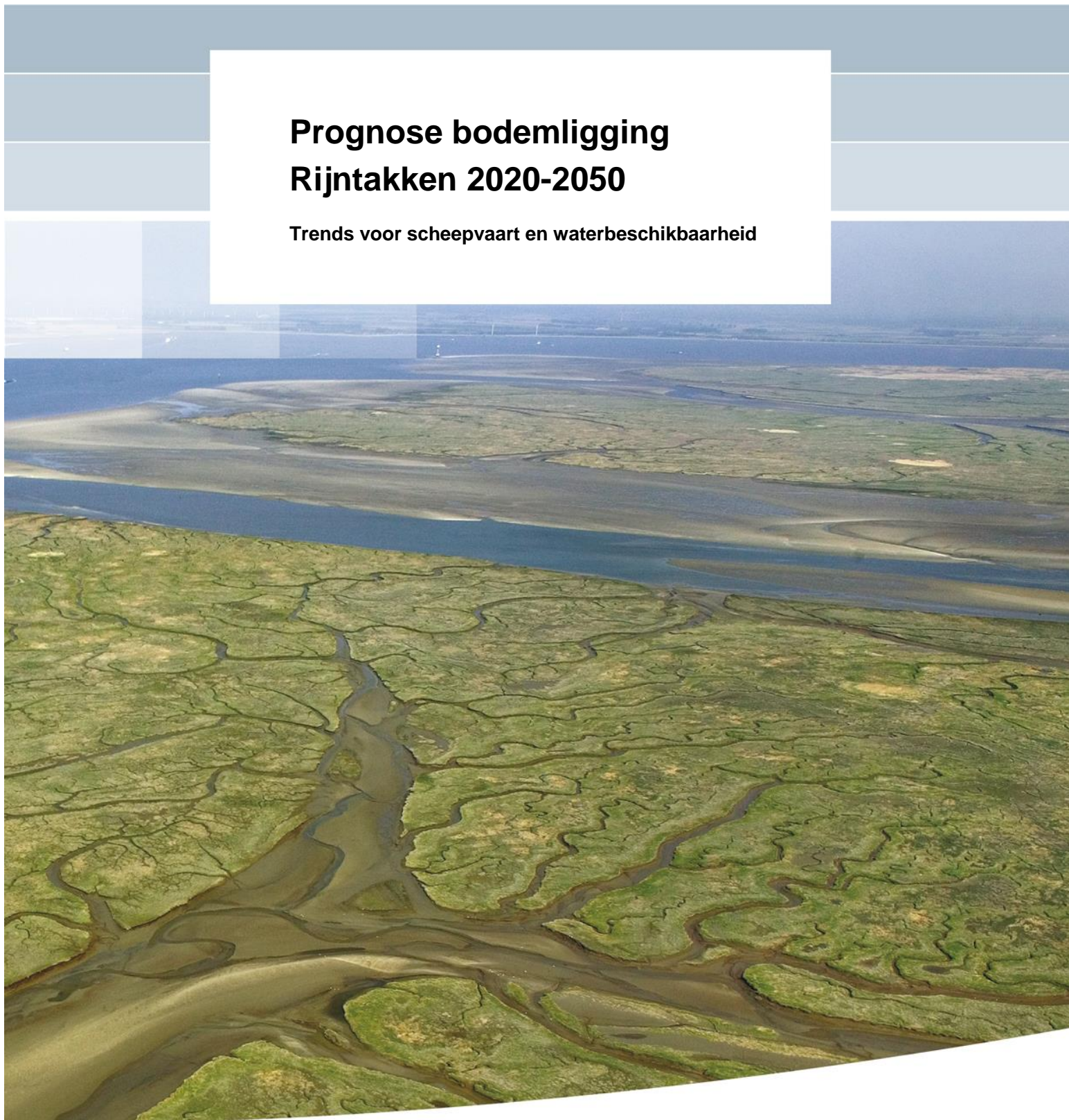


Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050

Trends voor scheepvaart en waterbeschikbaarheid



Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050

Trends voor scheepvaart en waterbeschikbaarheid




Kees Sloff

Titel
Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050

Opdrachtgever **Project** **Kenmerk** **Pagina's**
Rijkswaterstaat 11203738-005 11203738-005-BGS-0008 21

Trefwoorden
Morfologie Rijntakken, erosietrends, sedimentatietrends

Samenvatting
In dit rapport is een prognose gepresenteerd van de grootschalige bodemveranderingen in de Rijntakken tot het jaar 2050. De vraag komt voort vanuit de behoefte om de invloed van deze veranderingen op de functies scheepvaart en waterbeschikbaarheid in kaart te brengen. Bij het vaststellen van de prognose is gebruik gemaakt van de studies die vrijwel gelijktijdig zijn uitgevoerd voor de programma's Integraal Rivier Management (IRM), Rivers2Morrow (R2M) en binnen het Strategisch Onderzoek van Deltares. Trends per traject zijn afgeleid uit de multibeam-peilingen die vanaf circa 2000 voor alle Rijntakken jaarlijks worden gemaakt. Grootschalige erosietrends treden op in de Waal, Pannerdensch Kanaal en Boven-IJssel. Op de overige trajecten wordt een stabiele of licht sedimenterende trend voorspeld.

| Versie | Datum | Auteur | Paraaf | Review | Paraaf | Goedkeuring | Paraaf |
|--------|-----------|------------|---|--------------|--|-----------------|---|
| 0.1 | nov. 2019 | Kees Sloff | | Aukje Spruyt | | | |
| 0.2 | dec. 2019 | Kees Sloff | | Aukje Spruyt | | | |
| 1.0 | dec. 2019 | Kees Sloff |  | Aukje Spruyt |  | Henriette Otter |  |

Status
definitief

Inhoud

| | |
|--|-----------|
| 1 Inleiding | 1 |
| 2 Analyse van trends bodemontwikkeling in eerdere studies | 3 |
| 2.1 Recente studies naar morfologische trends | 3 |
| 2.2 Ruimtelijke variaties in trends | 3 |
| 2.3 Temporele variaties | 9 |
| 2.4 Trends in afvoerverdeling op riviersplittingsen | 11 |
| 3 Aanpak nieuwe prognose | 13 |
| 4 Prognose trends bodemontwikkeling KBN | 15 |
| 5 Conclusies | 19 |
| 6 Referenties | 21 |

1 Inleiding

Vanuit diverse rivierfuncties wordt op dit moment onderzoek verricht naar de verwachte lange termijn ontwikkeling van de Rijntakken (zichtjaren 2050 en 2100). Daarbij speelt de veranderende bodemligging, en de invloed ervan op waterverdeling en waterstanden, een belangrijke rol. In het verleden is door diverse oorzaken een grootschalige erosie opgewekt die vooral in de bovenrivieren heeft geleid tot insnijding van het zomerbed. De erosietrends zijn nog steeds aanwezig, met name in de Boven-Waal, Pannerdensch Kanaal en IJssel.

In dit rapport is een prognose gepresenteerd van de grootschalige bodemveranderingen in de Rijntakken tot het jaar 2050 bij voortzetting van het huidige beheer en huidige hydrologische condities en sedimentaanbod. De vraag komt voort vanuit de behoefte om de invloed van deze veranderingen op de functies scheepvaart en waterbeschikbaarheid in kaart te brengen. Het resultaat is daarom bedoeld als extra invoer voor de effectbepaling voor de bovengenoemde functies. De prognose is ontwikkeld binnen het project Klimaat Bestendige Netwerken (KBN) in opdracht van Rijkswaterstaat WVL.

De opzet van het rapport is als volgt:

- In Hoofdstuk 2, paragraaf 2.1 staat een toelichting bij de gebruikte gegevens en de parallel uitgevoerde studies voor Integraal Rivier Management (IRM) en Rivers2Morrow (R2M). In paragraaf 2.2 tot en met 2.3 staan enkele beschouwingen op de bodemontwikkeling in de Rijntakken zoals deze blijken uit de nieuwe prognose, maar ook uit overige studies. In paragraaf 2.2 wordt gekeken naar ruimtelijke variaties, in paragraaf 2.3 naar tijdsafhankelijke variaties en in paragraaf 2.4 wordt de relatie tot de afvoerverdeling bekeken.
- In Hoofdstuk 3 wordt de methodiek beschreven hoe uit deze gegevens de nieuwe trends zijn bepaald.
- In Hoofdstuk 4 staat de prognose van de trends in bodemontwikkeling.
- Ten slotte volgen in hoofdstuk 5 de belangrijkste conclusies.

2 Analyse van trends bodemontwikkeling in eerdere studies

2.1 Recente studies naar morfologische trends

De basis voor de prognose is de set van multibeam-metingen (multibeam-echosounder) die jaarlijks van het Rijntakken gebied worden gemaakt sinds circa het jaar 2000. In de periode voor 2000 is er gebruik gemaakt van single-beam metingen waardoor er sprake is van een discontinuïteit in meettechniek. Daarnaast zijn er rond die periode aanzienlijke veranderingen in de trends in bodemontwikkeling opgetreden, los van de verandering in meettechniek.

