

Onderbouwing beleidskeuze bodempligging IRM



Onderbouwing beleidskeuze bodemligging IRM

Auteur(s)

Kees Sloff

Andries Paarlberg

Pepijn van Denderen

Hermjan Barneveld

Erik Mosselman

Partners

HKV Lijn in Water, DELFT

Onderbouwing beleidskeuze bodemligging IRM

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Saskia van Vuren
Referenties	KPP HV04 2019 - BOA Rivieren (Deltares), PR4860.10 (HKV)
Trefwoorden	Riviermorfologie, rivierbedregulering, langsdammen, Delft3D

Documentgegevens

Versie	0.2
Datum	20-04-2023
Projectnummer	11208036-014
Document ID	11208036-014-ZWS-0001
Pagina's	47
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Kees Sloff (Deltares)	
	Andries Paarlberg (HKV)	
	Pepijn van Denderen (HKV)	
	Hermjan Barneveld (HKV)	
	Erik Mosselman (Deltares)	

Samenvatting

Regionale overheden en het Rijk werken binnen het programma Integraal Riviermanagement (IRM) samen aan een veilig, bevaarbaar, vitaal en aantrekkelijk Maas- en Rijngebied. Op verschillende plaatsen loopt het beheer tegen grenzen aan omdat het riviersysteem geen ruimte biedt om alles te realiseren. Bovendien hebben menselijke ingrepen het systeem verstoord, waardoor bijvoorbeeld de bodem van het zomerbed erodeert en steeds lager komt te liggen. IRM werkt toe naar een Programma onder de Omgevingswet (POW) als eerste stap naar het rivierengebied van de toekomst. Volgens de huidige planning is dat eind 2023 gereed. Het POW bevat een integrale visie op het rivierengebied met daarbij de te realiseren ambitieniveaus voor de afvoercapaciteit en de bodemligging en het type te nemen maatregelen met bijbehorende locaties.

Tegen deze achtergrond vragen Rijkswaterstaat en het Directoraat-generaal Water en Bodem een op systeemkennis en modelberekeningen gebaseerd advies over de haalbaarheid en uitvoerbaarheid van de volgende drie beleidsopties voor de bodemligging van de Rijntakken en de afvoerverdeling op de Rijnsplitsingen:

1. Beleidsoptie 1: Huidige bodemligging stabiliseren;
2. Beleidsoptie 2: Laagwaterafvoerverdeling van 1980 herstellen;
3. Beleidsoptie 3: Bodemligging herstellen naar 2010 of een eerder jaar.

Hiervoor is essentiële basiskennis van fysische processen en het Rijnsysteem bijeengebracht, zijn inzichten in kansrijke oplossingen afgeleid uit voorgaande studies, zijn voor de kansrijke oplossingen verkennende hydraulische en morfologische berekeningen gemaakt, en zijn op 14 november en 12 december 2022 discussiesessies georganiseerd met een bredere groep van deskundigen.

Geadviseerd wordt om het POW te beperken tot Beleidsopties 1 (huidige bodemligging stabiliseren) en 2 (laagwaterafvoerverdeling van 1980 herstellen). Het implementeren van maatregelen voor deze beleidsopties beslaat 10 à 20 jaar en de effecten lopen daarna nog decennia door. Er is tijd nodig om inzicht te krijgen in hoe de rivier reageert op de maatregelen. Beleidsoptie 3 komt redelijkerwijs pas in beeld als de maatregelen voor de andere beleidsopties daarvoor het fundament hebben gelegd en als voldoende geleerd is uit ervaringen opgedaan bij implementatie van die maatregelen. Dan is naar verwachting ook meer duidelijk over de baten van Beleidsoptie 3.

Als snelle eerste maatregel zonder spijt wordt geadviseerd om te stoppen met sedimentwinning uit het zomerbed van de Waal.

Extra stroomgeulen bieden een geschikte structurele oplossingsrichting voor het stabiliseren van de bodemligging in het zomerbed van de Waal. Parallel aan de hoofdgeul worden oevergeulen aangelegd. Berekeningen wijzen uit dat deze herinrichting van het zomerbed voor Beleidsoptie 1 voldoende effect kan sorteren als de oevergeulen bij middenafvoeren mee stromen en breed en diep zijn, ook als de normaalbreedte van de hoofdgeul kleiner is dan in de huidige situatie ten behoeve van scheepvaart en Beleidsoptie 2.

Onvermijdelijk blijft daarnaast adaptief sedimentbeheer nodig in de vorm van baggeren en suppleren. Andere mogelijke aanvullende maatregelen zijn kribverlaging op de Boven-Waal, zomerkadeverlaging op de Boven-IJssel, herstel van afgesneden bochten op de IJssel, zoals Het Zwarte Schaar bij Doesburg, en combinatie met uiterwaardmaatregelen voor natuur (bijvoorbeeld nevengeulen). Deze maatregelen zijn op zichzelf onvoldoende, maar kunnen in combinatie met meerdere stroomgeulen bijdragen aan optimalisatie.

Meerdere stroomgeulen op de Waal hebben effect op de verdeling van alle afvoeren over de Rijntakken. Realisatie van de gewenste afvoerverdelingen levert een ontwerpogave voor het splitsingspuntengebied. Maatregelen voor Beleidsopties 1 en 2 zijn daarom niet los van elkaar te ontwikkelen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding	8
1.2	Opdracht	8
1.3	Werkwijze	8
2	Advies voor een oplossingsrichting	10
3	Advies voor vervolgstappen	12
4	Literatuurverwijzingen	13
A	Riviergedrag, maatregelen en effecten	15
A.1	Oorzaken van bodemerosie	15
A.2	Nadelige gevolgen van bodemerosie	15
A.3	Mogelijke maatregelen	16
A.4	Effect van rivierverruiming	17
A.5	Sedimentsamenstelling van de rivierbodem	19
A.6	Riviersplitsingen	21
B	Voorgaande studies	22
B.1	Globaal ontwerp langsdammen (2015)	22
B.2	Sustainable Fairway Rhinedelta II (2015)	23
B.3	MIRT-onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken (2017)	24
B.4	Modelanalyse vaste laag Nijmegen (2019)	25
B.5	Ruimte voor levende rivieren (2019)	25
B.6	QuickScan rivierbodem Rijn (2020)	26
B.7	Testen van 1D morfologisch model Rijntakken (2021)	26
B.8	Vooruitblik naar mogelijke keuzes voor de Rijn (2022)	27
B.9	Historische reconstructie met een numeriek model (2020)	27
B.10	Rivierkundige ervaring (1978-2016)	27
C	Verkennde berekeningen	29
C.1	Inleiding	29
C.2	Redeneerlijn en eerste verkennende berekeningen	29
C.2.1	Inleiding	29
C.2.2	Hydraulische berekeningen	30
C.2.3	Morfologische berekeningen	30

C.3	Definitieve verkennende berekeningen	32
C.3.1	Inleiding	32
C.3.2	Effecten op afvoer, stroomsnelheden en waterstanden in de hoofdgeul	33
C.3.3	Effecten op sedimenttransport en morfologie	35
C.4	Conclusies	41
C.5	Aanbevelingen voor vervolg	42
D	Inbreng van experts tijdens discussiesessies	44

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Regionale overheden en het Rijk werken binnen het programma Integraal Riviermanagement (IRM) samen aan een veilig, bevaarbaar, vitaal en aantrekkelijk Maas- en Rijngebied. Het doel is om de rivieren duurzaam te beheren en om voorbereid te zijn op de toekomst. Het rivierbeheer kent opgaven voor waterveiligheid, bevaarbaarheid, zoetwaterbeschikbaarheid, waterkwaliteit, natuur en de zorg voor een leefomgeving die aantrekkelijk is om in te wonen, werken en recreëren. Op verschillende plaatsen loopt het beheer tegen grenzen aan omdat het riviersysteem geen ruimte biedt om alles te realiseren. Bovendien hebben menselijke ingrepen het systeem verstoord, waardoor bijvoorbeeld de bodem van het zomerbed erodeert en steeds lager komt te liggen. De overheden zien in dat een sectorale aanpak niet langer werkt. Zij kiezen een integrale aanpak waarin ze de rivier als één systeem zien en de verschillende opgaven samenbrengen en beoordelen vanuit één gezamenlijke visie.

IRM werkt toe naar een Programma onder de Omgevingswet (POW) als eerste stap naar het rivierengebied van de toekomst. Volgens de huidige planning is dat eind 2023 gereed. Het POW bevat een integrale visie op het rivierengebied met daarbij de te realiseren ambitieniveaus voor de afvoercapaciteit en de bodemligging en het type te nemen maatregelen met bijbehorende locaties. Binnen het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W) werken het Directoraat-generaal Rijkswaterstaat (RWS) en het Directoraat-generaal Water en Bodem (DGWB) deze visie uit. Zij wensen begin 2023 al een beter beeld te krijgen van de maakbaarheid en de uitvoerbaarheid van de mogelijke maatregelen. Deze wens vormt de aanleiding voor de voorliggende studie.

1.2 Opdracht

RWS en DGWB vragen een op systeemkennis en modelberekeningen gebaseerd advies over de haalbaarheid en uitvoerbaarheid van de volgende drie beleidsopties voor de bodemligging van de Rijntakken en de afvoerdeling op de Rijnsplitsingen:

1. Beleidsoptie 1: Huidige bodemligging stabiliseren;
2. Beleidsoptie 2: Laagwaterafvoerdeling van 1980 herstellen;
3. Beleidsoptie 3: Bodemligging herstellen naar 2010 of een eerder jaar.

1.3 Werkwijze

Voor de opdracht is essentiële basiskennis van fysische processen en het Rijnsysteem bijeengebracht (bijlage A), zijn inzichten in kansrijke oplossingen afgeleid uit voorgaande studies (bijlage B), zijn voor de kansrijke oplossingen verkennende hydraulische en morfologische berekeningen gemaakt met de modellen D-Hydro en Delft3D-4 (bijlage C), en zijn op 14 november en 12 december 2022 discussiesessies georganiseerd met een bredere groep van deskundigen (bijlage D). Op basis daarvan geeft hoofdstuk 2 advies voor een oplossingsrichting en hoofdstuk 3 advies voor vervolgstappen.

De uitvoering van de opdracht heeft zich geconcentreerd op de Waal.

De opdracht is uitgevoerd door Kees Sloff (Deltares, projectleider), Pepijn van Denderen (HKV), Andries Paarlberg (HKV), Hermjan Barneveld (HKV) en Erik Mosselman (Deltares). Het project werd begeleid door Saskia van Vuren (RWS) en Marco Taal (DGBW). Een bredere groep van deskundigen is geraadpleegd tijdens de discussiesessies op 14 november en 12 december 2022 (bijlage D). De groep heeft eerdere versies van rekenresultaten en rapportages besproken op 1 februari, 23 februari en 11 april 2023.

2 Advies voor een oplossingsrichting

Geadviseerd wordt om het POW te beperken tot Beleidsopties 1 (huidige bodemligging stabiliseren) en 2 (laagwaterafvoerdeling van 1980 herstellen). Maatregelen hiervoor zijn niet los van elkaar te ontwikkelen. Het implementeren van deze maatregelen beslaat 10 à 20 jaar en de effecten lopen daarna nog decennia door. Er is tijd nodig om inzicht te krijgen in hoe de rivier reageert op de maatregelen. Beleidsoptie 3 komt redelijkerwijs pas in beeld als de maatregelen voor de andere beleidsopties daarvoor het fundament hebben gelegd en als voldoende geleerd is uit ervaringen opgedaan bij implementatie van die maatregelen. Dan is naar verwachting ook meer duidelijk over de baten van Beleidsoptie 3.

Als snelle eerste maatregel zonder spijt wordt geadviseerd om te stoppen met sedimentwinning uit het zomerbed van de Waal.

Extra stroomgeulen bieden een geschikte structurele oplossingsrichting voor het stabiliseren van de bodemligging in het zomerbed van de Waal. Parallel aan de hoofdgeul worden oevergeulen aangelegd. Berekeningen wijzen uit dat deze herinrichting van het zomerbed voor Beleidsoptie 1 voldoende effect kan sorteren als de oevergeulen bij middenafvoeren mee stromen en breed en diep zijn, ook als de normaalbreedte van de hoofdgeul kleiner is dan in de huidige situatie ten behoeve van scheepvaart en Beleidsoptie 2. Geadviseerd wordt om de hoofdoplossing langs deze lijn te ontwikkelen. Ruimtelijke variaties in oevergeuldoorsnede zijn dan het voornaamste middel om een gelijkmatig verloop van de sedimenttransportcapaciteit langs de rivier te realiseren. Dat is de essentie om erosie en sedimentatie te minimaliseren. Geen of hooguit geringe ruimtelijke variaties worden geadviseerd voor de normaalbreedte van de hoofdgeul. Verkleining van de normaalbreedte vormt wel onderdeel van de oplossingsrichting om de waterdiepten en waterstanden bij laagwater te verhogen en daarmee de afvoerdeling op de Pannerdense Kop te wijzigen ten gunste van het Pannerdensch Kanaal. In eerdere rapportages werd deze oplossingsrichting genoemd naar de langsdammen die de hoofdgeul en de oevergeulen scheiden. Die benaming legt echter teveel nadruk op een constructief onderdeel dat niet de essentie van de herinrichting weergeeft. De hoofdtekst van dit rapport hanteert daarom de term “meerdere stroomgeulen”.

Onvermijdelijk blijft daarnaast adaptief sedimentbeheer nodig in de vorm van baggeren en suppleren. Dit betreft:

- het voortzetten van het huidige beheer van baggeren en storten en het bieden van een oplossing tot minstens 2040 zolang de herinrichting met meerdere stroomgeulen nog niet gerealiseerd is;
- het mitigeren van morfologische effecten van herinrichtingsmaatregelen;
- het corrigeren van morfologische gevolgen van hoogwaters (bijvoorbeeld baggeren van sedimentafzettingen in het Pannerdensch Kanaal of het vullen van erosiekuilen in zandige ondergrond);
- het al eerder bereiken van het op lange termijn beoogde effect en daarmee het vermijden van de tijdelijke toename van erosie benedenstrooms van herinrichtingsmaatregelen.

Suppleties moeten worden aangebracht in de trajecten waar meer sediment nodig is. Het is niet effectief om alleen op de Bovenrijn te suppleren, vanwaar de stroming het sediment verder stroomafwaarts zou kunnen verspreiden. De voornaamste oorzaken van de bodemerosie liggen niet bovenstrooms en suppleties op de Bovenrijn hebben pas na decennia invloed op erosie in de Rijntakken.

Potentieel geschikte aanvullende maatregelen tegen bodemerrosie zijn kribverlaging op de Boven-Waal, zomerkadeverlaging op de Boven-IJssel, herstel van afgesneden bochten op de IJssel, zoals Het Zwarte Schaar bij Doesburg, en combinatie met uiterwaardmaatregelen voor natuur (bijvoorbeeld nevengeulen).

Deze adviezen impliceren dat de volgende maatregelen afzonderlijk onvoldoende zijn als hoofdroplossing voor de Nederlandse Rijntakken:

- Suppleties op de Bovenrijn (want deze hebben pas na decennia invloed op erosie in de benedenstroomse Rijntakken);
- Kribverlaging (want deze verruimen te weinig voor voldoende effect op de bodemerrosie);
- Rivierverruiming in de uiterwaarden, anders dan oevergeulen (want meestal is verruiming in uiterwaarden slechts bij hoge afvoeren werkzaam terwijl juist verruiming bij de middenafvoeren effectief is);
- Algehele vergroving van de rivierbodem (want dit vergt grote hoeveelheden sediment, hindert de scheepvaart bij de uitvoering, en heeft onbekende effecten).

Dat deze laatste maatregelen onvoldoende zijn als hoofdroplossing wil overigens niet zeggen dat zij onbruikbaar zijn als lokale aanvulling of optimalisatie.

Realisatie van de aanbevolen oplossing vraagt tientallen jaren. In de tussentijd is adaptief sedimentmanagement noodzakelijk maar niet voldoende voor de nijpende problemen die zich al op korte termijn aandienen. Structurele aanpassingen zijn nodig voor de vaste laag bij Nijmegen, de bodemkribben bij Erlecom en kruisingen van kabels en leidingen.

