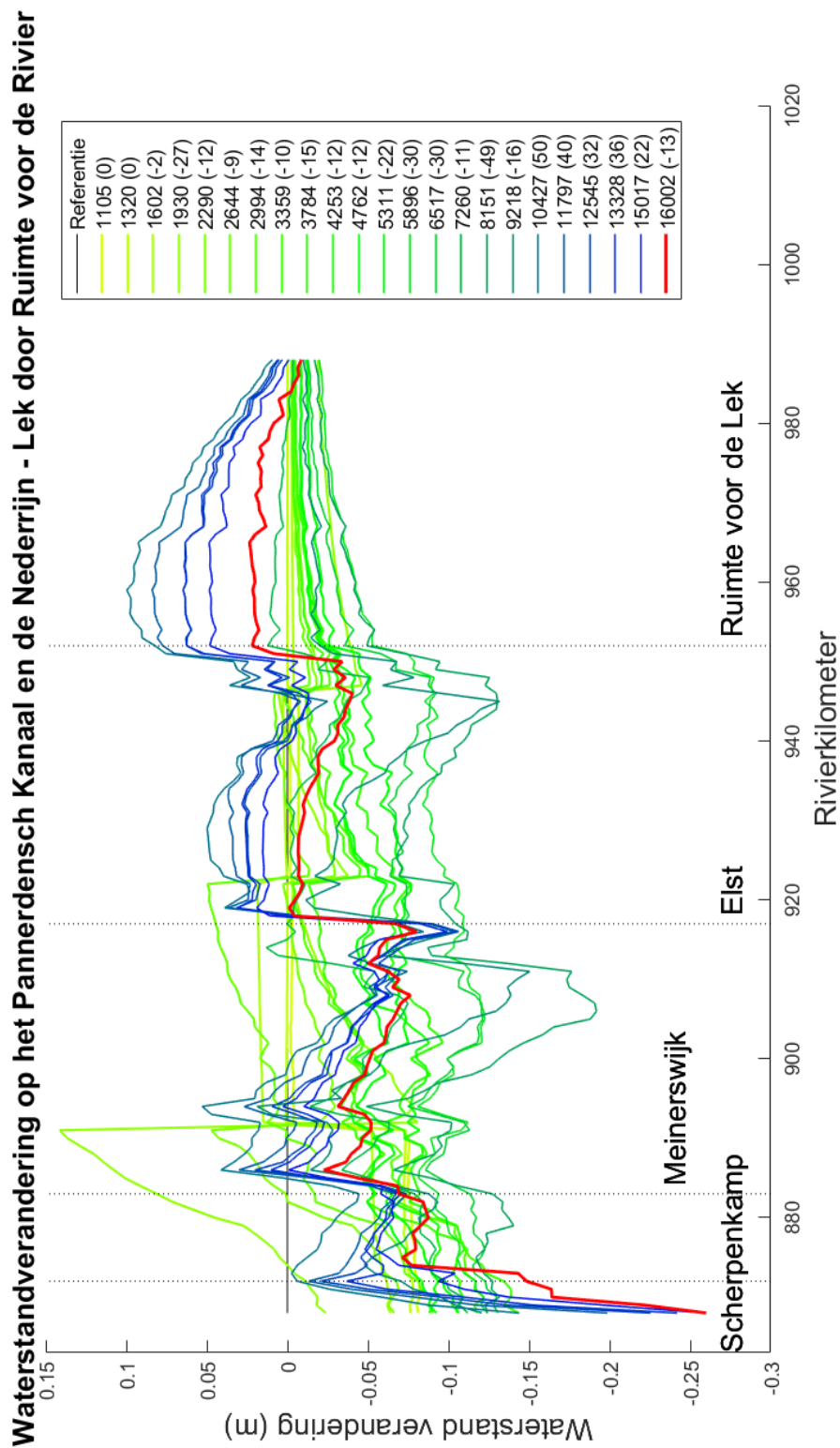
Vegetatieklasse	Ruwheidscoëfficiënt	IJssel		
		Aandeel ecotopen 1997 (%)	Aandeel referentie (%)	Mutatie (%-punt)
Plas/haven	0,05	9,09	29,72	20,63
Kribvakstrand	0,15	0,60	0,44	-0,16
Bebouwd en verhard terrein	0,60	4,00	3,28	-0,72
Verhard terrein	0,20	0,75	0,05	-0,70
Akker	0,20	7,67	6,14	-1,53
Productiegrasland	1,8 met hoogte = 0,06, dichtheid = 45,	53,34	33,46	-19,87
Natuurlijk grasland	1,8 met Hoogte = 0,10, Dichtheid = 12	9,10	13,70	4,60
Droge ruigte	1,8 met Hoogte = 0,56, Dichtheid = 0,23	2,60	1,90	-0,71
Natte ruigte	1,8 met Hoogte = 0,35, Dichtheid = 0,23	-	-	-
Zachthoutooibos	1,5 met Hoogte = 10,00, Dichtheid = 0,023	2,27	2,72	0,45
Overige		10,57	8,58	-1,99
Totaal		100	100	0