Belangrijk is verder dat eind 2019, min of meer tegelijkertijd, drie andere studies zijn uitgevoerd ten behoeve van de morfologische trends en de daaruit volgende prognoses:

- 1 Ten behoeve van het programma Integraal Riviermanagement (IRM) is, op basis van gemiddeld waargenomen bodemverandering voor trajecten in alle Rijntakken door Wilfried ten Brinke (2019), een prognose gemaakt van de trajectgemiddelde bodemverandering tot 2050. De prognose is bedoeld als eerste schatting voor keuzes rond de IRM beleidsopties en globale oplossingsrichtingen en bijbehorende 'quickscan' (studie "IRM Beleidsopties en oplossingsrichtingen duurzaam beheren rivierbodem").
- 2 Ten behoeve van het onderzoeksprogramma Rivers2Morrow (R2M) is door Claudia Ylla Arbós (TU Delft) onderzocht op kilometer-gemiddelde vakken welke veranderingen historisch zijn opgetreden, en met welke bandbreedte deze trends zich zouden kunnen doorzetten. In deze studie ligt de nadruk op de opgetreden veranderingen en de oorzaken, en niet een prognose voor een specifiek doel.
- 3 In het kader van Strategisch Onderzoek van Deltares, in relatie tot ontwikkelingen ten behoeve van basisrivierbodempligging, in kaart brengen erosieproblematiek, en modelvalidatie, is door Deltares ook een trendanalyse uitgevoerd naar de waargenomen bodemveranderingen in de Rijntakken in 2018 en begin 2019 (onder leiding van Willem Ottevanger).

De eerste twee onderzoeken zijn gebaseerd op de P-Mappen-data van Rijkswaterstaat. Dit zijn gemiddelde bodempliggingen per kilometervak tussen de normaallijnen afgeleid uit de bodempeilingen voor ieder jaar. Bij het ontwikkelen van de P-Mappen is in datasets met ontbrekende data (bijvoorbeeld niet-gemeten delen nabij oevers) uitgegaan van de bodempligging in het voorgaande jaar. Bij deze progressieve opbouw van de data kan er dus 'ruis' op de data zijn ontstaan. Bij het derde onderzoek is de analyse direct op de data sets gemaakt, en is op een andere manier met ontbrekende data omgegaan. Daarnaast zijn trends afgeleid op basis van regressie per rekenpunt, en niet per kilometervak.

Opvallend is dat de trends forse variaties laten zien afhankelijk van de gekozen ruimtelijk middeling en van de gekozen tijdsmiddeling. Dit is te zien in de figuren die gepresenteerd worden in Hoofdstuk 3.

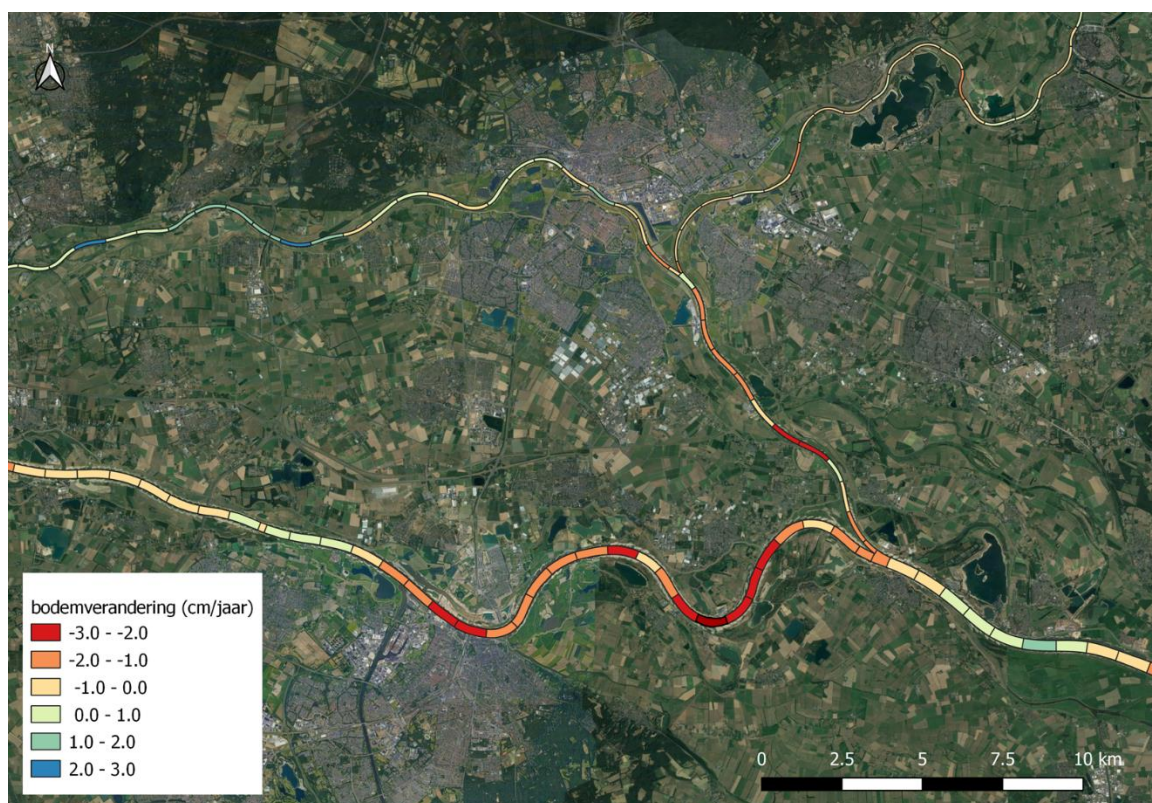
De resultaten van deze onderzoeken zijn gedeeld met Deltares door de bovengenoemde auteurs.

2.2 Ruimtelijke variaties in trends

De ontwikkeling van de bodempligging (de trend) is niet gelijkmatig verdeeld over de lengte van de beschouwde riviertakken. Zoals blijkt uit de figuren voor de morfologische trends voor deze

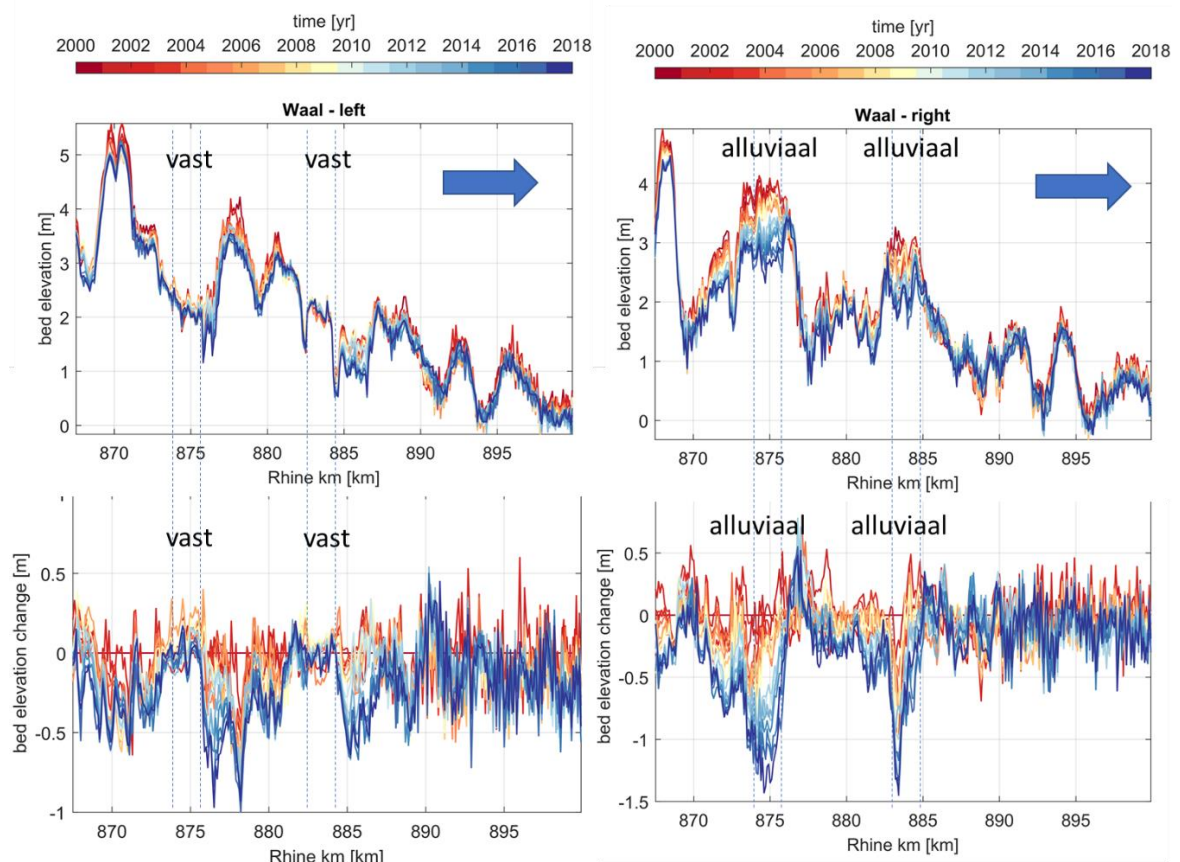
trajecten in Hoofdstuk 4, tonen deze grote ruimtelijk variaties. Over het algemeen wordt grootschalige bodemerrosie op de Rijntakken gepresenteerd als gemiddeld over grote afstanden (of takgemiddeld). Vanuit het oogpunt van terugkoppeling op waterverdeling is het goed om op deze wijze naar de veranderingen te kijken. Zoals besproken, werken door verhanglijnen de grootschalige veranderingen (orde 10 km) sterker door op waterstanden dan lokale morfologische effecten (schalen < 1 km).