3 Advies voor vervolgstappen

Voor het vervolg worden de volgende stappen geadviseerd:

- Verbetering van het vermogen van het morfologische model om huidige trends in de referentiesituatie te voorspellen (paragraaf C.5 van bijlage C);
- Verdere optimalisering van de inrichting van de Rijntakken met behulp van hydraulische en morfologische berekeningen met D-Hydro en Delft3D-4. Bijlage C geeft een eerste aanzet met verkennende berekeningen en meer gedetailleerde aanbevelingen voor verdere modellering;
- Bepaling van de volgorde en timing voor het uitvoeren van maatregelen aan de hand van hydraulische en morfologische berekeningen met D-Hydro en Delft3D-4. Uitvoering van benedenstrooms naar bovenstrooms? Geleidelijke implementatie van het eindbeeld in kleine stapjes langs de gehele rivier? Prioritering van trajecten met de grootste problemen?;
- Specifieke aandacht voor een ontwerp van de riviersplitsingen dat verschillende afvoeren van de Bovenrijn over de Rijntakken blijvend verdeelt in verhoudingen die passen in de doelbereiken van de verschillende rivierfuncties. De oplossingsrichting met meerdere stroomgeulen op de Waal stuurt bij lage afvoeren meer water naar Pannerdensch Kanaal, IJssel en Nederrijn-Lek, en trekt bij middenafvoeren en hoge afvoeren meer water naar de Waal. Het effect bij lage afvoeren is gewenst, maar dat bij middenafvoeren en hoge afvoeren waarschijnlijk niet. Bij de ontwerp opgave voor riviersplitsingen verdient ook de kans op ijssdammen aandacht;
- Aandacht voor tweedimensionale effecten (bijvoorbeeld binnenbochten versus buitenbochten, vaste lagen, geometrie van het winterbed);
- Actief gebruik van de huidige uitbreiding van de monitoring van de pilot Langsdammen in de Waal om beter inzicht te krijgen in de relatie tussen modelresultaten en werkelijke effecten;
- Nauwere samenwerking met Duitsland om wederzijds kennis en ervaring te delen en te ontwikkelen. Overweeg daarbij het volgen van een jaarlijkse PDCA-cyclus (Plan-Do-Check-Act) zoals deze al in Duitsland operationeel is;
- Relevante kennisontwikkeling:
 - Boringen voor bepaling van de samenstelling van het rivierbed met grotere resolutie in ruimte en tijd;
 - Wetenschappelijk onderzoek naar sedimenttransport over constructies als drempels en langsdammen ten behoeve van de stabiliteit van meerdere stroomgeulen (paragraaf A.6 van bijlage A);
 - Proeftuinen voor kleinschalige suppleties van grover materiaal.

Steun verdient het voornemen van het Nederlands Centrum voor Rivierkunde (NCR) om een discussiedag te organiseren waarin verschillende onderzoekers van trends in de afvoerverdelingen op de splitsingen van de Rijn onderling hun data en methodes vergelijken en bediscussiëren (paragraaf A.6 van bijlage A). Dit beoogt het verkrijgen van een meer eenduidig beeld van de huidige trends en de eventuele breuken in die trends.

4 Literatuurverwijzingen

- Barneveld, H., A. van Hove, A. Paarlberg, R. Daggenvoorde, A. Spruyt, A. Fujisaki, K. Sloff, W. Ottevanger, M. van den Bergh & R. Schielen (2019), Ruimte voor levende rivieren; Effect grootschalige rivierverruiming op bodemerosie Waal. Rapport PR3633.20 (HKV) & 11202191-003 (Deltares), HKV Lijn in Water, Deltares, Wereld Natuur Fonds en Rijkswaterstaat, Lelystad, maart 2019.
- Becker, A. (2021), Slim suppleren Boven-Waal. Rapport 11206792-014, Deltares, Delft, december 2021.
- De Jonge, A., F. Klijn & G.J. Ellen (2022), Trots en spijt in de waterbouw; Lessen uit de praktijk. Rapport 11206879-022, Deltares, Delft, juli 2022.
- Eerden, H. (2019-2023), Persoonlijke mededelingen. Rijkswaterstaat Oost-Nederland.
- Gensen, M.R.A., J.J. Warmink, K.D. Berends, F. Huthoff & S.J.M.H. Hulscher (2022), Improving rating curve accuracy by incorporating water balance closure at river bifurcations. *Journal of Hydrology*, Vol.610, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127958.
- Havinga, H. (2020), Towards sustainable river management of the Dutch Rhine River. *Water*, 12, 1827.
- Huthoff, F., A. Paarlberg, J. Vieira da Silva & A.K. de Jong (2015), Globaal ontwerp langsdammen; Rijnsplitsingspuntengebied en overige Rijntakken. Rapport PR2758.20, HKV Lijn in Water, Lelystad, juni 2015.
- Huthoff, F. & J. Vieira da Silva (2019), Rivierkundige ondersteuning RWS-ON; Modelanalyse vaste laag Nijmegen. Memo 2746.50, HKV Lijn in Water, Lelystad, mei 2019.
- Lauchlan, C. (2001), Sediment transport over steep slopes; An experimental investigation; Results and analysis. Report for Rijkswaterstaat-RIZA & Delft Cluster, August 2001, Delft University of Technology.
- Lauchlan, C. (2004), Experimental investigation of bed-load and suspended-load transport over weirs. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol.42, No.5, pp.549-555.
- Le, T.B., A. Crosato, E. Mosselman & W.S.J. Uijtewaal (2018), On the stability of river bifurcations created by longitudinal training walls. Numerical investigation, *Advances in Water Resources*, Vol.113, pp.112-125, doi: 10.1016/j.advwatres.2018.01.012.
- Le, T.B., A. Crosato & A. Montes Arboleda (2020), Revisiting Waal river training by historical reconstruction. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.146, No.5, 05020002.
- Meyer-Peter, E. & R. Müller (1948), Formulas for bed-load transport. *Proceedings 2nd Congress IAHR*, Stockholm, Paper No.2, pp.39-64.
- Mosselman, E., P. Kerssens, F. van der Knaap, D. Schwanenberg & K. Sloff (2004), Sustainable river fairway maintenance and improvement. Report Q3757.00, WL | Delft Hydraulics, Delft, DOI: 10.13140/RG.2.1.3728.5606.
- Mosselman, E. (2019), Advies zomerbedverdieping. Rapport 11203452-002, Deltares, Delft, maart 2019.
- Ottevanger, W. (2015), Sustainable Fairway Rhinedelta II; Effects of yearly bed stabilisation nourishments, Delta Program measures and training walls. Report 1209175, Deltares, Delft, April 2015.

- Paarlberg, A. & J.W. van Lente (2021), Testen 1D morfologisch model Rijntakken; Testcasus plan Ruimte voor Levende rivieren. Rapport PR4339.10, HKV Lijn in Water, Lelystad, maart 2021.
- Paola, C. & R. Seal (1995), Grain size patchiness as a cause of selective deposition and downstream fining. *Water Resources Research*, Vol.31, No.5, pp. 1395-1407.
- Sieben, A., C. de Leeuw, F. Klijn, M. Taal, M. Tijnagel, M. Reneerkens & S. van Vuren (2022), Programma Integraal Riviermanagement; Vooruitblik naar mogelijke keuzes voor Rijn. Memo Rijkswaterstaat, Directoraat-generaal Water en Bodem, en Deltares, 22 juli 2022, bestand "vooruitblik naar mogelijk keuzes in POW IRM 2023 - Rijn 2022-07-22.docx".
- Sloff, K. & E. Mosselman (2012), Bifurcation modelling in a meandering gravel-sand bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, BGRG, Vol.37, pp.1556-1566, DOI:10.1002/esp.3305.
- Sloff, K. (2019), Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050; Trends voor scheepvaart en waterbeschikbaarheid. Rapport 11203738, Deltares, Delft, december 2019.
- Ten Brinke, W.B.M. (2005), The Dutch Rhine: A restrained river. *Veen Magazines*, Amsterdam, the Netherlands.
- Tuijnder, A. (2017), Werkzaamheid maatregelen MO-DBR. Deelrapport 8, bijlage bij rapport "Bouwstenen duurzame bodemligging Rijntakken" van MIRT-onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken, Arcadis, Zwolle, december 2017.
- Van der Klis, H. (2003), Uncertainty analysis applied to numerical models of river bed morphology. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft University Press, ISBN 90-407-2440-7.
- Van Os, W.J., W.S.J. Uijttewaai, R.J. Labeur, A.L. Osorio, E. Mosselman & L.R. Lokin (2020), Bed-material transport over entrance sills at longitudinal training walls. *River Flow 2020, Proceedings of 10th Conference on Fluvial Hydraulics*, Editors W. Uijttewaai, M.J. Franca, D. Valero, V. Chavarrias, C. Ylla Arbós, R. Schielen & A. Crosato, Delft, The Netherlands, 7-10 July 2020, pp.389-395.
- Van Vuren, B.G. (2005), Stochastic modelling of river morphodynamics. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft University Press, ISBN 90-407-2604-3.
- Verbeek, M.C. (2022), De IJssel kreeg minder water; De ontwikkeling in de verdeling van lage Rijnafoeren in de periode 1989 -2021. Rijkswaterstaat Oost-Nederland, 01-03-2022.
- Vuik, V. (2010), Numerical modeling of sediment transport over hydraulic structures. MSc thesis, Delft University of Technology, June 2010.
- Wilcock, P.R. & J.C. Crowe (2003), Surface-based transport model for mixed-size sediment. *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.129, No.2, pp.120-128.
- Zuijderwijk, W.M., H. Barneveld, M.M.A. Schippers, C. Wegman & A. Paarlberg (2020), QuickScan rivierbodemligging Rijn; Ten behoeve van Integraal Riviermanagement. Rapport 116217, Witteveen+Bos & HKV Lijn in Water, Rotterdam, maart 2020.

A Riviergedrag, maatregelen en effecten

A.1 Oorzaken van bodemerosie

In principe kent de erosie van het zomerbed van de Rijntakken vele oorzaken (Mosselman, 2019; Eerden, 2019-2023):

- Riviernormalisaties in de 19e en 20e eeuw waarbij nevengeulen werden afgesloten en de resterende hoofdgeul met kribben werd versmald;
- Bochtafsnijdingen, leidend tot terugschrijdende erosie bovenstrooms;
- Blokkering van sedimenttoevoer door dammen in het stroomgebied;
- Winning van zand en grind, vooral in de jaren '70 in grote hoeveelheden;
- Mijnzakkingen in Duitsland, op twee schaalniveaus: (1) lokaal instortende mijngangen waardoor gaten vallen in de rivierbodem die sediment invangen; (2) algemene daling van het Ruhrgebied door steenkoolwinning, waardoor de zijrivieren Lippe, Emscher en Ruhr minder energie hebben om sediment naar de Rijn te voeren;
- Wateronttrekkingen uit zijrivieren door het Ruhrgebied voor drinkwater (Lippe) en industriewater (Ruhr), met als gevolg minder capaciteit om sediment naar de Rijn te transporteren;
- Suppletie van grof materiaal in Duitsland, met als gevolg minder sedimenttransport naar Nederland;
- Verlaging van waterstanden benedenstrooms door baggeren voor de zeevaart op riviertakken van de Rijn-Maasmonding, alsof de zee meer landinwaarts wordt gelegd;
- Extra zeewaarts sedimenttransport door de schroefstraal en de retourstroom van geladen opvaart;
- Afzetting van zand uit het zomerbed in zandwinplassen in de uiterwaarden tijdens hoogwaters.

De bijdrage van elke afzonderlijke oorzaak is niet precies bekend. Het algemene beeld is wel dat de bijdragen van normalisatie, sedimentwinning en bochtafsnijdingen het grootst zijn. Die vormen daarom het uitgangspunt voor het identificeren en analyseren van mogelijke maatregelen.

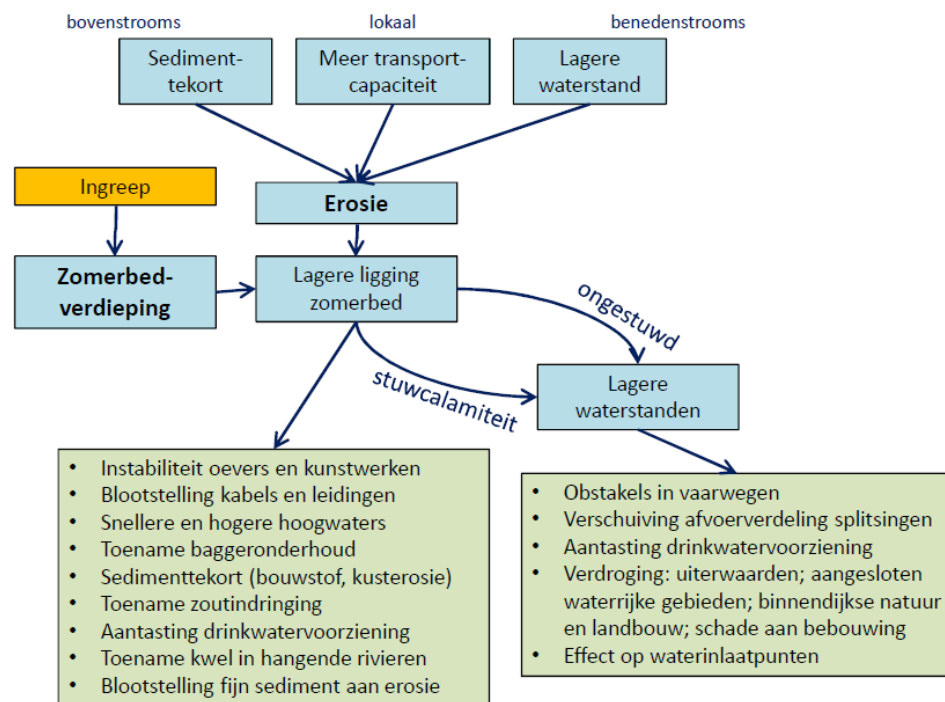
A.2 Nadelige gevolgen van bodemerosie

Bodemerosie leidt tot een diepere ligging van de rivierbodem en in ongestuwde rivieren ook tot lagere waterstanden. Dit heeft een breed scala aan nadelige gevolgen (figuur A.1). Een diepere ligging van de rivierbodem lijkt op het eerste gezicht gunstig voor de scheepvaart. De waterstanden dalen echter mee, waardoor de aansluiting op kanalen, sluisen en havenfaciliteiten steeds moeilijker wordt. Slecht erodeerbare delen van de rivierbodem, zoals de vaste laag bij Nijmegen, dalen evenmin mee met de waterstanden en vormen steeds grotere obstakels. Een nadelig gevolg voor de natuur is dat lagere waterstanden leiden tot verdroging en minder frequente overstroming van uiterwaarden. Omdat niet alle Rijntakken even snel eroderen, verandert de afvoerverdeling over de takken. De Waal trekt steeds meer water en het IJsselmeer ontvangt steeds minder water.

A.3 Mogelijke maatregelen

De voornaamste oorzaken van bodemerrosie in de Rijntakken zijn normalisatie, sedimentwinning en bochtafsnijdingen. Daarbij passen in principe de volgende mogelijke maatregelen:

- **Normalisatie:** De normalisatie kan voor een deel ongedaan gemaakt worden door kribben te verlagen of te verwijderen. Een andere mogelijkheid is dat de normalisatie anders wordt uitgevoerd. Dat kan door de rivier in te richten met meerdere stroomgeulen, gescheiden door langsdammen;
- **Sedimentwinning:** Structurele maatregelen zijn het stoppen met de winning van sediment (zand, grind) en het uitvoeren van onderhoudsbaggerwerk met een gesloten balans waarbij gebaggerd materiaal wordt teruggestort in delen van de rivier die diep genoeg zijn. Het tekort aan sediment kan ook worden aangevuld met suppleties. Suppleties met hetzelfde materiaal zouden tot in lengte van jaren herhaald moeten worden en bestrijden daarom slechts de symptomen zonder structurele verbetering. Ze zijn wel te gebruiken als tijdelijke overbrugging naar een toekomstige structurele oplossing. Suppleties met grover materiaal kunnen wel geheel of gedeeltelijk een structurele oplossing bieden als de hoeveelheden zo groot zijn dat de samenstelling van de rivierbodem verandert. Bodemerrosie zou dan van nature al minder ver doorzetten en stoppen bij een steiler verhang;
- **Bochtafsnijdingen:** Bochten die in het verleden zijn afgesneden, kunnen weer op de rivier worden aangesloten en geactiveerd. Een concrete mogelijkheid is de IJsselbocht van het Zwarte Schaar bij Doesburg.



Figuur A.1. Nadelige gevolgen van bodemerrosie (en zomerbedverdieping) en daaruit volgende lagere waterstanden (Mosselman, 2019).

Het voorliggende rapport adviseert om de hoofdoplossing te baseren op een ruimere inrichting van de rivier met behulp van meerdere stroomgeulen. Onvoldoende geschikt voor een hoofdoplossing zijn:

- Suppleties op de Bovenrijn (want deze hebben pas na decennia invloed op erosie in de benedenstroomse Rijntakken);
- Kribverlaging (want deze verruimen te weinig voor voldoende effect op de bodemerosie);
- Rivierverruiming in de uiterwaarden, anders dan oevergeulen (want meestal is verruiming in uiterwaarden slechts bij hoge afvoeren werkzaam terwijl juist verruiming bij de middenafvoeren effectief is);
- Algehele vergroving van de rivierbodem (want dit vergt grote hoeveelheden sediment, hindert de scheepvaart bij de uitvoering, en heeft onbekende effecten: zie paragraaf A.5 van bijlage A).

Dat deze laatste maatregelen onvoldoende zijn als hoofdoplossing wil overigens niet zeggen dat zij onbruikbaar zijn als lokale aanvulling of optimalisatie.