C. Waterstanden

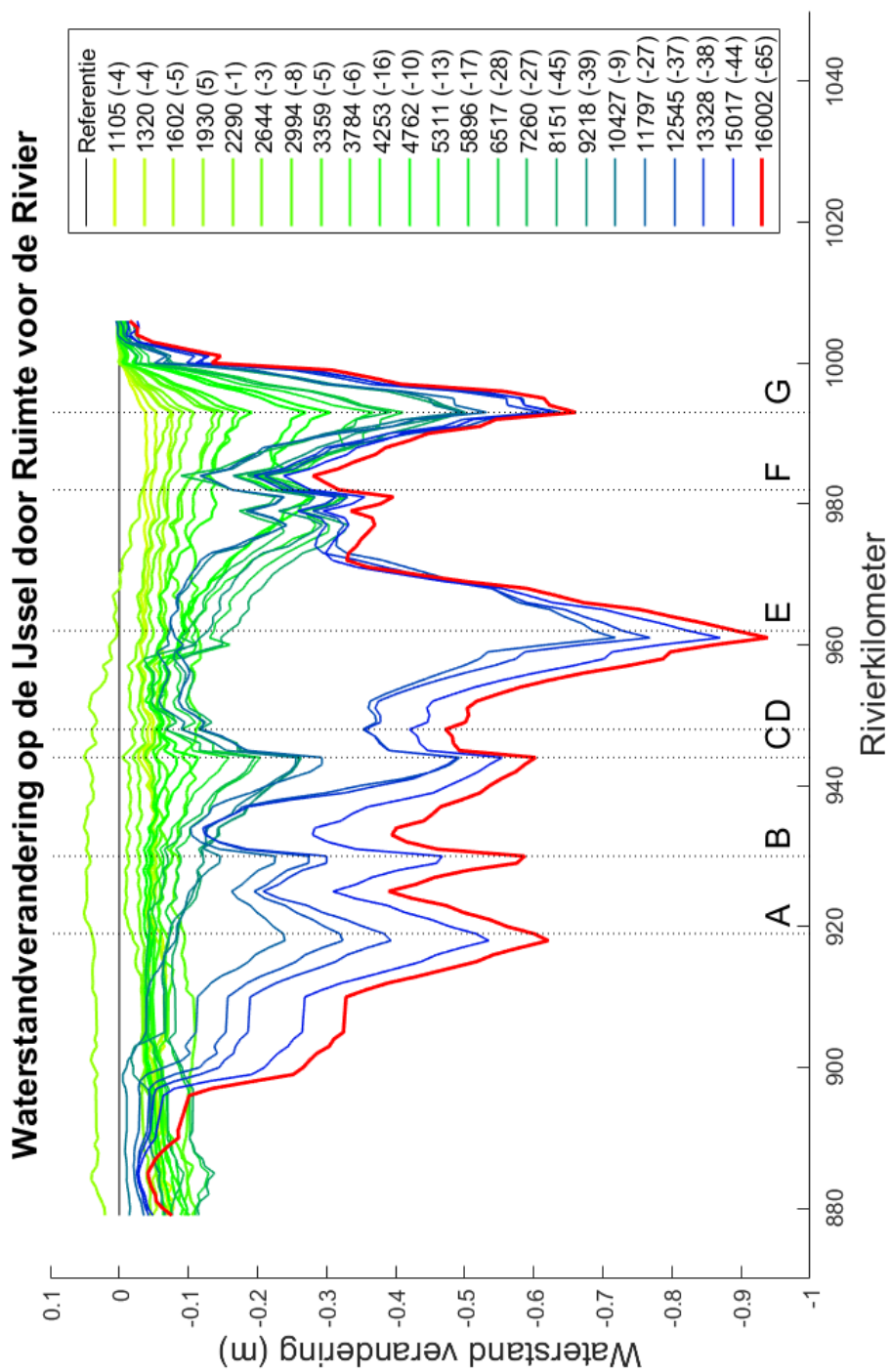
Waterstanden Ruimte voor de Rivier



Figuur 20. Waterstandverandering op de Boven-Rijn en Waal door Ruimte voor de Rivier. Tussen haakjes is de verandering in afvoer op de riviertak gegeven.