In Figuur 2.1 zijn de ruimtelijke variaties per rivierkilometer gevisualiseerd voor het splitsingspuntengebied (bron, Willem Ottevanger, 2019). De rode vakken in de Boven-Waal zijn kilometervakken waar de grootste erosietrends zijn opgetreden. Dit zijn echter geen aaneengesloten trajecten, maar afzonderlijke vakken met tussenliggende meer stabiele vakken.



Figuur 2.1 Ruimtelijk variatie in waargenomen trends gemiddeld per rivierkilometer (vakgemiddelde trends in cm/jaar, afgelopen 20 jaar)

Figuur 2.2 toont bodemtrends voor de linker- en rechterzijde van de Boven-Waal (afgelopen 20 jaar). Het illustreert hoe de ruimtelijk variatie niet alleen in de langsrichting van de rivier kan worden waargenomen, maar ook in dwarsrichting. De gemiddelde bodemerrosie over dit traject is circa 0.4 m (2 cm/jaar). Uit de figuur blijkt echter dat op enkele locaties erosie tot circa 1 à 1.5 m (5 à 7 cm/jaar) is opgetreden en op andere locaties zelfs aanzanding.



Figuur 2.2 Bodemontwikkeling links en rechts van de rivieras, Boven-Waal (km 867-890) voor de periode 2000-2018

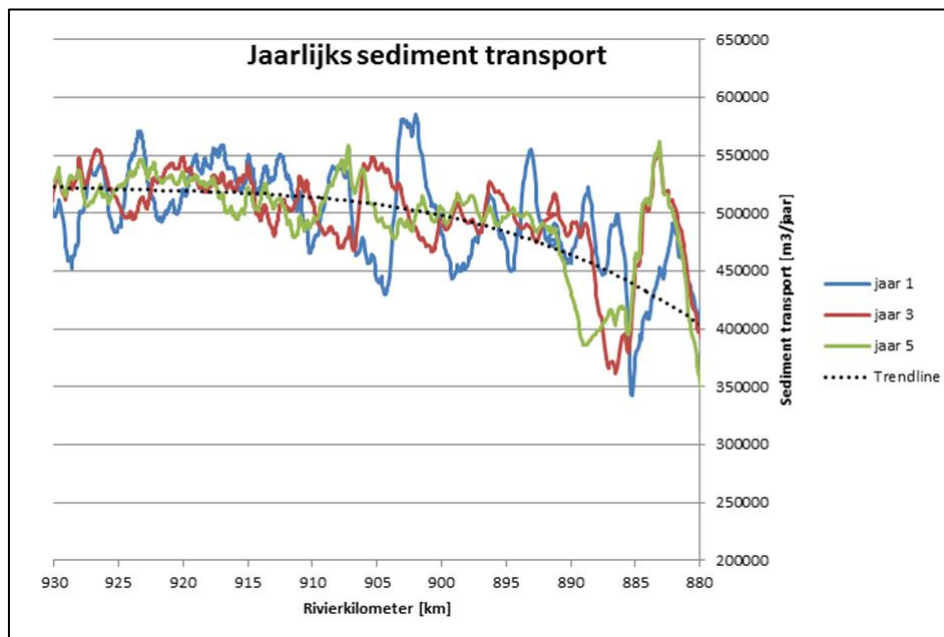
Uit Figuur 2.2 blijkt dat over het algemeen de (ondiepe) binnenbochten de grootste erosietrends hebben vertoond, terwijl de (diepe) buitenbochten relatief stabiel zijn gebleven. Meer specifiek kan worden waargenomen dat:

- In Figuur 2.2 zijn de locaties aangegeven van de bodemkribben Erlecom (als vaste laag) in de buitenbocht links rond km 874, en de vaste laag Nijmegen in de buitenbocht links rond km 884. De bodemontwikkeling toont een opvallend grote erosie in de alluviale binnenbocht naast beide 'vaste lagen'. De erosie bedraagt daar plaatselijk bijna 8 cm/jaar (1.5 m totaal) terwijl de gemiddelde erosie in dit traject ongeveer 2 cm/jaar bedraagt (de buitenbochten daar liggen uiteraard vast).
- Ook de lange binnenbocht, linkerzijde bij Haalderen (km 876 - 882) toont een forse erosie die zich lijkt te ontwikkelen vanuit de erosiekuil juist benedenstrooms van de bodemkribben Erlecom (voorgaande bocht). Op dit traject is de (alluviale) buitenbocht daarentegen slechts een klein beetje gedaald.

De oorzaken voor de versterkte erosie in binnenbochten zijn niet goed bekend.

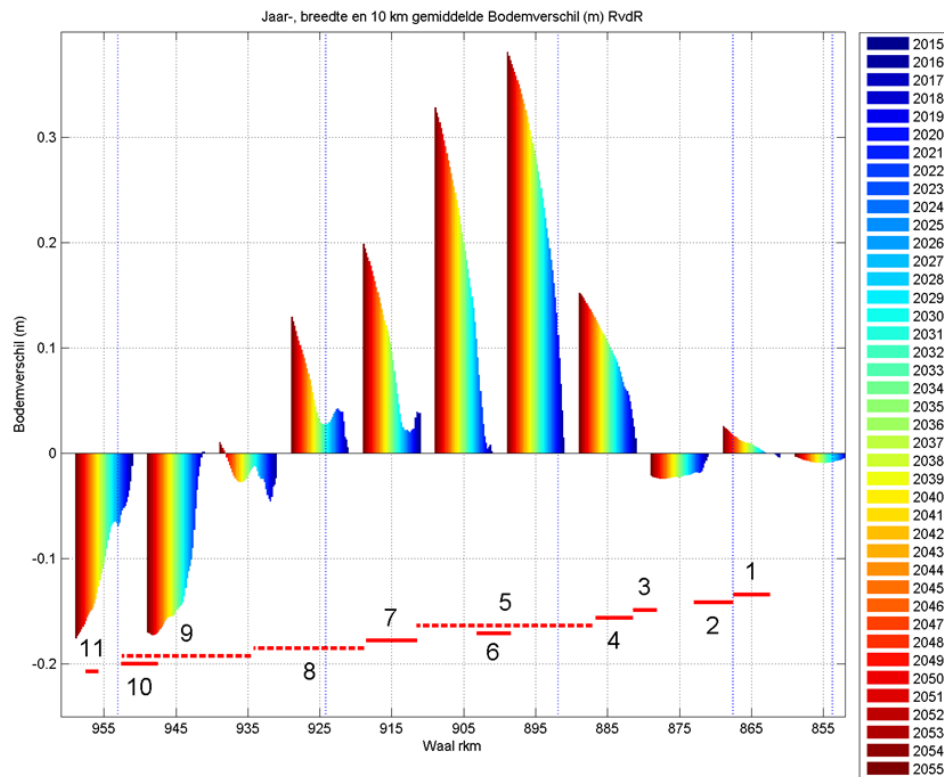
De ruimtelijk variaties treden over alle takken op. Diverse processen spelen hierbij een rol. Het is belangrijk hiervoor kennis te ontwikkelen, omdat de in dit memo gepresenteerde grootschalige ontwikkeling de som is van alle lokale trends. Belangrijke processen en kennisbehoeften zijn:

De grootschalige erosietrend wordt aangedreven door een gradiënt in gemiddeld sedimenttransport langs de takken, maar de gradiënten zijn niet constant over de lengte van de rivier. Dit is getoond in Figuur 2.3, waar een indicatie is gegeven van het verloop van het jaarlijks sedimenttransport op de Waal zoals 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).