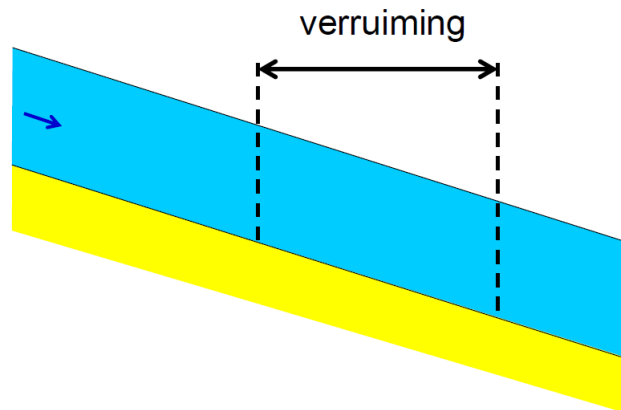
A.4 Effect van rivierverruiming

Figuren A.2 tot en met A.5 geven schematisch het hydraulische en morfologische effect weer van rivierverruiming. Het zijn lengteprofielen die tonen hoe de waterstanden voor een representatieve afvoer en de over de zomerbedbreedte gemiddelde bodemligging langs de rivier verlopen. De profielen zijn in horizontale richting gecomprimeerd. Verticale afmetingen liggen in de orde van meters terwijl horizontale afmetingen in de orde van tientallen kilometers liggen. Ook zijn de dieptes en hoogtes van initiële erosie en sedimentatie voor de duidelijkheid overdreven groot weergegeven. Als Ausgangssituatie geeft figuur A.2 een rivier in evenwicht weer. In werkelijkheid zijn de Rijntakken niet in evenwicht. Sedimentatie in de schematische weergaves kan voor de Rijntakken echte sedimentatie betekenen, maar ook afzwakking of stilvallen van de bodemerosie. Erosie in de schematische weergaves duidt op versterking van de bestaande erosietrend.

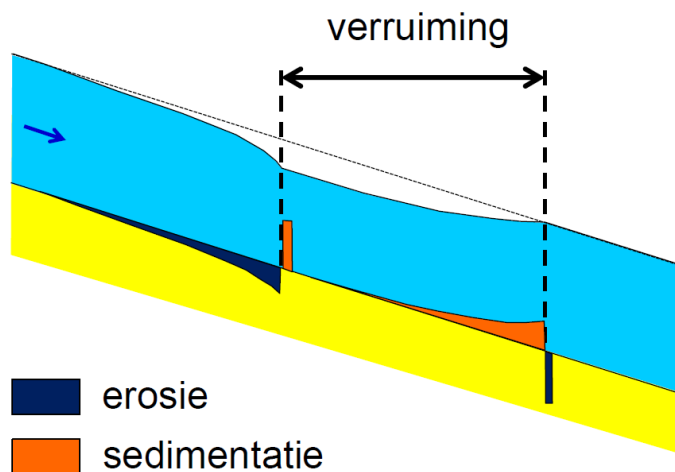
Verruiming van een riviertraject zal uiteindelijk leiden tot een nieuw morfologisch evenwicht met een hogere bodemligging in zowel het verruimde traject als de rivier verder stroomopwaarts (figuur A.5). In de tussentijd treedt echter een complexe morfologische reactie op met zowel erosie als sedimentatie. Figuur A.3 laat zien hoe de verruiming het waterstandsverloop beïnvloedt via stuweffecten. Het resulterende patroon van grotere en kleinere waterdieptes veroorzaakt versnellingen en vertragingen van de stroming. Dit creëert ruimtelijke variaties in de capaciteit van de stroming om sediment te transporteren. Waar de stroming versnelt, neemt de sedimenttransportcapaciteit toe en wordt extra sediment uit de bodem in beweging gebracht. Dit veroorzaakt erosie. Omgekeerd wordt sediment afgezet als de stroming vertraagt. De rivierverruiming in figuur A.3 trekt waterstanden bovenstrooms omlaag en versnelt daardoor de stroming. Dat leidt tot erosie. Op de overgang naar het verruimde traject vertraagt de stroming abrupt. Dat leidt tot lokaal geprononceerde sedimentatie die zich in de loop van de tijd als een schokgolf stroomafwaarts uitbreidt. Binnen het verruimde traject vertraagt de stroming nog verder. Ook dit draagt bij aan sedimentatie. Op de overgang naar de niet verruimde rivier neemt de stroomsnelheid weer abrupt toe. Dit veroorzaakt lokaal geprononceerde erosie die zich als een expansiegolf stroomafwaarts uitbreidt.

Figuur A.4 laat zien hoe de processen verlopen als de rivier alleen bij hogere afvoeren ruimer is. Bij lage afvoeren verplaatsen de gevormde erosie en sedimentatie zich dan als bodemgolven stroomafwaarts. In de praktijk is dat vooral zichtbaar voor de geprononceerde erosie en sedimentatie die zich gevormd hebben bij de overgangen aan het begin en het eind van het verruimde riviertraject. Ieder hoogwater genereert weer nieuwe bodemgolven. Deze bodemgolven hangen af van de afvoervariaties en vormen een voornaam bron van onzekerheid in voorspellingen van morfologische effecten (Van der Klis, 2003; Van Vuren, 2005).

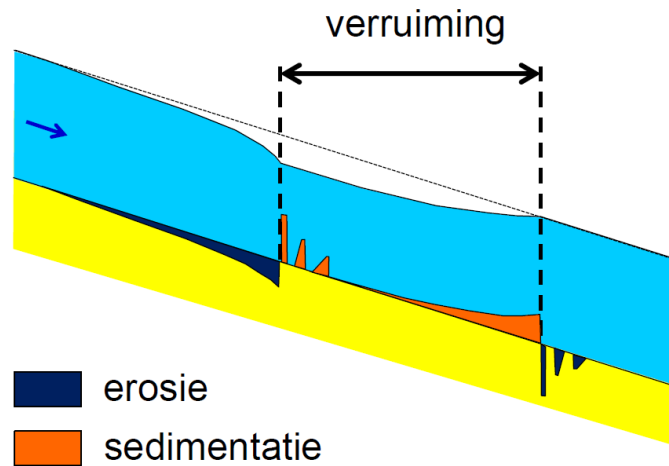
De erosie op korte termijn van figuren A.3 en A.4 kan jarenlang het beeld bepalen voordat zich uiteindelijk het hogere nieuwe evenwicht instelt van figuur A.5. Dat effect is tegengesteld aan de met de verruiming beoogde sedimentatie.



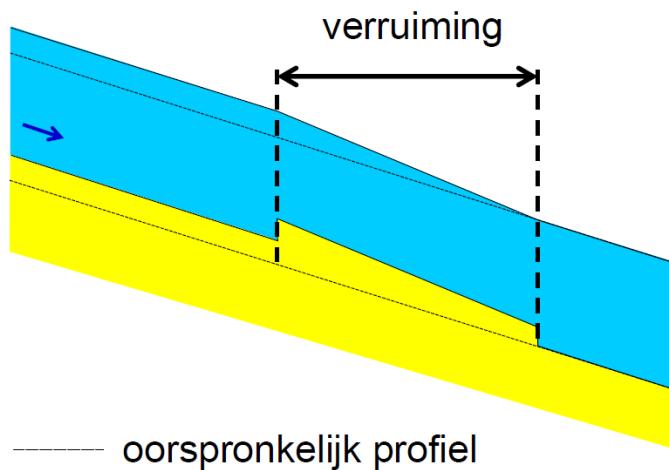
Figuur A.2. Schematische weergave van een gecomprimeerd lengteprofiel van een rivier in evenwicht in de uitgangssituatie vóór verruiming.



Figuur A.3. Schematische weergave van de korte-termijnreactie van het profiel uit figuur A.2 op verruiming van een riviertraject. De rivier is hier verruimd voor alle afvoeren.



Figuur A.4. Schematische weergave van de korte-termijnreactie van het profiel uit figuur A.2 op verruiming van een riviertraject. De rivier is hier alleen verruimd voor hogere afvoeren.



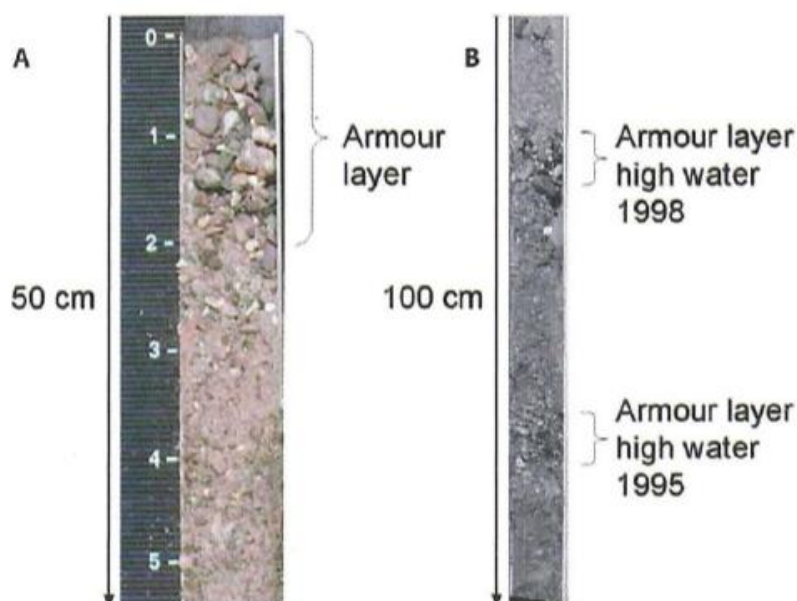
Figuur A.5. Schematische weergave van de lange-termijnreactie van het profiel uit figuur A.2.

A.5 Sedimentsamenstelling van de rivierbodem

De bodem van de Rijntakken bestaat uit niet-cohesief sediment waarvan de korrelgrootte stroomafwaarts gaandeweg afneemt. Op de Bovenrijn bestaat de bodem vooral uit grind. Stroomafwaarts worden de takken steeds zandiger. De sedimentsamenstelling van de rivierbodem is een belangrijke factor in de sedimenttransportcapaciteit. Mengsels van zand en grind compliceren echter het bepalen van deze transportcapaciteit en dus de morfologische modellering. Delen van het mengsel kunnen bij lagere afvoeren immobiel worden. Grotere korrels kunnen kleinere korrels afschermen en daardoor minder transporteerbaar maken, alsof die kleinere korrels eigenlijk groter zijn ("hiding"). In een omgeving van kleinere korrels kunnen grotere korrels meer uitsteken en makkelijker door de stroming in beweging gebracht worden, alsof die grotere korrels eigenlijk kleiner zijn ("exposure"). Zo beïnvloeden verschillende korrelgroottes elkaar als ze goed gemengd zijn. Vaak treedt echter ruimtelijke segregatie op waardoor de onderlinge invloed verdwijnt ("patches", Paola & Seal, 1995, en figuur A.6). Ook fluctueert de samenstelling aan het oppervlak in de tijd. Grofkorrelige lagen die zich tijdens hoogwaters aan het oppervlak tussen duinen vormen, raken naderhand begraven in de bodem (figuur A.7).



Figuur A.6. Grind en zand op de bodem van de Bovenrijn, 19 april 2011.



Figuur A.7. Twee boorprofielen uit de bovenste meter van de bodem van de Bovenrijn (Ten Brinke, 2005). Links een pleisterlaag van grofkorrelig materiaal boven een ondergrond van fijner sediment. Rechts begraven pleisterlagen als relictten van vroegere hoogwaters.

De in rekenmodellen als Delft3D verwerkte kennis over het gedrag van sedimentmengsels met verschillende korrelgroottes is vooral gebaseerd op metingen en waarnemingen in laboratoriumgoten, maar tijdsafhankelijke en ruimtelijke variaties in bodemligging, stroming en sedimentsamenstelling maken het gedrag in echte rivieren complexer. Dit is relevant bij de interpretatie van modelresultaten. In rivieren bepalen *hiding* en *exposure* het beeld minder dan in het laboratorium.

De Waal heeft vanouds een zand-grindbodem, maar gedraagt zich morfologisch als een rivier met een zandbodem. Daarvoor is in zand-grindmengsels een zandgehalte van 30% al voldoende (Wilcock & Crowe, 2003).

Mosselman et al (2004) beargumenteren dat vergroving van de bodem van de Waal zowel bodemerosie als ondieptes voor de scheepvaart kan tegengaan. Een bodem van grover sediment leidt aan de ene kant tot een steiler bodemlengteprofiel dat zich minder diep insnijdt, en aan de andere kant tot flauwere bodemdwarsprofielen met minder geprononceerde banken. Om deze vergroving van de bodem te bereiken zou een minstens 1 m dikke grindlaag nodig zijn, in overeenstemming met de dikte van de actieve laag volgens Sloff & Mosselman (2012). Voor een 85 km lang Waaltraject met een normaalbreedte van 260 m komt dit overeen met een suppletie van meer dan 20 miljoen m³ grind. De uitvoering van de benodigde gelijkmatige verdeling van deze grinddeken over het dwarsprofiel zou bovendien de scheepvaart hinderen, en de effecten van deze maatregel zijn onzeker. Voor het advies in deze studie wordt dit niet gezien als een kansrijke oplossingsrichting.

A.6 Riviersplitsingen

Riviersplitsingen zijn in het algemeen inherent instabiel. Ook de splitsingen van de Rijntakken zijn in heden en verleden nooit in evenwicht geweest. Verschuivingen in de afvoerdeling zijn een natuurlijk proces. Stabilisering van de afvoerdeling vergt ingrepen. Zonder beheer is de situatie niet stabiel, maar het is de kunst om riviersplitsingen zo te ontwerpen dat het beheer minimaal is.

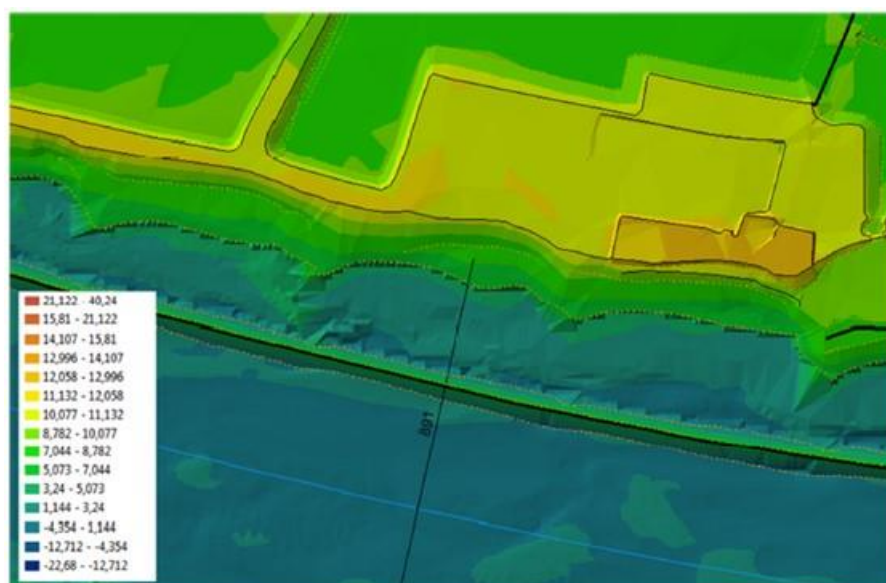
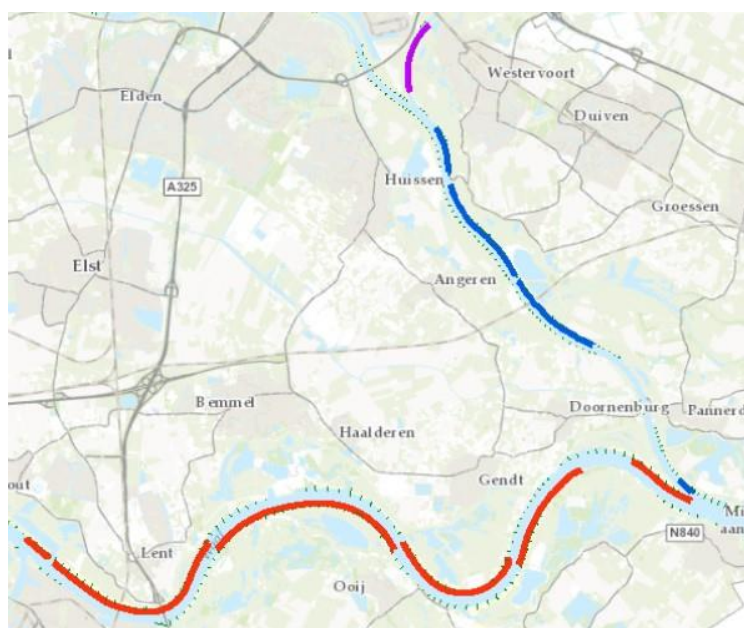
Hetzelfde geldt voor de verdeling van water en sediment over hoofdgeul en oevergeulen (Le et al, 2018). De grootste kennisleemte betreft daarbij de hoeveelheid sediment die over langsdammen of inlaatdrempels wordt getransporteerd (Vuik, 2010). Als een dam of drempel loodrecht overstroomd wordt, gaat al het aankomende bodemtransport en zwevend transport van sediment eroverheen (Lauchlan, 2001, 2004). Bij scheve aanstroming wordt onder bepaalde omstandigheden een deel van het aankomende sediment gevangen in een vortex en voor de dam of drempel langs afgevoerd zonder deze te passeren (Van Os et al, 2020).