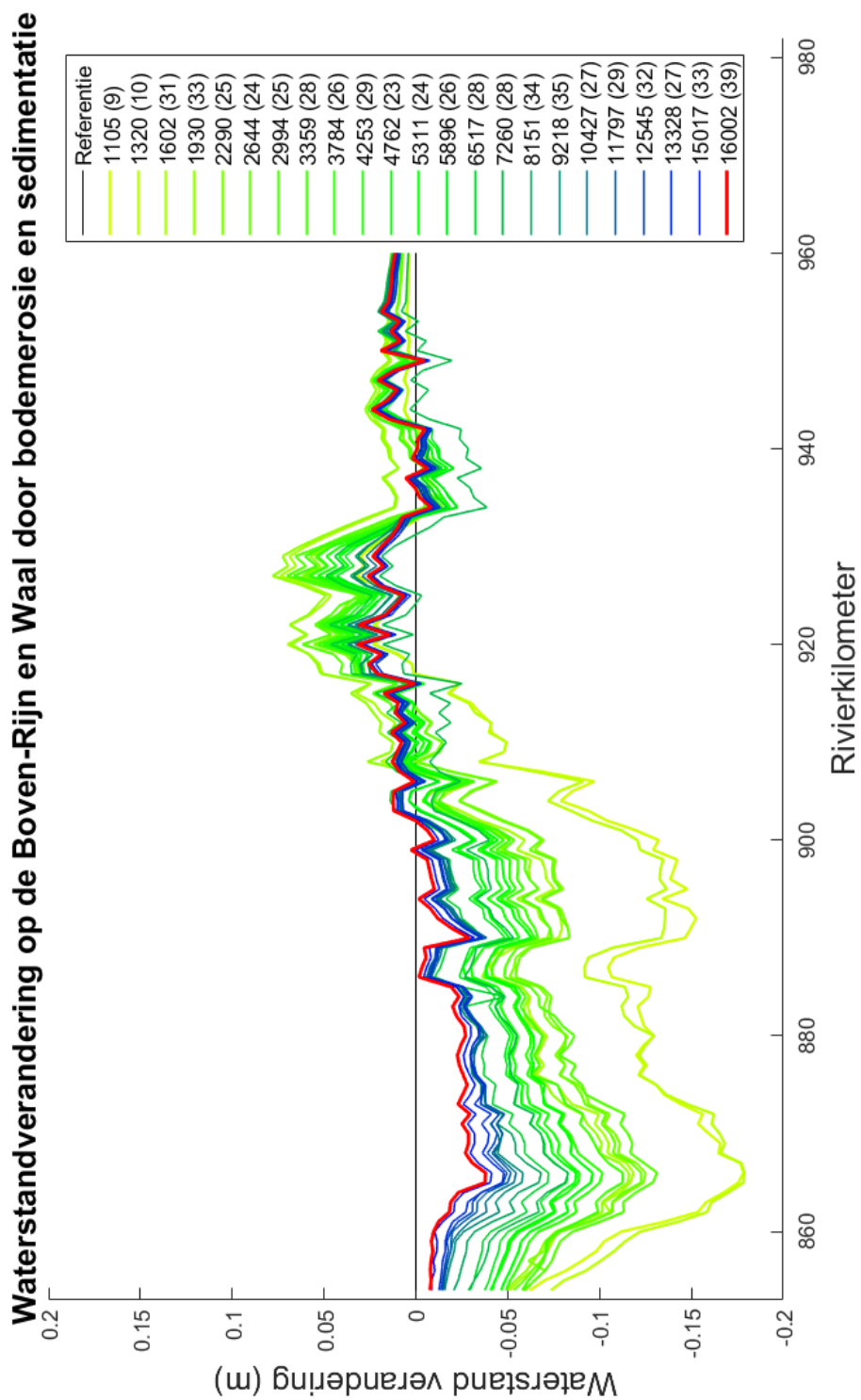


Figuur 21. Waterstandverandering op het Pannerdensch Kanaal en Nederrijn - Lek door Ruimte voor de Rivier. Tussen haakjes is de verandering in afvoer op de riviertak gegeven.