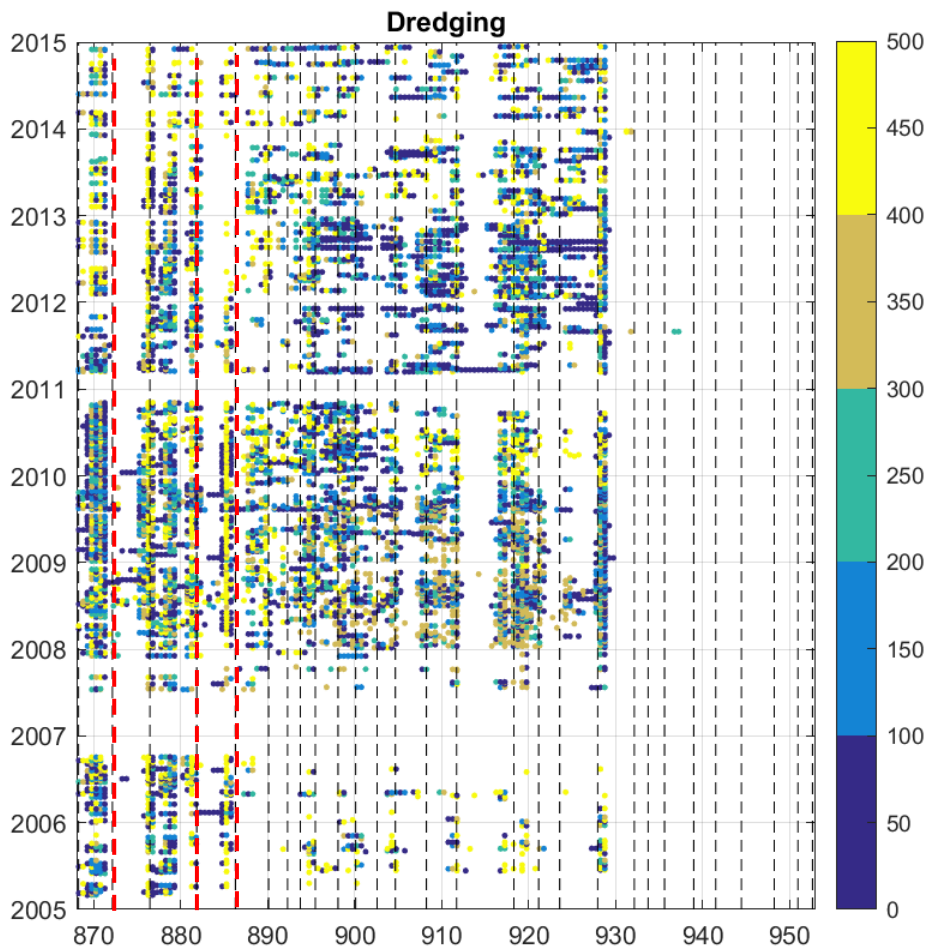
Figuur 2.3 Verloop van jaartransport langs de Waal berekend met het DVR model (Huthoff et al, 2011).
N.B. stroomrichting is van rechts naar links.

Het tijdelijk meestromen van geulen en uiterwaarden tijdens hoogwater leidt tot een afwisseling van erosie en sedimentatiegebiedjes. Deze zullen zich als zandgolven door het systeem verplaatsen met snelheden van orde 1 km/jaar. Na de aanleg van diverse uiterwaardprojecten, langsdammen en kribverlaging, is daarbij ook nog sprake van een initiële ontwikkeling waarbij de bodem zich nog 'aan moet passen' aan het nieuwe dynamische 'evenwicht' (de term evenwicht is eigenlijk niet van toepassing gezien de langjarige grootschalige trends). In Figuur 2.4 is het resultaat getoond van Delft3D berekeningen voor de Pakketsom Waal, de simulatie van de Waalbodem met alle Ruimte voor de Rivier maatregelen tezamen (Deltares, 2014). Het figuur toont met kleur voor ieder jaar de berekende bodemverandering ten opzichte van de startbodem van 2015. De eerste jaren is er sprake van een forse aanpassing (erosie in Boven-Waal en sedimentatie in Midden-Waal). De kribverlaging in de Midden-Waal speelt een belangrijke rol bij de daar optredende sedimentatie. Geleidelijk nemen de trends af. In de eindsituatie is de bodem iets minder steil, wat leidt tot een grotere waterdiepte bij OLA, en daarmee een afname van onderhoudsbaggerwerk. Hoewel het model een beeld geeft van een forse afname van de trends, is het te onzeker om aan te nemen dat dit ook in werkelijkheid op zal treden. De trends in het model zijn initieel (referentiesom) al groter dan de historische trends zoals getoond in de vorige paragraaf omdat het model op oude trends is gekalibreerd.



Figuur 2.4 Berekend bodemverschil ten opzichte van 2015, jaargemiddeld, breedtegemiddeld, 10-km gemiddeld, 2015-2055, zonder baggeren. Pakketsom Waal, Deltares, 2014.

Het onderhoudsbaggerwerk dat ter plaatse van de bochten in de Boven-Waal wordt uitgevoerd leidt tot herverdeling van sediment in bochten. In Figuur 2.5 is een overzicht van baggerwerk voor de periode 2005-2015 getoond. Op het genoemde traject (km 867-885) is in alle jaren sprake van onderhoudsbaggerwerk. Het gebaggerde volume wordt op de eerst mogelijk diepere benedenstroomse locatie gestort (d.w.z. buitenbocht zonder vaste laag).

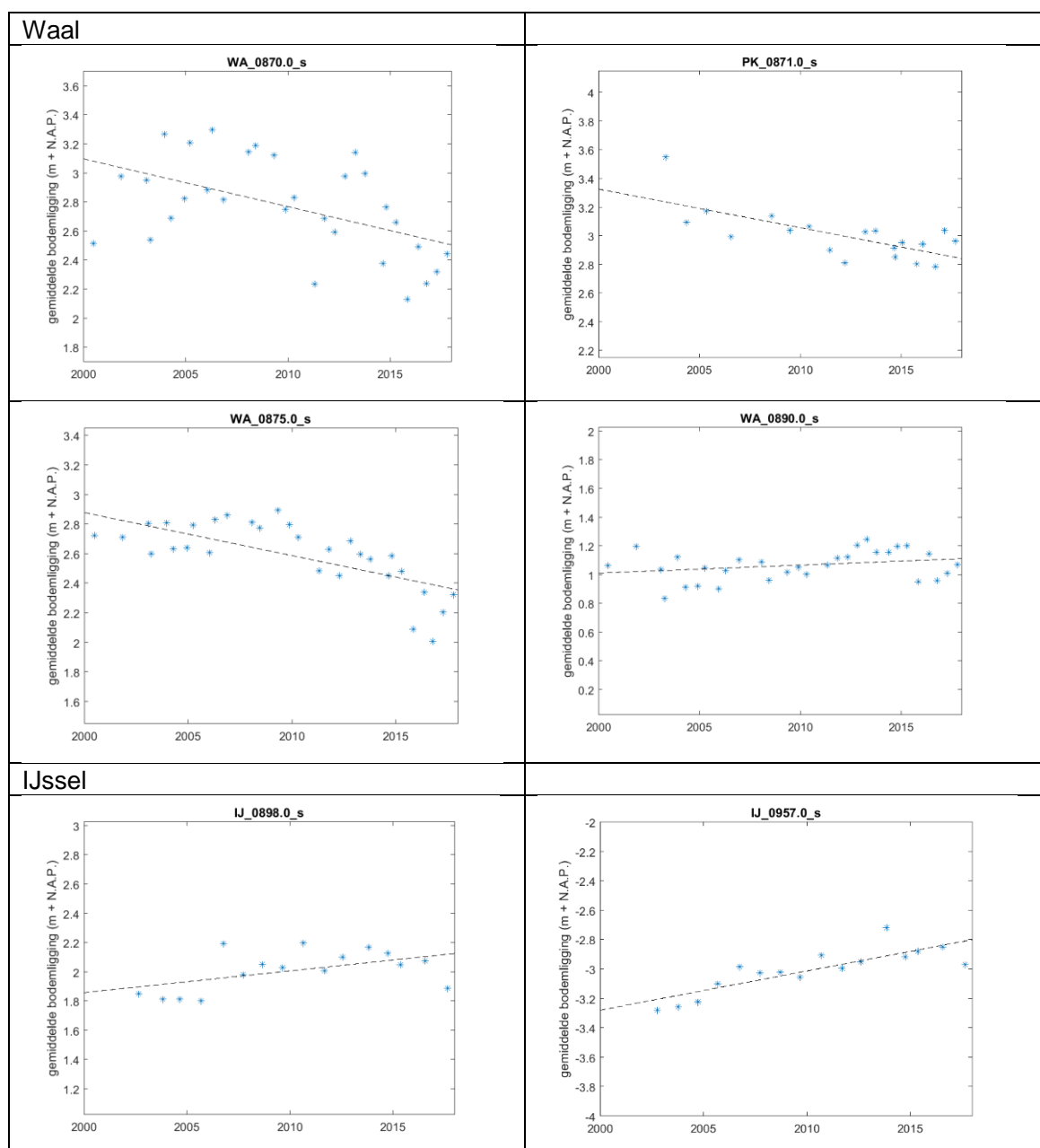


Figuur 2.5 Baggerwerk op de Waal als functie van tijd en locatie, periode 2005-2015. De gestreepte verticale lijnen geven de locaties aan van bochtovergangen (de rode streeplijnen accentueren de bochtovergangen op de Boven-Waal)