De instabiliteit van de Pannerdense Kop komt tot uitdrukking in de geleidelijke verandering van de verdeling van afvoeren over de Waal en het Pannerdensch Kanaal. Verschillende onderzoeken naar deze veranderingen leveren geen eenduidig beeld van de trends en de eventuele breuken in die trends, doordat de meetgegevens op verschillende manieren geanalyseerd zijn. Bovendien zijn de afvoermetingen onzeker, vooral in de uiterwaarden. De tijdreeksen van de metingen kunnen verder beïnvloed zijn door de tussentijdse overstap op een andere meetmethode. Stroomsnelheden worden nu niet meer met Ott-molens maar met ADCP gemeten. De officiële Rijkswaterstaatmetingen van de afvoeren boven en beneden de splitsingen leveren geen sluitende balans (Gensen et al, 2022). Het Nederlands Centrum voor Rivierkunde (NCR) overweegt om dit jaar een discussiedag te organiseren waarin de verschillende onderzoekers hun data en methodes onderling vergelijken en bediscussiëren.

B Voorgaande studies

B.1 Globaal ontwerp langsdammen (2015)

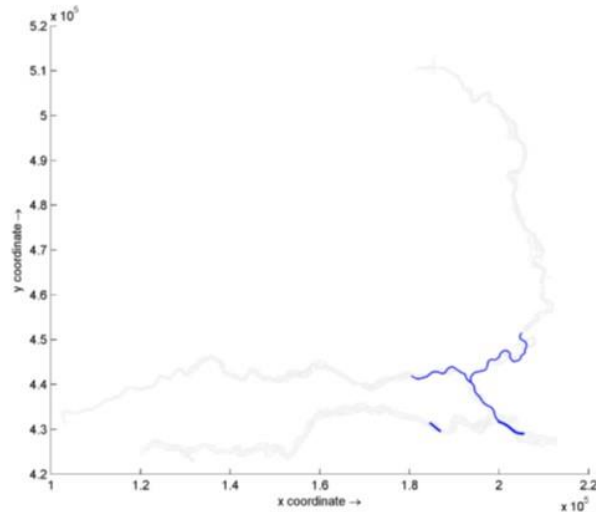
Huthoff et al (2015) voerden berekeningen uit voor het globaal ontwerp van langsdammen. Zij gebruikten hiervoor WAQUA en WAQMorf. De langsdammen hadden dezelfde kruinhoogte als de verlaagde kribben. Het zomerbed was 20 m versmald ten opzichte van de oorspronkelijke ruimte tussen de kribkoppen. Op de Boven-Waal trad nog 20 cm erosie op. De auteurs concluderen dat de oeverzone in de berekeningen niet voldoende verruimd was, maar dat in de Waal verdere optimalisatie mogelijk is. Effecten op de afvoerverdeling bij de Pannerdense Kop waren niet expliciet bepaald, maar kunnen mogelijk nog worden afgeleid uit de modelresultaten.



Figuur 10. Langsdam zoals geschematiseerd op de Waal in het nieuwe Basispakket DVR2 (bij rkm 891).

B.2 Sustainable Fairway Rhinedelta II (2015)

Ottevanger et al (2015) voerden berekeningen uit voor Sustainable Fairway Rhinedelta II. Zij gebruikten hiervoor Delft3D. Bodemstabilisatie met suppleties leidde ertoe dat de bodem van de eerste 10 km van de Boven-Waal na 20 jaar 10 cm hoger lag dan in de referentiesituatie. Bij een Lobith-afvoer van 2250 m³/s nam de afvoer naar de Waal met 1% toe. Combinatie van suppleties met langsdammen op de Waal en de IJssel leidde op de Boven-Waal tot een 5 cm lagere bodem dan in de referentiesituatie. De auteurs schrijven dit toe aan een te smalle oevergeul. Bij een Lobith-afvoer van 2250 m³/s ging er initieel 1% minder water naar de Waal maar na 20 jaar juist 0,1% meer.



Blauw: locaties van stabilisatie met suppleties

2.4.1 Training walls

Figure 2.10 shows an overview of the training walls that were included on the Waal and the IJssel, which are available in the Baseline format with names given in Table 2.7.

Table 2.7 Overview of included Baseline measures for training walls.

Description	Baseline measure
Training walls on the Waal	wf_dvr2ldm_a1
Training walls on the IJssel	ij_dvr2ldm_a2

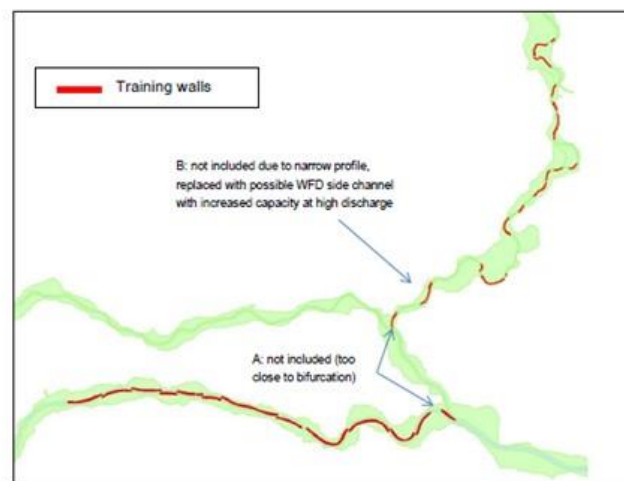


Figure 2.10 Overview of training walls, where A shows two training walls not included due to their proximity to the bifurcations and B shows a location where the training wall is not included as the cross-sectional profile is too narrow. That training wall has been replaced by a side channel (cf. Figure 2.12)

Rood: locaties van langsdammen

B.3 MIRT-onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken (2017)

Tuijnder (2017) voerde berekeningen uit voor het MIRT-onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken. Hij gebruikte hiervoor Delft3D. Langsdammen op de Boven-Waal en de Midden-Waal veroorzaakten erosie op de Boven-Waal en aanzanding op de Midden-Waal. De erosie op de Boven-Waal is mogelijk toe te schrijven aan lagere waterstanden op de Midden-Waal of een te smalle oevergeul. Een grotere oevergeul op de Midden-Waal leverde geen merkbaar effect op de Boven-Waal. De langsdammen onttrokken 6 à 10% van de afvoer op de Midden-Waal. Effecten op de afvoerverdeling bij de Pannerdense Kop waren niet expliciet bepaald, maar zijn mogelijk af te leiden uit de modelresultaten.

Kribverlaging in de binnenbocht veroorzaakte 9 cm aanzanding bij verlaging tot OLR + 1,2 m en 6 cm aanzanding bij verlaging tot OLR + 2,4 m. Kribverlaging in de buitenbocht leverde 19 cm aanzanding bij verlaging tot OLR + 1,2 m en 11 cm aanzanding bij verlaging tot OLR + 2,4 m. Kribverlaging aan beide zijden van de bochten hoogde de bodem van de Boven-Waal gemiddeld op met 28 cm bij verlaging tot 1,2 m + OLR en met 17 cm bij verlaging tot OLR + 2,4 m. De kribverlagingen hadden geen invloed op de afvoerverdeling bij de Pannerdense Kop bij OLA, omdat de kruin van de verlaagde kribben steeds ruim boven OLR bleef.

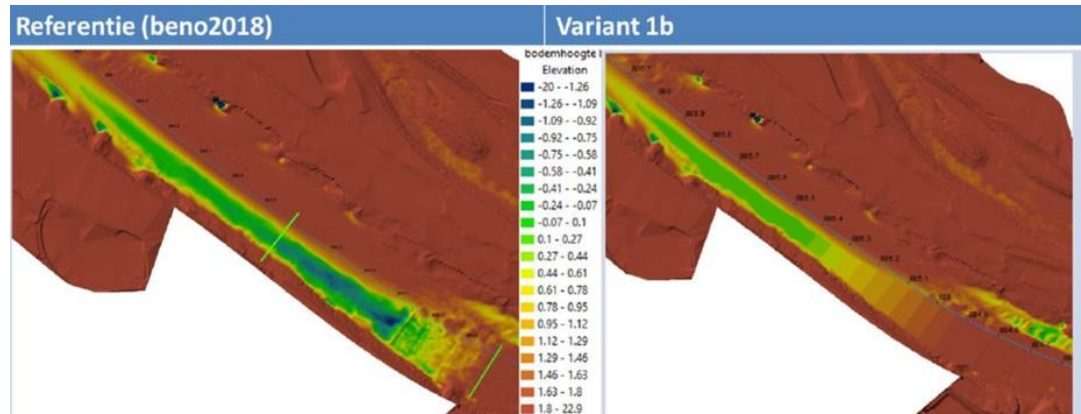


Figuur 36, in rood de langsdammen op de Boven Waal, in Blauw de langsdammen op de Midden Waal die nog niet gerealiseerd zijn, in paars de reeds gerealiseerde langsdammen bij Tiel.



B.4 Modelanalyse vaste laag Nijmegen (2019)

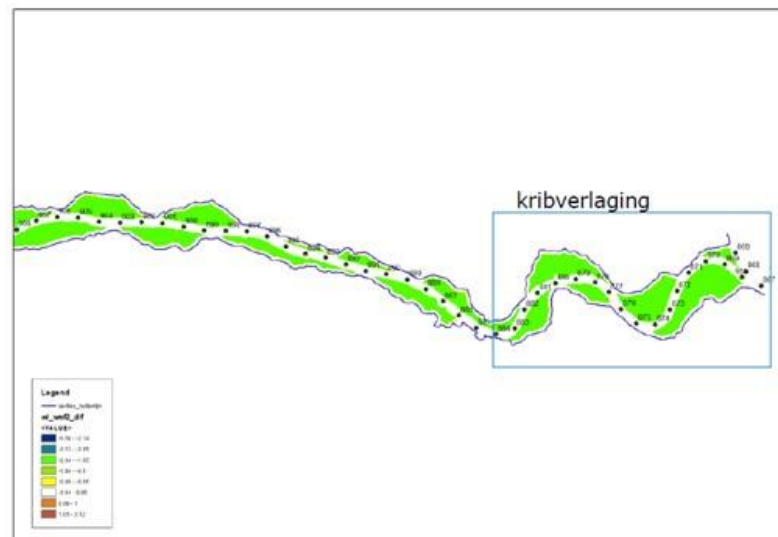
Huthoff & Vieira da Silva (2019) voerden berekeningen uit voor een modelanalyse van de vaste laag bij Nijmegen. In WAQUA vulden zij op verschillende manieren het erosiegat op dat zich aan de benedenrand van de vaste laag heeft gevormd. Lokaal werden de waterstanden 5 cm hoger. Bij afvoeren van 1020 tot 2000 m³/s werden de waterstanden op de Pannerdense Kop tot 1 cm opgestuwd. De auteurs schatten dat hierdoor de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal met 5 m³/s toenam.

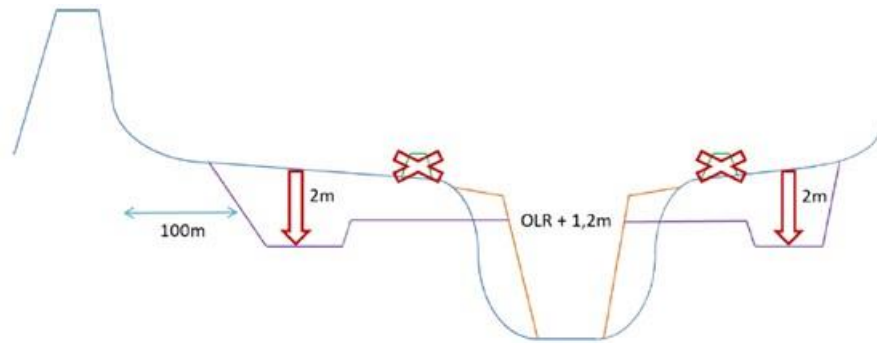


B.5 Ruimte voor levende rivieren (2019)

In het project “Ruimte voor levende rivieren” berekenden Barneveld et al (2019) het effect van grootschalige rivierverruiming op de bodemerosie van de Waal. Daarvoor modelleerden zij uiterwaardverlaging langs de Boven-Waal en de Midden-Waal en kribverlaging op de Boven-Waal met Sobek-RE. Waterstandsverlagingen op de Midden-Waal versterkten juist de erosie op de Boven-Waal. Bij lage Lobith-afvoeren tot 2000 m³/s traden er geen veranderingen op in de afvoerverdeling bij de Pannerdense Kop. Via interpretatie van de rekenresultaten schatten de auteurs dat slimmer verruimen het voor bodemstabilisatie benodigde suppletievolume met 25 à 50% kan reduceren.

Figuur 27:
Uiterwaardverlaging
en kribverlaging
Boven-Waal.





B.6 QuickScan rivierbodem Rijn (2020)

Zuijderwijk et al (2020) gebruikten vuistregels om de effecten van verschillende maatregelen te schatten. Deze vuistregels zijn gebaseerd op analytische formules voor morfologische evenwichten die pas op lange termijn bereikt worden. Met veranderingen in de afvoerverdeling op de Pannerdense Kop werd geen rekening gehouden. Omdat voor riviertrajecten een uniform dwarsprofiel werd aangenomen, is het moeilijk om de invloed van gradiënten in sedimenttransportcapaciteit te beschouwen.

Tabel 7: Boven-Waal: resultaten model, zonder suppleties.

Interventie	vv type	Dimensies interventie [m]			Effect bodemverhang [-]			Maximale onttrekking [%]		
		20	40	60	20	40	60	20	40	60
Kribverlaging (beide oevers) [m]	Hard	-1.3	-2.2	-3.0	1.02	1.04	1.07	3.5	6.8	9.9
Uiterwaardverlaging (1 oever)	Verruimend	-0.9	-1.5	-2.1	1.01	1.02	1.03	2.8	5.5	8.2
Oeverontstening (1 oever)	Zacht	238.0			1.01			2.7		
Zomerbedverbreding (kribben inkorten)	Hard	15.0	30.4	46.0	1.02	1.03	1.05	-2.6	-5.2	-7.6
Breedte oevergeul langsdammen	Hard	54.1	69.5	85.6	1.06	1.09	1.12	11.2	14.0	16.7
Breedte nevengeul (1 oever)	Verruimend	47.8	96.2	148.9	1.02	1.03	1.05	3.0	5.8	8.4

B.7 Testen van 1D morfologisch model Rijntakken (2021)

Paarberg & Van Lente (2021) testten het nieuwe model 1D D-Flow FM aan de hand van berekeningen van de morfologische effecten van een kralensnoer van maatregelen op de Midden-Waal. Deze maatregelen zijn via 2D berekeningen vertaald naar invoer voor het 1D model en omvatten nevengeulen, versmalling van het zomerbed en verruiming van de uiterwaarden. Ondanks aanzienlijke erosie in de Midden-Waal onderging de Boven-Waal toch 5 à 10 cm aanzanding. De 1D schematisering verruimde de rivier minder dan gepland. De auteurs constateren dat de stap van twee dimensies naar één dimensie leidt tot lastig te duiden modelresultaten.

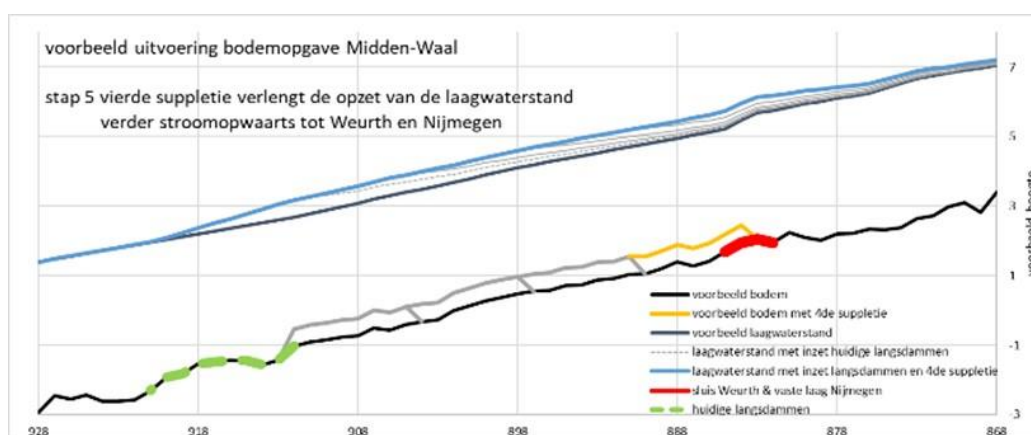
*Figuur 24
Contouren van de maatregelen. De rode lijn is de bandijk en begrenzing van de rekenmodellen. De paarse contouren representeren de zomerbedversmalling en geulen. De zwarte lijnen en contouren representeren maaiveldverlagingen en verwijdering of verlaging van kades.*





B.8 Vooruitblik naar mogelijke keuzes voor de Rijn (2022)

Sieben et al (2022) beredeneren dat de huidige langsdammen op de Midden-Waal 20 cm verhoging van de bodem van de Boven-Waal kunnen faciliteren. Een combinatie van suppleren en het stroomopwaarts doortrekken van de langsdammen zou de bodem van de Boven-Waal dan met 40 cm kunnen ophogen. De auteurs onderkennen dat deze aanzanding grote hoeveelheden sediment vergt, maar achten de ingreep op zich eenvoudig uit te voeren.