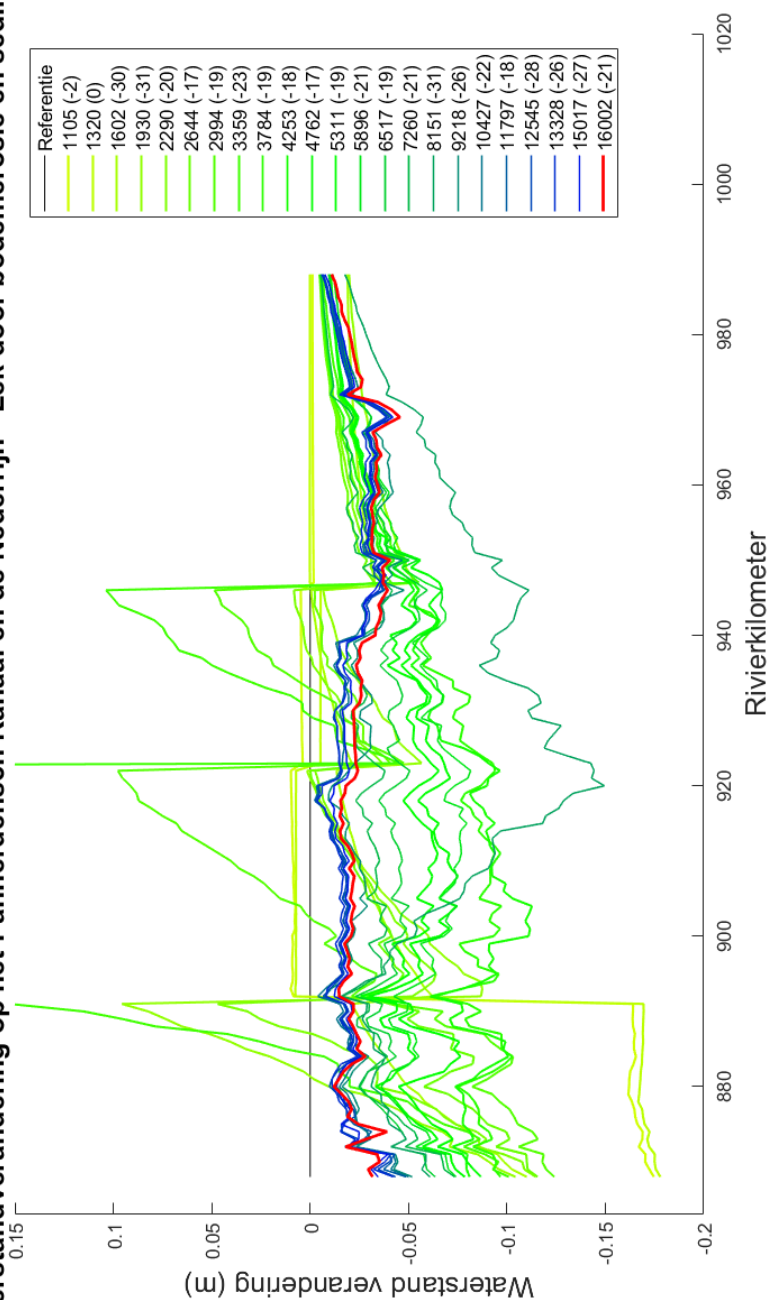
Figuur 22. Waterstandverandering op de IJssel door Ruimte voor de Rivier. Tussen haakjes is de verandering in afvoer op de riviertak gegeven.