- De aanwezigheid van de vaste lagen beïnvloedt de erosie in de omgeving. Omdat de vaste lagen niet mee dalen in de grootschalige bodemerosie, zal de erosie vooral optreden in de alluviale binnenbochten. Door een niet-lineaire herverdeling van snelheden zal in die gevallen mogelijk ook een versterkte verdieping van de binnenbochten optreden. Dit kan het erosieproces versnellen. Dit kan worden afgeleid uit modelberekeningen, maar is niet aangetoond in de rivier zelf.
- Ook de heterogeniteit van de bodem speelt een rol op locaties waar de bodem zich insnijdt. De plaatselijke aanwezigheid van fijn erosiegevoelig sediment kan leiden tot een andere erosiesnelheid dan insnijding in grof en erosieresistent materiaal.
- Tenslotte is het ook goed om de invloed van scheepvaart op het gedrag van de bodemligging niet te onderschatten. De verhoogde stroomsnelheid door retourstroom en de schroefstraal kunnen het bodemtransport beïnvloeden en leiden tot een versneld erosiegedrag. De kennis hierover ontbreekt nog.

2.3 Temporele variaties

Bij het afleiden van de morfologische trends zijn niet alleen ruimtelijke variaties waar te nemen, maar ook variaties in tijd. In onderstaande figuren is voor een aantal representatieve locaties geïllustreerd hoe de trends tot stand zijn gekomen die zijn afgeleid door Deltares (vergelijkbaar met de aanpak van de andere studies). De trendlijnen zijn lineair zoals getoond in de figuren.



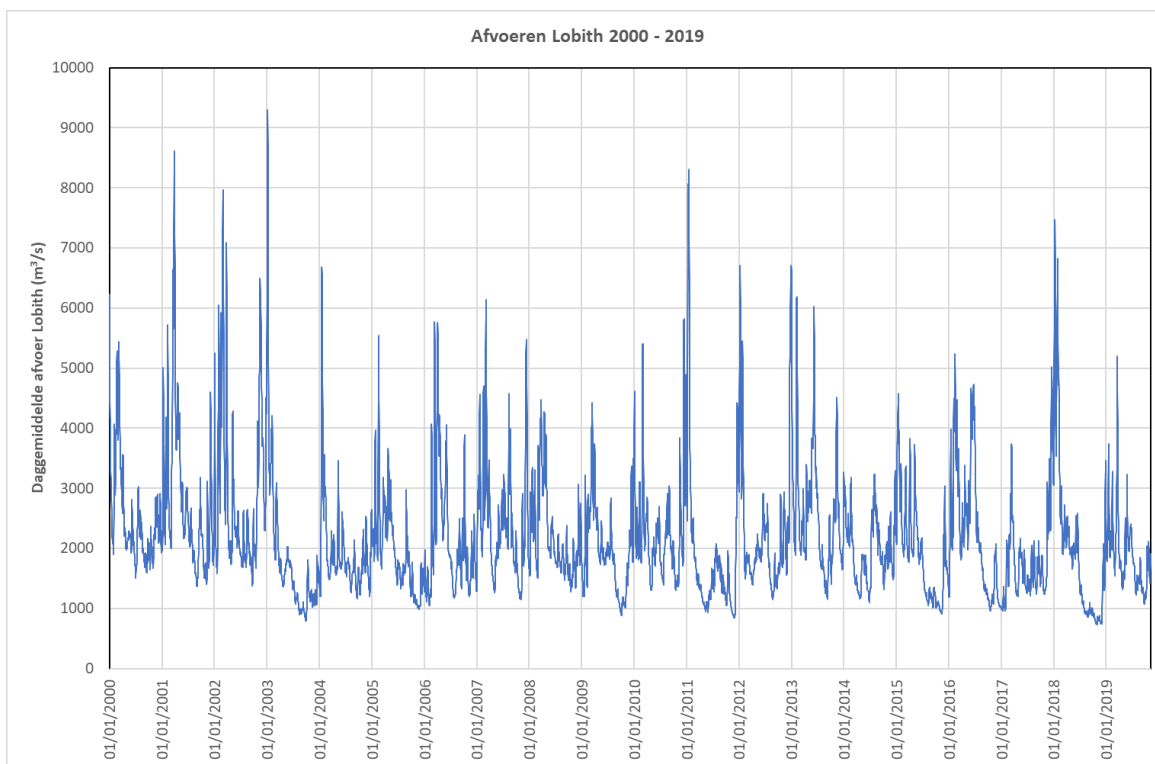
Figuur 2.6 Trendlijnen voor een aantal geselecteerde locaties (Deltares, 2019)

Uit de figuren kan het volgende worden afgeleid:

- De bodemligging daalt (of stijgt) niet gelijkmatig maar wordt gekarakteriseerd door golven. Er zijn locaties waar dit leidt tot een afwisseling van erosie en sedimentatie over de jaren. De gemiddelde trend kan dan zowel positief als negatief uitvallen, afhankelijk van het aantal jaren dat wordt beschouwd.

- Op sommige locaties zijn de fluctuaties rond de trendlijn veel groter dan op andere locaties.
- Er is een relatie met de aanleg van werken voor Ruimte voor de Rivier of met de overgang naar een 2.5 m naar 2.8 m diepte van de vaargeul op de Waal bij OLR (overeengekomen lage rivierstand) na 2006.

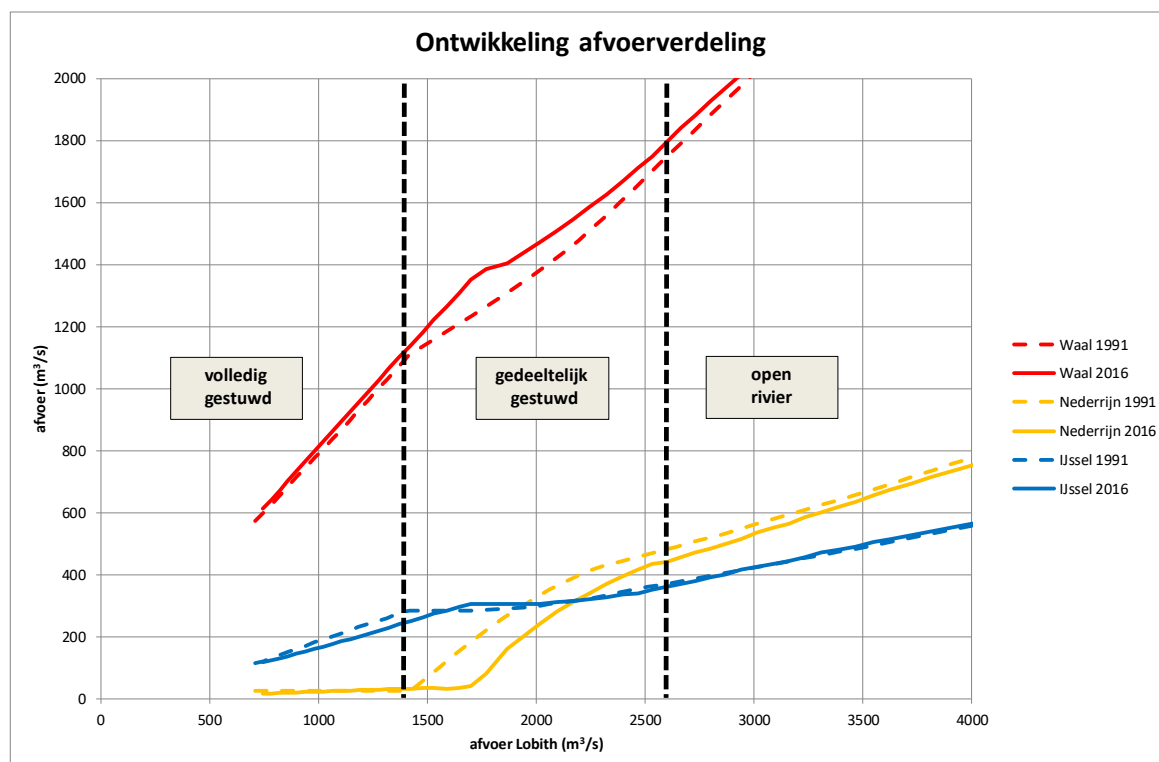
Er kan mogelijk een relatie worden gelegd met de afvoeren. Het verloop van de afvoeren in de periode 2000-2019 is getoond in Figuur 2.7. De jaren 2001, 2002, 2003, 2011 en 2018 worden gekenmerkt door een redelijk hoogwater, terwijl hoogwaters in tussenliggende jaren relatief laag zijn gebleven.