B.9 Historische reconstructie met een numeriek model (2020)

Le et al (2020) reconstrueerden de Waal aan het begin van de 19^e eeuw, voorafgaand aan de normalisaties, in Delft3D. Zij simuleerden de morfologische ontwikkeling voor de werkelijk gerealiseerde normalisering en voor hypothetische scenario's met langsdammen. Zij concluderen dat er minder bodemerosie geweest zou zijn en een betere vaarweg als de Waal meteen in de 19^e eeuw al genormaliseerd zou zijn met langsdammen in plaats van kribben, en met een normaalbreedte van 200 m in plaats van 260 m.

B.10 Rivierkundige ervaring (1978-2016)

Ten slotte verdienen de inzichten van Hendrik Havinga vermelding. Als rivierkundige bij Rijkswaterstaat Oost-Nederland was hij opdrachtgever voor schaalmodelproeven, numerieke modelstudies en pilots in het veld. Decennia lang wees hij op de schadelijke effecten van bodemerosie. In de loop van de jaren vormde hij zich een eigen beeld van welke maatregelen effectief en haalbaar zijn. Zo stond hij aan de wieg van het langsdammenconcept.

In een wetenschappelijk tijdschrift (Havinga, 2020) pleitte hij voor het onderzoeken van oplossingen voor de Waal met langsdammen aan weerszijden van de rivier, met een vaarbreedte van bij benadering 100 m (in plaats van de huidige 260 m) en zeer brede oevergeulen achter de dammen, als een extreme demonstratie om bodemerrosie te stoppen en de vaardiepte ruimschoots te vergroten. Dit zou weliswaar kunnen leiden tot enige hinder voor de scheepvaart, maar schepen zouden in grotere vaardieptes kunnen varen.

In een interview (De Jonge et al, 2022) pleitte hij ervoor om te onderzoeken hoe bodemerrosie kan worden tegengegaan: *“Dit is zowel voor de scheepvaart als de landbouw en ecologie langs de rivier cruciaal. Zoek uit: hoe gaat het met de scheepvaart als je geen ongebreidelde breedte meer hebt bijvoorbeeld. Wat als je langsdammen neerlegt met een veel smallere vaargeul (orde 100 m) en een brede oevergeul”*. En: *“De scheepvaart heeft bij een normaalbreedte van 100 m straks niet meer de mogelijkheid tot vijfstrooksverkeer, maar hoogstens driestrooks en misschien moeten schepen wel filevaren. Maar dat is niet heel erg, ik denk dat de baten opwegen tegen de kosten”*.

C Verkennde berekeningen

Door Hermjan Barneveld, Andries Paarlberg en Pepijn van Denderen (HKV).

C.1 Inleiding

Voor de onderbouwing van de beleidskeuze voor de bodemligging van IRM is een groot aantal verkennende berekeningen uitgevoerd met numerieke modellen die gaandeweg steeds beter zicht hebben geleverd op de effecten van ruimtelijke maatregelen en de aard van een geschikt maatregelpakket om de bodemerosie op de Waal te stoppen en daarmee verschillende functies van de rivier te bedienen. Die functies betreffen de scheepvaart (voldoende waterdiepte), natuur (hoge laagwaterstanden) en zoetwatervoorziening (afvoerverdeling op splitsingspunten). Paragraaf C.2 licht de eerste berekeningen toe en de daarbij gevolgde redeneerlijn om een geschikt maatregelpakket uit te denken. Paragraaf C.3 presenteert de laatste verkennende berekeningen waarin de inzichten het verst zijn voortgeschreden. Paragrafen C.4 en C.5 presenteren de conclusies en aanbevelingen.

C.2 Redeneerlijn en eerste verkennende berekeningen

C.2.1 Inleiding

Op basis van eerder uitgevoerde analyses en discussies ontstond het volgende beeld van een maatregelconcept om waterdiepten bij laagwater te vergroten, de bodem te stabiliseren en daarmee de afvoerverdeling over splitsingspunten te beïnvloeden:

1. Bij laagwater de waterdiepte vergroten door versmalling van de hoofdgeul;
2. Bij middenafvoeren en hoge afvoeren zoveel verruiming buiten de hoofdgeul creëren dat de gradiënten in stroomsnelheid en sedimenttransport in de hoofdgeul afnemen en de bodemerosie stopt.

De combinatie van versmallen en verruimen is mogelijk met verschillende maatregelen, zoals kribverlenging en -verlaging, meerdere stroomgeulen, en eilanden met grote nevengeulen. Omdat grootschalige verruiming noodzakelijk is om de bodemerosie voldoende te beïnvloeden, vallen kribverlaging en -verlenging af als hoofdoplossing. Verdere berekeningen en analyses hebben zich dus gericht op de oplossingsrichting op basis van meerdere stroomgeulen. Parallel aan de hoofdgeul worden oevergeulen aangelegd, onderling gescheiden door bijvoorbeeld langsdammen. Voor dit concept zijn hydraulische en morfologische berekeningen uitgevoerd voor de Boven-Waal en de gehele Waal. Als basis is een eerder ontwerp van grootschalige toepassing van meerdere stroomgeulen met langsdammen gehanteerd (Huthoff et al, 2015) waarin de hoofdgeul met circa 20 m wordt versmald. Om bij lage afvoeren te versmallen en bij middenafvoeren al te verruimen, wordt de kruin van de langsdam op OLR +2 m gelegd en de drempel van de inlaten op OLR +0,5 m (met als uitgangspunt de Overeengekomen Lage Rivierstand OLR van 2012). De oevergeul is circa 80 m breed en voor de bodemhoogte van de tweede stroomgeul zijn verschillende scenario's gebruikt.

C.2.2 Hydraulische berekeningen

Hydraulische berekeningen zijn uitgevoerd met het tweedimensionale D-Hydro-model van de Rijntakken uit IRM. Dit model omvat de Bovenrijn, de Waal, het Pannerdensch Kanaal, de IJssel en de Nederrijn-Lek). Het is doorgerekend met:

1. Stationaire randvoorwaarden;
2. Vrije afvoerverdeling op de splitsingspunten;
3. Afvoeren bij Lobith van 1.020 (OLA), 2.000, 4.000 en 6.000 m³/s (OLA = Overeengekomen Lage Afvoer). Er zijn geen extreem hoge afvoeren meegenomen, omdat die niet bepalend zijn voor de grootschalige morfologie op lange termijn.

Met het model zijn de afvoerverdelingen op de splitsingen en de waterstanden bepaald. Tevens zijn de jaarlijkse sedimenttransporten op verschillende punten in het model geschat op basis van berekende hydrodynamica, de sedimenttransportformule van Meyer-Peter & Müller (1948), een mediane korrelgrootte (D_{50}) van 2 mm, en een duurlijn voor de afvoeren waarin bovenstaande vier afvoeren gemiddeld respectievelijk 95, 208, 51 en 11 dagen per jaar voorkomen.

De hydraulische berekeningen toonden aan dat versmalling van de hoofdgeul met circa 20 m de waterstanden bij lage afvoeren met 2 tot 3 dm opstuwt en de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal met circa 20 m³/s verhoogt. De extra stroomgeulen verlagen de stroomsnelheden bij middenafvoeren en hoge afvoeren flink. Richtpunt voor het stoppen van de bodemerrosie is een reductie van de jaargemiddelde sedimenttransportcapaciteit in de hoofdgeul met 20% of meer. Met ruime oevergeulen is dit mogelijk.

C.2.3 Morfologische berekeningen

De morfologische berekeningen zijn uitgevoerd met Delft3D-4. De modelschematisatie is aangeleverd via de Helpdesk Water en betreft de schematisatie delft3d_4-rijn-2021-v1, die Becker (2021) eerder toepaste voor het project "Slim suppleren Boven-Waal". Dit model bevat een deel van de Niederrhein, de Bovenrijn, de Waal en het Pannerdensch Kanaal. In het referentiemodel zijn de langsdammen benedenstrooms van Tiel opgenomen en de kribverlaging op het Pannerdensch Kanaal nog niet. De korrelsamenstelling benedenstrooms van de Boven-Waal is stroomafwaarts doorgetrokken en het model is enige jaren ingespeeld voor andere studies. Dat beginpunt is ook voor deze verkennende berekeningen gebruikt. De morfologische berekeningen zijn uitgevoerd voor een periode van 20 jaar, waarbij ieder jaar een representatieve hydrograaf is doorgerekend met negen afvoerniveaus van 1.020 tot 8.592 m³/s bij Lobith. De afvoerverdeling op de Pannerdense Kop wordt door het model bepaald vanuit een Q-h-relatie bij de IJsselkop. Morfologische veranderingen wijzigen daarom de afvoerverdeling. Berekeningen met een vaste afvoerverdeling bij de Pannerdense Kop zijn ook gewenst om de situatie te simuleren dat door compenserende maatregelen (bij voorbeeld op het Pannerdensch Kanaal) de afvoerverdeling gelijk blijft. In eerste instantie is geprobeerd dit via een afvoerrandvoorwaarde op het Pannerdensch Kanaal te regelen. Omdat dat niet stabiel bleek, is uiteindelijk besloten om voor berekeningen met vaste afvoerverdeling het model van alleen de Waal te gebruiken. Als bovenstroomse randvoorwaarden zijn dan, voor de gehele rekenperiode, het jaarlijkse afvoerloop naar de Waal en het sedimenttransport (volume en samenstelling) van de berekening met vrije afvoerverdeling gebruikt. Deze zijn bepaald uit een hydraulische inspeelberekening zonder bodemverandering maar met berekening van het sedimenttransport.

In de eerste verkennende berekeningen met dit model ontbraken abusievelijk de overlaten waarmee de hoogtes en de energieverliezen worden gesimuleerd van kribben, zomerkades en knikken in de bodem. De resultaten gaven bij nadere analyse echter wel de juiste ontwikkelrichting van de morfologische effecten van herinrichting met meerdere stroomgeulen. De resultaten zijn gebruikt om de definitieve verkennende berekeningen van paragraaf C.3 te definiëren. Daarin werden de overlaten wel correct meegenomen.

Met het morfologische model zijn ontwerpen doorgerekend voor het concept met meerdere stroomgeulen op de Boven-Waal en op de gehele Waal. De afvoerverdeling op de Pannerdense Kop was in eerste instantie vrij. De extra stroomgeulen trekken bij middenafvoeren en hogere afvoeren meer water naar de Waal. Dit is naar verwachting ongewenst en zal in de praktijk worden tegengegaan met maatregelen op het Pannerdensch Kanaal, de IJssel of de Nederrijn-Lek om de afvoerverdeling intact te houden. Daarom zijn ook berekeningen uitgevoerd met een vaste afvoerverdeling. Hoe de afvoerverdeling over de splitsingspunten precies wordt gestabiliseerd of hersteld vormt geen onderdeel van deze studie en dient uiteraard nog te worden onderzocht.

Doel van de berekeningen was om in beeld te brengen hoe herinrichting met meerdere stroomgeulen van invloed is op de ontwikkeling in de tijd van:

1. de bodemligging;
2. de laagwaterstanden en de afvoerverdeling op de Pannerdense Kop;
3. het onderhoudsbaggerwerk (baggeren en storten) voor de scheepvaart.

Uit de rekenresultaten blijkt:

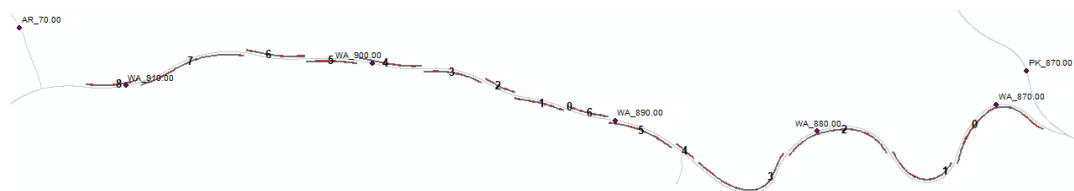
1. Met onttrekking van 15-20% afvoer aan de hoofdgeul bij middenafvoeren en hogere afvoeren kan de bodemerosie op de Waal worden gestopt. Kennis uit de pilot Langsdammen in de Waal toont aan dat een dergelijk percentage haalbaar is;
2. De afvoerverdeling bij lagere afvoeren kan worden beïnvloed, zodat de tendens van steeds meer afvoer naar de Waal kan worden gestopt en zelfs kan worden omgedraaid. Bij OLA kan dan circa 15-20 m³/s extra naar het Pannerdensch Kanaal gestuurd worden;
3. De rivierverruiming veroorzaakt aanzanding aan de bovenstroomse zijde, die zich in de loop van de tijd stroomafwaarts uitbreidt. Om de bodemerosie op de gehele Waal effectief te stoppen en scheepvaart mogelijk te houden is sedimentmanagement nodig. Dit betreft herverdeling van de aanzanding, maar tegelijkertijd ook sedimentsuppleties in vooral de Midden-Waal en het benedenstroomse traject van de Boven-Waal.

C.3 Definitieve verkennende berekeningen

C.3.1 Inleiding

Op basis van de resultaten uit paragraaf C.2 is geconstateerd dat het concept met meerdere stroomgeulen geschikt lijkt om bodemerosie te stoppen, de laagwaterstanden en -dieptes te vergroten, en de verdeling van lage afvoeren op de Pannerdense Kop te wijzigen ten gunste van het Pannerdensch Kanaal. Omdat de eerste verkennende berekeningen waren uitgevoerd met een foutieve instelling van de overlaten in het model, zijn de definitieve verkennende berekeningen herhaald voor het volgende ontwerp:

- 1 Vijftien locaties met meerdere stroomgeulen op traject km 867-911 tussen de Pannerdense Kop en de bestaande langsdammen op de Midden-Waal, zie figuur C.1;
- 2 Slanke langsdamconstructies tussen de twee stroomgeulen die de hoofdgeul circa 20 m versmallen;
- 3 De hoogte van de langsdammen ligt op OLR +1,2 m en de inlaten liggen aan bovenstroomse zijde op OLR +0,5 m;
- 4 De oevergeulen zijn in het model 3 rekencellen breed, wat overeenkomt met circa 80 m. De bodem van de oevergeulen ligt even hoog als de gemiddelde bodemligging in het naastliggende zomerbed.



Figuur C.1. Ligging van langsdammen van het meerdere-stroomgeulenconcept in het traject tussen de PannerdenseKop (rechts) en de bestaande langsdammen (vanaf rkm 911).

De morfologische simulaties voor 20 jaar zijn uitgevoerd met een representatief afvoerverloop voor:

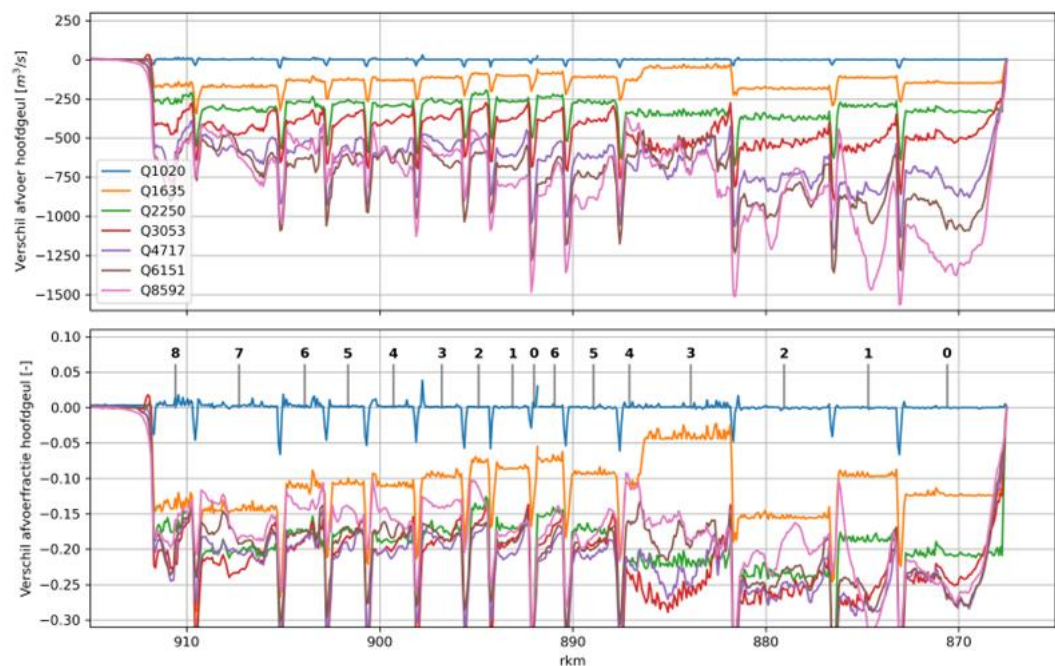
- de referentie (zonder verruiming) en een ontwerp met meerdere stroomgeulen;
- situaties met een vaste en met een vrije afvoerverdeling;
- situaties met en zonder onderhoudsbaggerwerk.