Bodemerosie en sedimentatie

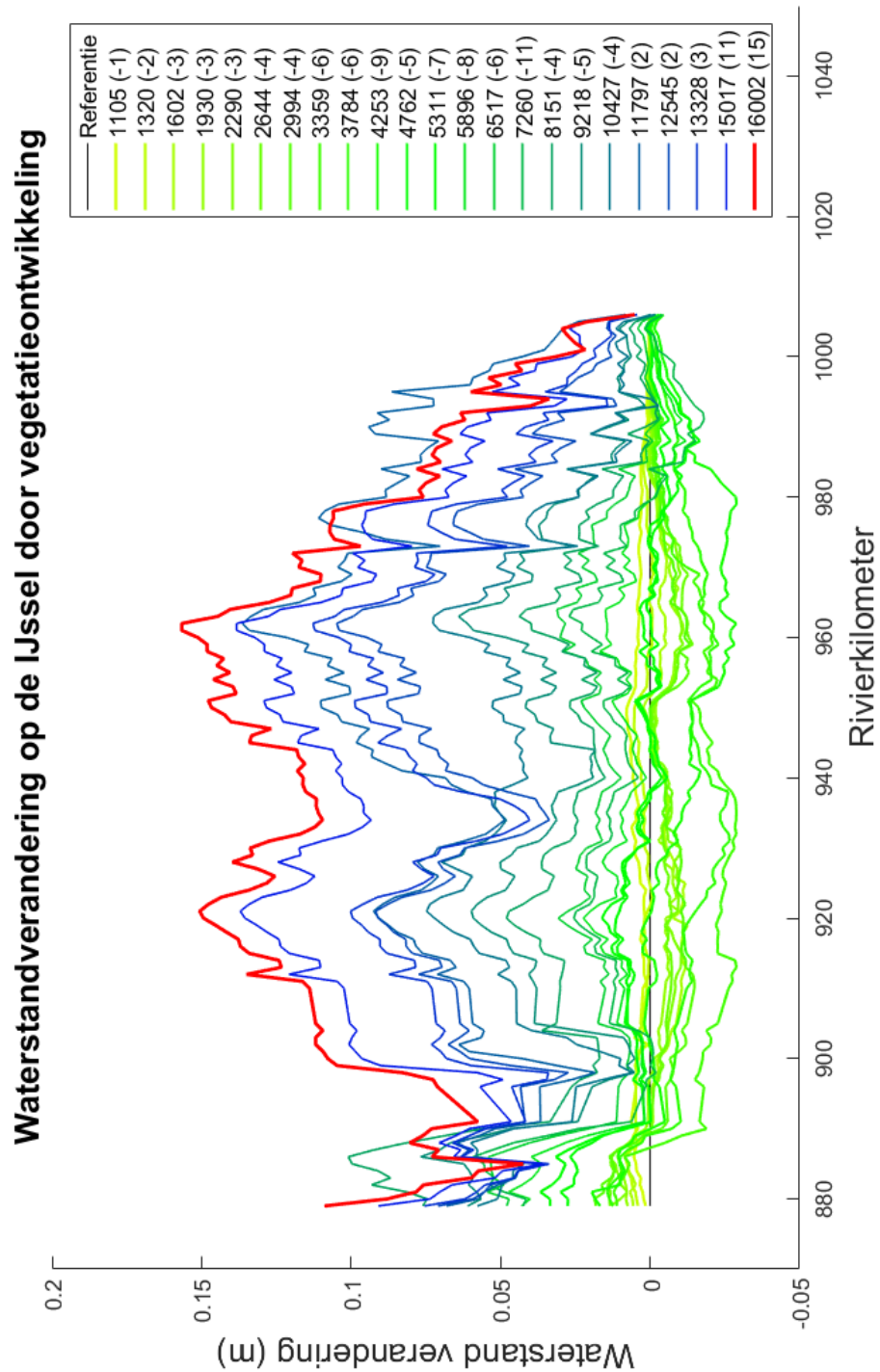


Figuur 23. Waterstandverandering op de Boven-Rijn en Waal door bodemerosie en sedimentatie. Tussen haakjes is de verandering in afvoer op de riviertak gegeven.