Figuur 2.7 Waargenomen afvoeren bij Lobith periode 2000-2019

2.4 Trends in afvoerverdeling op riviersplitsingen

Recent zijn door RWS-ON de historische afvoerdata voor de riviersplitsingen Pannerdensch Kop en IJsselkop onderzocht. De resultaten tonen een toename van afvoer naar de Waal en een afname van afvoeren naar IJssel en Neder-Rijn. De trends zijn consistent over het gehele afvoerbereik, maar door stuwbeheer (stuw Driel) is er wel onderscheid tussen lage-, midden- en hoge- afvoeren.



Figuur 2.8 Gemeten trends in afvoeren Rijntakken (bron: RWS-ON, Rico Tönis)

De trends zijn bij lage afvoeren, over de afgelopen periode van 29 jaar (met ruwe schatting van de waterdiepte op basis van de Qh-relaties):

- Boven Waal: ca. 40 m³/s toename bij lage afvoeren, ca. 10 cm toename waterdiepte
- Pann Kan: ca. 40 m³/s afname bij lage afvoeren, ca. 20 cm afname waterdiepte
- IJssel: ca. 40 m³/s afname bij lage afvoeren, ca. 40 cm afname waterdiepte
- Neder-Rijn: 0 m³/s bij lage afvoeren (gereguleerd met stuwen)

De invloed van de ongelijkmatige bodemerosie in Waal en Pannerdensch Kanaal speelt hierbij een belangrijke rol. Bij de midden-afvoeren (stuwbeheer van invloed en valt op dat dit is gewijzigd tussen 1991 en 2016.

Bij hoge afvoeren (open rivier) is er op de Pannerdensch Kop ook een toename in de afvoer naar de Waal ten koste van een afname naar het Pannerdensch Kanaal. Bij de IJsselkop zet deze lagere afvoer enkel door naar de Nederrijn:

- Boven Waal: ca. 40 m³/s toename bij hoge afvoeren, ca. 10 cm toename waterdiepte
- Pann Kan: ca. 40 m³/s afname bij hoge afvoeren, ca. 20 cm afname waterdiepte
- IJssel: ca. 0 m³/s bij hoge afvoeren
- Neder-Rijn: 40 m³/s afname bij hoge afvoer

3 Aanpak nieuwe prognose

In de nieuwe prognose (deze studie) hebben bovengenoemde studies en gegevens een belangrijke bijdrage kunnen leveren. Anders dan de prognose die voor de IRM beleidsopties en voor R2M is het voor de functies scheepvaart en waterbeschikbaarheid belangrijk de bodemontwikkeling ruimtelijk nauwkeurig te specificeren met het oog op toepassing in waterbewegingsmodellen (SOBEK, 1D). Belangrijk is de volgende terugkoppeling van de *grootschalige* morfologische veranderingen:

- 1 Voor scheepvaart is waterdiepte afhankelijk van verandering in bodemhelling (afname helling geeft grotere waterdiepte) en afvoerverdeling (verandering debiet op riviersplitsingen). Kleinschalige effecten (vaste lagen, binnenbochten, etc.) kunnen op de gemiddelde bodemverandering worden gesuperponeerd.
- 2 Voor waterbeschikbaarheid is afvoerverdeling eveneens cruciaal (hoeveel water gaat naar het IJsselmeer, kunnen we de stuwen nog gebruiken bij lage afvoeren?) en zijn waterstanden relevant voor inlaatwerken en verval over stuwen.

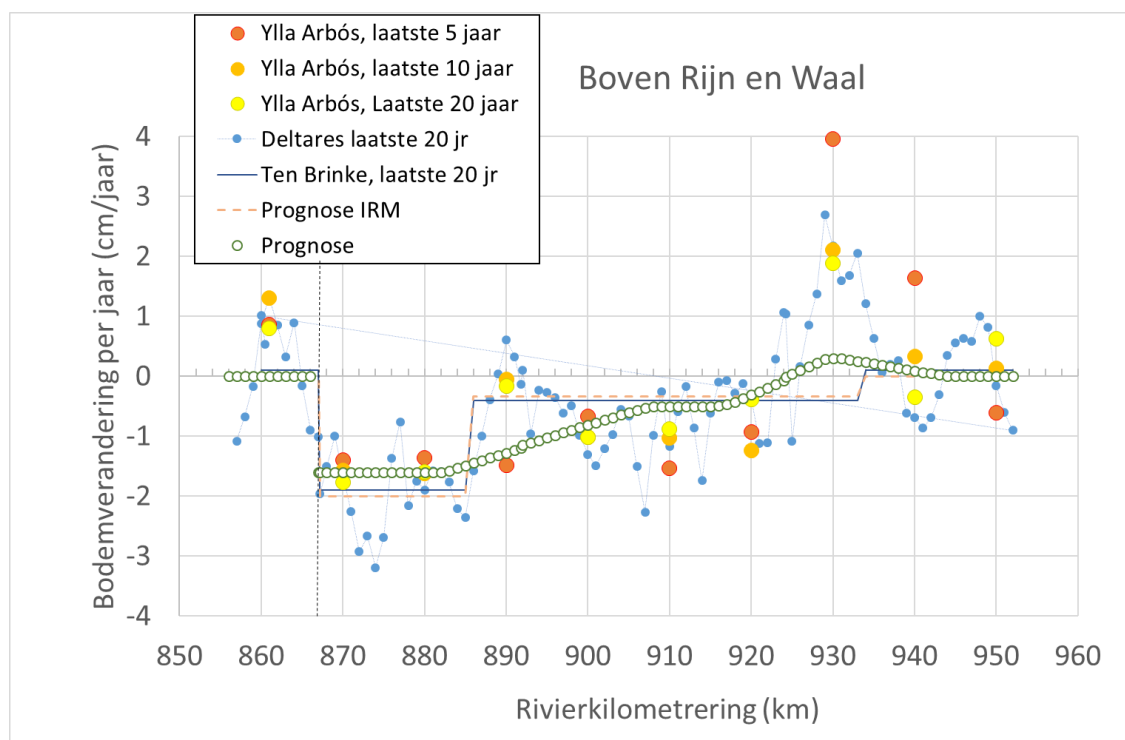
Hoewel blijkt dat de (geleidelijke) bodemveranderingen lokaal sterk variëren langs de rivier (Paragraaf 2.2), is er toch voor gekozen om gebruik te maken van ruimtelijk gemiddelde trends. De redenen hiervoor zijn:

- De meer lokale ruimtelijk variaties in bodemverandering zijn een combinatie van verplaatsende erosie- en sedimentatiegolven, plaatsvaste invloeden, en menselijk ingrijpen (baggeren en storten, Ruimte voor de Rivier). De verplaatsende en plaatsvaste trends zijn niet eenvoudig te scheiden en een eenduidige prognose van deze effecten op basis van gemeten trends is niet mogelijk. Verder onderzoek, in combinatie met gekalibreerde rekenmodellen, is hiervoor aanbevolen.
- Waterstand en afvoerverdeling worden vooral bepaald door verhanglijnen. De verhanglijnen zorgen ervoor dat waterstanden op een bepaald punt worden beïnvloed door de geometrie van een benedenstrooms traject van enkele tientallen kilometers. Uiteraard werkt de dichtbij gelegen bodemligging sterker door in de waterstand dan de veraf gelegen bodem. Bij de riviersplitsingen volgt de waterverdeling uit de eis dat waterstanden op de splitsing gelijk zijn voor beide takken, en dus wordt bepaald door beide verhanglijnen.

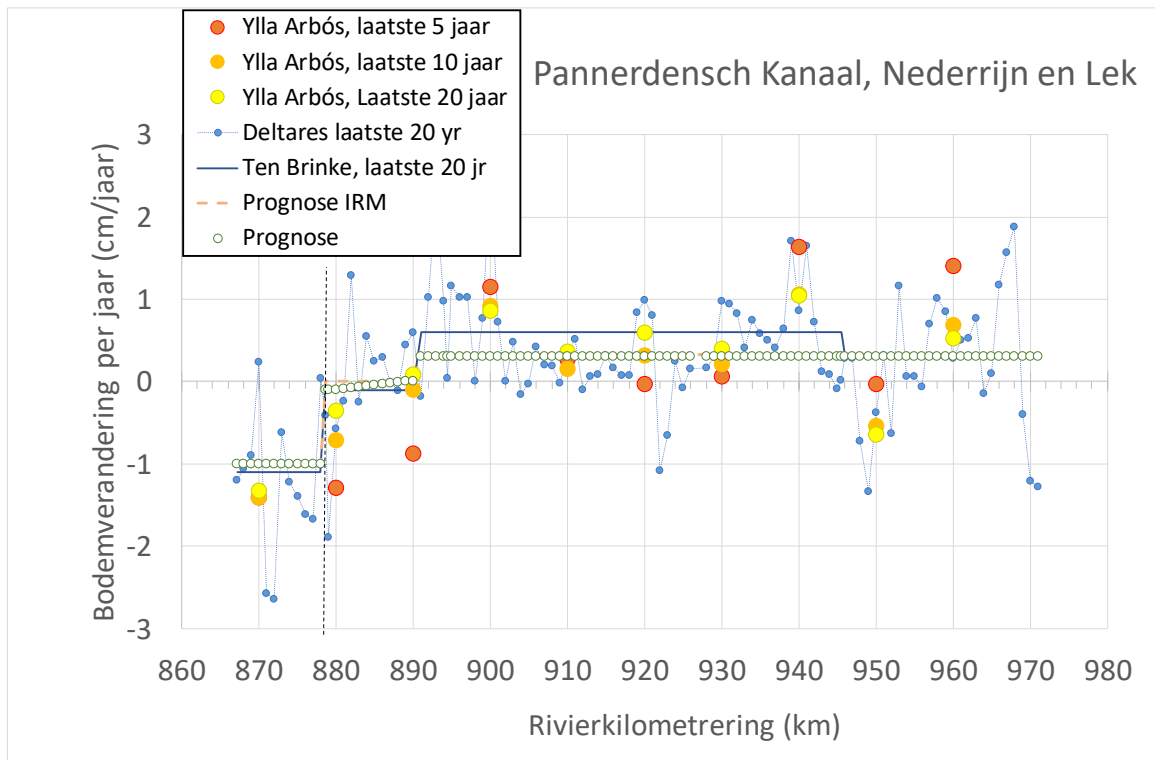
Met het oog op deze terugkoppeling van bodems op waterstanden en functies 'waterverdeling' en 'scheepvaart' is een prognose gemaakt die iets afwijkt van de prognoses voor IRM beleidsopties en voor Rivers2Morrow (R2M).

4 Prognose trends bodemontwikkeling KBN

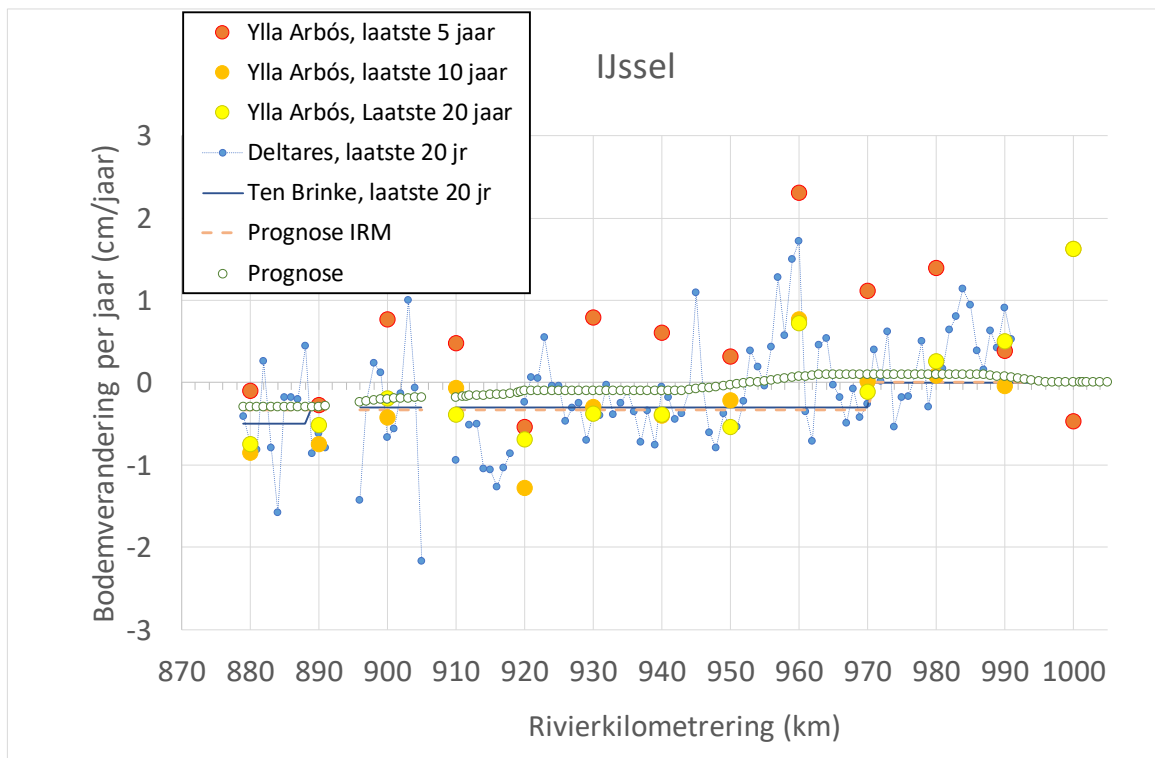
Onderstaande figuren geven de prognose van trends, en de relatie met de waargenomen trends van de andere studies.



Figuur 4.1 Trends in bodemverandering Boven Rijn en Waal: prognose (deze studie) en waargenomen trends uit recente studies voor R2M en IRM (stroming is van links naar rechts).



Figuur 4.2 Trends in bodemverandering Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en Lek: prognose (deze studie) en waargenomen trends uit recente studies voor R2M en IRM (stippellijn markeert de locatie van de IJsselkop).



Figuur 4.3 Trends in bodemverandering IJssel: prognose (deze studie) en waargenomen trends uit recente studies voor R2M en IRM (de locaties van voormalige bochtafsnijdingen zijn zichtbaar als 'gaten' in de lijnen door verspringen van de rivierkilometrerings).

Toelichting bij de figuren (voor vergelijking met de prognose voor IRM, zie tekst na Tabel 1):

- Uit alle studies volgt dat de meeste erosietrends zijn afgenomen ten opzichte van vorige eeuw en begin deze eeuw (Ylla Arbós, 2019, Ten Brinke, 2019). De aanpassingen van baggerbeleid en de aanleg van rivierverruimende maatregelen (Ruimte voor de Rivier e.d.) spelen daarbij een belangrijke rol.
- Trends in *Boven-Rijn*: bodem heeft zich afgelopen tijd gestabiliseerd (zelfs enige aanzanding) en zal geen grote verandering laten zien tot 2050.
- Trends in *Boven-Waal (Figuur 4.1, km 867-885)*: de bodem blijft nog eroderen, maar in iets geringere mate dan de afgelopen 10 á 20 jaar (rivierverruiming gaat een rol spelen). Vooral nog is voor de erosie een conservatieve schatting gemaakt: uitgegaan is van de gemiddelde trend van de afgelopen 10 jaar, zoals afgeleid door Ylla Arbós, van -1.6 cm/jaar (dat is iets minder dan de trend van de afgelopen 20 jaar van -1.9 cm/jaar zoals voorgesteld door IRM, zie na Tabel 4.1). Deze trend zet zich door tot aan Nijmegen. Erosie vindt vooral plaats in de binnenbochten (zie paragraaf 2.2).
- Trends in *Midden-Waal (Figuur 4.1, km 885-935)*: rondom km 890 is sprake van sterk veranderende trends (stabilisatie), maar rest van Midden-Waal blijft eroderen. Toch is gekozen om de erosietrend geleidelijk af te laten nemen (lineair tussen Nijmegen, km 885, en Beneden Leeuwen, km 910) en daarna constant tot Tiel, km 916. Aangenomen wordt namelijk dat de stabilisatie rond km 890 een tijdelijke response was op de Ruimte voor de Rivier maatregelen (kribverlaging eerste fase, traject Nijmegen-Winssen) en dat de erosie in de Boven-Waal zich weer verder stroomafwaarts gaat ontwikkelen (voortschrijdende erosie). Dit blijkt onder andere uit de trend van de afgelopen 5 jaar van Ylla Arbós in de figuur op km 890. Tussen Heesselt (Sint Andries) en Zaltbommel (km 925 – 935) is vervolgens sprake van sedimentatie. De *Beneden-Waal (Figuur 4.1, vanaf km 935)* is stabiel verondersteld (mede door beheer en reactie op kribverlaging).
- Trends in *Pannerdensch Kanaal (Figuur 4.2, km 867- 878)*: de historische trends geven een continue doorgaande erosie van 1 cm/jaar. Aangenomen wordt dat deze erosie onveranderd blijft doorgaan tot 2050, gelijkmatig over de hele tak.
- Trends in *Nederrijn en Lek (Figuur 4.3, vanaf km 878)*: tot aan de stuw Driel (km 891.5) wijken de trends van verschillende studies sterk af. Aangenomen wordt dat tot 2050 nog sprake zal zijn van een geringe trajectgemiddelde erosie van -0.1 cm/jaar op de IJsselkop afnemend naar 0 cm/jaar voor de stuw, met de kanttekening dat er lokaal al sprake kan zijn van forse aanzandingspieken. Benedenstrooms van Driel geven alle studies aan dat er sprake is van een doorgaande sedimentatie (mogelijk de reactie op de rivierverruiming). Voor de prognose is uitgegaan van +0.3 cm/jaar sedimentatie, in overeenstemming met IRM.
- Trends in de *IJssel*: de huidige trends tonen dat in ieder geval in de Boven-IJssel nog sprake is van een geringe erosie die naar verwachting door zal gaan tot 2050. In de historische data lijkt rond Doesburg (km 903) sprake te zijn van een aanzandingstrend, maar hier blijkt sprake te zijn van grote fluctuaties (in de orde van 1 m) van de gemiddelde bodemligging in de afgelopen jaren, en lijken de recente trends weer op erosie te duiden. Vooral nog is aangenomen dat dit een lokale invloed is en de grootschalige erosietrend hier ook nog zal doorgaan. Pas circa 10 km benedenstrooms van Deventer (km 945) is sprake van een geleidelijke overgang naar een (lichte) sedimentatie trend, zowel in de metingen als in de prognose.

In onderstaande tabel zijn de beschreven trends geaggregeerd over de trajecten zoals gedefinieerd door Ten Brinke (2019) en gebruikt voor de IRM beleidsopties. Zowel de trajectgemiddelde historische trends (20 jaar gemiddeld) als de prognoses zijn vergelijkbaar maar niet overal identiek.

Tabel 4.1 Trends 20 jaar gemiddeld per riviertraject (trajecten zoals gebruikt in IRM). Grijsz kolommen geven de prognoses weer die voor IRM en in deze studie zijn gepresenteerd.

| | Km | Trend Ten Brinke (cm/jr) | Prognose trend IRM (cm/jr) | Trend Ylla Arbos (cm/jr) | Deltares 20 yr (cm/jr) | Prognose (cm/jr) |
|------------------------------------|------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------|
| Boven-Rijn | 858 - 857 | +0.1 | 0 | +1.3 | +0.2 | 0.0 |
| Boven-Waal | 868 - 885 | -1.9 | -1.9 | -1.6 | -2.0 | -1.6 |
| Midden-Waal | 886 - 933 | -0.4 | -0.4 | -0.3 | -0.2 | -0.6 |
| Beneden-Waal | 934 - 951 | +0.1 | +0.1 | +0.2 | +0.1 | +0.1 |
| Pann. Kanaal | 868 - 876 | -1.1 | -1.1 | -1.4 | -1.2 | -1.0 |
| Nederrijn (IJsKop-Driel) | 877 - 890 | -0.1 | -0.1 | -0.4 | 0.0 | -0.1 |
| Nederrijn-Lek (Driel-Hagestein) | 891 - 947 | +0.6 | +0.3 | +0.5 | +0.5 | +0.3 |
| Lek (vanaf Hagestein) | 947 - 970 | +0.3 | +0.3 | +0.1 | +0.2 | +0.3 |
| Boven-IJssel | 879 - 888 | -0.5 | -0.5 | -0.9 | -0.4 | -0.3 |
| Midden-IJssel | 889 - 970 | -0.3 | -0.3 | -0.3 | -0.2 | -0.1 |
| Beneden-IJssel | 971 - 1005 | 0.0 | 0.0 | +0.6 | - | +0.1 |

In de prognose voor de IRM beleids optie (voortzetting trends van afgelopen 20 jaar) en de nieuwe prognose zijn verschillen geconstateerd:

- Boven-Waal: De daling in de Boven-Waal zal iets afnemen in reactie op de rivierverruiming en de afvlakking van erosie in de binnenbochten (-1.6 cm/jr in plaats van -1.9 cm/jr). Dit volgt onder andere uit de effectberekeningen met Delft3D voor de Pakketsom Waal (Deltares, 2014). Voor IRM is echter uitgegaan dat deze afname niet zal optreden.
- Midden-Waal: Door de gekozen geleidelijke afname van erosie vanaf Nijmegen in plaats van een abrupte overgang (zoals gemeten afgelopen 20 jaar) valt in de Midden Waal de gemiddelde erosie iets hoger uit (-0.6 cm/jr in plaats van -0.4 cm/jr) dan toegepast in IRM. De trajectgemiddelde gemiddelde erosie in IRM (en de historische trends van 20 jaar) wordt vooral ook gereduceerd door de trend rond km 890, waar in de periode tussen 2010 – 2015 de bodem met circa 0.4 m is gestegen, echter inmiddels is de bodem daar weer aan het dalen. Dat blijkt bijvoorbeeld ook uit de korte termijn trend van Claudia Ylla Arbós op die locatie. De nieuwe prognose geeft daarom iets meer erosie dan IRM.
- IJssel: De Boven-IJssel zal iets minder sterk eroderen door rivierverruiming (-0.3 cm/jr in plaats van -0.5 cm/jr voor IRM). De trends van Claudia Ylla Arbós laten een duidelijke afname zijn van de erosie in de tijd. Dit geldt ook voor de Midden-IJssel waardoor ook daar is gekozen voor een lagere erosie dan voor de IRM prognose (-0.1 cm/jr in plaats van -0.3 cm/jr voor IRM). Hoewel de recente trends uit de P-Mappen zelfs duiden op een relatieve aanzanding van de IJssel, wordt aangenomen dat de onzekerheden in de P-Map data hier een rol bij spelen en uit mag worden gegaan dat erosietrends in de Boven-IJssel aanwezig zullen blijven.
- Beneden-IJssel: De Beneden-IJssel zal sedimenteren, maar dat zal deels door het huidige intensieve beheer (met name bij de zomerbedverlaging) worden opgevangen. Het deel bovenstrooms van de zomerbedverlaging zal een gemiddelde aanzanding tonen van +0.1 cm/jr. In IRM is uitgegaan van een stabiele bodemligging, maar meer recente trends geven duidelijk een sedimentatie aan.

5 Conclusies

Ten behoeve van functies 'scheepvaart' en 'waterbeschikbaarheid', als input voor modellering is een prognose gemaakt voor de grootschalige morfologische ontwikkeling van de Rijntakken tot 2050. De volgende conclusies kunnen worden getrokken ten aanzien van de resultaten:

- De huidige trends in grootschalige erosie tonen een geringe afname, maar er is nog te weinig zicht op een verdere afname van de erosie (met name in de Waal). De invloed van Ruimte voor de Rivier maatregelen lijkt in ieder geval merkbaar in de recente trends.
- In de voorspelde erosietrends blijft de Waal sterker dalen dan de bodem in het Pannerdensch Kanaal. De waargenomen trend in de verandering in afvoerdeling blijft daarmee ook doorgaan.
- De grootschalige morfologische ontwikkeling (gemiddeld over lengteschalen van tientallen kilometers) is de som van een groot aantal lokale veranderingen. Deze ruimtelijk variërende (en temporeel variërende) lokale trends zijn vrijwel niet te voorspellen. Voor de prognose van grootschalige trends in deze studie, als de som van de lokale trends, is gekozen om aan te sluiten bij de waargenomen recente trends uit bodempeilingen van de afgelopen 20 jaar met enkele correcties voor verwachte morfologische effecten van maatregelen en stroomafwaarts ontwikkelende erosie.
- De gepresenteerde prognoses in dit rapport zijn in grote lijnen vergelijkbaar met de prognoses afgeleid uit de studies van Ten Brinke en Yllas Arbós. Enkele kleine verschillen in trends hebben te maken met interpretatie en trajectmiddeling.

6 Referenties

- Brinke, W. ten (2019) Effecten morfologische ontwikkelingen op functies Rijn en Maas. Blueland Consultancy BV. Rapport B19.01, Okt. 2019.
- Deltares (2014) Morfologische Pakketsom Waal: Morfologische effecten Ruimte voor de Rivier maatregelen. Auteurs: Kees Sloff, Robin van der Sligte, Willem Ottevanger. Rapport 1208454-000. Nov 2014.
- Frings R.M, Hillebrand, G, Gehres, N, Banhold, K., Schriever, S., Hoffmann, T. (2019) From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-Science Reviews*. Volume 196, September 2019, 102830, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.002>
- Huthoff F, Paarlberg AJ, Barneveld H, Wal M van der (2011) Rivierkundig onderzoek WaalSamen, Pilotstudie Langsdammen, HKV-rapport PR2096.10, juni 2011.
- Ylla Arbós, C., A. Blom, S. van Vuren, R.M.J. Schielen (2019) Bed level change in the upper Rhine Delta since 1926 and rough extrapolation to 2050. Delft University, Nov 2019.