In totaal zijn dit $2 \times 2 \times 2 = 8$ morfologische berekeningen.

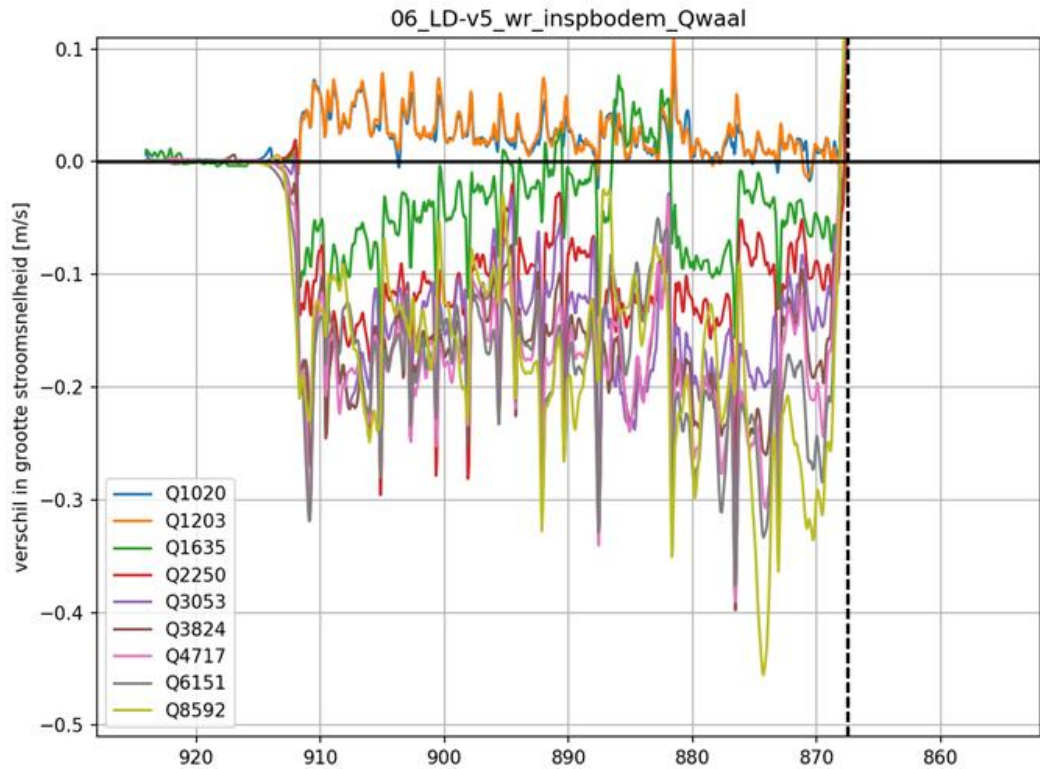
C.3.2 Effecten op afvoer, stroomsnelheden en waterstanden in de hoofdgeul

Figuren C.2 – C.5 geven de resultaten weer van Delft3D-berekeningen zonder morfologische veranderingen. Op basis daarvan kan worden geconcludeerd dat door de extra stroomgeulen:

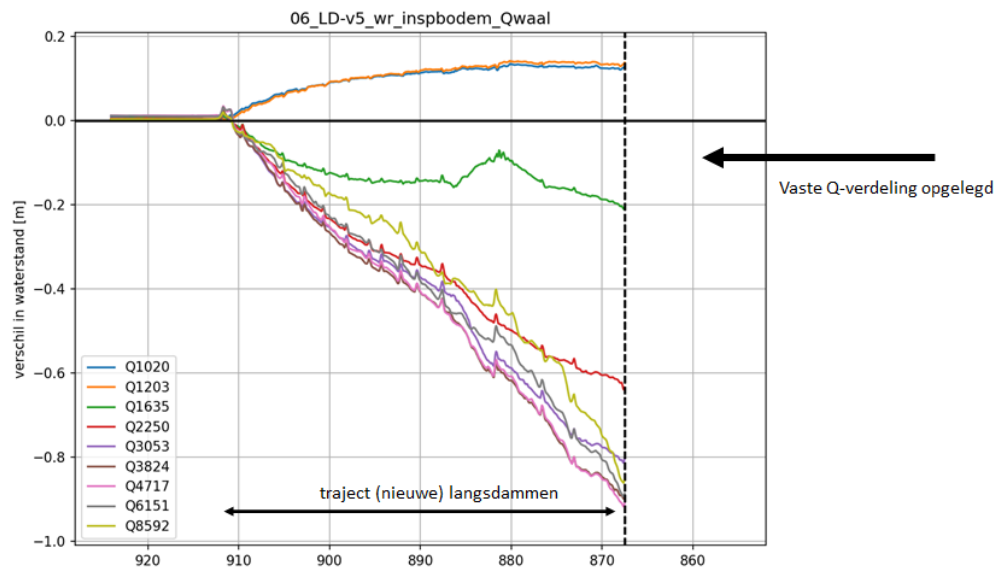
- 1 de afvoer door de hoofdgeul afneemt bij afvoeren waarbij de oevergeul mee gaat stromen (figuur C.2). De figuur geldt voor een vaste afvoerverdeling op de Pannerdense Kop. Bij een vrije afvoerverdeling stroomt bij hoge afvoeren meer water naar de Waal, maar neemt de afvoer in de hoofdgeul op vergelijkbare wijze af;
- 2 de stroomsnelheid in de hoofdgeul afneemt zodra de oevergeul mee gaat stromen (figuur C.3). Tot dat moment ($Q_{Lobith} < 1635 \text{ m}^3/\text{s}$) nemen de stroomsnelheden wat toe door de versmalling. De figuur geldt voor de vaste afvoerverdeling op de Pannerdense Kop. Bij een vrije afvoerverdeling is het effect op de stroomsnelheid nagenoeg gelijk;
- 3 de waterstanden op de Waal in het traject van de extra stroomgeulen dalen zodra de oevergeul mee gaat stromen (figuur C.4). Tot dat moment ($Q_{Lobith} < 1635 \text{ m}^3/\text{s}$) nemen de waterstanden wat toe door de versmalling. Figuur C.4 geldt voor een vaste afvoerverdeling. Als die verdeling wordt vrijgelaten, en op het Pannerdensch Kanaal, de Nederrijn of de IJssel geen compenserende maatregelen worden getroffen, geldt figuur C.5. Ook dan nemen de waterstanden op de Waal bij lage afvoeren toe en bij hogere afvoeren af, maar verandering van de afvoerverdeling op het splitsingspunt verkleint dat effect enigszins. Bij lage afvoeren neemt de afvoer op het Pannerdensch Kanaal toe ten opzichte van de situatie zonder meerdere stroomgeulen. Bij hogere afvoeren trekt de Waal meer afvoer.



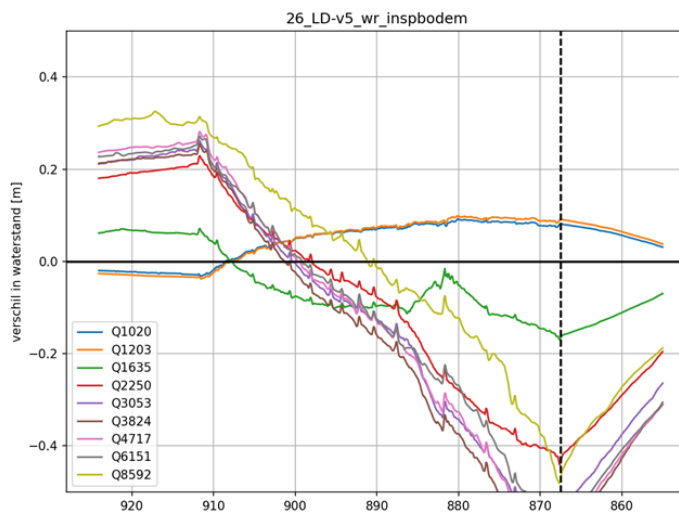
Figuur C.2. Effect van meerdere stroomgeulen op afvoer door hoofdgeul bij vaste afvoerverdeling op de Pannerdense Kop, zonder morfologische veranderingen, bij verschillende Lobith-afvoeren ($1.020 - 8.592 \text{ m}^3/\text{s}$).



Figuur C.3. Effect van meerdere stroomgeulen op stroomsnelheid in hoofdgeul bij vaste afvoerverdeling op de Pannerdense Kop, zonder morfologische veranderingen, bij verschillende Lobith-afvoeren (1.020 – 8.592 m³/s).



Figuur C.4. Effect van meerdere stroomgeulen op waterstand in hoofdgeul bij vaste afvoerverdeling op de Pannerdense Kop, zonder morfologische veranderingen, bij verschillende Lobith-afvoeren (1.020 – 8.592 m³/s).



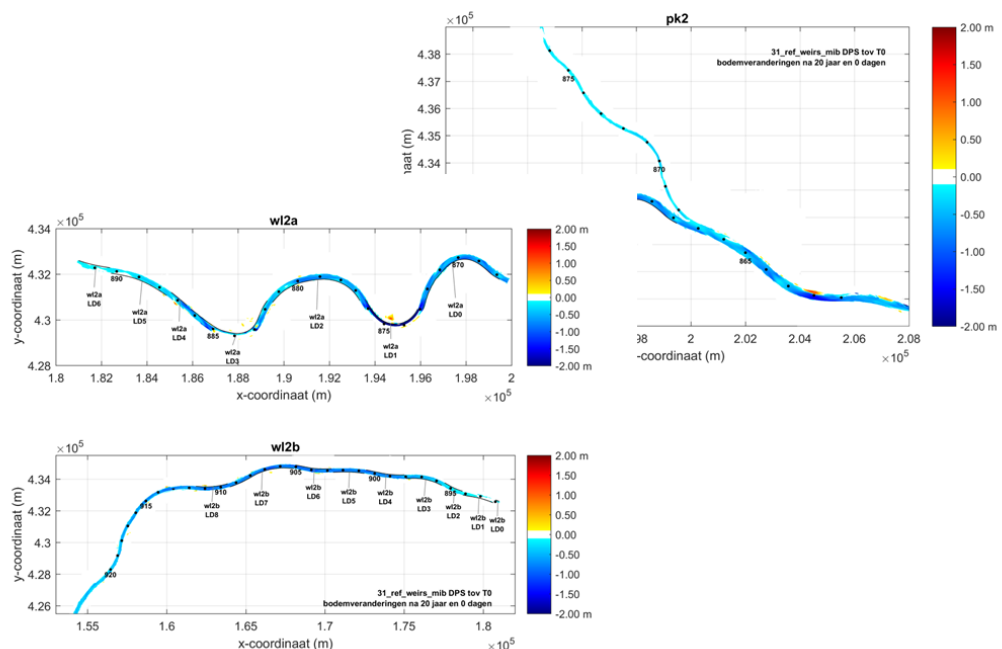
Afvoer km870 Waal

Index	5_wr_insp
Q1020	-13.03
Q1203	-14.94
Q1635	29.51
Q2250	111.05
Q3053	150.72
Q3824	167.11
Q4717	214.98
Q6151	264.45
Q8592	506.4

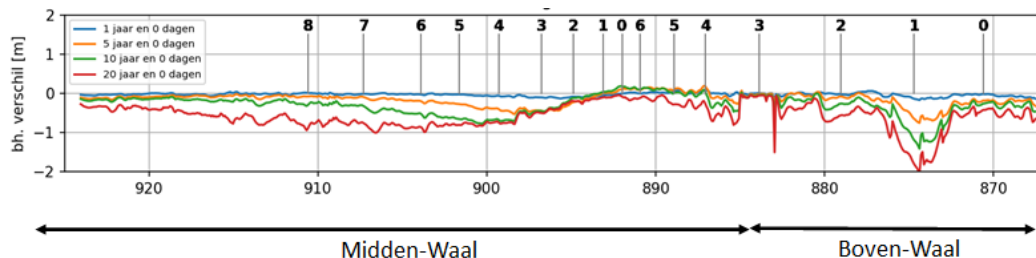
Figuur C.5. Effect van meerdere stroomgeulen op waterstand in hoofdgeul bij vrije afvoerdeling op de Pannerdense Kop, zonder morfologische veranderingen, bij verschillende Lobith-afvoeren (1.020 – 8.592 m³/s). De tabel rechts geeft de verandering van de afvoer op het splitsingspunt (negatief = meer water naar het Pannerdensch Kanaal).

C.3.3 Effecten op sedimenttransport en morfologie

Het model van de referentiesituatie, zonder meerdere stroomgeulen, is morfologisch doorgerekend voor 20 jaar. Figuur C.6 laat zien dat in het gehele model de eroderende trend doorzet. Voor de Waal is de berekende erosietrend nader gevisualiseerd in figuur C.7 en vergeleken met de gemeten trend. De figuur laat zien dat het model de erosieve trend in de Boven-Waal redelijk beschrijft. Met name in de Midden-Waal (rkm 895-920) overschat het gebruikte model de gemeten trend. Met deze overschatting moet bij het interpreteren van de resultaten rekening worden gehouden, zeker bij vergelijking met de huidige situatie (t_0). Voor vervolgberekeningen zal het model moeten worden verbeterd.



Figuur C.6. Bodemverandering na 20 jaar voor de referentiesituatie voor Bovenrijn en Pannerdensch Kanaal (rechtsboven), Boven-Waal (midden) en Midden-Waal (onder).



	Prognose Sloff (2019) [cm/jr]	Resultaat model (orde grootte) [cm/jr]
Boven-Rijn	0.0	-2
Boven-Waal	-1.6	-2
Midden-Waal	-0.6	-4
Beneden-Waal	+0.1	0
Pannerdensch Kanaal	-1.0	0

Figuur C.7. Breedtegemiddelde bodemligging in de referentiesituatie ten opzichte van beginbodemligging (boven) na 1, 5, 10 en 20 jaar bij een vaste afvoerdeling. Gemeten trends in de tabel. Nummers in de figuur verwijzen naar trajecten waarin vervolgens meerdere stroomgeulen zijn gemodelleerd.

Figuur C.8 toont de gradiënt in sedimenttransportcapaciteit die de erosie op de Waal veroorzaakt. De gradiënt is vooral tussen rkm 890 en 900 vrij groot, wat de grote erosie op de Midden-Waal verklaart. Tussen de Pannerdense Kop (rkm 867) en het einde van de bestaande langsdammen op de Midden-Waal (rkm 925) is de toename van het jaarlijkse sedimenttransport flink groter dan de toename van circa 140.000 m³/jaar die op basis van de bodemverandering in de hoofdgeul mag worden verwacht (Sloff, 2019). Dit is in lijn met de te grote jaarlijkse erosie in de referentieberekening.