Waterstandverandering op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn - Lek door bodemerrosie en sedimentatie

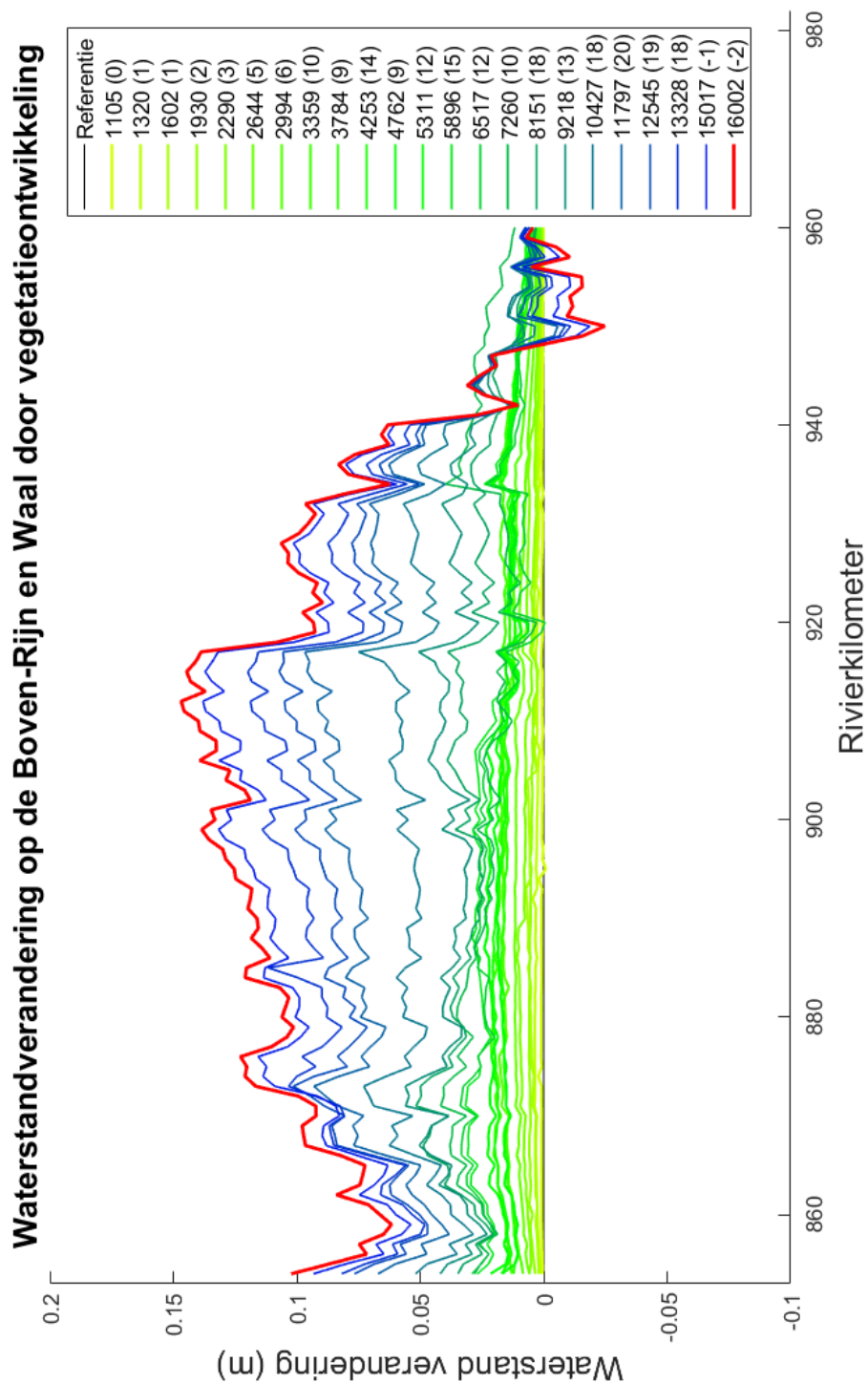


Figuur 24. Waterstandverandering op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn - Lek door bodemerrosie en sedimentatie. Tussen haakjes is de verandering in afvoer op de riviertak gegeven.

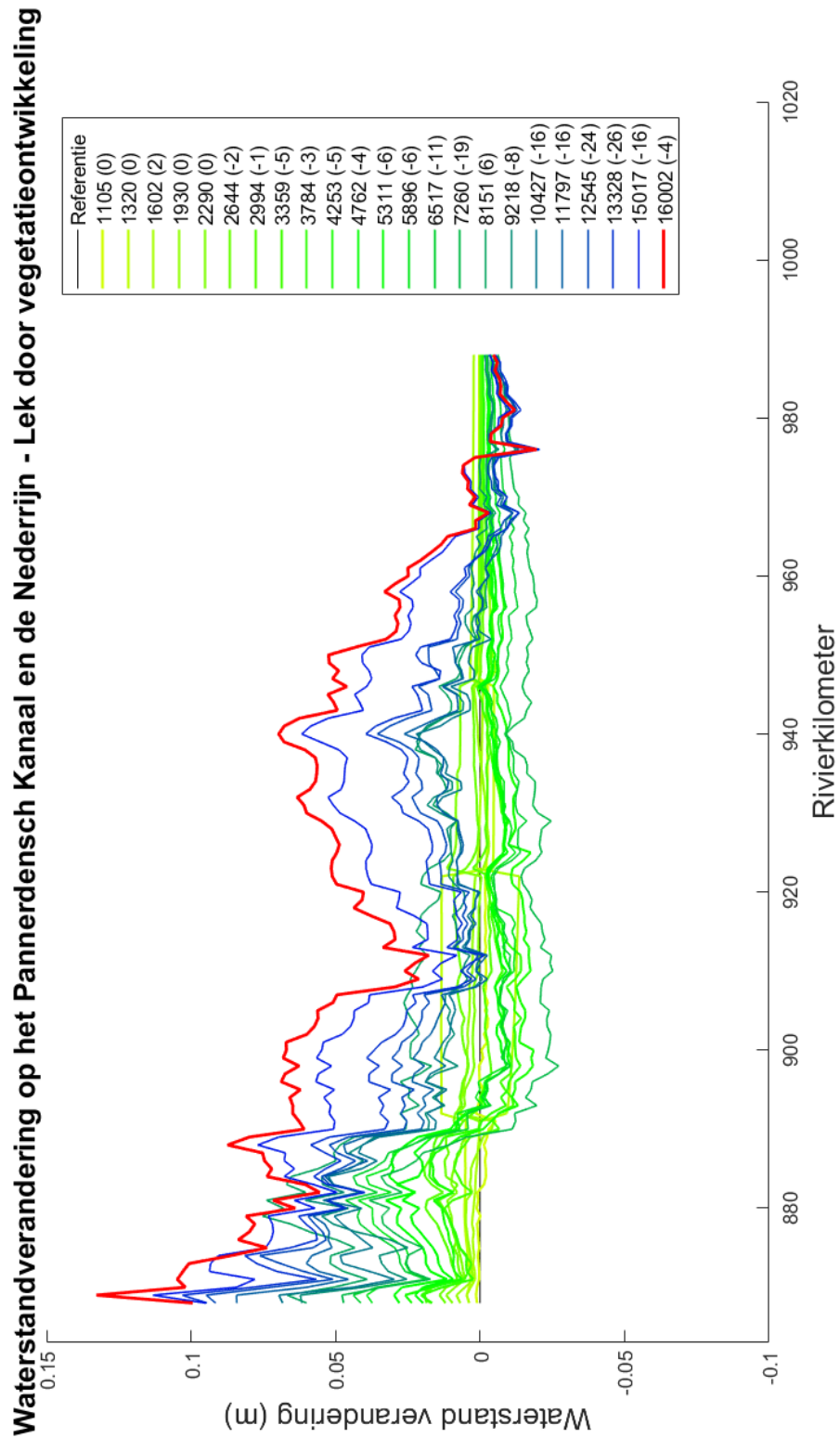


Figuur 25. Waterstandverandering op de IJssel door bodemerosie en sedimentatie. Tussen haakjes is de verandering in afvoer op de riviertak gegeven.

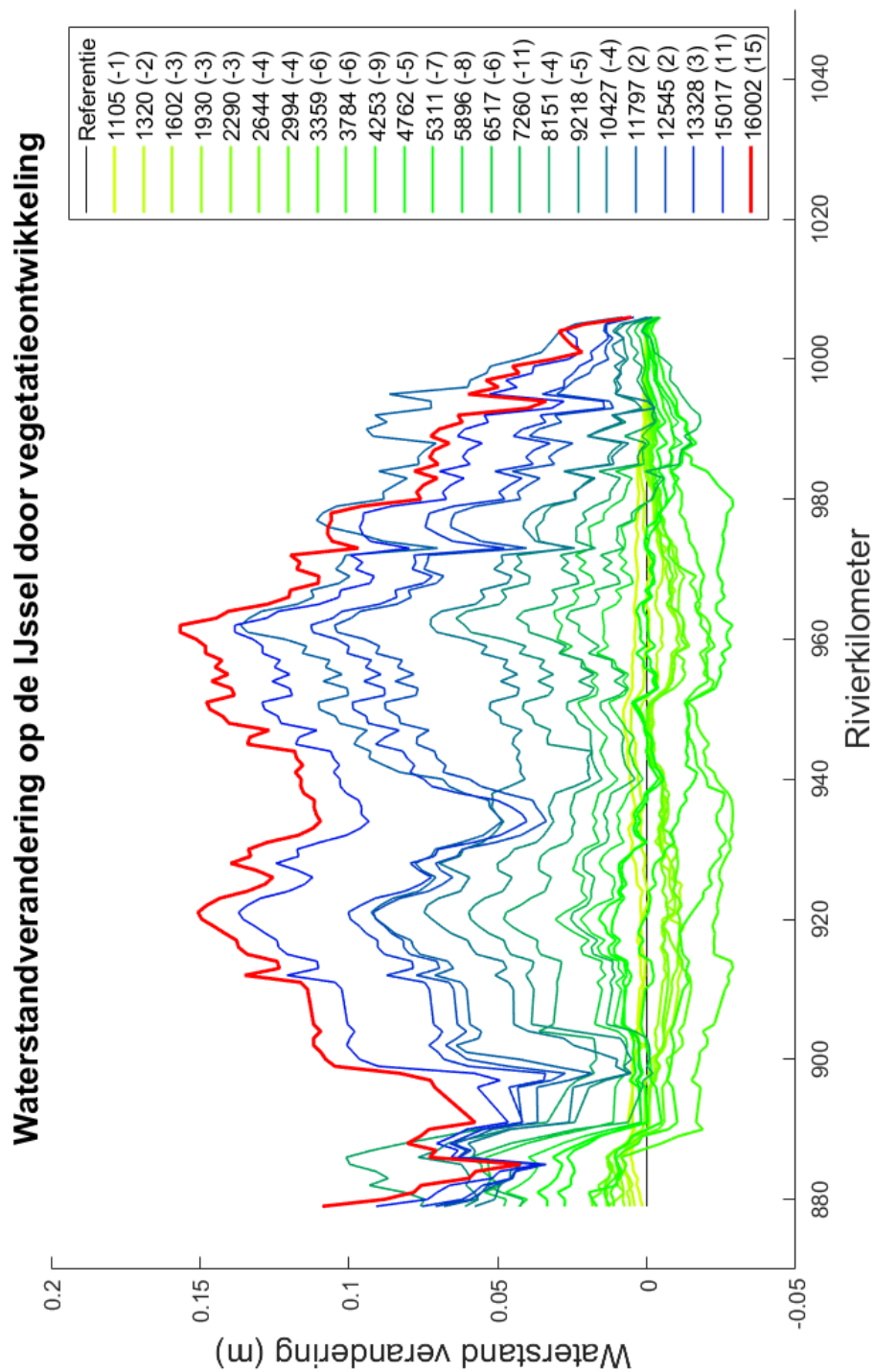
Vegetatieontwikkeling



Figuur 26. Waterstandverandering op de Boven-Rijn en Waal door vegetatieontwikkeling. Tussen haakjes is de verandering in afvoer op de riviertak gegeven.



Figuur 27. Waterstandverandering op het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn - Lek. Tussen haakjes is de verandering in afvoer op de riviertak gegeven.



Figuur 28. Waterstandverandering op de IJssel door vegetatieontwikkeling. Tussen haakjes is de verandering in afvoer op de riviertak gegeven.