De berekeningen met meerdere stroomgeulen en een vaste afvoerdeling op het splitsingspunt geven de volgende resultaten:

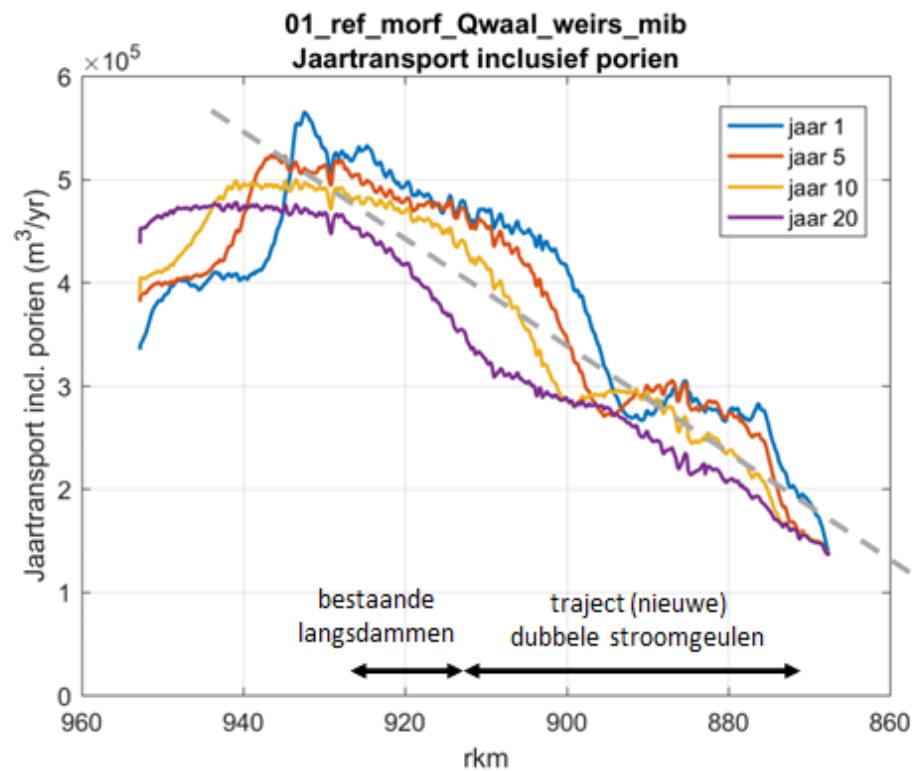
- 1 De extra stroomgeulen hebben een groot effect op de sedimenttransportcapaciteit (figuur C.9). Ze vlakken de gradiënt in het jaarlijkse transport af en daarmee ook de bodemerosie. Figuren C.8 en C.9 laten ook zien dat in het model de transportcapaciteit bij de bestaande langsdammen hoog is en blijft. De oorzaak lijkt te liggen in de vrij grove resolutie van het model, waardoor het volledige effect op stroomsnelheden en sedimenttransporten niet tot zijn recht kan komen;
- 2 Op de Boven-Waal wordt de bodemerosie sterk gereduceerd (figuur C.10). Ten opzichte van de referentie komt de bodem omhoog en ten opzichte van de huidige situatie stabiliseert de bodem zich;

- 3 Op de Midden-Waal gaat de erosie door en verergert deze zelfs (figuur C.10). Hetzelfde geldt voor de Beneden-Waal. De aanzanding in de Boven-Waal veroorzaakt dit deels, omdat minder sediment de Midden-Waal bereikt. Een belangrijker oorzaak is echter de te grote erosietrend in het model op de Midden-Waal (figuur C.7). Hierdoor zakken de waterstanden te sterk, overstromen de langsdammen minder vaak en worden de extra stroomgeulen minder effectief. Dit wordt geïllustreerd door de berekende afvoeren door de oevergeulen van de Midden-Waal in figuur C.11. De oevergeulen trekken door de dalende bodem en te lage waterstanden steeds minder afvoer. De dalende waterstanden zorgen er tevens voor dat waterstanden op de Boven-Waal zakken en ook daar de oevergeulen op langere termijn minder effectief worden. Door de te grote erosieve trend van het referentiemodel wordt daarom het effect van meerdere stroomgeulen onderschat.

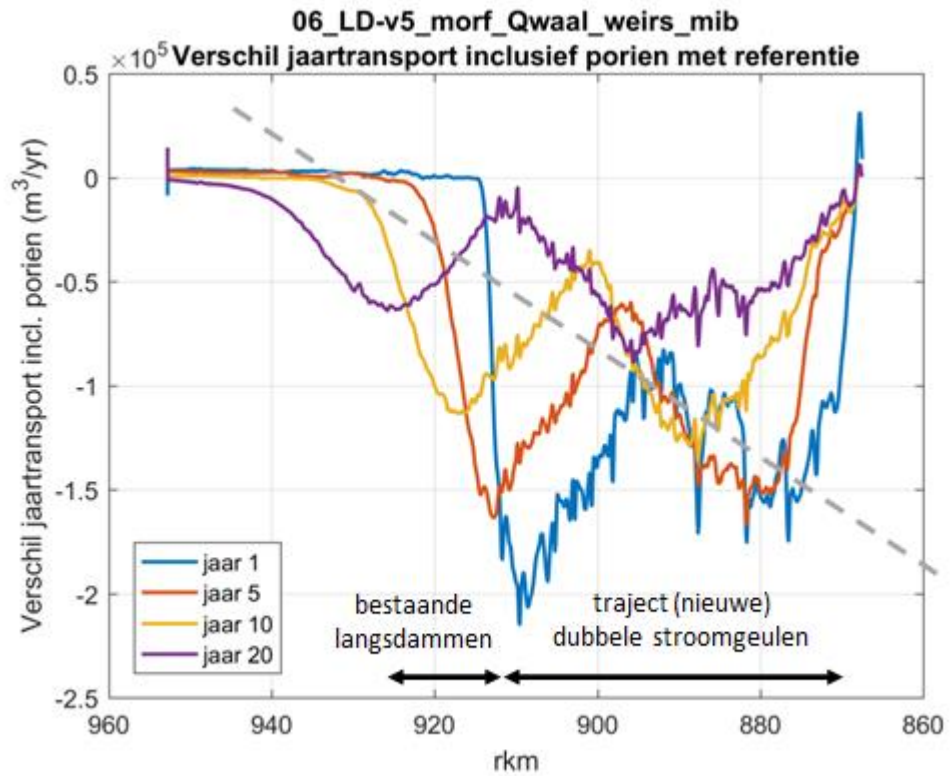
Figuren C.9 – C.11 gelden voor de vaste afvoerverdeling. Een vrije afvoerverdeling geeft een vergelijkbaar beeld. Voor zowel vaste als vrije afvoerverdeling zijn ook berekeningen uitgevoerd met onderhoudsbaggerwerk ten behoeve van de scheepvaart. Baggerwerk wordt uitgevoerd als de waterdiepte bij OLA minder wordt dan 2,8 m. Dan wordt meteen een overdiepte van 0,5 m gebaggerd. Hierbij is gebruik gemaakt van de bagger- en storttroutines van Delft3D-4 die het gebaggerde sediment storten in de diepste delen van het zomerbed bij de eerstvolgende langsdam. Op deze manier wordt aanzanding stroomafwaarts verplaatst en de vaardiepte geborgd. In de oevergeulen wordt niet gebaggerd, maar door de locatie van de instroomdrempel en de positionering van de oevergeulen in binnenbochten blijft het meeste sediment in het zomerbed. De berekening is uitgevoerd voor de referentie en met het meerdere-stroomgeulenconcept. De morfologische resultaten lijken op die van figuren C.9 – C.11. De bijbehorende jaarlijkse bagger- en stortvolumes voor de gehele Waal staan in figuur C.12. Voor een vaste afvoerverdeling blijkt het bagger- en stortvolume bij het meerdere-stroomgeulenconcept initieel lager dan in de referentie. Dit is een gevolg van de grotere waterdiepte door de versmalling. In de loop van de tijd erodeert de bodem in de referentieberekening, neemt het verhang af, de waterdiepte wat toe en het bagger- en stortvolume licht af. Voor de situatie met meerdere stroomgeulen neemt het bagger- en stortvolume in de tijd wat toe door de morfologische veranderingen in het systeem. De volumes nemen vooral benedenstrooms toe.

Bij een vrije afvoerverdeling neemt het bagger- en stortvolume in de hoofdgeul in de loop van de tijd sterker af dan bij de vaste afvoerverdeling, als gevolg van het verder scheefftrekken van de afvoerverdeling. Voor de situatie met meerdere stroomgeulen blijft de afvoerverdeling en daarmee het bagger- en stortvolume vrijwel constant. Voor zowel vrije als vaste afvoerverdeling is er geen groot verschil in baggervolume tussen de referentie en de situatie met meerdere stroomgeulen. Deze resultaten hebben betrekking op onderhoudsbaggerwerk. Bij de herinrichting met meerdere stroomgeulen zal ook sedimentmanagement nodig zijn om te helpen bij het stabiliseren van de rivierbodembodem. Dit zal naar verwachting vooral nodig zijn op de Midden-Waal waar de erosie in eerste instantie zal toenemen door de sedimentatie op de Boven-Waal. Het benodigde sedimentmanagement zal in een vervolg nader moeten worden uitgewerkt.

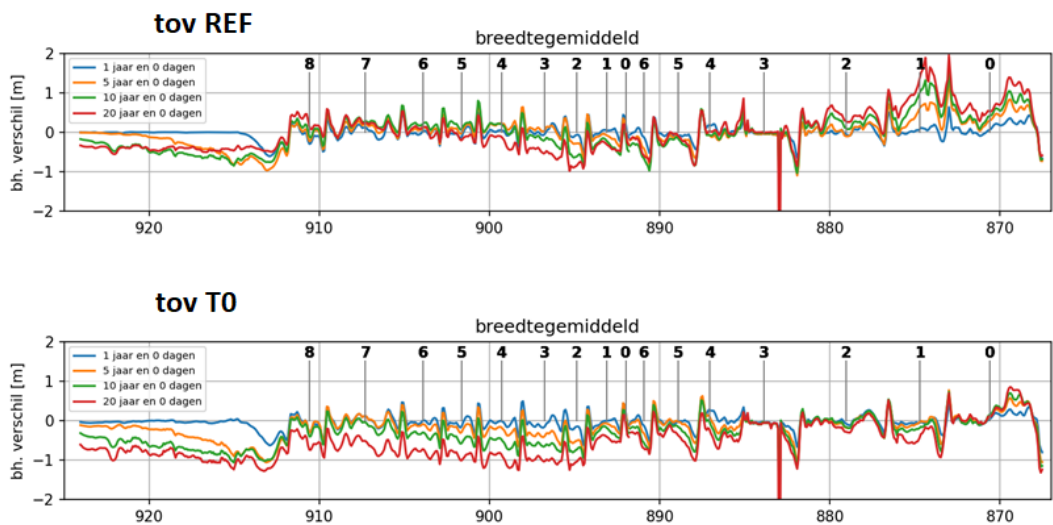
Tot slot is voor de berekeningen met vrije afvoerdeling (zonder onderhoudsbaggerwerk) gekeken naar de afvoerdeling bij de Pannerdense Kop. De verdeling bij de lagere afvoeren is van belang voor de zoetwatervoorziening en de scheepvaart. Figuur C.13 laat de verdelingen zien voor de referentie en de situatie met meerdere stroomgeulen. Door de meerdere stroomgeulen neemt de berekende afvoer naar het Pannerdensch Kanaal bij lage Bovenrijnafvoeren (1.020 en 1.203 m³/s) initieel toe. Daarna blijft de afvoerdeling redelijk constant, terwijl in de referentiesituatie de afvoer naar het Pannerdensch Kanaal geleidelijk afneemt in de tijd. De extra stroomgeulen hebben dus het gewenste effect: meer water naar het Pannerdensch Kanaal. De wens voor zoetwatervoorziening is dat van een Bovenrijnafvoer van 1300 m³/s minimaal 315 m³/s naar het Pannerdensch Kanaal stroomt. Deze afvoer is niet doorgerekend, maar een schatting op basis van interpolatie laat zien dat dit lijkt te lukken. Uit metingen blijkt echter (Verbeek, 2022) dat in de huidige situatie slechts 260 m³/s naar het Pannerdensch Kanaal stroomt. Het huidige model overschat die afvoer dus, wat betekent dat een pakket van maatregelen de afvoer waarschijnlijk nog wat extra naar het Pannerdensch Kanaal zal moeten sturen.



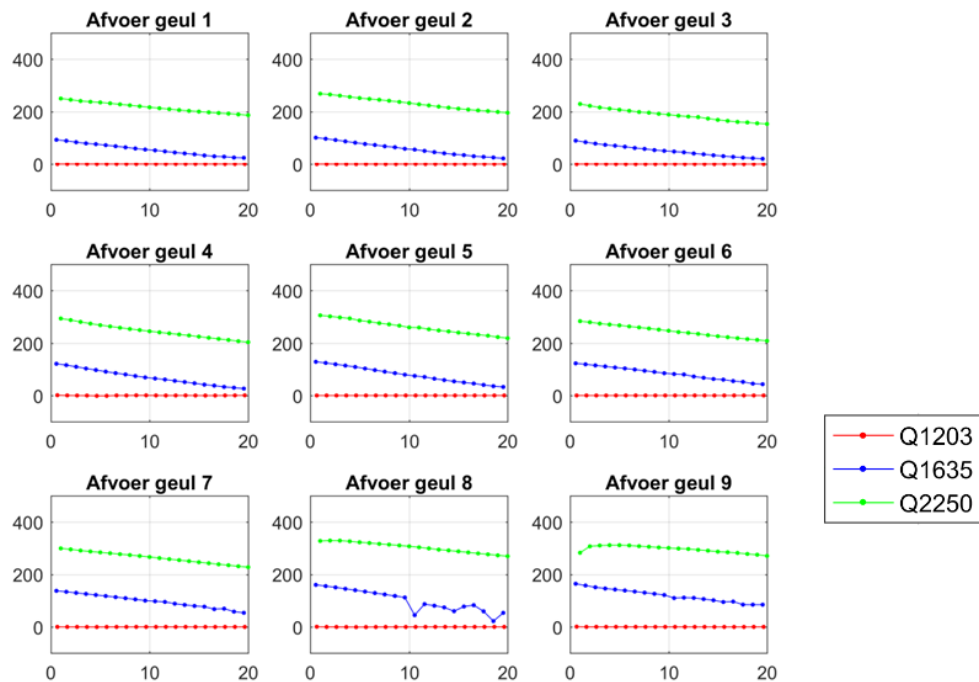
Figuur C.8. Verloop in de tijd van het jaartransport van sediment in de Waal voor de referentieberekening. Vanaf de Pannerdense Kop neemt het transport in benedenstroomse richting toe. Dit veroorzaakt bodemerosie.



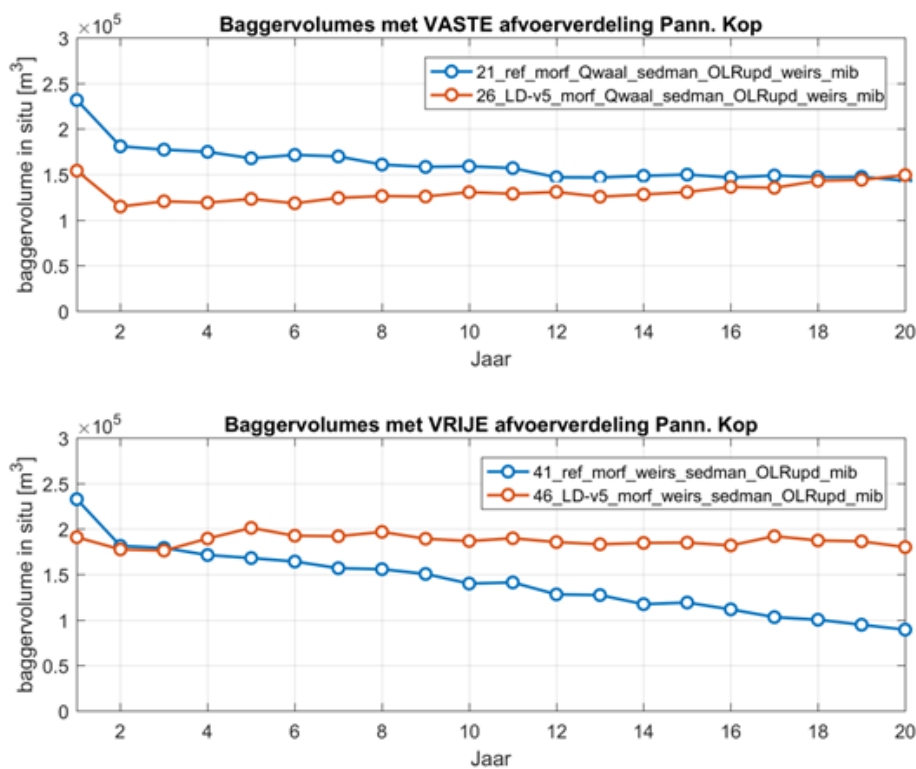
Figuur C.9. Effect van meerdere stroomgeulen op het jaartransport van de Waal.



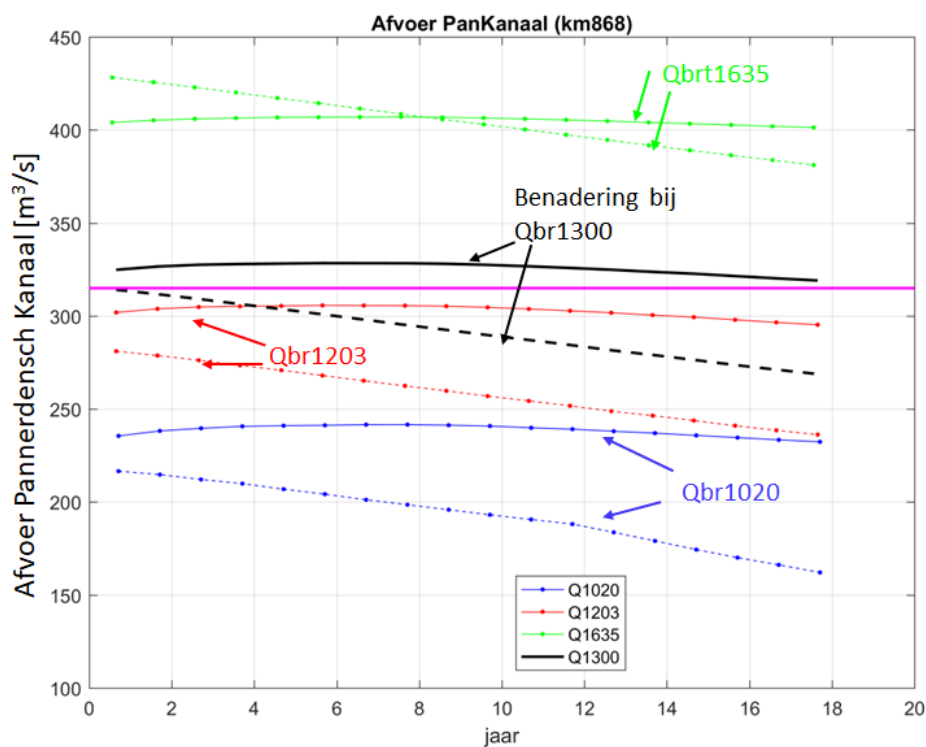
Figuur C.10. Effect van meerdere stroomgeulen op de gemiddelde bodemligging in de tijd ten opzichte van de referentie (boven) en ten opzichte van de huidige situatie t_0 (onder).



Figuur C.11. Afvoer door de oevergeulen op de Midden-Waal (genummerd volgens figuur C.7) bij drie Bovenrijnafvoeren. Door de grote erosieve trend in het referentiemodel neemt de afvoer in de oevergeulen in de tijd sterk af en wordt herinrichting met meerdere stroomgeulen minder effectief.



Figuur C.12. Volumes onderhoudsbaggerwerk (baggeren en storten) voor de referentiesituatie en de situatie met meerdere stroomgeulen. Voor de vaste afvoerdeling op de Pannerdense Kop (boven) lopen de volumes bagger- en stortwerk naar elkaar toe in de tijd. Voor een vrije afvoerdeling (onder) zorgt de aanzanding in de situatie met meerdere stroomgeulen (of de stabilisatie van de rivierbodem) op termijn voor hogere bagger- en stortvolumes.



Figuur C.13. Afvoer naar het Pannerdensch Kanaal in de tijd voor de referentie en de situatie met meerdere stroomgeulen. Getrokken lijnen voor de situatie met meerdere stroomgeulen en stippellijnen voor de referentiesituatie. De parse lijn toont de voor zoetwatervoorziening gewenste afvoer naar het Pannerdensch Kanaal bij een Bovenrijnafvoer van 1300 m³/s.

C.4 Conclusies

De verkennende berekeningen met de tweedimensionale Delft3D-modellen D-Hydro en Delft3D-4 hebben nieuwe inzichten in het morfologisch systeem opgeleverd en een beeld geschetst van hoe het model de huidige morfologische processen voorspelt. Ondanks dat het morfologische model niet perfect is en de maatregelen met de huidige roosterresolutie slechts grof kunnen worden geschematiseerd, leveren de verkennende berekeningen bruikbare inzichten:

- 1 Voor het stoppen van bodemerrosie is grootschalige onttrekking van afvoer aan de hoofdgeul nodig. Meerdere stroomgeulen en grootschalige verruiming van uiterwaarden zijn fysieke maatregelen die daarbij passen. Verlaging en verlenging van kribben kunnen bijdragen maar geven op zichzelf onvoldoende reductie van de bodemerrosie;
- 2 Toepassing van het concept met meerdere stroomgeulen op de gehele Waal tussen de Pannerdense Kop en de pilot Langsdammen in de Waal bij Tiel lijkt geschikt om de bodemerrosie te stoppen en de laagwaterstanden op te zetten. De berekeningen laten zien dat het concept ook op de bochtige Boven-Waal een geschikte maatregel is. De extra stroomgeulen en versmalling van de hoofdgeul maken tevens beïnvloeding van de afvoerverdeling bij lagere afvoeren mogelijk, met het doel om de tendens van steeds meer afvoer naar de Waal te stoppen en om te draaien. Bij OLA kan dan minstens circa 15 à 20 m³/s extra naar het Pannerdensch Kanaal worden gestuurd;

- 3 De verruiming moet bij middenafvoeren en hogere afvoeren 15 à 20% of meer afvoer aan de hoofdgeul onttrekken om de bodemerosie te stoppen. Kennis uit de pilot Langsdammen in de Waal toont aan dat dit haalbaar is;
- 4 De rivierverruiming vermindert de erosie aan bovenstroomse zijde die zich in de loop van de tijd stroomafwaarts uitbreidt. Om de bodemerosie op de gehele Waal effectief te stoppen en scheepvaart mogelijk te houden is herverdeling van de aanzanding nodig, maar zullen tegelijkertijd sedimentsuppleties nodig zijn. Dit externe sediment moet dan met name in de Midden-Waal en in het benedenstroomse traject van de Boven-Waal worden aangebracht;
- 5 De extra stroomgeulen lijken geen toename van het jaarlijkse baggervolume in de hoofdgeul te veroorzaken ten opzichte van de referentiesituatie. Dat is een optimistischer beeld dan volgt uit de praktijkervaringen op de Midden-Waal;
- 6 Maatwerk is nodig voor een ontwerp voor de gehele Rijntakken. De extra stroomgeulen op de Waal trekken de afvoerverdeling bij middenafvoeren en hogere afvoeren namelijk nog schever dan die al is. De Waal krijgt door de verruiming nog meer water. In de integrale uitwerking is daarom van belang dat een maatregelconcept:
 - a de bodemerosie gelijkmatig stopt, waarvoor naast verruiming ook sedimentmanagement nodig is. De verruiming op de Midden-Waal moet mogelijk nog ruimer worden gedimensioneerd, via ruimere oevergeulen of lagere instroomdrempels of langsdammen, eventueel in combinatie met minder ruime oevergeulen op de Boven-Waal;
 - b de afvoerverdeling over de splitsingspunten reguleert, zodat bij lage afvoeren meer water naar het Pannerdensch Kanaal, de IJssel en het IJsselmeer stroomt terwijl de huidige afvoerverdeling bij middenafvoeren en hogere afvoeren in stand blijft;
 - c de omvang van het sedimentmanagement voor regulering van de bodemligging en voor de scheepvaart minimaliseert.
- 7 Een maatregelenpakket op basis van meerdere stroomgeulen kan worden gecombineerd met maatregelen die individueel onvoldoende effect sorteren. Dergelijke maatregelen kunnen aanvullend wel helpen om de bodemligging en afvoerverdeling in de juiste richting te beïnvloeden. Voorbeelden zijn kribverlaging, verlenging van de vaste laag bij Nijmegen, verbreding of verlenging van de IJssel en aanleg van nevengeulen.

C.5 Aanbevelingen voor vervolg

Uit de verkennende berekeningen en de analyses volgen vooralsnog de volgende aanbevelingen voor vervolgacties.

Morfologische model:

- 1 IJking van het model om sedimenttransporten uit de bodempeilingen en de gemeten bodemtrends enerzijds en uit de modelberekeningen anderzijds dichterbij te brengen. Dat zou wellicht mogelijk zijn via nadere detaillering van de korrelgroottes (die nu op de Midden-Waal vanaf de Boven-Waal zijn doorgetrokken) en via langer inspelen van de berekeningen. Doel is een morfologisch model te ontwikkelen dat vanaf tijdstip t_0 realistische sedimenttransporten, bodemligging, erosietrends, bodemsamenstelling, waterstanden en afvoerverdelingen geeft voor de berekeningen met maatregelen;
- 2 Verfijning van het rekenrooster van Delft3D-4 om langsdammen en inlaten nauwkeuriger te schematiseren en daarmee beter te kunnen optimaliseren. Met de huidige resolutie zijn er beperkingen om de oevergeulbreedte en het instroomgebied van oevergeulen goed te modelleren. Bovendien lijken de langsdammen en oevergeulen van de pilot Langsdammen in de Waal in de berekeningen benedenstrooms van Tiel minder effect te hebben dan uit de evaluatie van de pilot is gevolgd;

- 3 Analyse of de morfodynamiek in oevergeulen berekend moet worden en zo ja, hoe;
- 4 Analyse van verschillen tussen hydraulische effecten van langsdammen in D-Hydro en Delft3D-4;
- 5 Creatie van een model met een vaste afvoerverdeling dat het splitsingspunt bevat.

Ontwerp maatregelenpakket:

- 1 Verkenning van varianten voor de volgorde van uitvoering met bijbehorende voor- en nadelen;
- 2 Optimalisatie van ligging en afmetingen van alle stroomgeulen, op basis van lokale riviermorfologie (dieptes en ondieptes en de dynamiek daarvan), huidig baggerwerk, berekende gradiënten, etc. Dit vervangt het ontwerp in de huidige verkennende berekeningen waarin de afmetingen afhangen van het rekenrooster;
- 3 Optimalisatie van het sedimentmanagement, inclusief benodigde suppleties om de rivierbodem gelijkmatig op niveau te houden. Relevante parameters zijn daarbij volume, samenstelling en locaties. Hierbij is het belangrijk om te toetsen dat de volumes sedimentmanagement voor bevaarbaarheid niet toenemen door de maatregelen;
- 4 Onderzoek naar combinatie met andere verruimingsmaatregelen, zoals kribverlaging en nevengeulen (aansluitend op de oevergeulen);
- 5 Verkenning van de rek in meerdere stroomgeulen of uiterwaardverlaging om erosie op termijn om te buigen naar sedimentatie;
- 6 Combinatie met maatregelen op andere Rijntakken om de afvoerverdeling over de splitsingspunten bij verschillende afvoerniveaus te stabiliseren of te herstellen naar een historische verdeling.

D Inbreng van experts tijdens discussiesessies

Op 14 november en 12 december 2022 vonden discussiesessies plaats met experts van Rijkswaterstaat, HKV, Deltares en de universiteiten van Delft en Wageningen. Deze hebben bijgedragen aan de totstandkoming van het advies in dit rapport. Daarnaast brachten de experts diverse aanvullende inzichten en overwegingen naar voren. De voornaamste punten volgen hieronder.

Hermjan Barneveld (HKV, Wageningen Universiteit):

De noodzaak van Beleidsoptie 1 staat buiten kijf; die van Beleidsopties 2 en 3 niet zo. De betrokken spelers hebben ook een Plan B. Geschikte maatregelen zijn suppleren en langsdammen. Bekijk de optie van langsdammen in de Boven-Waal, ondanks het voorbehoud vanwege de bochten. Denk gedurfder dan we tot nu toe doen en bekijk ook langsdammen langs de IJssel en het Pannerdensch Kanaal. Maak beter gebruik van de ervaringen uit Duitsland. Met langsdammen langs de gehele Waal is Beleidsoptie 1 haalbaar en maakbaar.

Basam Barakat (Directoraat-generaal Luchtvaart en Maritieme Zaken):

Wat gebeurt er als we de rivier gewoon zijn gang laten gaan? [Antwoorden tijdens de sessie: negatieve gevolgen voor scheepvaart en voor de watervoorziening van Noord-Nederland].

Astrid Blom (Technische Universiteit Delft):

Voorkeur voor Beleidsoptie 1 boven Beleidsoptie 3. Houd rekening met de effecten van aanzanding in het Pannerdensch Kanaal na hoogwaters. Nederland gaat profiteren van de Duitse suppleties. Suppleren moet met verstand, want anders is de maatregel geen 'no-regret'. De riviersplitsingen kennen meerdere evenwichten en kunnen zich na verstoring naar een ander evenwicht ontwikkelen. Na de hoogwaters van 1993, 1995 en 1998 werd een sedimentprop geconstateerd in het Pannerdensch Kanaal. De aanwezigheid van een zandfractie maakt grind op de rivierbodem makkelijker te eroderen en meer mobiel.

Andries Paarlberg (HKV):

Ga slimmer om met het baggerreferentievlak om minder te hoeven baggeren op knelpunten. Concentreer structurele maatregelen ter vermindering van het baggerbezwaar op die knelpunten.

Frans Klijn (Deltares, Technische Universiteit Delft):

Beleidsoptie 2 is geen afzonderlijke beleidsoptie maar altijd onderdeel van de andere beleidsopties. Verlaag eerst de kribben op de Boven-Waal. Win suppletiemateriaal via onderzuigen of omputten van sediment uit de uiterwaarden. Sedimentatie in het Pannerdensch Kanaal wordt versterkt doordat relatief grof sediment wordt aangevoerd vanuit een buitenbocht van de Bovenrijn. Zomerkades zijn vooral langs de Boven-IJssel erg hoog. Verwijdering van die zomerkades is dan een effectieve vorm van rivierversuiming.

Erik Mosselman (Deltares, Technische Universiteit Delft):

Graag doorlopend overleg met Rijkswaterstaat over de vraag in hoeverre extreme maatregelen nog maakbaar of haalbaar zijn. Denk bijvoorbeeld aan een normaalbreedte van 100 m of het aanbrengen van een 1 m dikke deken van grof sediment.

Michiel Reneerkens (Rijkswaterstaat):

Tot symptoombestrijding behoren naast de suppleties: (i) het dieper leggen van kabels en leidingen; (ii) het aanpassen (verlengen, verlagen) van vaste lagen. Van al het nautisch baggeren vindt nu 50% plaats bij de langsdammen. Oplossingsrichting: (a) vergroving van bodemsediment en langsdammen van Spijk tot Zaltbommel met ecologie in nevengeulen; (b) functiescheiding; (c) werken van benedenstrooms naar bovenstrooms. Beleidsoptie 3 (ophogen van de bodem) pas in aanmerking laten komen als voldoende ervaring is opgedaan met suppleren voor Beleidsoptie 1 (bestaande bodemligging stabiliseren).

Arjan Sieben (Rijkswaterstaat):

Zie memo over vooruitblik naar mogelijke keuzes (Sieben et al, 2022). De op laagwaterstanden gerichte Beleidsoptie 3 is niet handig. Als systeemmaatregel is rivierverruiming in de uiterwaarden weinig effectief. Tijd is een belangrijke factor in de haalbaarheid, en dus ook de volgorde van uitvoering. Door de focus op de Waal wordt de IJssel onderbelicht. Benedenstrooms van de aansluiting op het Twentekanaal bij Eefde zou de vaarwegklasse verlaagd kunnen worden van V naar IV. Het ongedaan maken van de bochtafsnijding bij Doesburg maakt de IJssel 4 km langer. Dit geeft 40 cm hogere waterstanden. Berekeningen met D-Fast (opvolger van WAQMorf) suggereren dat de stabiliteit van de riviersplitsing afhangt van de in de modellering toegepaste correctie voor *hiding and exposure* [zie paragraaf A.5 van bijlage A].

Kees Sloff (Deltares, Technische Universiteit Delft):

Rivierverruiming op deeltrajecten maakt de sedimenttransportcapaciteit minder uniform en veroorzaakt daardoor lokale bulten van aanzanding in plaats van een egale ophoging van de bodem. Uit recente metingen blijkt niet dat sediment naar het Pannerdensch Kanaal grover is dan sediment naar de Waal. Het beeld is complex door het aansnijden van dieper gelegen fijne lagen en de invloed van passerende schepen op sedimenttransport. Adaptieve maatregelen zoals suppletie zullen ook nodig blijven wanneer de structurele maatregelen de bodemerosie tot staan hebben gebracht.

Marco Taal (Directoraat-generaal Bodem en Water):

Overweeg verlenging van de rivier door bochtafsnijdingen ongedaan te maken. Presenteer niet als conclusie dat we veel niet weten en daarom meer onderzoek nodig hebben. Adviseer daadwerkelijk een beleidsrichting, zonder voorbehoud van meer onderzoek. Toon lef met verstand. Zorg voor goed verwachtingsmanagement. Wees eerlijk over wat níet mogelijk is (bijvoorbeeld Beleidsoptie 3). Bij beleid geldt: geen besluit zonder dekking. Voor IRM is echter 80 miljoen euro/jaar beschikbaar uit het Deltafonds.

Rico Tönis (Rijkswaterstaat):

De IJssel is het grootste zorgenkind van Rijkswaterstaat Oost-Nederland. De IJssel wordt dubbel geraakt met lagere waterstanden, namelijk via eigen bodemerosie en via minder afvoer. Een van de door Rijkswaterstaat beschouwde maatregelen is baggeren in het Pannerdensch Kanaal na hoogwaters. De meest urgente opgaven zijn het vergroten van afvoer naar de IJssel en de civieltechnische aanpassing van de vaste laag bij Nijmegen. De minst gepeilde dieptes (MGD's) van de Boven-Waal liggen net benedenstrooms van vaste lagen en bodemkribben. Rijkswaterstaat Oost-Nederland heeft veel contact met Dietmar Abel in Duitsland waar een expertteam jaarlijks de PDCA-cyclus volgt (Plan-Do-Check-Act). Lokaal wordt de vaarweg in Duitsland versmald door de boeien te verleggen. Dat vermindert het baggerbezwaar. De uiterste consequentie van langduriger droogtes kan zijn dat voor scheepvaart in Nederland een lateraalkanaal wordt aangelegd.

Saskia van Vuren (Rijkswaterstaat):

Volgens Hendrik Havinga is de vaste laag ontworpen met 0,75 m overdiepte voor 30 jaar erosie met 2,5 cm/jaar. Ook met langsdammen blijft sedimentmanagement nodig. Volgens een recente studie blijft na aanleg van structurele maatregelen zelfs nog 80% van de suppleties nodig. Zijn structurele maatregelen dan wel effectief? Verkleining van de normaalbreedte is een mogelijke oplossingsrichting.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl