

Verkenning invloed onregelmatige oevers op rivierfuncties



Verkenning invloed onregelmatige oevers op rivierfuncties

Auteur(s)

Robert Groenewege

Aukje Spruyt

Verkenning invloed onregelmatige oevers op rivierfuncties

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Contactpersoon	Arjan Sieben
Referenties	
Trefwoorden	Natuurvriendelijke oever, erosie, rivierfuncties, D-HYDRO

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	06-03-2025
Projectnummer	11210364-011
Document ID	11210364-011-ZWS-0002
Pagina's	65
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Robert Groenewege	
	Aukje Spruyt	

Samenvatting

Langs de Nederlandse rivieren zijn er oevers volledig of deels ontsteend om de ecologische toestand te verbeteren (bijvoorbeeld in het kader van de Kaderrichtlijn Water). Deze “natuurvriendelijke” oevers (NVO's) kunnen nu vrij eroderen. Bij NVO's is er de ambitie om deze zoveel mogelijk ruimte te geven voor morfologische ontwikkeling. Dus bij voorkeur wordt landinwaarts ruimte gebruikt of gemaakt voor die ontwikkeling. Die oeverontwikkeling gaat echter in veel gevallen gepaard met sterke ruimtelijke variaties. Het is bij de meeste oevers nog niet zover, maar het is goed mogelijk dat die grilligheid ook in de eindtoestand van de oeverontwikkeling aanwezig blijft. In de meeste planstudies wordt echter uitgegaan van een strak en geschematiseerd oeverprofiel zonder grilligheid.

De onderzoeksvraag van deze studie is: wat is de invloed van de grilligheid in de oeverlijn zoals van NVO's (zowel in eindtoestand als tussentijds in de ontwikkelfase daarvoor) voor de normaliserende functies van de oever (afvoer water, sediment en ijs, beperken dwarsstroming) en zijn er risico's? Hierbij is voornamelijk gekeken naar de effecten van onregelmatige oevers zoals die in de Maas voorkomen en die zich nog in een dynamisch tussenstadium naar een eindsituatie bevinden. Dit betekent dat voorbeelden worden gebruikt die nog geen (dynamisch) evenwicht hebben bereikt en dat verdere groei van de onregelmatigheid niet uitgesloten is.

Het effect van een onregelmatige oever op het stroombeeld is tweeledig: via verandering van de stroming en van de waterstand. Een onregelmatige oever zorgt voor meer loslating en afbuiging van de stroming. Dit effect kan zo sterk zijn dat er neer- of wervelvorming plaatsvindt, al is dit effect minder sterk dan in diepere kribvakken van vergelijkbare afmetingen. Het verandert de stroomrichting nabij de oever en in de uiterwaard - als die meestroomt - aan de kant van de vervormde oever. In de stroming bij de tegenovergelegen oever en uiterwaard is weinig tot geen effect zichtbaar (maar daar kan de waterstand nog wel beïnvloed zijn). Het effect van een onregelmatigheid van de oever straalt dus ruimtelijk uit, maar dat neemt sterk af op grotere afstand.

Uit deze studie blijkt dat een onregelmatige oever zoals van een NVO een risico kan vormen voor de afvoer van water en ijs. Voor hoogwaters is dit vermoedelijk pas het geval voor een paar (2-4) locaties met onregelmatige oevers achter elkaar, of een enkele grotere onregelmatigheid van minstens 200 m lang. De oevererosie in een NVO werkt rivierverruimend. Hiermee bestaat er overigens ook een kans op verlaging van laagwaterstanden, mits er geen stroombelemmerende ondiepte bij de oever ontwikkelt en oevers zonder neer doorstroomd worden.

De afvoer van ijs in de hoofdgeul wordt in de beschouwde individuele voorbeelden niet relevant beïnvloed; zowel Froude getallen als stromingspatroon laten in de oeverzone geen grote afwijking zien. Bij grotere of meer onregelmatigheid in de belijning neemt kan dit veranderen. De afvoer van ijs door de uiterwaard lijkt door de onregelmatigheid iets meer belemmerd te worden.

Een NVO ontwikkelt door oevererosie naar een eindsituatie. Met het bereiken daarvan stopt de oevererosie. Zonder baggeren is voor zo'n situatie uiteindelijk een verhoging van de hoofdgeulbodem te verwachten, als reactie op het veranderde dwarsprofiel.

De bevaarbaarheid kan in het geding komen als het geërodeerde sediment in de vaarweg wordt afgezet. Of dit een knelpunt vormt, hangt vooral af van de initieel beschikbare ruimte.

Qua bestuurbaarheid vormt de dwarsstroming bij een typische onregelmatige oever zoals hier is beschouwd geen risico volgens het RBK. Uit een gedetailleerdere studie van MARIN (Bedos, 2019) heeft de onregelmatigheid die is doorgerekend significante impact op het vaargedrag, die alleen met voldoende manoeuvreercapaciteit goed opgevangen kan worden.

Het inzicht in de effecten van onregelmatige oevers wordt groter met vervolgonderzoek naar de effecten van meer (verschillende) NVO's met variërende ontwikkeling en evenwichtssituaties.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding	8
1.2	Doel	8
1.3	Leeswijzer	9
1.4	Afkortingen	9
2	Oevererosie	10
2.1	Algemeen proces van oevererosie	10
2.2	Profielen	11
3	Methode	15
3.1	Locaties	15
3.2	Functie-eisen	17
3.2.1	Afvoer van water	18
3.2.1.1	Hoogwater	18
3.2.1.2	Laagwater	18
3.2.2	Afvoer van ijs	19
3.2.3	Sedimenttransport en morfologie	19
3.2.4	Vlot en veilig varen	19
3.2.4.1	Bevaarbaarheid	20
3.2.4.2	Bestuurbaarheid	20
3.3	D-HYDRO simulaties	22
3.3.1	Model en aanpassingen	22
3.3.1.1	Roosterverfijning	22
3.3.1.2	Implementatie onregelmatige oevers	22
3.3.1.3	Schematisatie van kribben	25
3.3.1.4	Profielen	25
3.3.2	Simulaties	26
4	Algemeen stroombeeld	28
4.1	Stromingsveld	28
4.1.1	Locatie 1 en 2	28
4.1.2	Kribben	31
4.2	Waterstandsveld	33
4.3	Synthese	36
5	Effect op rivierfuncties	37
5.1	Afvoer van water	37
5.1.1	Hoogwater	37
5.1.2	Laagwater	39

5.2	Afvoer van ijs	41
5.2.1	Stroomsnelheidsgradiënten	41
5.2.2	Froude getal	43
5.2.3	Synthese	44
5.3	Sedimenttransport en morfologie	45
5.3.1	Sedimenttransport	45
5.3.2	Morfologie	47
5.4	Vlot en veilig varen	48
5.4.1	Bevaarbaarheid	48
5.4.2	Bestuurbaarheid	49
6	Conclusies en aanbevelingen	51
6.1	Algemeen stroombeeld	51
6.1.1	Invloed van rivierafvoer	51
6.1.2	Invloed van de oevervorm	52
6.1.3	Invloed van stuwen/stuwpeilen	52
6.1.4	Afzonderlijk effect van depositie	52
6.2	Effect op rivierfuncties	52
6.3	Advies voor vervolgonderzoek	54
7	Referenties	56
A	Karakterisering onregelmatige oevers	58
B	Aanvullende stroombeelden	60
C	Aanvullende effectbeoordeling	63

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Langs de Nederlandse rivieren zijn er oevers volledig of deels ontsteend om de ecologische toestand te verbeteren (bijvoorbeeld in het kader van de Kaderrichtlijn Water). Deze “natuurvriendelijke” oevers (NVO's) kunnen nu vrij eroderen.

Bij NVO's is er de ambitie om deze zoveel mogelijk ruimte te geven voor morfologische ontwikkeling. Dus bij voorkeur wordt landinwaarts ruimte gebruikt of gemaakt voor die ontwikkeling. Die oeverontwikkeling gaat echter in veel gevallen gepaard met sterke ruimtelijke variaties. Het is bij de meeste oevers nog niet zover, maar het is goed mogelijk dat die grilligheid ook in de eindtoestand van de oeverontwikkeling aanwezig blijft. In de meeste planstudies wordt echter uitgegaan van een strak en geschematiseerd oeverprofiel zonder grilligheid.

In de context van WVH 01 Rivierkundig Onderzoek zijn er afgelopen jaren al meerdere studies gedaan naar natuurvriendelijke oevers (NVO's). Dit omvat, maar is niet beperkt tot: Chavarrias (2019), Duró (2020), Duró & Schippers (2021), Mosselman et al. (2021), Van der Deijl (2022; 2023a), en Van Houten (2022). Specifiek het effect van de grilligheid/variatie in de oeverlijn op navigatie (vlot en veilig varen) is al eerder door Verheij (2015), Helsloot (2016), De Jong (2017), en Bedos (2019) bestudeerd.

1.2 Doel

De onderzoeksvraag van deze studie is: wat is de invloed van de grilligheid in de oeverlijn zoals van NVO's (zowel in eindtoestand als tussentijds in de ontwikkelfase daarvoor) voor de normaliserende functies van de oever (afvoer water, sediment en ijs, beperken dwarsstroming) en zijn er risico's?

De onderzoeksvraag kan worden opgedeeld in twee deelvragen:

- 1 Wat is de invloed van typische ruimtelijke variaties in vrij eroderende ("natuurvriendelijke") oevers (onder en boven water) op de normaliserende functies van de oever: afvoer van water, sediment en ijs, en het beperken van dwarsstroming ten behoeve van de bevaarbaarheid? Dit geldt zowel in de eindtoestand als tussentijds in de ontwikkelfase daarvoor.
- 2 Welke type variaties zijn niet hinderlijk voor deze functies en welke wel?

In deze studie is voornamelijk gekeken naar de effecten van onregelmatige oevers zoals die in de Maas voorkomen en die zich nog in een dynamisch tussenstadium naar een eindsituatie bevinden. Dit betekent dat voorbeelden worden gebruikt die nog geen (dynamisch) evenwicht hebben bereikt en dat verdere groei van de onregelmatigheid niet uitgesloten is. Waar verder in dit rapport “natuurvriendelijke oever” / “NVO” wordt genoemd, wordt een onregelmatige of grillige oever bedoeld, aangezien niet elke NVO in relevante mate onregelmatig is.

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt eerst een beknopt overzicht gegeven van het proces van erosie van natuurvriendelijke oevers en tot welk bodemprofiel dit typisch leidt. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 uiteengezet hoe de invloed van natuurvriendelijke oevers op rivierfuncties wordt beoordeeld. De resultaten hiervan zijn verdeeld over hoofdstuk 4, waar eerst de invloed op het algemene stroombeeld in de rivier wordt gepresenteerd, en hoofdstuk 5, waar de effecten op de verschillende rivierfuncties wordt beschreven. Als laatste staan in hoofdstuk 6 de meest belangrijke conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek.

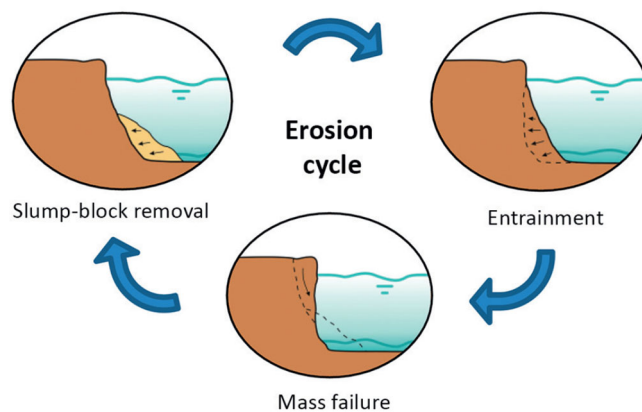
1.4 Afkortingen

- IRM: Integraal Rivier Management
- KRW: Kader Richtlijn Water
- MLW: Maatgevend Laag Water. Dit is de waterstand die 1% van de tijd overschreden wordt. Op de Maas is dit ongeveer gelijk aan het stuwpeil.
- NVO: natuurvriendelijke oever
- OLA: Overeengekomen Lage Afvoer. Dit is de afvoer die gemiddeld 20 dagen per jaar wordt overschreden. Voor de Rijntaken is deze afvoer momenteel 1020 m³/s.
- OLR: Overeengekomen Lage Rivierstand. Dit is de waterstand onder OLA voor de (ongestuwde) Rijntakken.
- OLW: Overeengekomen Lage Waterstand. Dit is de waterstand onder OLA in het overgangsgebied tussen de bovenrivieren en de bijbehorende riviermonden.
- RBK: Rivierkundig Beoordelingskader (voor ingrepen in de Grote Rivieren): zie RWS WVL, 2023.

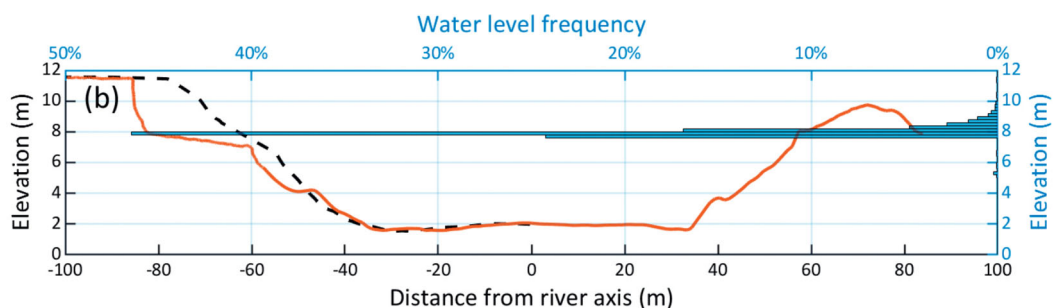
2 Oevererosie

2.1 Algemeen proces van oevererosie

Het algemene proces van oevererosie (Figuur 2-1; Duró, 2020) bestaat eerst uit het geleidelijk afkalven van de oever ("entrainment"), waarbij deze steeds steiler wordt. De teen van deze 'steilrand' lijkt samen te hangen met de gemiddelde waterstand (Figuur 2-2). Door instabiliteit faalt de oever uiteindelijk (zijgen / "mass failure"), waarbij het oevermateriaal van de hogere oever bij de teen wordt afgezet ("slump block"). Dit proces wordt weer in gang gezet zodra het afgezette oevermateriaal is verdwenen, door natuurlijke erosie of baggerwerkzaamheden. Er bestaan ook verschillende faalmechanismen, afhankelijk van de grootte, vorm, geotechnische parameters, stratigrafie, en erodeerbaarheid van de oever. Deze resulteren in een variatie aan groottes en vormen van het afgezette oevermateriaal (Duró, 2020).

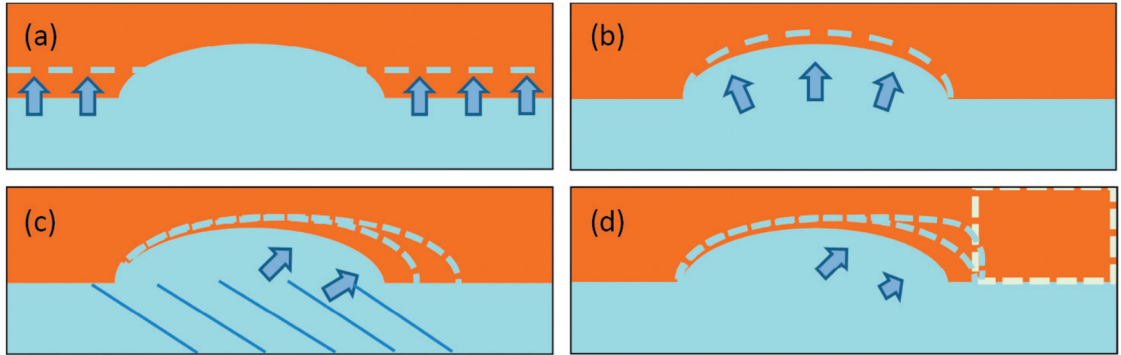


Figuur 2-1. Algemeen proces van oevererosie. Bron: Duró (2020, Fig. 1.4).



Figuur 2-2. Waterstandfrequentie in de periode 2009-2017 en het oeverprofiel van de Maas bij rkm 153.94. Zwart: 2010, rood: 2017. Bron: Duró (2020, Fig. 3.3).

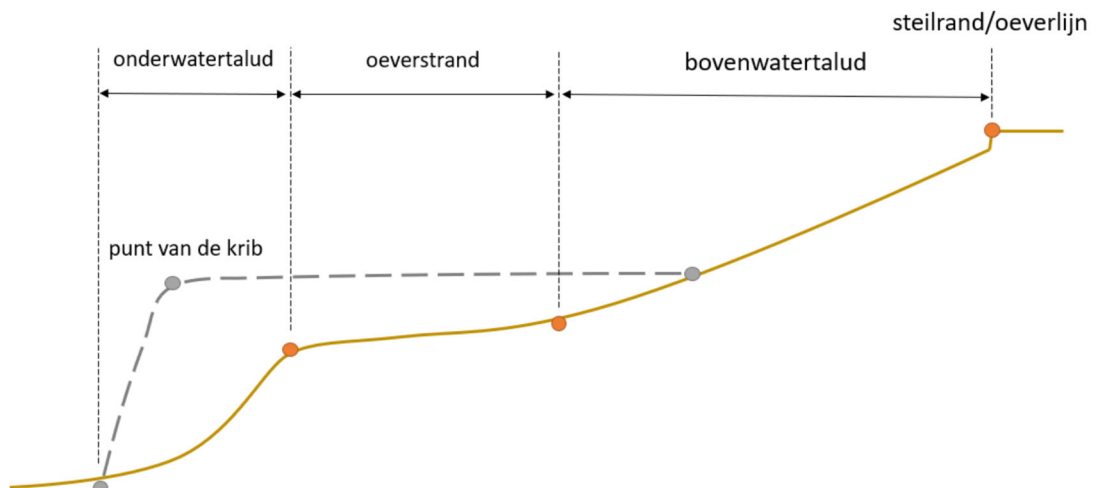
De oeverlijn van een NVO kan zich onder invloed van hoge afvoeren en scheepsgolven ook in verschillende richtingen ontwikkelen, zoals Figuur 2-3 toont.



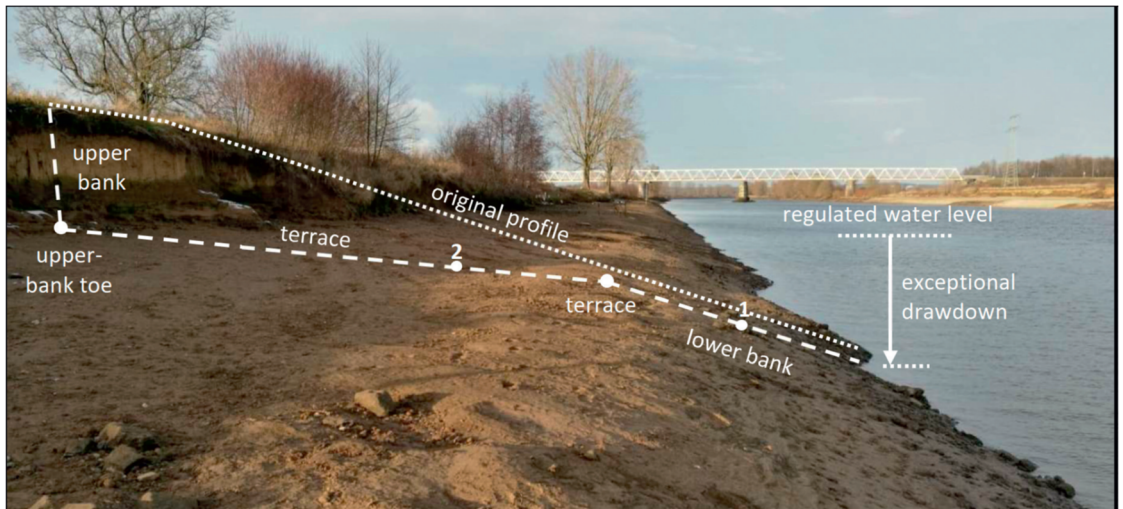
Figuur 2-3. Typen oevererosie zoals onderscheiden door Duró (2020, Fig.3.8). De stroming kan vanuit beide richtingen komen. (a) Uniforme terugtrekking, naast initiële verstoring, (b) symmetrische groei, (c) asymmetrische groei, (d) onregelmatige, asymmetrische groei.

2.2 Profielen

Een typisch dwarsprofiel van een onregelmatige oever in eindtoestand is voor de IJssel (situatie mét kribben) geschematiseerd in Figuur 2-4. Hierin zijn drie zones te onderscheiden: het bovenwatalud, met o.a. de steilrand, het oeverstrand en het onderwatalud. De Maas kent ten opzichte van de IJssel weinig waterstandsvariatie waardoor het oeverstrand en bovenwatalud dezelfde helling heeft. Dit is in Figuur 2-5 getoond, waarbij de 'lower bank' het onderwatalud is, de 'terrace' het oeverstrand en bovenwatalud, en de 'upper bank' de steilrand.



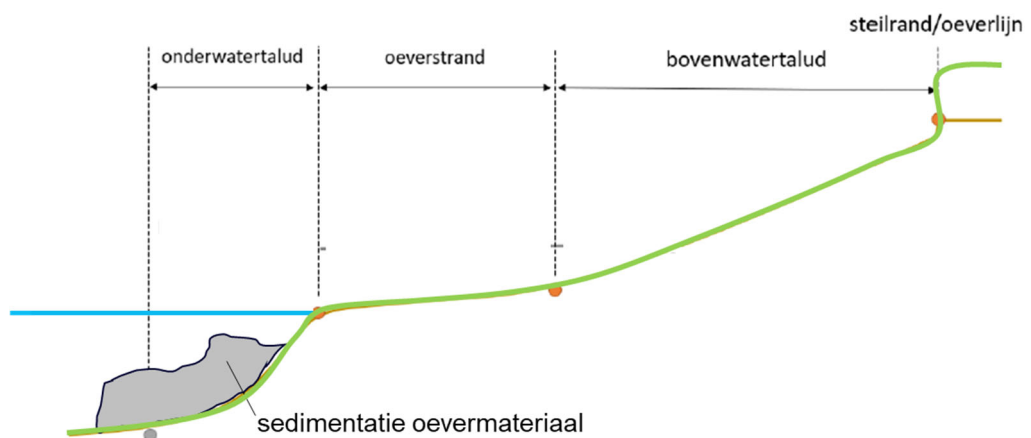
Figuur 2-4. Zones in de doorsnede van een typisch oeverprofiel (bruine lijn) en krib (grijze lijn). Bron: Duró & Schippers (2021, Afb. 1.2)



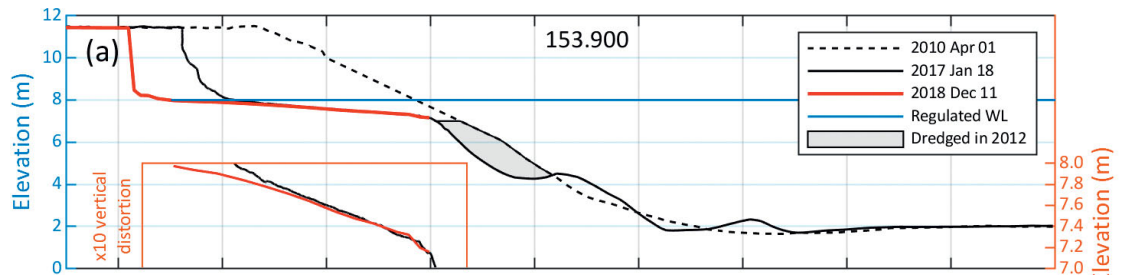
Figuur 2-5. Oeverprofiel van de Maas ter hoogte van rivierkilometer 154.1. Bron: Duró (2020, Fig. 4.1)

Figuur 2-6 en Figuur 2-7 tonen een mogelijk faalmechanisme waarbij materiaal dat geërodeerd is van de hogere oever naar beneden gevallen is en is afgezet op het onderwatertalud. Deze zone bevindt zich in het volop meestromende deel van de vaarweg. Overigens blijft de teen van de steilrand in dit geval typisch op dezelfde hoogte (alleen verplaatst deze zich landinwaarts).

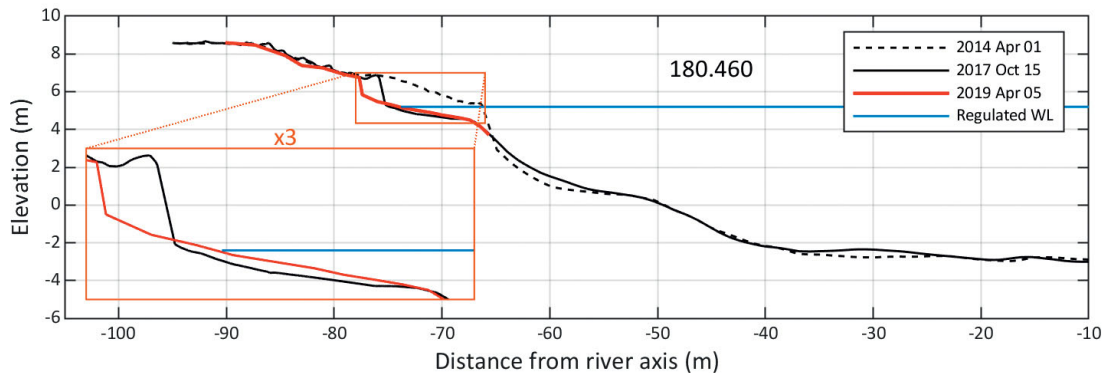
Het kan ook voorkomen dat het geërodeerde materiaal niet helemaal naar beneden valt maar hoger op het talud wordt afgezet. Dit leidt tot verhoging van het talud, en mogelijk ook een steilere helling (zie inzet in Figuur 2-8). De teen van de steilrand is in dit geval meer dan een meter hoger komen liggen.



Figuur 2-6. Schematisering van geërodeerd oevermateriaal dat naar beneden is gevallen en op het onderwatertalud is afgezet.

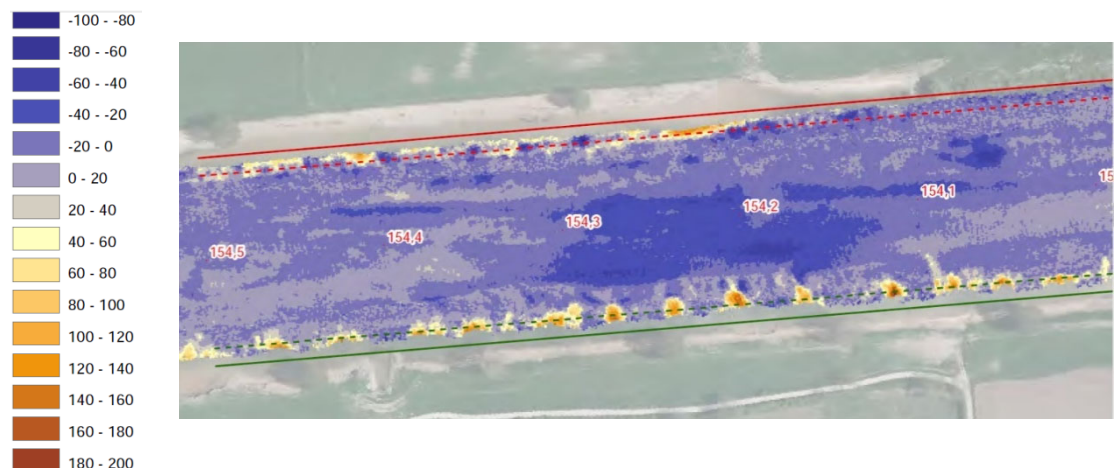


Figuur 2-7. Erosie van een Maasoever met een relatief hoge erodeerbaarheid ter hoogte van rivierkilometer 153.9 (Genneep). Hierbij is lage afzetting van het geërodeerde oevermateriaal zichtbaar. Bron: Duró (2020, Fig. 4.12).

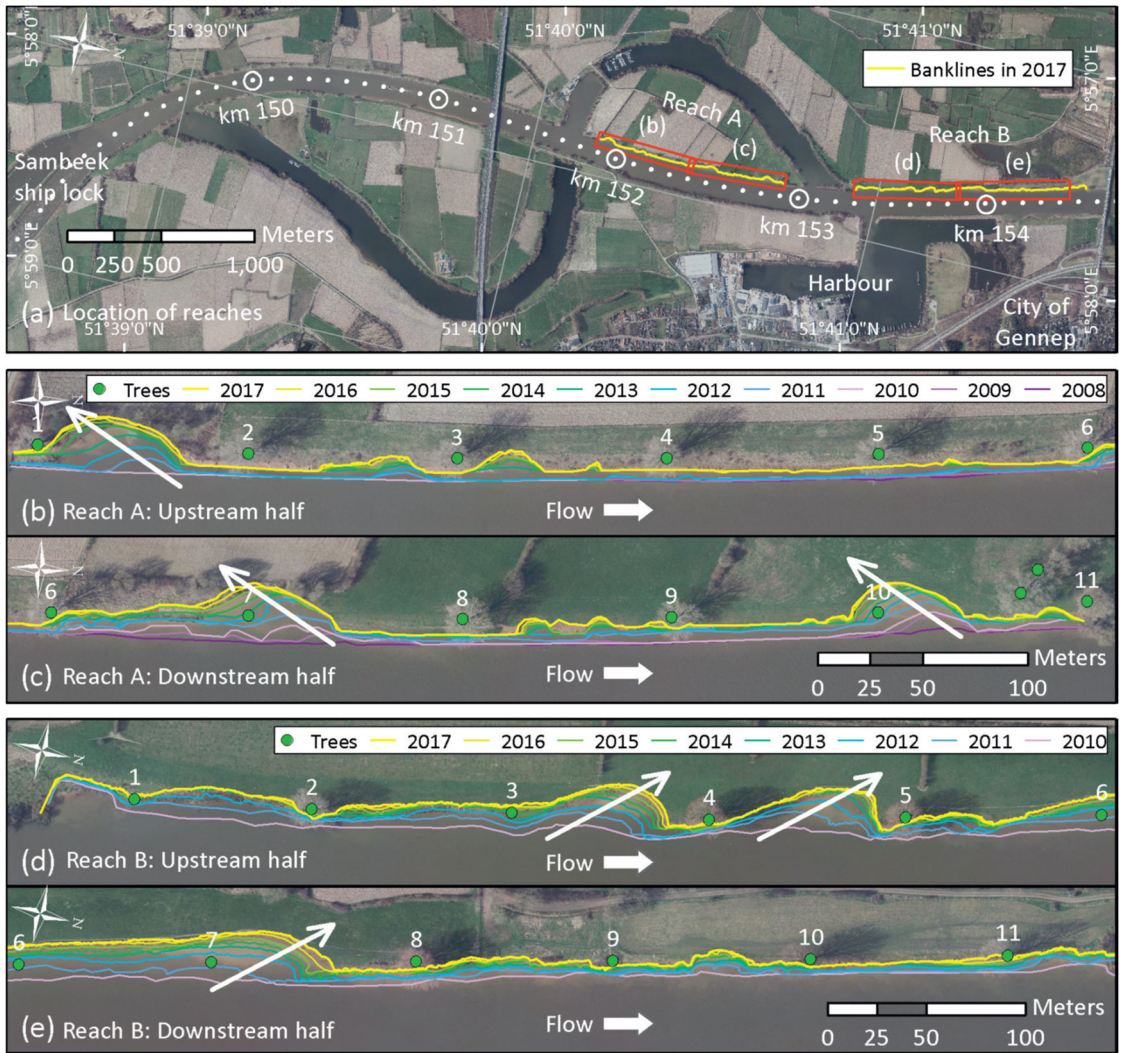


Figuur 2-8. Erosie van een Maasoever ter hoogte van rivierkilometer 180.46 (Neerloon). Hierbij is hoge afzetting van het geërodeerde oevermateriaal zichtbaar. Bron: Duró (2020, Fig. 5.8)

In het langsprofiel van een rivier kunnen meerdere erosiekommen met bijbehorende sedimentatie achter elkaar voorkomen, bijvoorbeeld waar kribben of oeverbeschermingen zijn verwijderd en de bakenbomen zijn achtergebleven (Van der Deijl, 2022). Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 2-9. Voorkomen van meerdere afzettingen van geërodeerd oevermateriaal in de vaarweg bij Genneep. Legenda toont bodemverandering 2010-2011 in cm. Bron: Sieben, 2019: Figuur 3-b. Figuur 2-9 en Figuur 2-10.



Figuur 2-9 Voorkomen van meerdere afzettingen van geërodeerd oevermateriaal in de vaarweg bij Genneep. Legenda toont bodemverandering 2010-2011 in cm. Bron: Sieben, 2019: Figuur 3-b.



Figuur 2-10. Evolutie van de oeverlijn bij Gennepe. Bron: Duró (2020, Fig. 3.2).

3 Methode

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de impact van onregelmatige oevers op het stroombeeld en de verschillende normaliserende rivierfuncties wordt beoordeeld. De focus ligt op eerste-orde effecten. In §3.3 wordt ingegaan op de benodigde D-HYDRO simulaties.

3.1 Locaties

Om de impact van onregelmatige oevers te kunnen evalueren zijn twee locaties uitgekozen in de Maas. Omdat ook wordt gekeken naar een hoogwatersituatie waarbij de uiterwaarden overstromen, moeten de uiterwaarden op de gekozen locaties redelijk representatief zijn, dus niet heel smal of breed. Op de Maas zijn de uiterwaarden gemiddeld enkele honderden meters breed. Daarnaast wordt gekeken naar zowel een locatie in het gestuwde als het ongestuwde deel van de Maas.

1. Gestuwd (pand Lith-Grave):

Rond rkm 187-188 bestaat er een redelijk lang stuk rivier waar de oevers nog de normaallijnen volgen (Figuur 3-1). Dit gedeelte ligt tussen de NVO's van de Niftrikse waarden (183.05-183.57, 183.57-184.20) en De Waarden (192.50-193.10), dus hier een onregelmatige oever aanleggen (tussen 2 bakenbomen) is niet onlogisch. De bomen staan op een afstand van 100 m van elkaar. De totale breedte van de uiterwaarden is hier ongeveer 700 m.

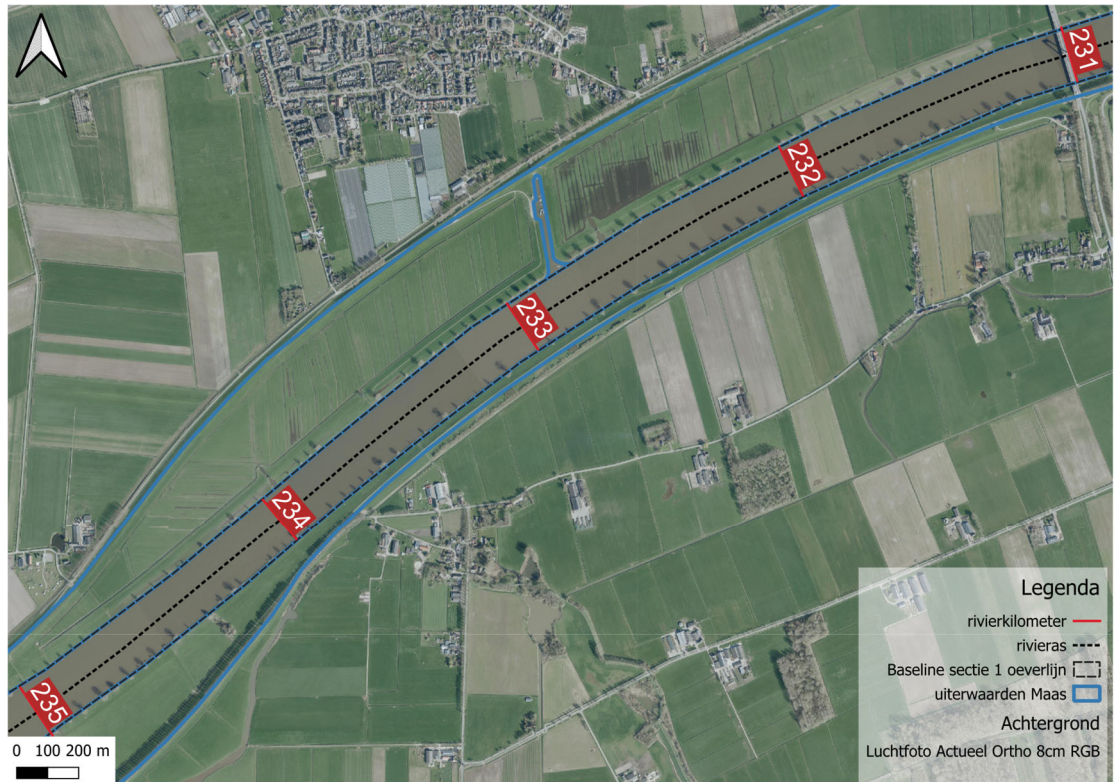


Figuur 3-1. Locatie 1. Stroming is van rechts naar links.

2. Ongestuwd:

Tussen rkm 231 en 234, benedenstrooms van stuw Lith, bestaat een redelijk recht stuk rivier en zijn er geen onregelmatige oevers (Figuur 3-2). De bakenbomen staan op een afstand van ongeveer 60 m van elkaar.

De uiterwaard is redelijk smal aan de zuidkant. Aan de noordkant is de uiterwaard breder: ongeveer 300-350 m breed. De onregelmatige oever kan dus het best aan de noordkant worden geïmplementeerd.



Figuur 3-2. Locatie 2. Strooming is van rechts naar links.

Kribben:

Iets verder bovenstrooms van locatie 2, tussen rkm 222-226, bevindt zich een traject met kribben. Dit traject kan gebruikt worden om mee te vergelijken en de resultaten in context te plaatsen. Kribben vormen namelijk ook grilligheid in de oeverlijn maar zijn geen knelpunt voor de normaliserende rivierfuncties.

De kribben liggen op een afstand van 90-110 m van elkaar en de oevererosie ertussen is ongeveer 25 tot 50 m breed. Dit komt goed overeen met de onregelmatige oevers die zijn geïmplementeerd.

In werkelijkheid wordt dit traject beïnvloed door getij (benedenstrooms van stuw Lith), wat de analyse lastiger zou maken. Echter wordt in het Maas-model standaard niet met getij gerekend, maar met vaste waterstanden per afvoer (Qh-relatie gebaseerd op maximaal getij), wat de analyse vereenvoudigt.



Figuur 3-3. Traject met kribben in de Maas waarmee wordt vergeleken. Strooming is van rechts naar links.

3.2 Functie-eisen

In Tabel 3.1 is een overzicht opgenomen van de verschillende functie-eisen en waarop deze beoordeeld worden in dit rapport. Het betreft vijf eisen die zijn onderverdeeld in meerdere sub-eisen. Deze eisen zijn voornamelijk gebaseerd op het Rivierkunding Beoordelingskader (RBK). Dit kader geeft naast de beoordelingseisen ook aan voor welke condities dit moet worden gedaan, wat leidt tot het doorrekenen van verschillende scenario's met verschillende afvoer. De wijze waarop beoordeeld wordt is in de volgende secties nader uitgewerkt.

Tabel 3.1. Overzicht van de verschillende functie-eisen en hoe deze beoordeeld worden.

Nr	Functie-eis		Beoordeling	Afvoer(som)	Sectie
1	Afvoer van water	Hoogwater	< 1 mm verhoging v/d waterstand	SD4100	3.2.1.1
		Laagwater	Géén verlaging v/d waterstand	S50	3.2.1.2
2	Afvoer van ijs	Getal van Froude	Géén verlaging tot < 0.08 in stroomvoerend profiel	1500 tot 2800 m ³ /s: S1700 S2100 S2500	3.2.2
		Stroomsnelheidsgradiënten	Kwalitatief (ten opzichte van kribben)		
3	Sedimenttransport en morfologie		Kwalitatief ten opzichte van kribben (met D-FAST-MI)	S1300 S1700 S2100 S2500 SD3200	3.2.3

Nr	Functie-eis	Beoordeling	Afvoer(som)	Sectie	
4	Vlot en veilig varen	Bevaarbaarheid	Géén verkleining van de minimale vaargeulafmetingen (diepte + breedte)	Afvoer bij MLW/OLW; geen hydrodynamische som	3.2.4.1
		Bestuurbaarheid	U _{repr} < 0.3 m/s voor Q _{repr} < 50 m ³ /s U _{repr} < 0.15 m/s voor Q _{repr} > 50 m ³ /s	S1700 S2100	3.2.4.2

3.2.1 Afvoer van water

3.2.1.1 Hoogwater

De beoordelingsgrens voor hoogwaterstanden is een *verhoging van 1 mm* bij de Hoogwaterreferentie¹ op de as van de rivier (RBK H1). De maatgevende situatie is hier als er sedimentatie aan de teen plaatsvindt, want dan is het profiel (onder water) kleiner en de verwachte waterstand hoger, al kan dit ook (gedeeltelijk) opgeheven worden door het ruimere profiel erboven. Het bijbehorende afvoerniveau voor de gekozen locaties (zie §3.1) is 4100 m³/s (Tabel 3.2).

Tabel 3.2. Hoogwaterreferentie voor de verschillende riviertakken. Bron: RBK, tabel 2a.

Watersysteem	Herhalingstijd [jaar]	Afvoerniveau [m ³ /s]
Rijntakken (ON)	~ 10.000 jaar	16.000 m ³ /s
Maasvallei (ZN)	~ 100 jaar	3.200 m ³ /s
Bedijkte Maas (ZN)	~ 3.000 jaar	4.100 m ³ /s
Rijnmaasmonding (WNZ)	Lokale ondergrensnorm(en)	Lokaal te bepalen met methode CIP
IJsseldelta, Zwarte Water en Zwarte Meer (ON/MN)	Lokale ondergrensnorm(en)	Lokaal te bepalen met methode CIP

3.2.1.2 Laagwater

Eén van de beleidskeuzes in IRM is het stoppen van de bodemerrosie en daarmee *verdere verlaging van laagwaterstanden*. Voor de Rijntakken geldt dat de OLR niet mag worden verlaagd. In de grensregio met Duitsland op de Boven-Rijn geldt dat de gemiddelde waterstand niet mag worden verlaagd.

Voor de Maas geldt voor scheepvaart het Maatgevend Laag Water (MLW), wat de waterstand is die 1% v/d tijd onderschreden wordt. In gestuwde trajecten is dit ongeveer gelijk aan het stuwpeil. De bijbehorende afvoer is niet precies bekend vanuit de Betrekkingslijnen Maas 2023-2024 maar is in ieder geval lager dan 80 m³/s bij St. Pieter. Ten behoeve van de effectbeoordeling is ervoor gekozen om de laagste afvoer die voorkomt in de standaardsommen door te rekenen: ~70 m³/s bij Lixhe (S50). We duiken niet in detail in de laagwatereffecten, maar signaleren alleen als er eventueel een kans bestaat op verlaging van de waterstand in dit afvoerbereik en welke orde-grootte dit betreft.

¹ “Er is een hoogwaterreferentie opgesteld om de invloed van maatregelen bij de verschillende afvoerniveaus op een praktische manier te benaderen en om te voorkomen dat er onnodig veel berekeningen moeten worden uitgevoerd.” (RBK, Inleiding)

3.2.2 Afvoer van ijs

De kans dat ijs blijft hangen vanwege een variatie in de breedte/het profiel (dus vanwege verlaging stroomsnelheid) kan niet op zichzelf kwantitatief beoordeeld worden omdat niet onderzocht is bij welke variatie/afname van de stroomsnelheid dit gebeurt. Mogelijk zorgt een verlaging van het Froude-getal tot een waarde onder de 0,08 voor een hogere kans op een ijssdam, maar dit is geen harde grenswaarde:

“De volgende ontwerpprincipes zijn relevant voor een goede afvoer van ijs” (RBK 1.5):

- “In het stroomvoerend profiel mag de ingreep voor afvoeren vanaf bankfull tot grofweg 75 jaar herhalingsstijd (Lobith van 4000 tot 8000 m³/s, Borgharen van 1500 tot 2800 m³/s), ook in scenario’s met benedenstrooms ijsdek, de Froude getallen niet verlagen tot onder 0,08, om de kans op ontwikkeling van ijssdammes niet te verhogen)”

Voor deze eis wordt het effect van een onregelmatige oever op het Froude-getal en gradiënten in stroomsnelheden vergeleken met het effect van een krib(vak). De gradiënten zijn in langsrichting bepaald voor iedere rekencel langs de oeverlijn uit Baseline (sectie 1) ter hoogte van de geïmplementeerde grilligheid. Hierbij wordt de RBK-aanpak niet exact gevolgd (correcties benedenstrooms ijsdek, correcties bodemveranderingen), maar wel de hoofdlijnen ervan.

3.2.3 Sedimenttransport en morfologie

In het RBK (Tabel 5) staat het volgende over de beoordeling van morfologische effecten (in de Maas):

“Bij erosie:

- geen verlaging zomerbed beneden de minimale bodemligging t.a.v. erosie en infrastructuur (o.a. kabels, leidingen en waterkeringen);

Bij sedimentatie:

- geen vermindering van vaargeulafmetingen);
- geen verhoging van de maatgevende waterstanden op lange termijn;

Generiek:

- beperkte hinder door baggeren en/of terugstorten;
- behouden vlotheid en veiligheid scheepvaartverkeer;
- geen onacceptabele sedimentatie of terugschrijdende erosie”

Gezien bovenstaande eisen, is de impact van een onregelmatige oever op sedimenttransport en morfologie kwalitatief en met ‘expert judgement’ gedaan.

Op basis van de gemodelleerde waterstroming is eerst een inschatting gemaakt van het initiële effect van de onregelmatige oevers op sedimenttransport en gradiënten hierin. Dit wordt ook vergeleken met het effect van de situatie met kribben. Naast het bepalen van de initiële respons is ook D-FAST-MI gebruikt om een evenwichtssituatie te voorspellen.

3.2.4 Vlot en veilig varen

Eisen aan vlot en veilig varen betreffen de bevaar- en bestuurbaarheid die volgen uit het RBK en IRM. Dit zijn eisen aan (1) het dwarsprofiel en (2) de dwarsstroming.

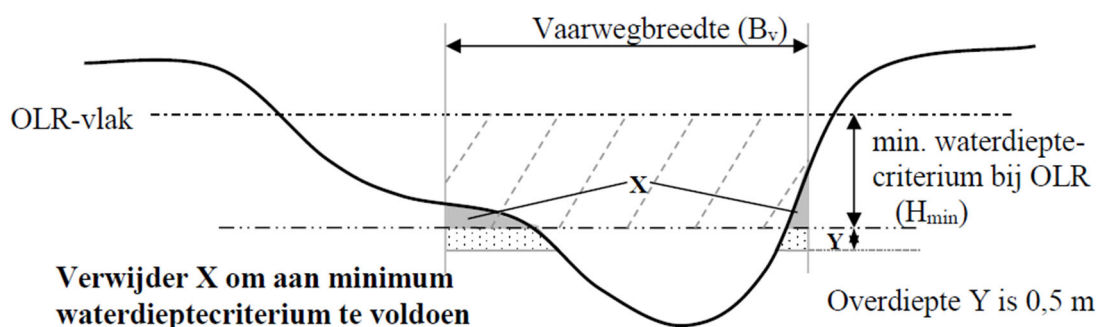
3.2.4.1 Bevaarbaarheid

In IRM is de beleidskeuze vastgelegd om de baggerinspanningen zoveel mogelijk te beperken: “Het streven is dat het doorgaand sedimenttransport wordt behouden en de rivieren zodanig ingericht worden dat de baggerinspanning voor de instandhouding van de vaarweg zo beperkt mogelijk is.” (IRM Ontwerp Programma). In het RBK zijn er ook duidelijke afspraken over de minimale waterdiepte in de vaargeul: “De minimale waterdiepte in de vaargeul bij OLR, OLW of stuwpeil mag als gevolg van ingrepen niet kleiner worden dan [de] gegarandeerde waarde. Op plaatsen waar de rivierbodem nu al hoger ligt dan de gegarandeerde waterdiepte toelaat mag de rivierbodem niet hoger komen.” (RBK6 bijlage 6).

Om de eis uit het RBK te beoordelen is niet per se een hydrodynamische simulatie nodig. Het effect op de minimale waterdiepte kan simpelweg worden afgeleid uit het dwarsprofiel (zie ter illustratie Figuur 3-4). De MLW en het vaarwegmodel / de eis is ter hoogte van de gekozen locaties bekend (pers. comm. Arjan Sieben; Tabel 3.3). Voor de Maas wordt enkel in het vaarwegprofiel buiten de taluds gekeken naar de beschikbare diepte (pers. comm. Eveline van der Deijl).

Tabel 3.3. MLW/OLW en vaarwegcriteria voor de gekozen locaties.

Locatie	MLW/OLW (m+NAP)	Min. waterdieptecriterium (m)	Vaarwegmodel / eis (m+NAP)
1	4,6	4,9	-0,3
2	0,2	4,4	-4,2



Figuur 3-4. Voorbeeld toets minimum waterdiepte in dwarsdoorsnede vaarweg. Bron: RBK, bijlage 8, figuur 1.

3.2.4.2 Bestuurbaarheid

Een eis voor de bestuurbaarheid is dat de dwarsstroming niet te groot mag worden ter hoogte van de bakenlijn. Hiervoor zijn hydrodynamische simulaties nodig: “Stroombeelden en (dwars)stroomsnelheden zullen in kaart gebracht moeten worden voor een aantal kenmerkende afvoeren. Welke afvoeren dat zijn dient vastgesteld te worden in overleg met de rivierbeheerder. Voor de Maas is dat in ieder geval bij een afvoer van 2000 m³/s. De initiatiefnemer dient aan te tonen dat de gebruikte afvoer(en) voor de betreffende ingreep representatief is.” (RBK Deel C) “Of het moet aantoonbaar zijn dat de toename padbreedte schip t.g.v. dwarsstroom maximaal ½B is” (RBK, Tabel 4-7). Om de toename in padbreedte af te leiden zijn aanvullende scheepssimulaties nodig, daarom is ervoor gekozen om de beoordeling te beperken tot de kwantitatieve dwarsstroomsnelheid op basis van de D-HYDRO modelresultaten.

De bepaling en presentatie van de dwarsstroming bestaat uit 3 stappen (RBK Bijlage 7). De 1^e stap is het bepalen en beoordelen van de representatieve dwarsstroomsnelheid.

“Langs de Maas (en sommige delen van de Rijntakken en Rijn-Maasmonding) is doorgaans sprake van gestrekte oevers en valt de bakenlijn vaak samen met de oeverzone vanwege het ontbreken van kribben. Langs gestrekte oevers is de waterdiepte (en de in de bakenlijn berekende dwarsstroomsnelheid) daarom niet representatief voor de vaarweg. In geval van gestrekte oevers mag daarom worden gewerkt met een zogenaamde representatieve dwarsstroomsnelheid. Voor situaties met een gestrekte oever dient de representatieve dwarsstroomsnelheid per rekencel als volgt berekend te worden:” (RBK Bijlage 7).

$$u_{repr} = Q_{bakenlijn} / (L_{rekencel} * \max(H;D))$$

- u_{repr} = representatieve dwarsstroomsnelheid per rekencel [m/s]
- $Q_{bakenlijn}$ = dwarsstroomdebiet in de rekencel ter hoogte van de bakenlijn uit het 2D-model [m³/s]
- $L_{rekencel}$ = lengte van de rekencel langs de *bakenlijn* in het 2D-model [m]
- H = waterdiepte ter hoogte van de bakenlijn voor de betreffende rekencel [m]
- D = diepgang van een representatief schip [m], zie RBK Bijlage 7, Tabel 1

“Presenteer vervolgens in een grafiek de (representatieve) dwarsstroomcomponent (in m/s) haaks op de linker- en rechterrاند van de *vaarweg* per rekencel in de lengterichting van de rivier en gerelateerd aan de rivierkilometertelling

- Eenmaal voor de referentiesituatie
- Eenmaal voor de situatie met de ingreep

Kijk vervolgens waar de dwarsstroomsnelheden beïnvloed worden door de ingreep.

- a. Indien voor alle veranderde rekencellen geldt $u < 0,15$ m/s: dwarsstroming OK.
- b. Indien voor een of meerdere veranderde rekencellen geldt $u > 0,15$ m/s: ga naar stap 2.
- c. In veel gevallen zal al op voorhand duidelijk zijn dat het dwarsstroomdebiet groter is dan 50 m³/s. De rekenexercitie in Stap 2 kan dan worden overgeslagen. Ga in dat geval naar Stap 3.”

Stap 2 is het bepalen van het dwarsstroomdebiet ter hoogte van de ingreep (zie RBK Bijlage 7). Stap 3 is het beoordelen van de berekende dwarsstroming:

- “Indien $Q > 50$ m³/s: Maximaal toelaatbare dwarsstroming is 0,15 m/s.
- Indien $Q < 50$ m³/s: Maximaal toelaatbare dwarsstroming is 0,30 m/s.

Indien de dwarsstroming in de referentie situatie al boven de normen zit, dan geldt dat de ingreep geen toename van de dwarsstroming mag veroorzaken.” (RBK Bijlage 7)

Bij RWS-ZN/Maas is het normprofiel bepalend voor de RBK-toets op dwarsstroming, en bij RWS-ON/Rijntakken zijn dit de normaallijnen (pers. comm. Arjan Sieben). Het normprofiel is aangeleverd door RWS-ZN en bestaat uit 2 lijnen aan beide zijden van de rivier. Dit zijn waarschijnlijk de randen van het vaarwegtalud; het gaat om de buitenste lijn. Die lijn wordt in KRW projecten (WAQUA tijdperk) gebruikt om dwarsstroming te beoordelen (pers. comm. Arjan Sieben). De bestuurbaarheid is enkel voor locatie 1 beoordeeld omdat het normprofiel tot rkm 226,5 loopt. Voor verdere details over de beoordeling wordt verwezen naar het RBK.

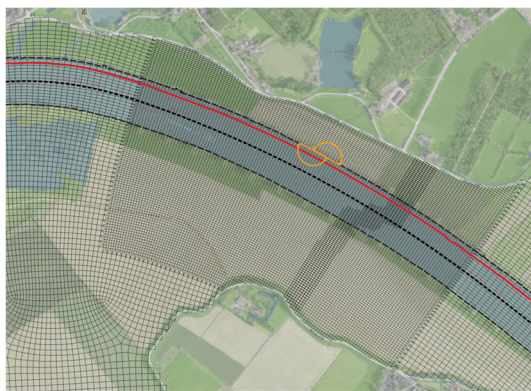
3.3 D-HYDRO simulaties

Met een hydrodynamisch, 2D D-HYDRO model kan het effect van ruimtelijke variaties in oevers op waterstanden en dwarsstroming inzichtelijk worden gemaakt, door een referentiesituatie met rechte oever te vergelijken met een aangepaste, ruimtelijk variërende oever.

3.3.1 Model en aanpassingen

3.3.1.1 Roosterverfijning

Er is een verfijnd beno22-deelmodel van de Maas gebruikt (deelmodel C; dflowfm2d-maas-beno22_6_20m_km144_247-v2a, D-HYDRO 2024.03). De originele resolutie hiervan is 20 m. Er zijn minstens 10 cellen nodig in de langsrichting van een onregelmatige oever om veranderingen in het stroombeeld numeriek op te lossen: voor een onregelmatigheid van 100 m lang betekent dit dus een benodigde resolutie van 10 m. Het model is dus voor deze studie eerst lokaal verfijnd naar deze resolutie (Figuur 3-5). Het model heeft een onzekerheid van enkele centimeters tot een decimeter voor absolute waterstanden (Rijkswaterstaat & Deltares, 2024).



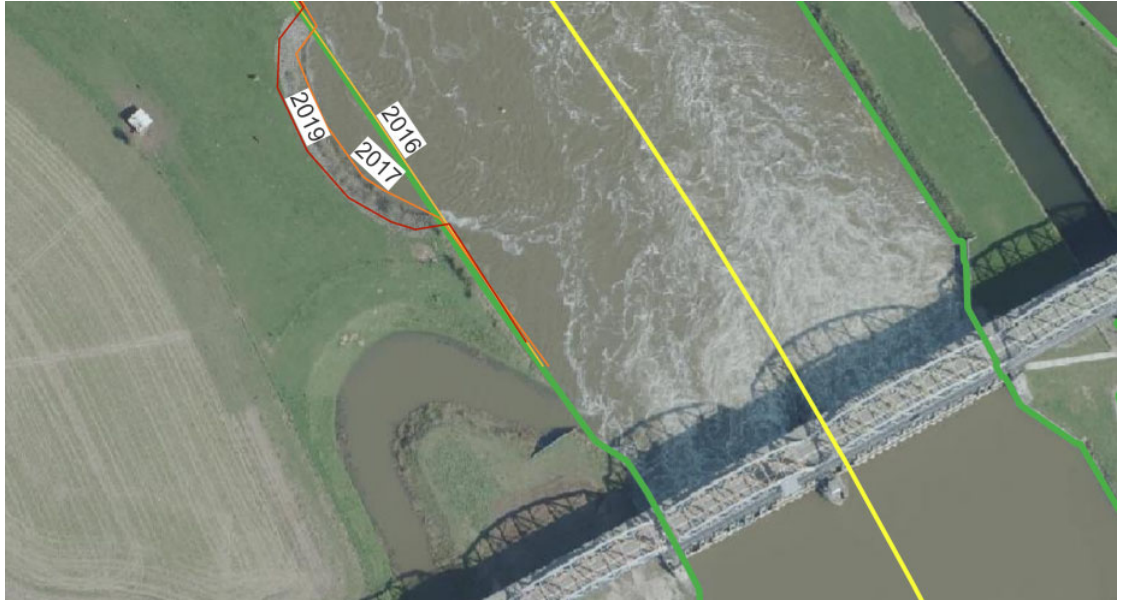
Figuur 3-5. Lokale roosterverfijning rondom de onregelmatige oever.

3.3.1.2 Implementatie onregelmatige oevers

Na de roosterverfijning is er één onregelmatigheid van 100 m lang als een geïdealiseerde/schematische maatregel in het model geïmplementeerd. De typische bakenboom-afstand op de Maas en kribafstand op de Maas en Rijntakken is 100 meter. De oevererosie is geïmplementeerd door de bodem uniform omlaag te brengen. De sedimentatie bij de teen van de oever en op het oeverstrand is geïmplementeerd door parallel aan de erosie de bodem uniform omhoog te brengen, waarbij het sedimentatievolume gelijk staat aan het geërodeerde volume. Het uitgangspunt hierbij is dat de oever zich nog in een (dynamisch) tussenstadium naar een eindsituatie bevindt. In een evenwichtssituatie groeit de onregelmatigheid niet meer en is de sedimentatie door de rivier weer (deels) opgeruimd. Het effect van meerdere opeenvolgende onregelmatigheden kan analytisch worden berekend als een extrapolatie van de modelresultaten met één onregelmatigheid (pers. comm. Victor Chavarrias).

Om de grootte (de laterale breedte waarmee de erosiekom de uiterwaard in steekt) te bepalen van de gemodelleerde onregelmatigheid, kan deze worden gerelateerd aan de breedte van de vaargeul en de lengte van de onregelmatigheid langs de rivier, zie ook Bijlage A. Voor de Maas kan de NVO nét benedenstrooms van stuw Grave (hectometerpunt 175.80) als aanvullend voorbeeld dienen (Figuur 3-6). Deze NVO heeft een aantal jaren de tijd gehad om te ontwikkelen en de erosiekom is 100 m lang. De erosiekom is maximaal ~25 m breed en de vaargeul is hier ~95 m breed.

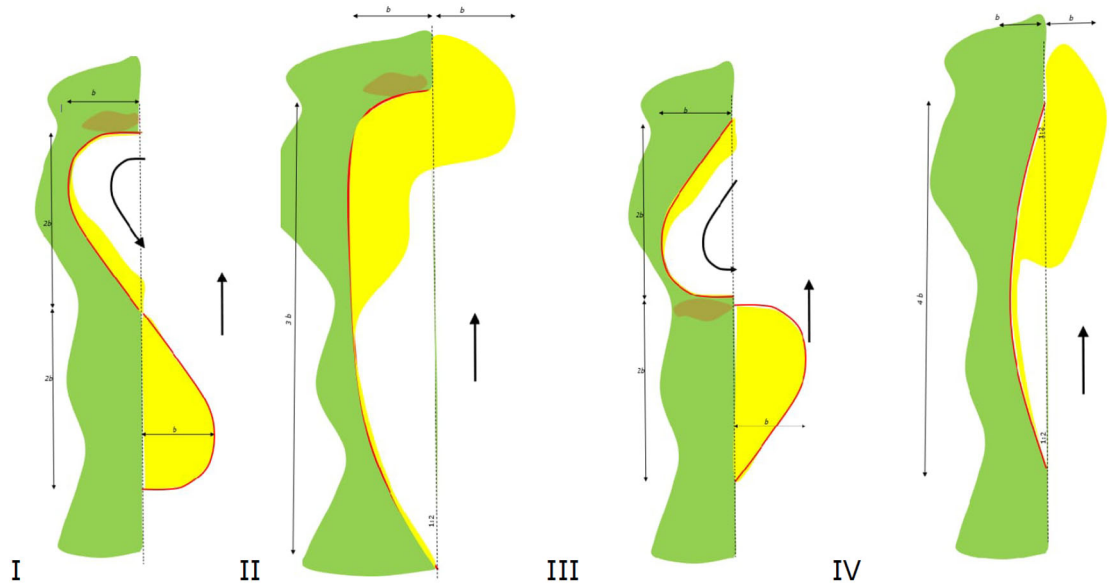
Er zijn geen voorbeelden bekend van bredere erosiekommen met dezelfde lengte, en een perfecte halve cirkel (waarbij breedte = 0,5 * lengte) lijkt in ieder geval de bovengrens. Een erosiekom van 35 m breed ($\pm 1/3^e$ vaargeul-breedte en $\pm 1/3^e$ lengte erosiekom) en 100 m lang lijkt dus een realistische, extreme waarde om in het Maasmodel te implementeren. Daarnaast zijn ook erosiekommen van 50 m breed geïmplementeerd om de bovengrens van de effecten te bepalen voor een erosie van 100 m lang. De erosiekom van 35 m breed is qua oppervlak twee keer zo klein als de erosiekom van 50 m breed.



Figuur 3-6. Erosiekom bij stuw Grave (hectometerpunt 175.80). Gele lijn: rivieras, groene lijn: normaallijn.

Het effect van verschillende vormen van erosie en sedimentatie is doorgerekend op twee locaties: een gestuwd en ongestuwd traject. Voor de geometrie van de geërodeerde oevers zijn drie varianten doorgerekend op basis van Figuur 3-7:

- 1 Symmetrische erosie: halve ellips (type IV).
- 2 Onregelmatige, asymmetrische erosie: extreme situatie met een rechte hoek aan de bovenstroomse kant van de erosiekom (type III maar zonder retourstroming).
- 3 Onregelmatige, asymmetrische erosie met retourstroming: extreme situatie met een rechte hoek aan de benedenstroomse kant van de erosiekom (type I). Deze is vooral ten behoeve van de stroombeelden aanvullend op de twee bovenstaande varianten onderzocht, maar wordt in de algemene effectbeoordeling op rivierfuncties alleen waar relevant meegenomen.



Figuur 3-7. Typen vorm van onregelmatige oevers (Bijlage A). I) een onregelmatigheid met één rechte hoek op de benedenstroomse aansluiting met de rechte oever en retourstroming in met name het benedenstroomse deel van de onregelmatigheid; II) een onregelmatigheid met één rechte hoek op de benedenstroomse aansluiting met de rechte oever zonder retourstroming; III) een onregelmatigheid met één rechte hoek op de bovenstroomse aansluiting met de rechte oever en retourstroming; IV) een onregelmatigheid zonder rechte hoeken op beide aansluitingen.

In de verticale richting is ervoor gekozen om 1 meter erosie en depositie toe te passen. Deze waarde is gebaseerd op wat er in het veld is geobserveerd (hoofdstuk 2). Hiermee is het volume aan erosie en depositie ook aan elkaar gelijk: elk 3927 m³ voor een symmetrische vorm en 3183 m³ voor een asymmetrische vorm van 50 m breed. De asymmetrische vorm is gebaseerd op Bijlage A en wordt gegeven door de vergelijking:

$$y = D * \sin\left(\frac{-\pi(x-L)}{L} + \frac{y}{D}\right) \text{ (asymmetrisch)}$$

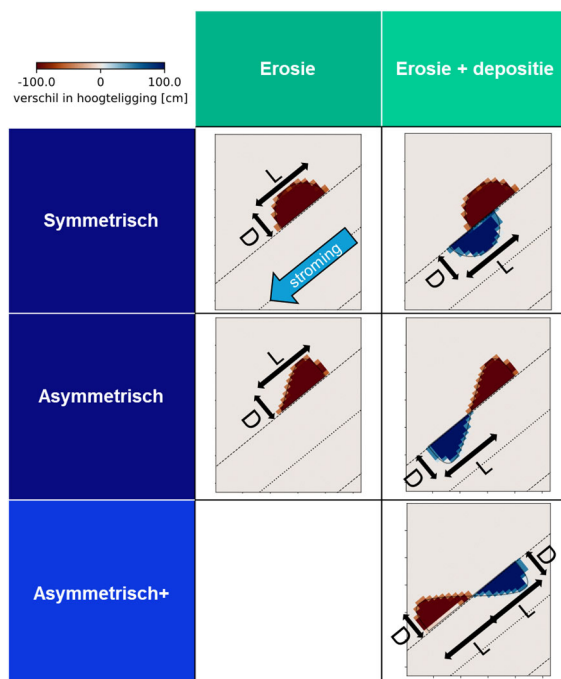
$$y = D * \sin\left(\frac{-\pi x}{L} - \frac{y}{D}\right) \text{ (asymmetrisch met retourstroming)}$$

waarbij:

D = (laterale) breedte van de erosiekom

L = longitudinale lengte van de erosiekom

In Figuur 3-8 is een voorbeeld gegeven van de verschillende varianten die zijn geïmplementeerd. Verderop in de tekst wordt dit omschreven als 'een typische (onregelmatige) NVO (in de Maas)', en de vorm 'asymmetrisch met retourstroming' wordt verder in dit rapport ook wel aangeduid als 'asymmetrisch+'. Ten opzichte van de kribvakken in het gekozen traject (§3.1) is D 1-2 maal zo groot en is L 0,9-1,1 maal zo groot. Ten opzichte van een kribvak van 25 m breed is de oppervlakte van een NVO van 50 m breed 4 keer zo groot.



Figuur 3-8. Voorbeeld van doorgerekende varianten van onregelmatige oevers (hier voor locatie 2 en $D = 50$ m, $L = 100$ m).

3.3.1.3 Schematisatie van kribben

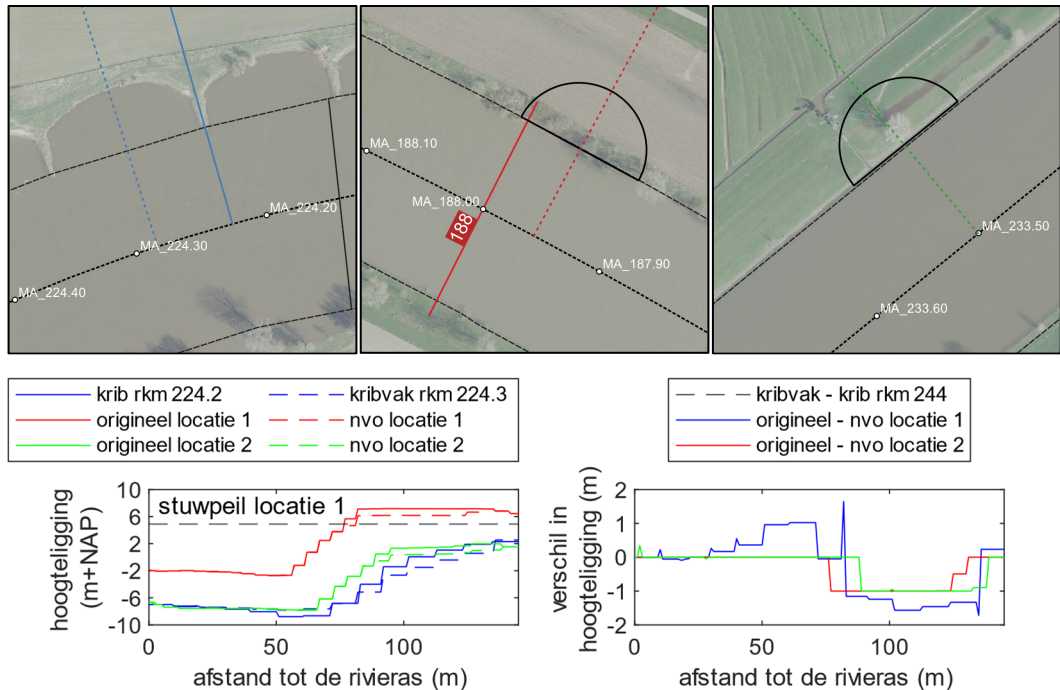
Een modelmatig verschil met de onregelmatige oevers is dat de kribben als overlaten in het model geschematiseerd. De kribben in het gekozen traject (§3.1) hebben een kruinhoogte rond 1,5 tot 2,5 m+NAP, een kruinbreedte van 2,5 m en een helling van 1:3.

3.3.1.4 Profielen

In Figuur 3-9 worden doorsnedes van de bodemligging dwars op de rivier getoond ter hoogte van het grootste kribvak in het gekozen traject (§3.1, rkm 224,3), de naastgelegen krib (rkm 224,2)² en de geïmplementeerde (symmetrische) NVO's. De uiterwaard op locatie 1 ligt ongeveer 9,9 m boven het diepste punt van het zomerbed, en die op locatie 2 ongeveer 9,3 m. Zoals geschematiseerd, is er sprake van maximaal 1 m verticale erosie ten opzichte van de originele bodemligging. Op locatie 1 maakt de NVO $50 \text{ m} / 607 \text{ m} = 8,2\%$ deel uit van het stroomvoerend profiel, en op locatie 2 is dit $50 \text{ m} / 550 \text{ m} = 9,1\%$.

Het kribvak steekt – net als de NVO's – ongeveer 50 m de uiterwaard in. Hier is sprake van 1 tot 2 m verticale erosie ten opzichte van de bodemligging van de bovenstroomse krib (Figuur 3-9). Dit is dus tot 1 m meer erosie dan voor de NVO's in het model is geschematiseerd. De erosie heeft ook over het hele oeverstrand plaatsgevonden, in tegenstelling tot de NVO's. De uiterwaard ligt bij de krib ongeveer 11 m boven het diepste punt van het zomerbed; dit is 1,1-1,7 m hoger dan bij de NVO's. Het talud van het (originele) oeverstrand is ongeveer 1:3,2 op locatie 1, 1:2,7 op locatie 2 en varieert van 1:3 tot 1:11 bij de krib. Met oevererosie wordt het talud iets minder steil: 1:3,6 op locatie 1 en 1:3 op locatie 2.

² De bodemligging is zonder het kriblichaam zelf. Dit kan als zodanig als de referentie worden beschouwd.



Figuur 3-9. Dwarsdoorsneden van de bodemligging ter hoogte van de krib en het naastgelegen kribvak bij rkm 224, en de onregelmatige oevers / NVO's.

3.3.2 Simulaties

Een overzicht van de mogelijke combinaties van de verschillende variaties (locatie, erosievorm, met/zonder depositie), exclusief variatie in afvoer en NVO-breedte, is gegeven in Tabel 3.4. Dit bevat de meeste oevervariaties in Bijlage A. Omdat de NVO op locatie 2 nog in het invloedsgebied bevindt van de NVO op locatie 1, zijn deze NVO's niet gecombineerd in één simulatie maar altijd in aparte simulaties doorgerekend. In alle simulaties is er steeds maar één variabele gewijzigd ten opzichte van de referentie.

Op basis van de functie-eisen zijn afvoersommen S50, S1300, S1700, S2100, S2500, SD3200 en SD4100 doorgerekend. Dit is niet voor alle mogelijke combinaties in Tabel 3.4 gedaan, maar dit is zo gekozen dat voor alle functie-eisen de minimaal benodigde modelresultaten beschikbaar zijn. Het is geverifieerd dat de simulaties aan het einde van de simulatieperiode stationair zijn, zowel qua waterstanden als stroomsnelheden. Voor locatie 1 zijn afvoeren vanaf S2100 zomerbedvullend, en voor locatie 2 is dit vanaf S1700 (Betrekkingslijnen Maas 2023-2024). Voor afvoeren van S1700 en hoger zijn alle stuwen gestreken en is locatie 1 dus ongestuwd.

Voor S50 is eerst een nieuwe bovenstroomse randvoorwaarde gegenereerd want deze was niet meegeleverd met het beno22-deelmodel. Dit is gedaan door de S50 lateralen bovenstrooms van deelmodel C op te tellen bij de afvoer bij Lixhe (Van der Deijl, 2023b). Dit leverde een bovenstroomse randvoorwaarde op van $Q = 96,16 \text{ m}^3/\text{s}$. Dit is vervolgens geverifieerd door een simulatie met deze randvoorwaarde te vergelijken met een tweede simulatie van S50 van het totaalmodel: de waterstanden waren bijna gelijk en eventuele verschillen konden worden verklaard door de verschillende rekenresoluties (40 m voor het totaalmodel, 20 m voor het beno22-deelmodel).

Tabel 3.4. Overzicht van mogelijke combinaties van variaties (exclusief variatie in afvoer).

Combinatie	Locatie	NVO-vorm	Met/zonder depositie
1	1 (gestuwd)	Symmetrisch	Met
2			Zonder
3		Asymmetrisch	Met
4			Zonder
5			Asymmetrisch+
6	2 (ongestuwd)	Symmetrisch	Met
7			Zonder
8		Asymmetrisch	Met
9			Zonder
10			Asymmetrisch+

Tabel 3.5. Overzicht van doorgerekende afvoeren. Bron: Factsheet D-Flow FM 2D deelmodellen Maas, versie 2024-01 * bron: D-FAST-MI.

Afvoer	Standaardsom Maas	Bovenstroomse randvoorwaarde bij Lixhe (max. afvoer) in m ³ /s
Hoog	SD4100	4088,48
Voor de beoordeling effecten morfologie en dwarsstroming*	SD3200	3192,77
	S2500	2496,46
	S2100	2100,28
	S1700	1709,25
	S1300	1311,37
Laag	S50	69,86

4 Algemeen stroombeeld

In dit hoofdstuk wordt het algemene stroombeeld behandeld, waarbij de focus ligt op het effect van een NVO met zowel erosie als depositie op het tweedimensionale stromingsveld (richting) en waterstandsveld. Meer gedetailleerde analyse van stroomsnelheden (magnitude en gradiënten), Froude-getallen, en NVO-geometrieën is te vinden in §5.2.

4.1 Stromingsveld

4.1.1 Locatie 1 en 2

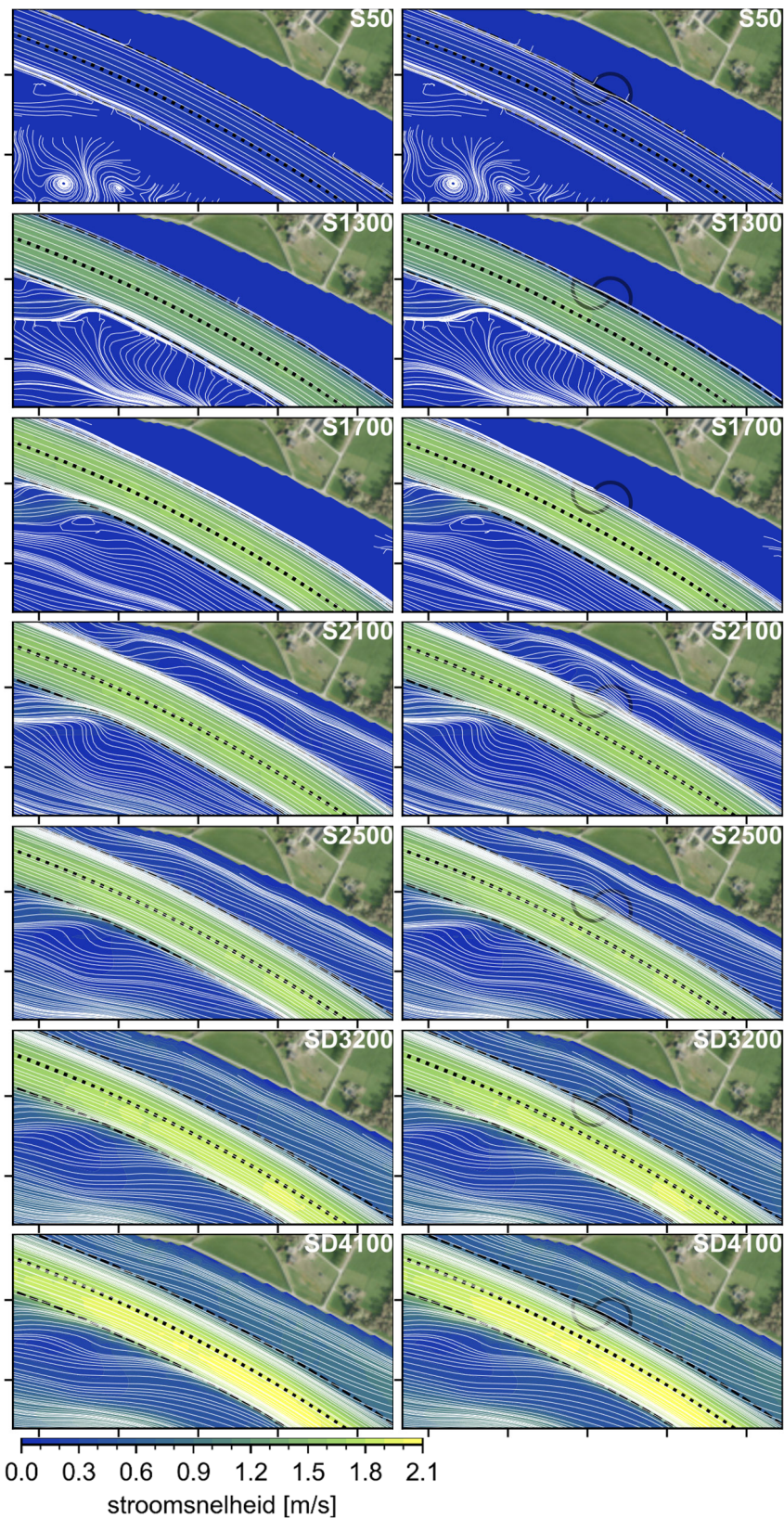
Ten eerste wordt duidelijk uit Figuur 4-1 dat op locatie 1 de rechteruiterwaard pas meestroomt vanaf de S2100 afvoersom en niet bij lagere afvoeren (geen stroombanen zichtbaar op die locatie bij lagere afvoeren). Voor lagere afvoeren heeft de symmetrische NVO van 50 m breed hier dus weinig effect op de algehele stroomrichting, al kan wel worden geobserveerd dat ter plekke van de NVO de stroming boven het zomerbed iets wordt afgebogen in de richting van de erosiekom.

In de S2100 afvoersom, waarbij de uiterwaard meestroomt, wordt de stroming in de uiterwaard door de NVO naar rechts afgebogen (Figuur 4-1). Er ontstaat een andere 'kromme' in de stroomlijnen en een andere concentratie van stroomsnelheden. Dit levert voortschrijdende erosie stroomafwaarts op. De afbuiging van de stroming begint direct stroomafwaarts van het meest bovenstroomse punt van de erosie(kom). De stroming sluit weer - bijna loodrecht - aan op de oever ongeveer 200 m benedenstrooms. Hierbij vindt er ook loslating plaats (grotere afstand tussen stroombanen). Er lijkt geen neer/circulatiecel te ontstaan, maar er is niet bepaald of dit wel gebeurt in het afvoerbereik tussen S1700 en S2100. Met een asymmetrische vorm vindt er enigszins meer afbuiging en loslating plaats (Bijlage B).

Voor hogere afvoeren wordt het effect op de stroomrichting beduidend kleiner (Figuur 4-1). Hoe hoger de afvoer, des te groter is de waterdiepte; de erosie en depositie van de NVO heeft dan minder impact op de stroming.

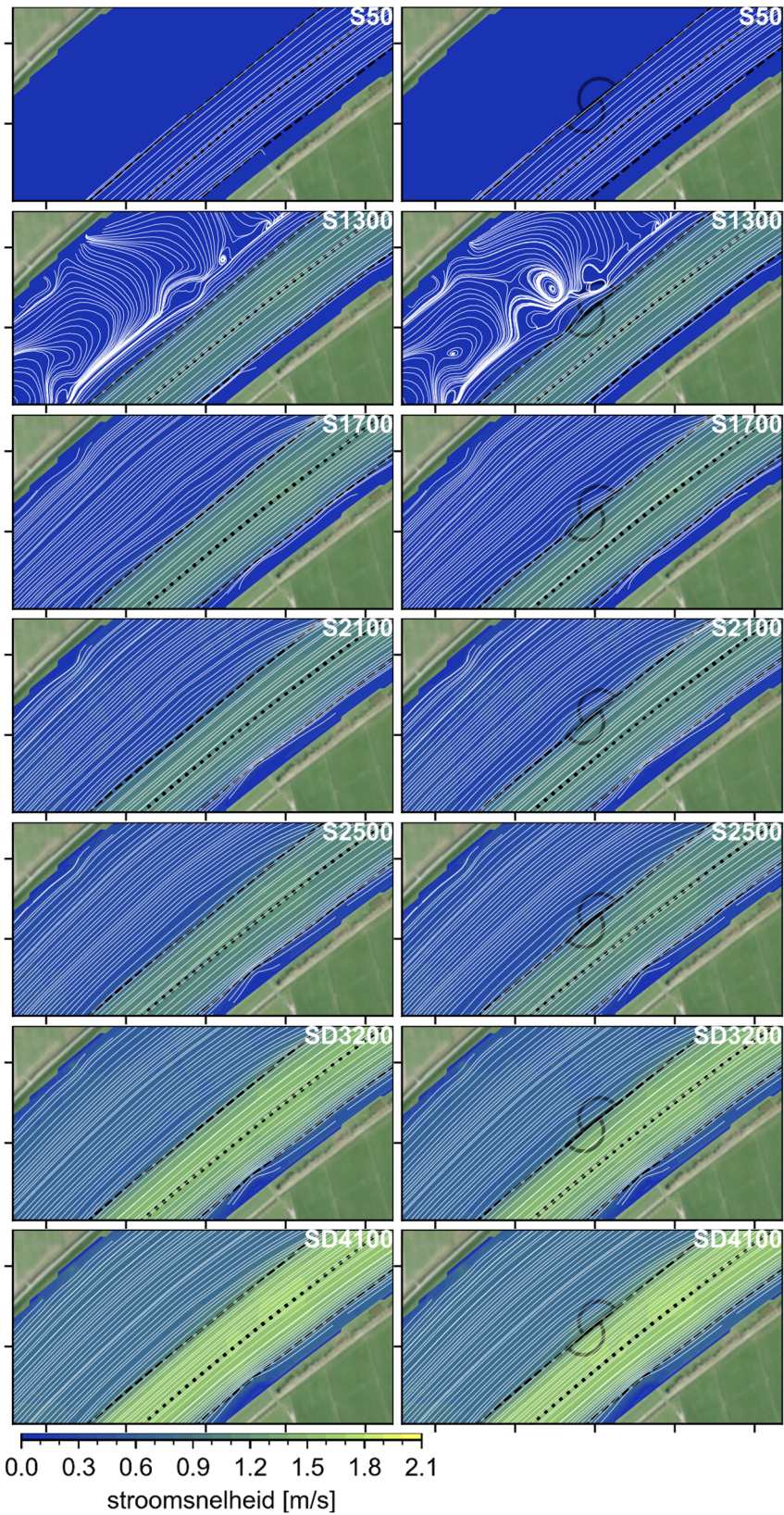
Voor locatie 2 stroomt de rechteruiterwaard mee vanaf S1700 (Figuur 4-2). Voor S1300 zijn er weliswaar stroomlijnen in deze uiterwaard te zien, maar de stroomsnelheid is hier veelal kleiner dan 1 mm/s. Ongeveer zo ver als dat de erosiekom de uiterwaard insteekt stroomt het nog wel echt mee in S1300 (5-10 cm/s). Het effect van de NVO op deze locatie in afvoersom S1300 is vergelijkbaar met het effect van de NVO op locatie 1 in afvoersom S2100. Een verschil is dat er op locatie 2 wél een (kleine) neer in de uiterwaard ontstaat, net stroomafwaarts van het meest bovenstroomse punt van de erosie(kom). Met een asymmetrische vorm met retourstroming vindt er sterkere neervorming boven de erosiekom plaats (Figuur 4-3).

Bij hogere afvoeren is de afbuiging en loslating van de stroming op locatie 2 veel minder sterk dan op locatie 1, wat waarschijnlijk te verklaren is door de bredere uiterwaard. Voor beide locaties blijkt tevens dat boven het (originele) zomerbed en in de tegenovergelegen uiterwaard de NVO van 50 m breed zeer weinig tot geen invloed heeft op de stroomrichting.

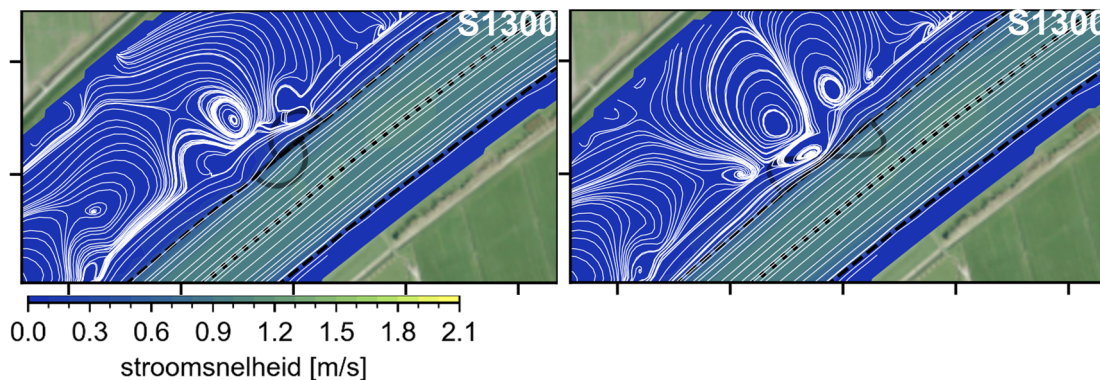


0.0 0.3 0.6 0.9 1.2 1.5 1.8 2.1
 stroomsnelheid [m/s]

Figuur 4-1. Stroombeelden met en zonder een symmetrische NVO van 50 m breed (erosie én depositie, locatie 1) voor verschillende afvoeren. De witte lijnen geven de stroomlijnen aan en de zwarte gestippelde lijn de rivieras. Stroming is van rechts naar links. Linker kolom: referentie, rechter kolom: NVO.



Figuur 4-2. Idem als Figuur 4-1, maar hier voor de NVO op locatie 2. Strooming is van rechtsboven naar linksonder.

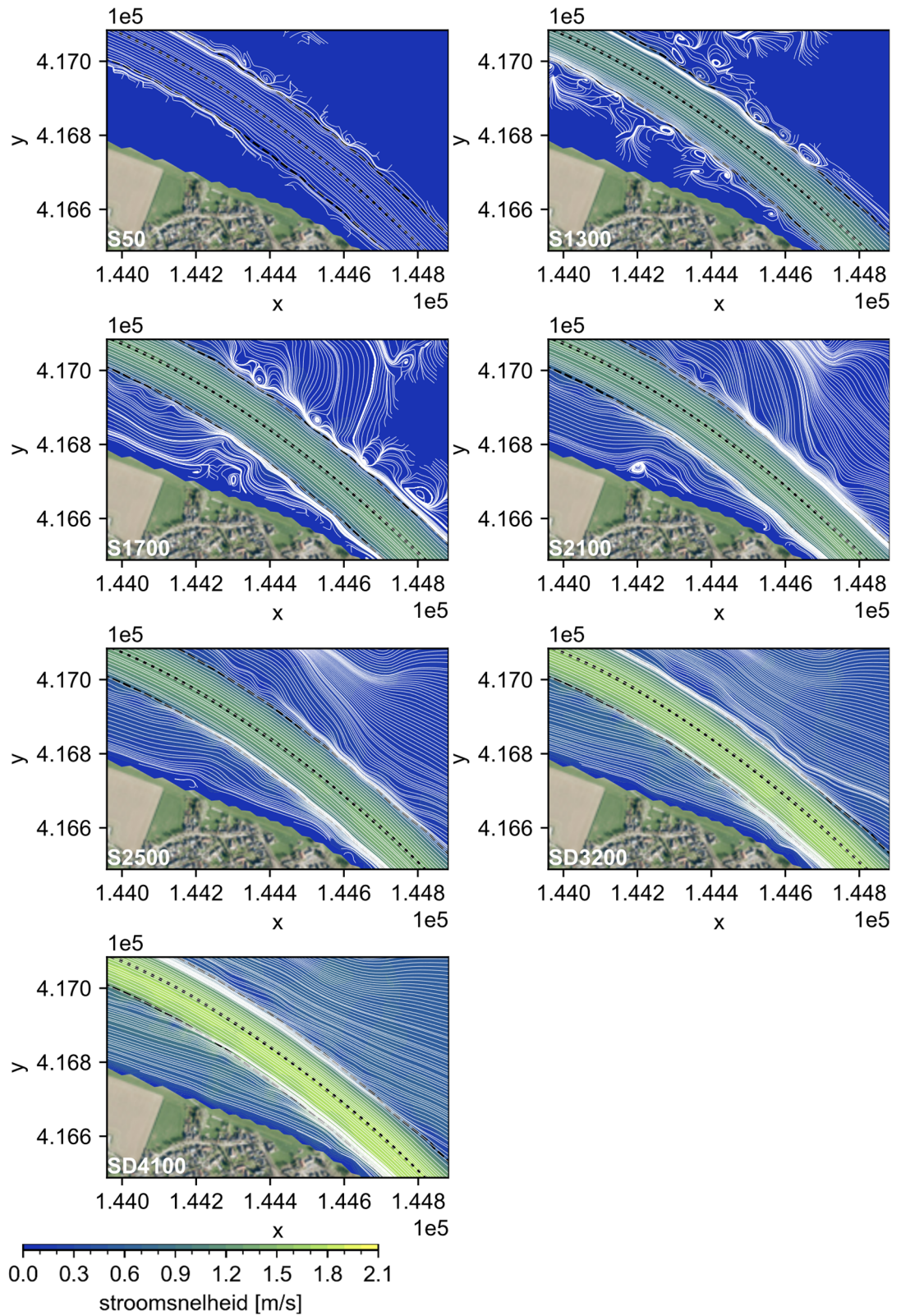


Figuur 4-3. Sterkere neervorming bij een NVO met een asymmetrische vorm met retourstroming (rechts) dan met een symmetrische vorm (links). Hoewel er in de uiterwaard stroomlijnen zichtbaar zijn, stroomt het maar zo ver als dat de erosiekom de uiterwaard insteekt echt mee (5-10 cm/s).

4.1.2 Kribben

Om de resultaten verder in context te plaatsen, kunnen deze worden vergeleken met stroombeelden in een traject met kribben (ter hoogte van rkm 222-223, Figuur 4-4). Hieruit komt duidelijke neervorming en grootschalige circulatie in de kribvakken naar voren voor afvoeren van S1700 en lager. Een logische verklaring voor de sterkere neervorming bij kribben dan bij de NVO's zou mogelijk het verschil kunnen zijn in de geometrie tussen kribvakken en NVO's. Kribben vormen een scherpere hoek met de hoofdgeul dan de 'harde' objecten die een NVO begrenzen (bv. bakbomen, zie ook hoofdstuk 2 en Bijlage A). De hoogte van de uiterwaard en de mate van verticale erosie zijn ook verschillend tussen de NVO en de kribben (§3.3.1.4). Ook zijn er in het traject met kribben meerdere erosiekommen achter elkaar, wat de loslating en neervorming kan versterken.

Voor afvoeren van S2100 en hoger hebben de kribben minder invloed op de stroomrichting en komt het effect overeen met dat van de NVO's in Figuur 4-1 en Figuur 4-2 bij zomerbedvullende rivierafvoer (S2100 voor locatie 1, S1700 voor locatie 2) en net daarboven.



Figuur 4-4. Stroombeelden voor een traject met kribben (rkm 222-223) voor verschillende afvoeren. De witte lijnen geven de stroomlijnen aan en de zwarte gestippelde lijn de rivieras. Strooming is van rechtsonder naar linksboven.

4.2 Waterstandsveld

Veranderingen in het stromingsveld door een NVO (§4.1) leiden tot veranderingen in het waterstandsveld. Dit wordt in Figuur 4-5 en Figuur 4-6 gepresenteerd voor NVO's met zowel erosie als depositie. Zonder depositie vormt een NVO een rivierverruiming, die direct tot verlaging van waterstanden bovenstrooms leidt.

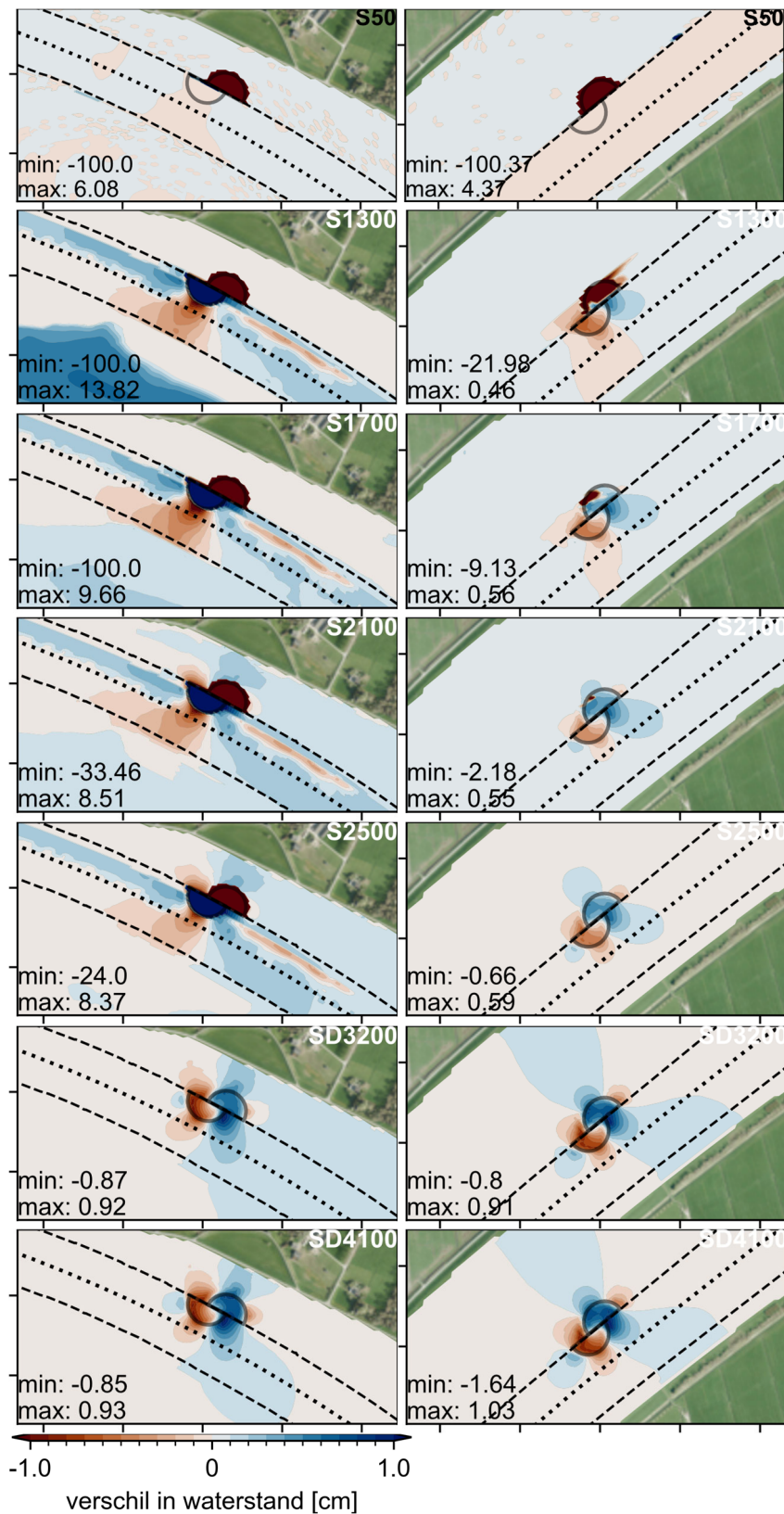
Voor S50 tot en met S1700 op locatie 1 en S50 op locatie 2 was er in de referentiesituatie geen water in het gebied van de erosiekom, waardoor het in Figuur 4-5 en Figuur 4-6 lijkt alsof de waterstand hier met 100 cm daalt (gelijk aan de verticale bodemerosie). In werkelijkheid vormt de erosiekom een nieuwe oeverlijn en komt er water te staan binnen de erosiekom, waar dit er eerder niet was. Voor S50, locatie 1 in Figuur 4-6 lijkt het ook alsof de waterstand met 100 cm stijgt langs de oeverlijn bij de depositie, maar dit is een onjuist gevolg van de hier toegepaste statistische Fourier analyse met droge rekencellen.

De grootste verschillen treden lokaal boven de erosie en depositie zelf op (Figuur 4-5, Figuur 4-6). Voor de hoge afvoeren (SD3200-SD4100) hebben deze een ordegrootte van maximaal 1 cm. Boven de depositie kan op locatie 1 tot en met S2500 lokaal een waterstandsverhoging van 6-14 cm worden geobserveerd. Voor S50 lijkt de depositie echter geen opstuwend effect te hebben, mogelijk doordat de stroomsnelheid te laag is (7-11 cm/s). Boven S2500 is er altijd een waterstandsverlaging boven de depositie. De schijnbare verlaging van de waterstand over een langer riviertraject op locatie 2 voor S50 is zodanig klein dat het waarschijnlijk binnen de modelonzekerheid valt.

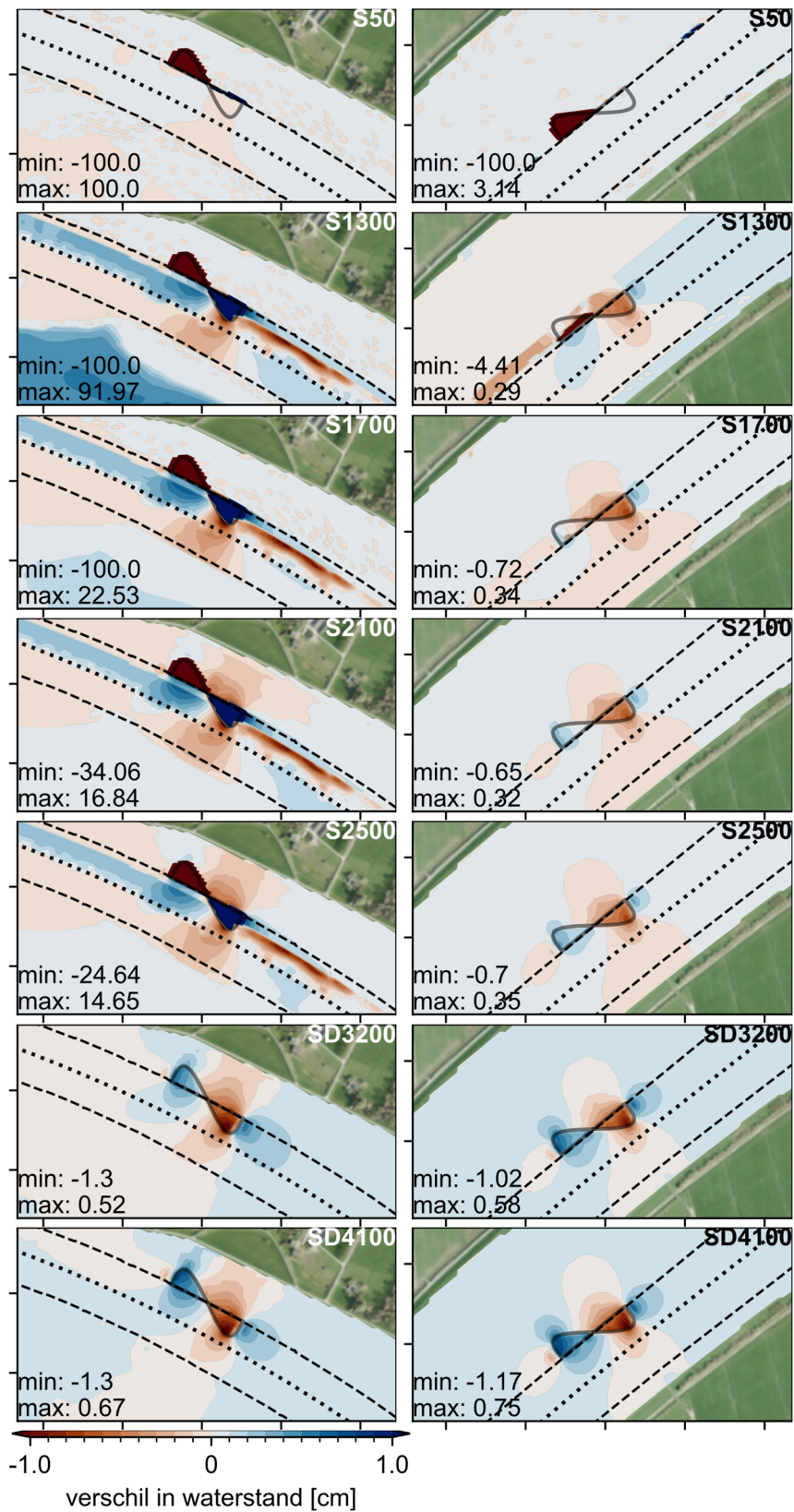
Het effect van de NVO straalt daarnaast longitudinaal (boven- en benedenstrooms, met een stuwkromme) én lateraal uit. Het effect neemt echter beduidend af met toenemende afstand tot de NVO, zoals al in §4.1 was gesignaleerd. Voor de hoogste afvoeren straalt het effect als 'vleugels' aan weerszijden van de NVO uit. Het is opmerkelijk dat het effect op locatie 2 veel meer geconcentreerd is rond de NVO dan op locatie 1. Aan de overkant van de NVO op locatie 1 is er een brede uiterwaard die al vanaf een relatief lage afvoer (tussen S50 en S1300, Figuur 4-1) begint mee te stromen. Bovenstroomse effecten die de NVO opwekt zullen hierdoor worden versterkt.

De patronen op locatie 2 veranderen geleidelijk tussen verschillende rivierafvoeren; op locatie 1 zijn de patronen ongeveer hetzelfde tot S2500 en vindt er een omslag plaats voor hogere afvoeren (Figuur 4-5, Figuur 4-6). De waterstand wordt ter plekke van de erosiekom verlaagd binnen een bepaald (randvoorwaardelijk) afvoerbereik en verhoogd daarbuiten; dit betreft S2500 en lager voor locatie 1, en het hele afvoerbereik voor locatie 2. Voor locatie 1 gaat dit voor S1300 en hoger ook gepaard met benedenstroomse waterstandsverlaging over de linkerhelft van het zomerbed. In de rechterhelft wordt de waterstand juist verhoogd. Ook is het opvallend dat – binnen bovenstaand afvoerbereik - de waterstand boven de depositie toeneemt op locatie 1, maar juist afneemt op locatie 2. Op locatie 2 is dit consistent tussen alle afvoeren. Dit kan verklaard worden doordat in het gestuwd bereik de waterstand (kunstmatig) rond het stuwpeil in stand wordt gehouden en hiervan vrij mag afwijken in het ongestuwd bereik. De omslag hangt waarschijnlijk ook samen met de afvoer waarbij de uiterwaarden volop meestromen.

Een asymmetrische NVO met retourstroming (Figuur 4-6) zorgt bij zomerbedvullende afvoer en daarboven voor iets meer waterstandsvaling boven de depositie dan een symmetrische NVO (Figuur 4-5). Voor afvoeren tot en met S2500 veroorzaakt deze variant ook iets sterkere benedenstroomse waterstandsvaling en -verhoging in de linker- en rechterhelft van het zomerbed, respectievelijk, dan de symmetrische vorm.



Figuur 4-5. Verschillen in waterstand door een symmetrische NVO van 50 m breed voor verschillende afvoeren (ten opzichte van de referentie). De kleurenschaal is beperkt tot ± 1 cm; het minimum en maximum van de data (in cm) is ook getoond. De gestippelde lijn is de rivieras, en de onderbroken lijnen de Baseline sectie 1 oeverlijnen. Linker kolom: locatie 1, rechter kolom: locatie 2.



Figuur 4-6. Idem als Figuur 4-5, maar hier voor een asymmetrische NVO met retourstroming.

4.3 Synthese

De verschillen in stroombeeldeffecten tussen de twee locaties kunnen verklaard worden aan de hand van verschillend waterstandsdynamiek, afvoermagnitude, en riviergeometrie. In een gestuwd traject wordt de waterstand over een langer traject kunstmatig rond het stuwpeil in stand gehouden, en in een ongestuwd traject kan deze vrij afwijken. Hierdoor is er minder waterstandsdynamiek aanwezig in een stuwband. Door dit verschil veranderen de patronen op locatie 2 geleidelijk tussen verschillende rivierafvoeren; op locatie 1 zijn de patronen ongeveer hetzelfde tot S2500 en vindt er een omslag plaats voor hogere afvoeren. Dit hangt waarschijnlijk ook samen met de afvoer waarbij de uiterwaarden volop meestromen. Ten tweede is voor dezelfde afvoer-randvoorwaarde de daadwerkelijke afvoer bij de NVO's verschillend. Ten derde is de breedte van de uiterwaard aan de NVO-zijde van invloed, wanneer die meestroomt. De uiterwaardbreedte is kleiner op locatie 1, wat ertoe leidt dat een verandering in het oeverprofiel een sterker effect heeft op de stroming bij afvoeren die hoger zijn dan zomerbedvullend.

Generaliserende uitspraken over de impact van een NVO op het stroombeeld zijn met bovenstaande resultaten lastig te doen, omdat het locatie-specifiek is. Voor hoge rivierafvoeren, waarbij de uiterwaarden volop meestromen, lijkt het eenduidiger van aard. De impact vindt dan voornamelijk lokaal en geconcentreerd rond de NVO plaats, met enige longitudinale en laterale doorwerking. De stroomrichting wordt voor de hoge afvoeren ook nauwelijks beïnvloed en het maximale waterstandseffect heeft voor een typische NVO een ordegrootte van 1 cm.

Hoe lager de rivierafvoer, des te meer lijkt de lokale riviergeometrie en het afvoerregime van invloed te zijn, maar de impact blijft grotendeels geconcentreerd rond de NVO. Het is aannemelijk dat de impact van een grotere NVO (ten opzichte van de rivierbreedte) zodanig sterk kan zijn dat de stroming boven het zomerbed en in de uiterwaarden significant wordt beïnvloed. Er is aangetoond dat loslating en neer-/wervelvorming door een NVO kunnen ontstaan, maar grootschalige circulatie in de NVO (zoals in kribvakken) komt in bovenstaande resultaten niet naar voren, dus daar is wellicht een grotere NVO voor nodig. Met meerdere NVO's achter elkaar zullen de effecten ook over een grotere afstand doorwerken en zal de impact merkbaar zijn over een langer riviertraject. In het volgende hoofdstuk wordt hier nader op ingegaan.

5 Effect op rivierfuncties

5.1 Afvoer van water

5.1.1 Hoogwater

In Figuur 5-1 wordt het effect van een NVO van 50 m breed op de hoogwaterstand (SD4100) getoond. Het effect is klein en lokaal in de ordegrrootte van enkele millimeters. Over een langer riviertraject is het effect kleiner dan 1 mm, maar meerdere NVO's van dezelfde afmetingen achter elkaar kunnen de functie-eis van 1 mm wel doen overschrijden. Dit wordt hieronder nader toegelicht.

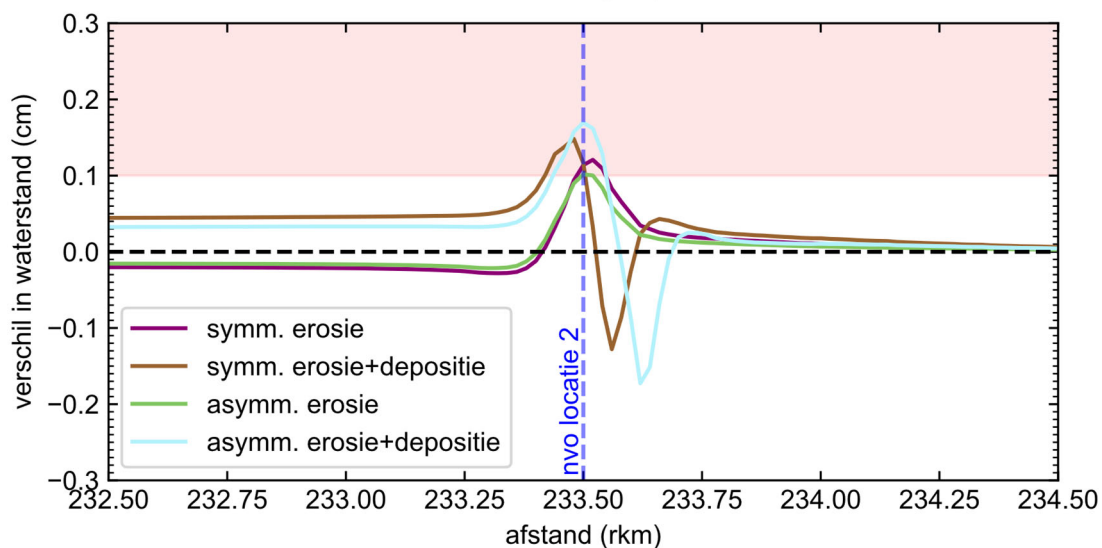
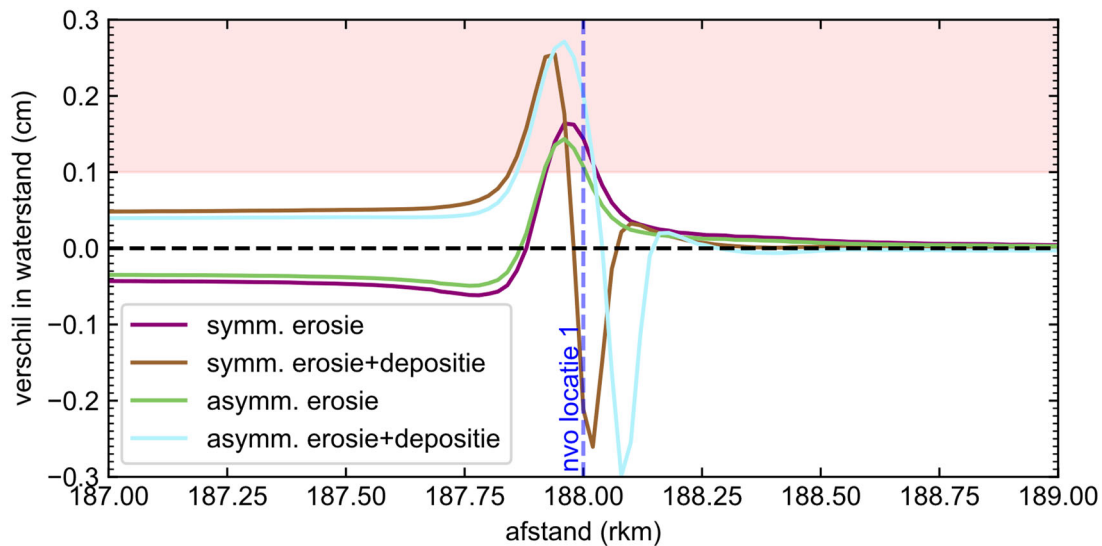
Met enkel erosie is er lokaal een verhoging van 1 tot 2 mm, en bovenstrooms een kleine verlaging van de waterstand tussen 0 en 0,5 mm, die met een stuwkromme doorloopt. Volgens het RBK kan de "zaagtandmethode" worden toegepast voor rivierverruimende maatregelen (RBK §2.2). Dit betekent dat de benedenstroomse/lokale piek (verhoging) alsnog is toegestaan als het oppervlak van de bovenstroomse verlaging in het figuur groter is dan het oppervlak van de lokale verhoging. Dit is voor beide locaties het geval, waardoor zonder depositie beide NVO's voldoen aan de functie-eis.

Met zowel erosie als depositie is er een hogere lokale verhoging van 1,5 tot 3 mm, en ook bovenstrooms is de waterstand verhoogd met $\pm 0,5$ mm. Over een langer traject voldoen deze NVO's (met depositie) echter wel aan de functie-eis, omdat er ook een verlaging is van 1,5 tot 3 mm. Als er echter twee NVO's met dezelfde afmetingen (50 m breed, 100 m lang, met zowel erosie als depositie) achter elkaar liggen, en hun waterstandseffecten worden opgeteld, wordt de functie-eis over een langer traject naar verwachting wél overschreden.

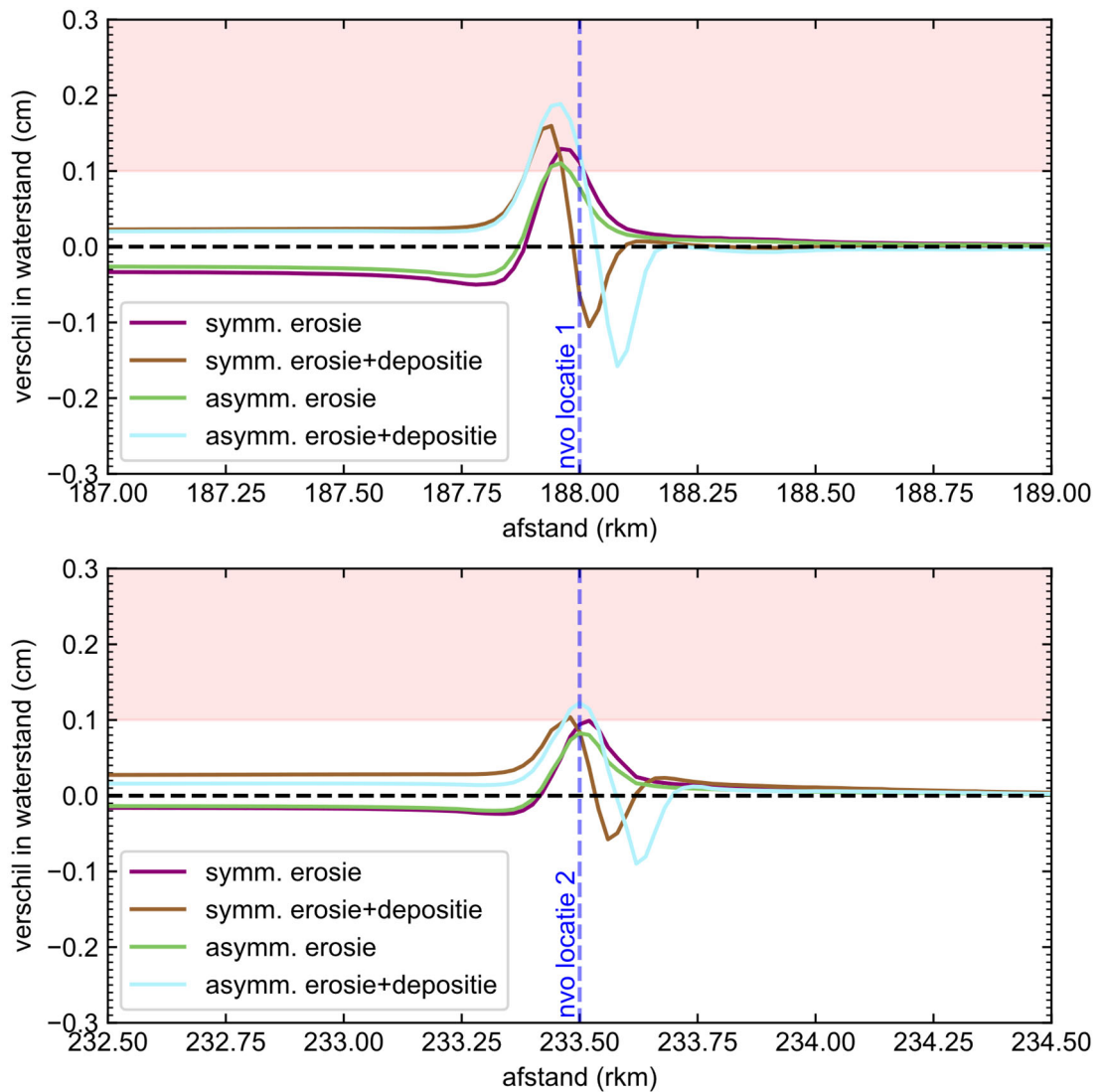
Dit effect bij opschaling wordt verder ondersteund door de resultaten in Figuur 5-2. Hieruit blijkt dat een NVO met een oppervlak dat de helft kleiner is, leidt tot een bovenstroomse waterstandsverhoging van ongeveer 0,25 mm (als depositie wordt meegenomen). Dit is gelijk aan de helft van het effect van een NVO met een twee keer zo groot oppervlak. Er zijn echter niet genoeg groottes van NVO's doorgerekend om een exacte relatie te definiëren tussen oppervlak van de NVO en de veroorzaakte opstuwing. Als er vier NVO's van 35 m breed en 100 m breed (relatief dicht) achter elkaar worden aangelegd wordt de functie-eis van 1 mm over een langer traject dus naar verwachting wel overschreden, omdat ze alle vier een verhoging van ca. 0,25 mm veroorzaken.

Het effect van een NVO met een asymmetrische vorm ten opzichte van een symmetrische vorm is lokaal gezien kleiner als enkel erosie wordt meegenomen, maar juist sterker met zowel erosie als depositie (zie Figuur 5-1 en Figuur 5-2). Dit laatste effect is waarschijnlijk te verklaren door de sterkere loslating van de stroming (zie hoofdstuk 4). Bovenstrooms gezien is het effect van een NVO met asymmetrische vorm altijd kleiner, waarschijnlijk door het kleinere oppervlak van de erosie en depositie.

Over het algemeen zijn de effecten groter op locatie 1 dan op locatie 2. Dit is waarschijnlijk te verklaren aan de hand van de breedte van de uiterwaard. Deze is kleiner op locatie 1, wat ertoe leidt dat een verandering in het oeverprofiel een sterker effect heeft op de stroming, ondanks dat de NVO een kleiner deel uitmaakt van het hele stroomvoerend profiel ten opzichte van locatie 2 (zie hoofdstuk 4).



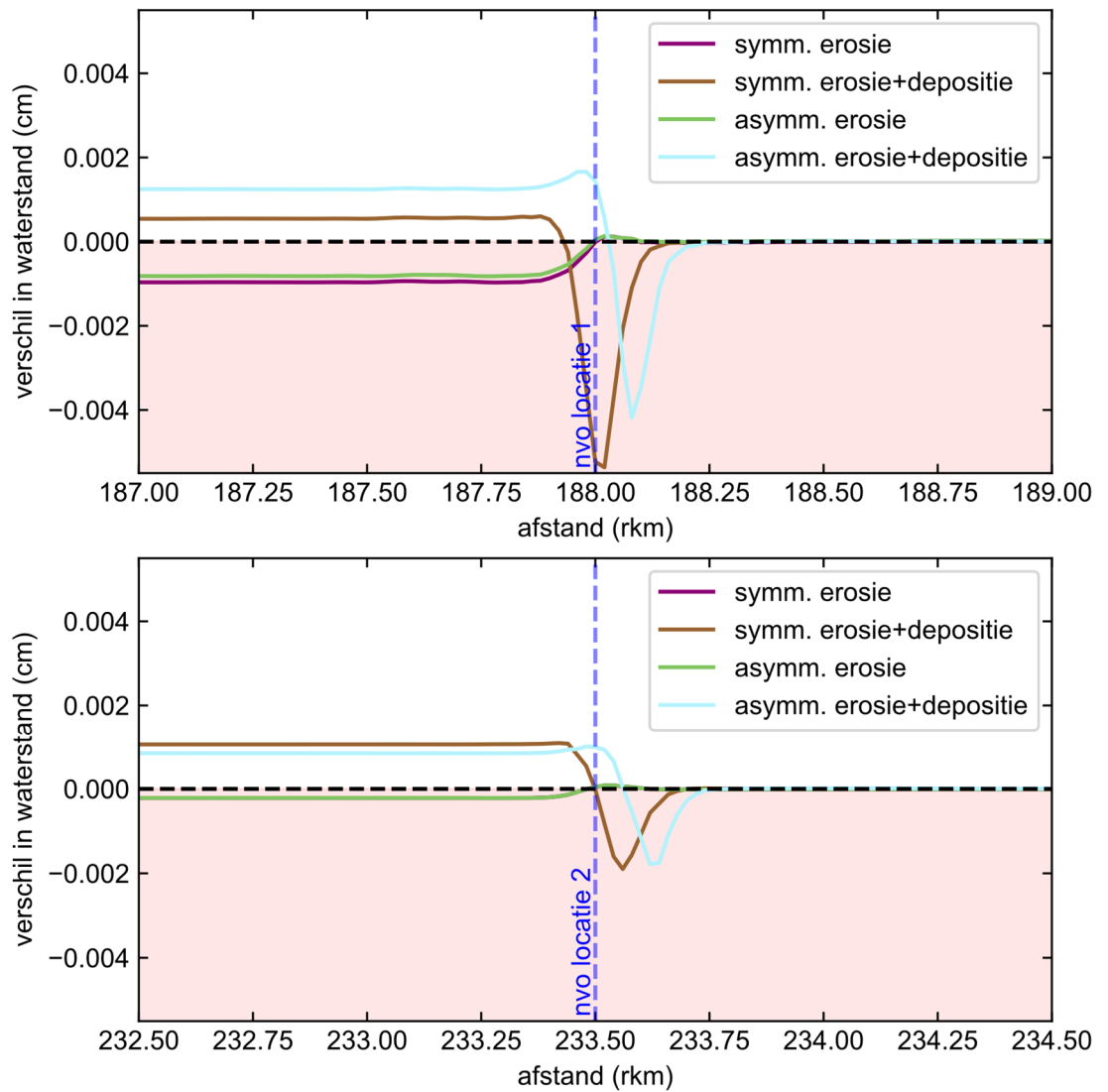
Figuur 5-1. Effect van een NVO van 50 m breed en 100 m lang op de waterstand langs de rivieras voor hoogwater (afvoersom SD4100). Het bereik boven de functie-eis is rood gearceerd. Boven: locatie 1, onder: locatie 2.



Figuur 5-2. Idem als Figuur 5-1, maar hier voor een NVO van 35 m breed.

5.1.2 Laagwater

Het waterstandseffect van de NVO van 50 m breed tijdens laagwater is vele malen kleiner dan bij hoogwater (Figuur 5-3). Het effect is hier zeer klein (maximaal effect van -0,05 mm, met erosie en depositie), zowel in het gestuwde als ongestuwde traject, en valt waarschijnlijk binnen de modelonzekerheid; echter wijzen de resultaten op een kans op verlaging van de laagwaterstand over een bovenstrooms langer traject als er alleen erosie is en geen depositie. Er is echter een grotere NVO nodig, of meerdere NVO's achter elkaar, om de waterstand significant te doen dalen. Voor laagwater lijkt er meer 'functie-ruimte' te zijn dan voor hoogwater (§5.1.1).



Figuur 5-3. Effect van een NVO van 50 m breed en 100 m lang op de waterstand langs de rivieras voor laagwater, afvoersom S50. Het bereik onder de functie-eis is rood gearceerd. Boven: locatie 1, onder: locatie 2.

5.2 Afvoer van ijs

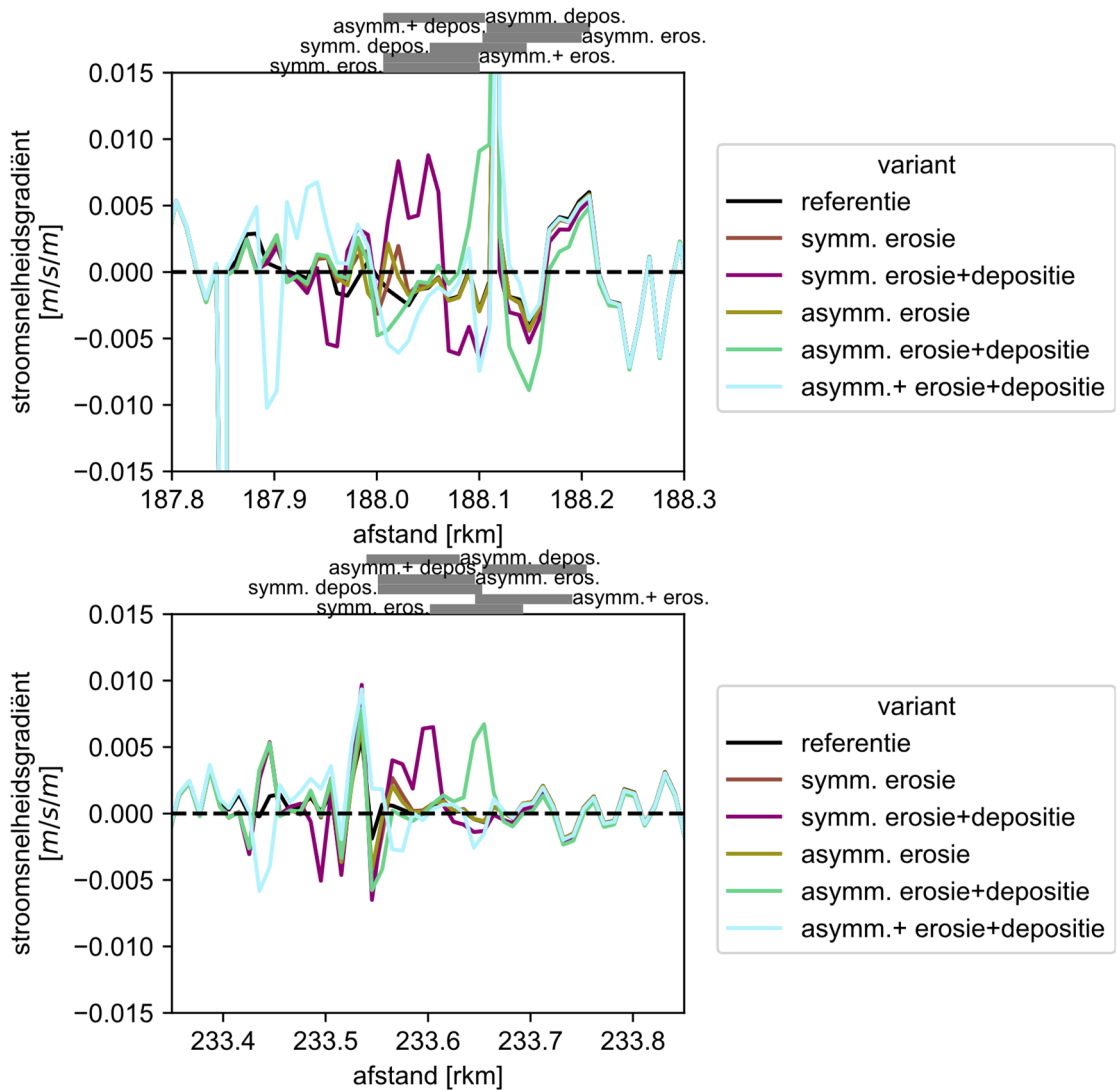
5.2.1 Stroomsnelheidsgradiënten

Ten behoeve van de beoordeling van de afvoer van ijs, zijn de stroomsnelheidsgradiënten in langsricting berekend op basis van de modelresultaten. Dit is langs de rechteroever uit Baseline gedaan voor een zomerbedvullende afvoer van S1700, S2100 en S2500.

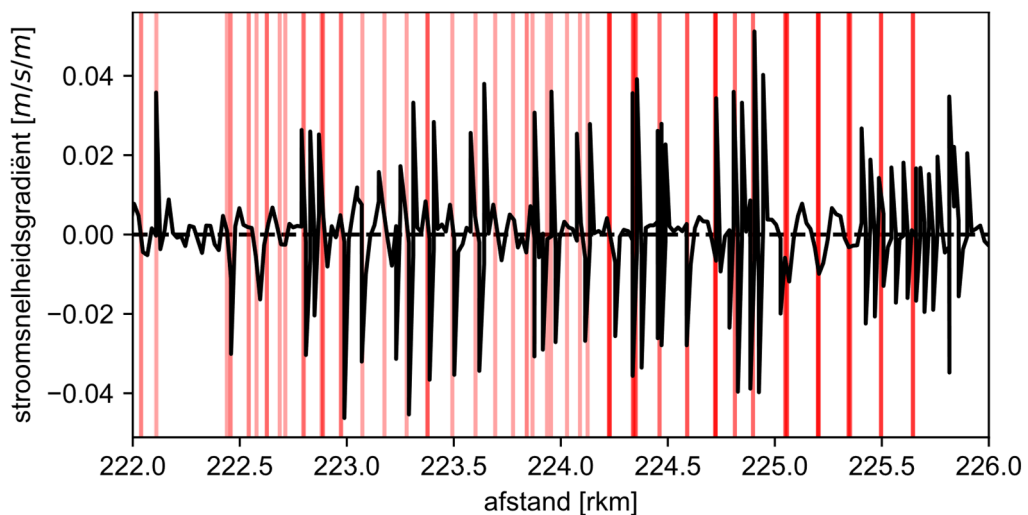
De absolute stroomsnelheden liggen op beide locaties rond 0,6-0,7 m/s. In Figuur 5-4 worden de stroomsnelheidsgradiënten geïllustreerd voor S2100; overige afvoeren zijn in Bijlage C te vinden. Hieruit blijkt dat voornamelijk een NVO met zowel erosie als depositie de stroomsnelheidsgradiënten versterkt. Het effect loopt over enkele honderden meters benedenstrooms door, vermoedelijk in de orde van de NVO-lengte. In de referentie / huidige situatie zit de gradiënt tussen -0,005 en 0,005 m/s/m. De varianten symm. erosie+depositie en asymm.(+) erosie+depositie zorgen voor pieken in de gradiënt tot 0,015 m/s/m (pieken boven 0,015 m/s/m komen ook in de referentie voor en zijn dus niet toe schrijven aan de NVO's).

Om dit in context te plaatsen zijn de stroomsnelheidsgradiënten ook weergegeven voor het traject met kribben tussen rkm 222 en 226 in Figuur 5-5. Hieruit komen pieken van 0,04 en -0,04 m/s/m naar voren die grotendeels overeenkomen met de ligging van de kribben.

Aangezien ijs goed afgevoerd wordt bij kribben, kan worden gesteld dat de snelheidsverschillen in de stroming die worden veroorzaakt door een enkele NVO van 50 meter breed en 100 meter lang, niet te sterk zijn om ijsvorming te bevorderen.



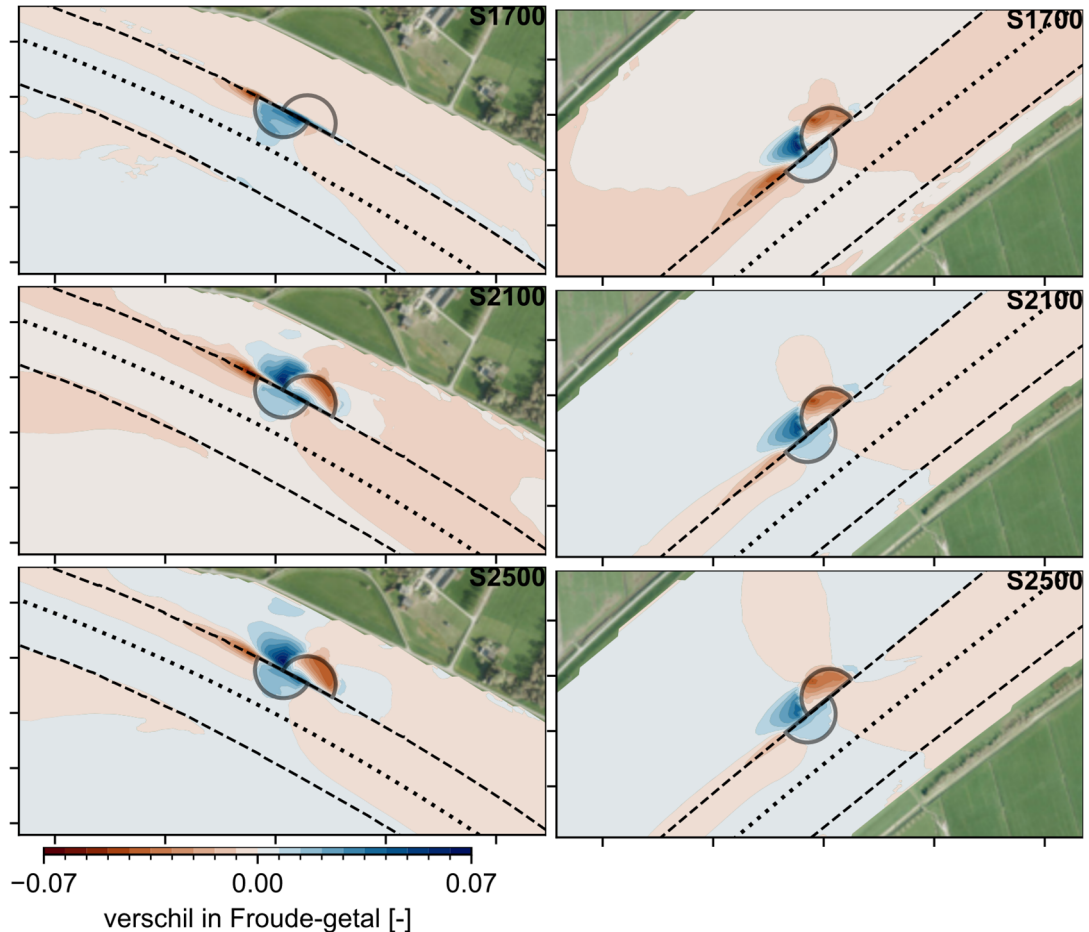
Figuur 5-4. Stroomsnelheidsgradiënten langs de rechteroever uit Baseline (sectie 1) ter hoogte van een NVO van 50 m breed, afvoersom S2100. Boven: locatie 1, onder: locatie 2.



Figuur 5-5. Stroomsnelheidsgradiënten langs de linkeroever uit Baseline (sectie 1) ter hoogte van een traject met kribben, afvoersom S2100. De kribben (aan zowel de linker- als rechteroever) zijn met verticale rode lijnen aangegeven.

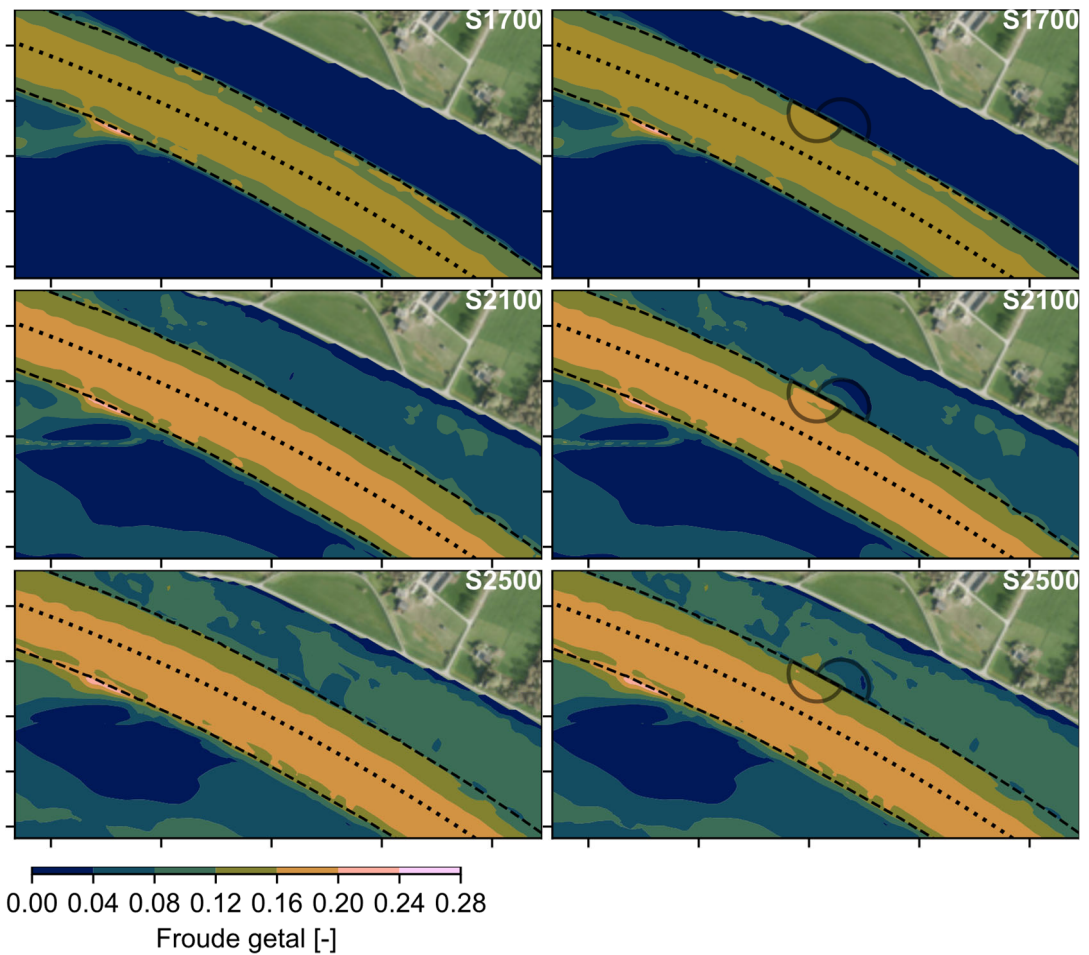
5.2.2 Froude getal

Een NVO van 50 m breed levert voor de relevante afvoeren van S1700, S2100 en S2500 een maximaal verschil in Froude getal op van 0,07 (Figuur 5-6). In de uiterwaard is er een vermindering van het Froude getal te zien door loslating en vermindering van de (door)stroming in het geërodeerde deel (hoofdstuk 4). Het Froude getal is direct benedenstrooms van de NVO, ook in de uiterwaard, juist verhoogd. Ook is het Froude getal verhoogd boven de depositie, waar de waterdiepte kleiner is geworden. Voor locatie 2 en de asymmetrische NVO gelden dezelfde patronen, maar een asymmetrische vorm levert een iets kleiner effect op.



Figuur 5-6. Effect van een NVO op het Froude getal voor verschillende rivierafvoeren. De rivieras is weergegeven met een stippellijn en de oevers met onderbroken lijnen. Links: locatie 1, rechts: locatie 2.

Uit Figuur 5-7 blijkt dat er binnen de erosiekom een vermindering van het Froude getal tot onder de 0,04 optreedt. Dit is binnen het stroomvoerend profiel, waarmee er in principe niet wordt voldaan aan de functie-eis van een Froude-getal van boven de 0,8. Het is belangrijk om hierbij op te merken dat het Froude getal al onder de 0,08 zit in de referentiesituatie en dat dit tevens geen harde grenswaarde is.



Figuur 5-7. Links: referentie, rechts: symmetrische NVO van 50 m breed met zowel erosie als depositie.

5.2.3

Synthese

Uit bovenstaande resultaten wordt duidelijk dat een NVO de afvoer van ijs in de uiterwaard significant negatief kan beïnvloeden, bij afvoeren die relevant voor deze functie-eis worden geacht, via vermindering van de stroomsnelheid. Als er nog depositie van de NVO ligt, werkt het effect in de hoofdgeul door via versterking van stroomsnelheidsgradiënten. Deze worden enigszins versterkt, maar liggen alsnog onder de gradiënten die te vinden zijn bij kribvakken van vergelijkbare afmetingen.

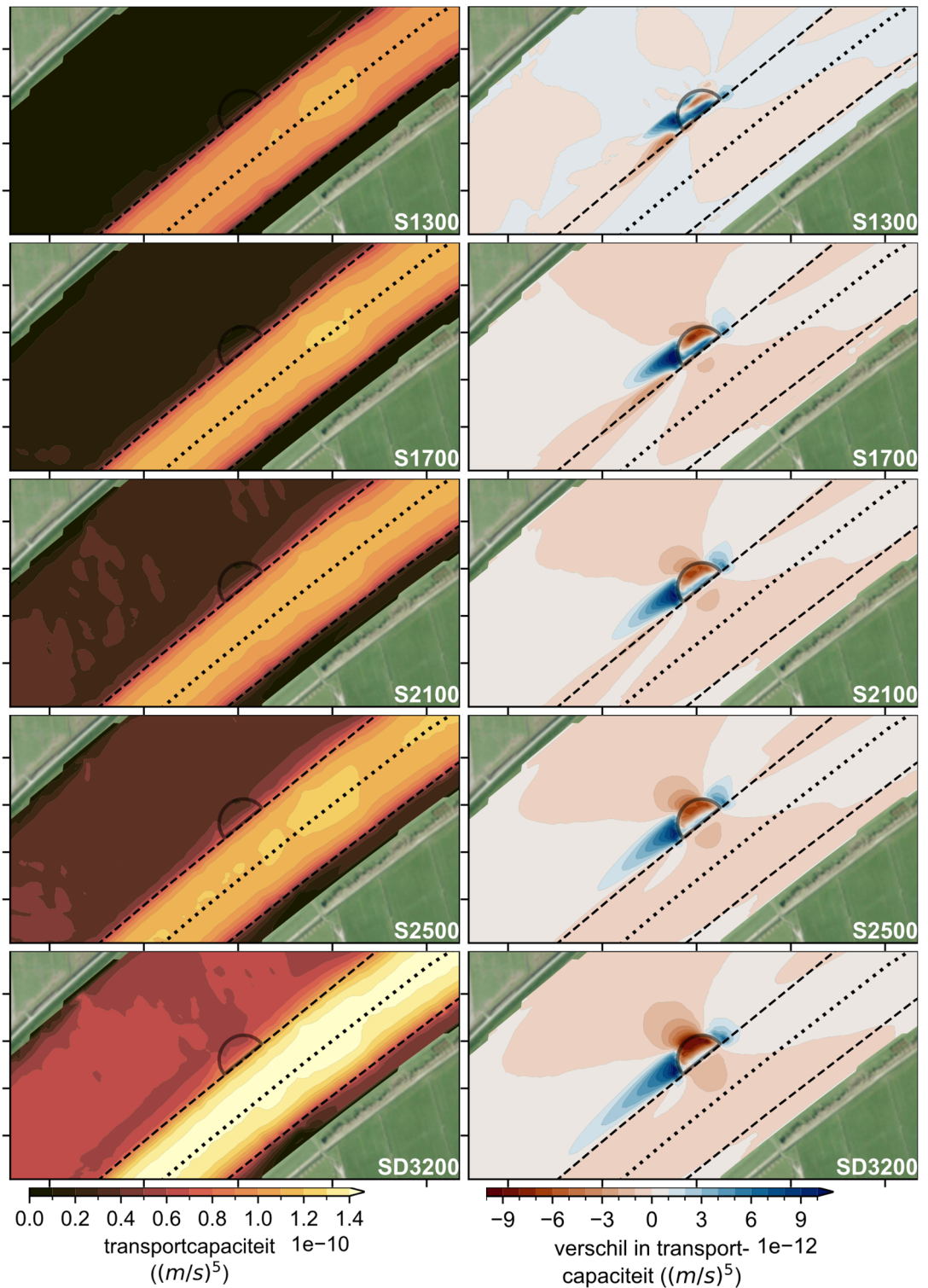
5.3 Sedimenttransport en morfologie

5.3.1 Sedimenttransport

Om meer inzicht te geven in de initiële respons van het sedimenttransport op een NVO, is een indicator voor de transportcapaciteit bij de relevante afvoeren (Tabel 3.1) gevisualiseerd (Figuur 5-8; Figuur B-3). Deze indicator is berekend door de stroomsnelheid met een macht van 5 te verheffen, zoals in de Engelund-Hansen sediment transportformule. Het gaat hierbij niet om absolute getallen, maar relatieve patronen.

Eerst is de transportcapaciteit met de referentiesituatie vergeleken (Figuur 5-8). Hieruit wordt duidelijk dat de initiële respons zich voornamelijk afspeelt binnen de erosiekom zelf en stroomafwaarts hiervan in de uiterwaard. Met de stroming meekijkend is er een gradiënt van relatief lage naar hoge transportcapaciteit in longitudinale richting, al is er ook een minder sterke gradiënt in laterale richting zichtbaar.

De NVO is dus (in een tussenstadium van ontwikkeling) nog steeds een erosiegevoelige zone. Tijdens deze afvoeren is het dus te verwachten dat de NVO zich nog verder ontwikkelt. Hoe snel en in welke richting dit (over het algemeen) gebeurt, is naast de frequentie van deze afvoeren ook afhankelijk van allerlei locatie-specifieke factoren, zoals het talud, de samenstelling van de ondergrond, het voorkomen van erosieresistente of -gevoelige objecten en lagen, niveau van ontstening, enzovoort. (Duró, 2020; Van der Deijl, 2022; 2023a). Wel kunnen beheerders bij het aanleggen van natuurvriendelijke oevers rekening houden met de ontwikkeling van een NVO door ruimte over te laten voor toekomstige erosie.



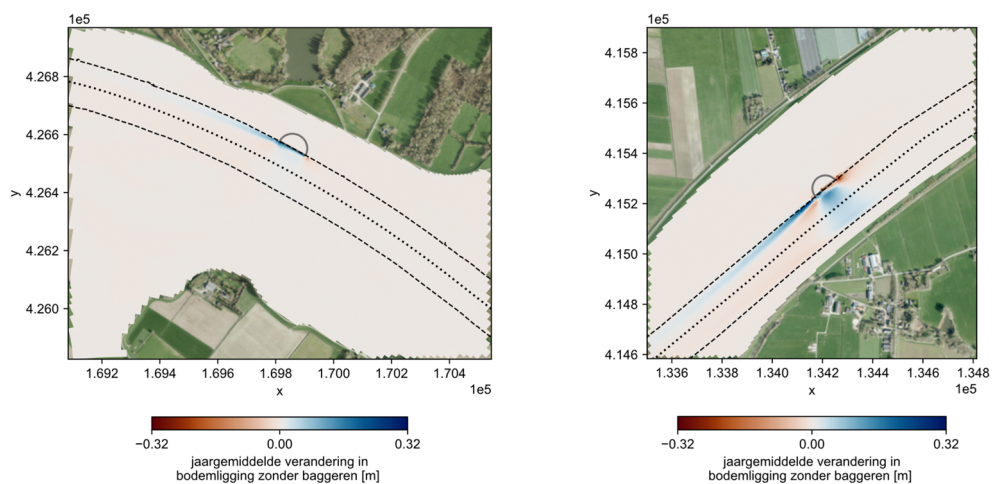
Figuur 5-8. Effecten van een NVO van 50 m breed en 100 m lang op de sedimenttransportcapaciteit bij verschillende afvoeren (locatie 2). Links: absolute capaciteit, rechts: verschil in capaciteit ten opzichte van de referentie.

5.3.2 Morfologie

Ten behoeve van de beoordeling van morfologische impact van een NVO, is met D-FAST-MI de jaargemiddelde verandering in bodemligging ter plekke van de NVO's uitgerekend, op basis van de modelresultaten. In Figuur 5-9 worden de resultaten hiervan getoond. Hieruit blijkt dat er in een evenwichtssituatie enkele decimeters (verticale) verandering in bodemligging kan optreden in het zomerbed, bij een erosiekom van 50 m breed en 100 m lang, mits er niet gebaggerd wordt. De morfologische verandering blijft beperkt tot het zomerbed. Op locatie 2 is er maximaal -32 cm en +27 cm verandering en op locatie 1 maximaal -7,5 en +21 cm verandering. In stuwpannen is er minder waterstandsdynamiek waardoor er over het algemeen minder morfologische verandering plaatsvindt. Dit verklaart waarom er minder verandering wordt voorspeld op locatie 1. Ook doordat de NVO een minder groot deel uitmaakt van het stroomvoerend profiel op locatie 1, zou hier minder morfologische verandering kunnen worden voorspeld.

Er ontstaat op beide locaties een lage 'aanzandingsrand' of '-vlam' op het oeverstrand direct stroomafwaarts van de NVO. Deze loopt op locatie 2 ongeveer 600 m benedenstrooms door en op locatie 1 maar 200 m. Dit kan gezien worden als laterale uitbouw van de oever(lijn) richting de rivieras. Op locatie 2 vindt er tevens ook enige afzetting plaats over de volle breedte van het zomerbed ter hoogte van de NVO. Daarnaast erodeert de oeverlijn direct bovenstrooms van de NVO (op beide locaties, maar meer op locatie 2), wat geïnterpreteerd kan worden als het (asymmetrisch) groeien van de erosiekom (zie ook §2.1).

Een situatie met ook depositie is niet doorgerekend, omdat de depositie wordt gezien als een vast, onbeweeglijk object door D-FAST en het zich in het invloedsgebied bevindt van de erosie. Als het geërodeerde sediment niet gelijk door de rivierstroming wordt meegenomen maar ergens in het zomerbed weer wordt afgezet, is het te verwachten dat de mate van (verticale) depositie in eerste instantie recht evenredig is aan de mate van (verticale) erosie. De depositie wordt vaak in de loop der tijd lager omdat het (deels) wordt afgebroken. Daarnaast wordt verwacht dat de depositie langzamer wordt afgebroken in een gestuwd traject dan in een ongestuwd traject, omdat er minder (stromings)dynamiek is in een gestuwd traject.



Figuur 5-9. Verwachte verandering in bodemligging zonder baggeren bij een NVO van 50 m breed en 100 m lang, zoals berekend door D-FAST-MI. Links: locatie 1, rechts: locatie 2.

5.4 Vlot en veilig varen

5.4.1 Bevaarbaarheid

Ten behoeve van de beoordeling van bevaarbaarheid, zijn in Figuur 5-10 profielen getoond van de bodemligging en functie-eis ter plekke van de NVO's. Hiermee wordt het volgende aangetoond:

- De bodemligging ligt in de referentie / huidige situatie onder het vaarwegmodel op beide locaties; hier wordt dus wordt voldaan aan de functie-eis;
- Depositie van 1 meter op de teen en het oeverstrand leidt op beide locaties niet tot overschrijding van het vaarwegmodel en er wordt in deze situatie nog voldaan aan de functie-eis. Bij de rechteroever is er op locatie 1 nog 0,95 m ruimte over, en op locatie 2 nog 0,39 m.

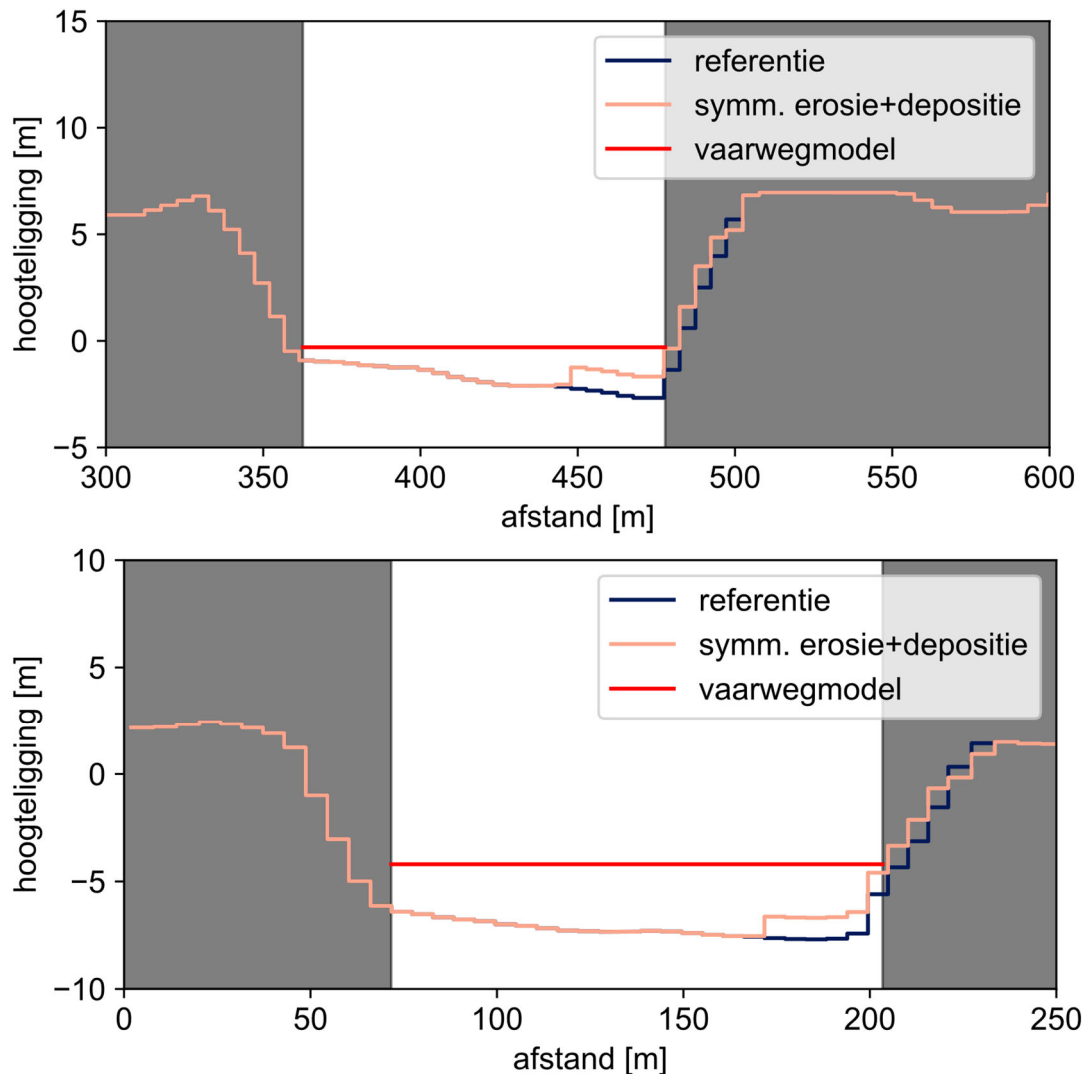
In de evenwichtssituaties die door D-FAST-MI zijn berekend (Figuur 5-9) is de verticale depositie minder hoog. Op basis hiervan is te stellen dat voor deze NVO's in een evenwichtssituatie dus tevens geen overschrijding van de functie-eis te verwachten.

Of de depositie leidt tot een knelpunt voor deze functie-eis, hangt af van de functie-ruimte die er eerst beschikbaar was, de nabijheid van de NVO tot de vaargeul, en waar (in het dwarsprofiel) het geërodeerde sediment wordt afgezet. Zowel in de Maas als op de Rijntakken zijn er locaties aan te wijzen waar in de huidige situatie al niet wordt voldaan aan de functie-eis (te vinden in de BRL-viewer³; Van der Deijl, 2023c) en de waterdiepte kaarten Rijntakken RWS-ON⁴). Hier kan het aanleggen van een NVO de normoverschrijding dus verergeren, al zal dit tijdelijk zijn omdat de depositie op termijn weer verdwijnt. Een NVO aanleggen in de buitenbocht, waar de rand van de vaarweg dicht bij de oever ligt, vergroot daarnaast de kans dat er sediment in de vaarweg terecht komt. Als laatst kan gesteld worden dat er vaak pas überhaupt een knelpunt voor deze functie-eis kan optreden als de depositie bij de teen wordt afgezet (zie ook 2.1), in plaats van hoger op het oeverstrand (wat gebruikelijk buiten de vaarweg valt).

³ Beschikbaar op het RWS-intranet

⁴ Openbaar beschikbaar:

https://maps.rijkswaterstaat.nl/gwproj55/index.html?viewer=ON_Waterdiepte kaarten_Rijntakken.Webviewer

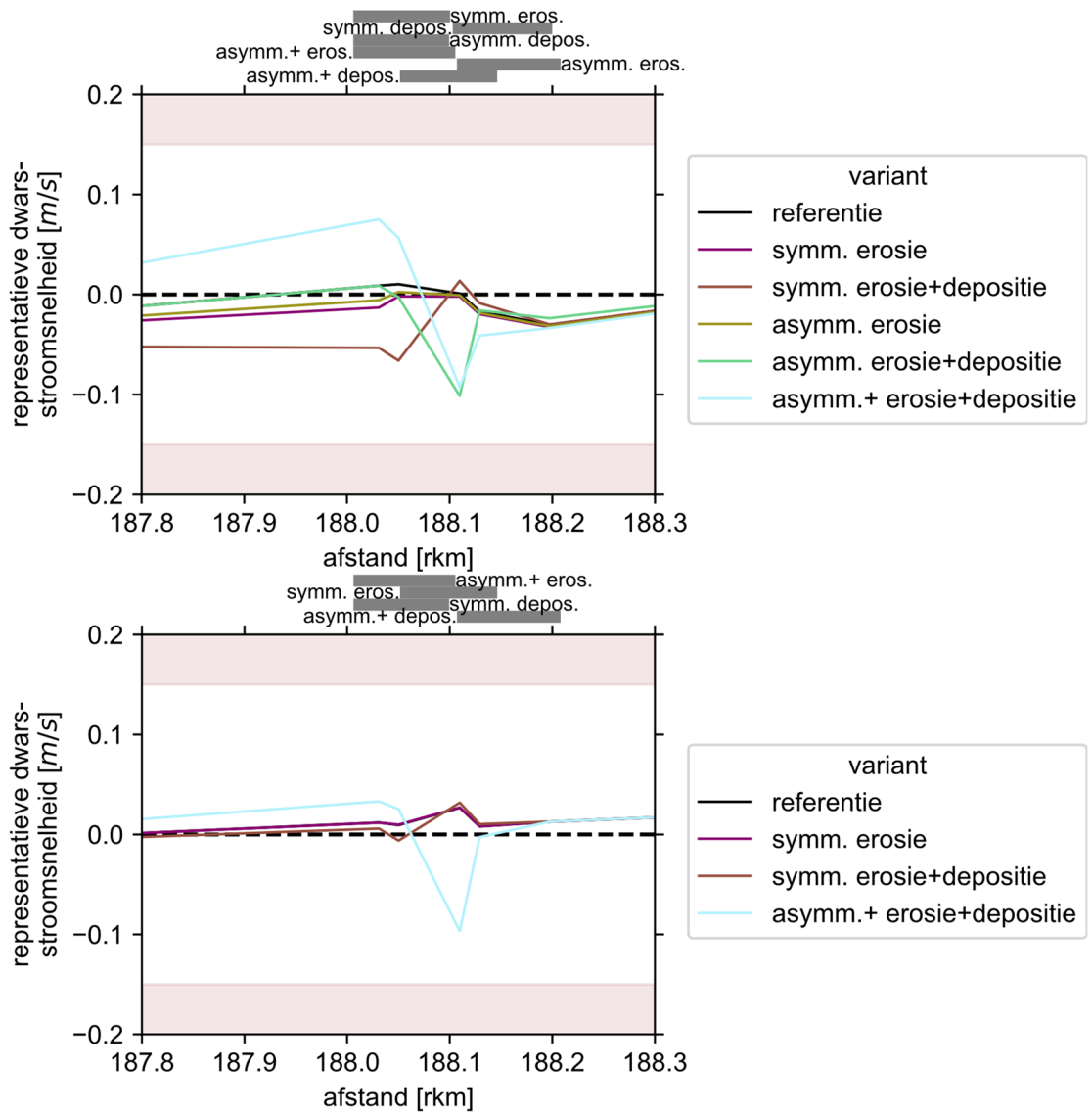


Figuur 5-10. Dwarsprofiel van de bodemligging voor de NVO (50 m breed) ten opzichte van de referentie. De functie-eis voor bevaarbaarheid geldt alleen tussen de grijze vlakken. Met 1 m depositie is er op deze locaties geen overschrijding van deze functie-eis, aangegeven door de rode lijn. Boven: locatie 1, onder: locatie 2.

5.4.2 Bestuurbaarheid

In Figuur 5-11 wordt ten behoeve van de beoordeling van bestuurbaarheid de representatieve dwarsstroomsnelheid getoond die is berekend op basis van de modelresultaten, ter plekke van de NVO op locatie 1. In Figuur 5-11 (boven) is ten eerste te zien dat voor alle varianten de representatieve dwarsstroomsnelheid onder de grenzen van 0,15 m/s en 0,3 m/s blijft voor een afvoer van S2100. Mét depositie wordt de dwarsstroomsnelheid significant vergroot ten opzichte van de referentie, met een ordegrootte van 0,1 m/s. De dwarsstroomsnelheid blijft echter binnen de functie-eis. Het effect is nog kleiner voor de S1700 afvoersom (Figuur 5-11, onder).

Er zijn twee opmerkelijke verschillen tussen de symmetrische en asymmetrische NVO's te zien in Figuur 5-11. Bij de asymmetrische vorm vindt de piek in dwarsstroming iets meer benedenstrooms plaats dan bij de symmetrische vorm. Dit is bij andere functies ook geobserveerd en het komt waarschijnlijk doordat de asymmetrische depositie meer stroomafwaarts ligt. Ook heeft de symmetrische vorm een groter bovenstrooms effect dan de asymmetrische vorm. Hoe generiek deze bevindingen zijn is echter moeilijk te bepalen omdat de dwarsstroming voor locatie 2 niet bepaald kon worden aangezien hier geen normprofiel beschikbaar was.



Figuur 5-11. Berekende dwarsstroomsnelheid op basis van de modelresultaten; locatie 1, recheroever. Boven: afvoersom S2100, onder: afvoersom S1700.

6 Conclusies en aanbevelingen

De onderzoeksvraag van deze studie is: wat is de invloed van de grilligheid in de oeverlijn van vrij eroderende ("natuurvriendelijke") oevers (zowel in eindtoestand als tussentijds in de ontwikkelfase daarvoor) voor de normaliserende functies van de oever (afvoer water, sediment en ijs, beperken dwarsstroming) en zijn er risico's?

6.1 Algemeen stroombeeld

Het effect van een onregelmatige oever op het stroombeeld is tweeledig: via verandering van de stroming en van de waterstand.

De stroomrichting verandert vooral lokaal bij de erosiekom. Dat kan overigens ook de verdere ontwikkeling van de erosiekom beïnvloeden. Een onregelmatige oever zorgt voor meer loslating en afbuiging van de stroming. Dit effect kan zo sterk zijn dat er in de NVO neer- of wervelvorming plaatsvindt, al is dit effect minder sterk dan in diepere kribvakken van vergelijkbare afmetingen. Een onregelmatigheid in de oever verandert de stroomrichting nabij de oever en in de uiterwaard - als die meestroomt - aan de kant van de vervormde oever. In de tegenovergelegen oeverzone en uiterwaard is weinig tot geen effect zichtbaar (mogelijk met uitzondering van de waterstand).

Het effect van een onregelmatige oever straalt ruimtelijk uit. Dit gebeurt zowel aan weerszijden als boven- en benedenstrooms. De omvang van het benedenstroomse effect is waarschijnlijk afhankelijk van de lengte van de onregelmatigheid en bovenstrooms loopt het effect over wat grotere lengte door met een stuwkromme.

In deze studie zijn onregelmatige oevers zoals van NVO's in een tussenstadium onderzocht, waarbij zo'n NVO nog geen (dynamisch) evenwicht heeft bereikt. Wanneer de erosie van een NVO dit wel heeft bereikt en de bijbehorende depositie helemaal is opgeruimd, kan de vervormde oever worden gezien als een waterstandsverlagende rivierverruiming. Als een neer in de erosiekom ontwikkelt, dan kan dat het waterstandsverlagend effect (deels) teniet doen.

Het effect van de onregelmatige oever van een NVO kan worden beïnvloed door allerlei locatie-specifieke factoren zoals de ligging in een binnen- of buitenbocht, het talud en de hoogteligging van de uiterwaard. Hieronder worden een aantal factoren nader toegelicht, specifiek op basis van wat in deze studie is aangetoond.

6.1.1 Invloed van rivierafvoer

Bij hoogwater heeft een onregelmatigheid met een oppervlak 1-4 maal een kribvak nauwelijks effect op de stroomrichting en de waterstand wordt het meest beïnvloed. In de beschouwde situatie leidde de onregelmatigheid (met name de aanzanding uit de oever) tot circa 0,5 mm opstuwing (langs de rivieras); naar verwachting neemt dit af bij hogere afvoeren.

Bij laagwater is het waterstandseffect in de beschouwde situatie veel kleiner en ook de stroomrichting wordt door de lage stroomsnelheid minder beïnvloed. Rondom zomerbedvullende afvoeren heeft een onregelmatigheid het grootste effect op de stroomrichting en lijkt de grootste kans te bestaan op neer-/wervelvorming.

6.1.2 Invloed van de oevervorm

In deze studie is de impact van de onregelmatigheid van oevers onderzocht met een oppervlak van 1-4 maal het oppervlak van een kribvak. De beschouwde verschillende vormen in de onregelmatigheid van de oever leveren vergelijkbare effecten op. De hydraulische effecten van onregelmatige oevers met retourstroming lijken op typische kribvakstroming met een geconcentreerdere in- en uitstroom tussen de erosiekom en hoofdgeul.

6.1.3 Invloed van stuwen/stuwpeilen

In een ongestuwd riviertraject is er meer waterstandsdynamiek dan in een stuwpan. Hierdoor veranderen in een ongestuwd traject de stroombeelden geleidelijk met hogere afvoeren maar abrupt in een stuwpan wanneer de stuw open wordt gezet. In combinatie met het kunstmatig in stand houden van de waterstand rond het stuwpeil in een stuwpan, levert dit een merkbaar verschil op in het effect van een onregelmatige oever in een gestuwd of ongestuwd traject.

Het waterstandseffect van een onregelmatige oever wordt vooral bepaald door het wel of niet aanwezig zijn van depositie. Het wordt verwacht dat de depositie in een stuwpan geprononceerder kan zijn dan onder de permanente stromingscondities van een vrijafstromende riviertak.

6.1.4 Afzonderlijk effect van depositie

Over het algemeen heeft afzetting van geërodeerd sediment van een NVO in de hoofdgeul een wateropstuwend effect dat groter kan zijn dan het waterstandsverlagend effect van de erosie. Tijdens hogere afvoeren kan dit zorgen voor waterstandsverhoging. Met de sedimentatie vanuit één typische onregelmatige oever zal dit vermoedelijk niet leiden tot overschrijding van de grens van 1 mm, maar deze kans bestaat wel met grotere onregelmatigheden en als er meerdere relatief dicht achter elkaar liggen.

De depositie zorgt ook voor versterking van stroomsnelheidsgradiënten langs de oever, maar minder dan bij kribben/kribvakken van vergelijkbare afmetingen als de in deze studie beschouwde onregelmatige oevers. Daarnaast wordt het Froude getal lokaal boven de depositie verhoogd, doordat daar de snelheid groter en de waterdiepte kleiner wordt. De absolute dwarsstroming wordt door de depositie ook verhoogd. Met een enkele onregelmatigheid blijft dit waarschijnlijk nog onder de grens van 0,15 m/s, maar ook hier bestaat er een kans op overschrijding met grotere of meerdere onregelmatigheden achter elkaar. Na verloop van tijd wordt de depositie (deels) door de rivier opgeruimd, wat het waterstandsopstuwende effect weer verkleint.

6.2 Effect op rivierfuncties

In Tabel 6.1 is een overzicht opgenomen van de effectbeoordeling op rivierfuncties voor een typische NVO. Het is hier belangrijk op te merken dat:

- 1 dit het afzonderlijk effect van de NVO betreft en dat met initiële functie-overschrijding geen rekening wordt gehouden;
- 2 de beoordelingen van de verschillende functies lastig met elkaar vergeleken kunnen worden;
- 3 de beoordeling is gedaan voor één typische NVO in de Maas op basis van modelresultaten.

In andere rivieren, of met meerdere/grotere NVO's, zal de beoordeling hiervan kunnen afwijken. Echter geeft dit een eerste inzicht in de eerste-orde effecten van een NVO, wat rivierbeheerders kunnen gebruiken ter kennisgeving bij het aanleggen of beheren van een NVO. Het meenemen van de initieel beschikbare functie-ruimte is natuurlijk ook van belang.

Uit deze studie blijkt dat een onregelmatige oever zoals van een NVO een risico kan vormen voor de afvoer van water en ijs. Voor hoogwaters is dit vermoedelijk pas het geval voor een paar (2-4) locaties met onregelmatige oevers achter elkaar, of een enkele grotere onregelmatigheid van minstens 200 m lang. De oevererosie in een NVO werkt rivierverruimend. Hiermee bestaat er overigens ook een kans op verlaging van laagwaterstanden, mits er geen stroombelemmerende ondiepte bij de oever ontwikkelt en oevers zonder neer doorstroomd worden.

Een NVO ontwikkelt door oevererosie naar een eindsituatie. Met het bereiken daarvan stopt de oevererosie. Zonder baggeren is voor zo'n situatie uiteindelijk een verhoging van de hoofdgeulbodem te verwachten, als reactie op het veranderde dwarsprofiel.

De bevaarbaarheid kan door de oeverdynamiek in het geding komen als het geërodeerde sediment dicht bij de eroderende oever in de vaarweg wordt afgezet. De omvang van deze depositie is dan nog goed vergelijkbaar met de omvang van de oevererosie. Op de langere termijn daarna kan er een lokale verhoging van het zomerbed optreden en een versmalling van de rivier stroomafwaarts van de NVO.

Qua bestuurbaarheid vormt de dwarsstroming bij een typische onregelmatige oever zoals hier is beschouwd geen risico volgens het RBK. Uit scheepssimulaties van MARIN (Bedos, 2019) heeft de onregelmatigheid die is doorgerekend significante impact op het vaargedrag, die alleen met voldoende manoeuvreercapaciteit goed opgevangen kan worden. Dit betekent dat onregelmatige oevers wel een risico kunnen vormen voor de bestuurbaarheid.

Tabel 6.1. Voorbeeld van de beoordeling van de impact van de beschouwde onregelmatige oever in de Maas op (normaliserende) functie-eisen voor de rivier.

Nr	Functie-eis		Beoordeling	Resultaat	Overschrijding functie-eis?
1	Afvoer van water	Hoogwater	< 1 mm verhoging v/d waterstand	0,5 mm verhoging	nee
		Laagwater	Géén verlaging v/d waterstand	Enkel erosie: verlaging	ja
				Erosie+depositie : verhoging	nee
2	Afvoer van ijs	Froude-getal	Géén verlaging tot < 0,08 in stroomvoerend profiel	Verlaging tot < 0,04	ja
		Stroomsnelheidsgradiënt en	Kwalitatief (ten opzichte van kribben)	Minder sterke gradiënten (0,01 m/s/m) dan bij kribben van vergelijkbare afmetingen (0,04 m/s/m)	nee

Nr	Functie-eis		Beoordeling	Resultaat	Overschrijding functie-eis?
3	Sedimenttransport en morfologie		Kwalitatief ten opzichte van kribben (met D-FAST-MI)	<p>Initiële respons van sedimenttransport vindt binnen de erosiekom zelf en benedenstrooms hiervan in de uiterwaard plaats (erosiegevoelige zone).</p> <p>De NVO heeft een langjarige morfologische impact in de hoofdgeul van enkele decimeters (Locatie 1: max.21 cm, locatie 2: max. 32 cm)</p>	'Expert judgement'
4	Vlot en veilig varen	Bevaarbaarheid	Géén verkleining van de minimale vaargeulafmetingen (diepte + breedte)	Géén verkleining (locatie 1: min. 0,95 m ruimte over, locatie 2: min. 0,39 m ruimte over)	nee
		Bestuurbaarheid	$U_{repr} < 0,3 \text{ m/s}$ voor $Q_{repr} < 50 \text{ m}^3/\text{s}$ $U_{repr} < 0,15 \text{ m/s}$ voor $Q_{repr} > 50 \text{ m}^3/\text{s}$	$U_{repr} = \text{max. } \pm 0,1 \text{ m/s}$	nee

6.3 Advies voor vervolgonderzoek

Het wordt aanbevolen om de effecten van meer (verschillende) NVO's te bepalen. Hierbij kan gedacht worden aan grotere NVO's om meer inzicht te krijgen in de opschaling. Ook meerdere NVO's achter elkaar kunnen extra of andere effecten opwekken ten opzichte van één NVO. Als laatst is in deze studie alleen naar de Maas gekeken, dus het wordt aanbevolen om de effecten van NVO's in andere riviersystemen verder te onderzoeken.

Hoe NVO's zich ontwikkelen door de tijd blijft een belangrijke kennisleemte. De NVO's die in deze studie zijn onderzocht, bevinden zich nog in een tussenstadium en zijn dus nog niet in evenwicht.

Het voorspellen hiervan zou, in combinatie met de resultaten van deze studie, waardevolle informatie opleveren om vooraf te bepalen of het aanleggen van een bepaalde NVO zal leiden tot overschrijding van functie-eisen aan de rivier. Hierom wordt aanbevolen om de ontwikkeling en evenwichtssituatie van meer NVO's die verschillen in grootte, vorm, locatie, enzovoort te simuleren, bijvoorbeeld met D-FAST-MI.

7 Referenties

- Bedos, A. (2019). Impact of an irregular bank on the sailed trajectory: Manoeuvring model and sensitivity analysis. MARIN rapport 31138873.
- Chavarias, V. (2019). Bank characterization. Deltares memo 11203681-009-ZWS-0004.
- Chavarias, V., & Groenewege, R. (2023). Improving modelling of groynes: Update of Villemonte formulation. Deltares memo 11209261-004-ZWS-0004.
- De Jong, J. (2017). Analyse experimenten Vlot en Veilig Varen: Uitwerking van de experimenten van Alessio Exer. Deltares rapport 1230041-007 -ZWS-0002.
- Duró, G. & Schippers, M.M.A (2021). Studie Natuurvriendelijke Oevers IJssel: Eindrapportage. Witteveen+Bos rapport 124989/21-012.487.
- Duró, G. (2020). Bank erosion in regulated navigable rivers. Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- Harms, J. M. (2021). Physical modelling of submerged groynes. Tech. rep., Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- Helsloot, T. C. (2016). The development of a method to predict ship-bank interaction in real-time. Master's thesis, TUD. Opgehaald van <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A1a8dc7a5-1a50-43b5-9593-a9a0bbd94c8f?collection=education>
- Langeveld, B. (2023). Streamlining river groynes: Laboratory experiments in schematised geometry under submerged flow conditions. Master's thesis, Delft University of Technology.
- Mosselman, E., Duró, G., van der Deijl, E., Eijsberg-Bak, C., & Buijse, T. (2021). Beheer van dynamische oevers. Tech. rep., Deltares and Witteveen + Bos, the Netherlands, Deltares and Witteveen + Bos, the Netherlands.
- Rijkswaterstaat & Deltares. (2024). Factsheet zesde-generatie modelschematisaties. D-Flow FM 2D Maas. Versie 2024-03 in te zien op: <https://iplo.nl/thema/water/applicaties-modellen/modelschematisaties/rivieren/>
- Van der Deijl, E. (2022). Karakterisatie van negen KRW-Maasoevers. Deltares rapport 11208033-005-ZWS-0002.
- Van der Deijl, E. (2023a). Verificatie van WAQBANK / D-FAST Bank Erosion: Analyse van de ontwikkeling van negen KRW-Maasoevers. Deltares rapport 11208033-005-ZWS-0003.
- Van der Deijl, E. (2023b). Update van de standaardsommen JAMM2022 naar JAMM2023. Deltares memo 11209233-002-ZWS-0003.
- Van der Deijl, E. (2023c). Aanpassing Basisrivierbodemplugging eisen en actualisatie rivierbodemplugging 2021. Deltares rapport 11208036-021-ZWS-0006.
- Van Houten, J. (2022) Quantifying erosion rates of the natural and nature-friendly banks of the Meuse river. BSc thesis Wageningen University, Soil Physics and Land Management Group.

Verheij, H. (2015). KPP Rivierkundig Onderzoek Duurzame vaardiepte: Interactie vaarweggebruik en rivierbodempligging en effecten op vlotheid en veiligheid. Deltares rapport 1209376-000

A Karakterisering onregelmatige oevers

1) Aanleiding

Met de ontstening van een groot aantal rivieroevers in afgelopen jaren, groeit het inzicht in de wijze waarop deze oevers veranderen. Naar verwachting kalven onbeschermd jonge oevers af. Dat gaat gepaard met een behoorlijke variatie in dynamiek, en dus variatie in oeverprofiel. De impact van de variatie in oeverprofiel op rivierfuncties en -waarden is in veel planstudies onderbelicht. Niet alleen omdat niet altijd goed te voorspellen is waar en in welke mate dit ontwikkelt, maar ook omdat onduidelijk is wat de impact is op een veilige afvoer van water (zonder extra opstuwung), van sediment en van ijs; een vlot en veilig gebruik van het vaarwater en een goede ondersteuning van (laag) waterstanden.

In SITO Rivierkunde onderzoekt Deltares welke mate van variatie in oeverprofielen schadelijk is voor de rivierfuncties. Met een aantal hypothetische oeverbressen wordt het effect op rivierfuncties geschat en, zoveel als mogelijk, met behulp van relevante RBK criteria beoordeeld. Het onderzoek is niet gericht op voorspelling van dergelijke variaties in oevers, noch op definitie van een onderhoudsstrategie.

In deze notitie wordt, ter voorbereiding van de Deltares analyse, een aantal oevers met bressen enkele jaren gevolgd. Doel hiervan is om met een eerste indruk daarvan (dus zonder diepgaande studie...) een idee te krijgen *welke verschillende typen bresvormen kunnen ontstaan*. Die karakteristieken kunnen worden gebruikt voor definitie van de hypothetische bressen in de Deltares analyse.

2) Aanpak

Om een indruk te krijgen van de vorm van bressen in dynamische oevers wordt middels reeksen luchtfoto's de ontwikkeling van contouren bij enkele eroderende oevers gevolgd. Deze reeksen zijn bijvoorbeeld te vinden op <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>. De beschouwde oevers beperken zich grotendeels tot de Maas, omdat daar de meeste oudere ontstane oevers zijn te vinden. Het betreft oevers in gestuwde panden en in een traject met enig riviergetij. De overeenkomsten tussen de verschillende oevers wordt tenslotte gebruikt om bresvormen enigszins te classificeren.

3) Belasting op de oever

De bresvorm ontstaat uit de verplaatsingssnelheid van de bresrand landinwaarts en de verplaatsingssnelheid van de bresrand stroomop-/afwaarts. De snelheden zijn gerelateerd aan de verhouding tussen belasting op en sterkte van het aangesneden oeversediment.

Voor wat betreft belasting lijkt van belang

- scheepgolven en scheepsretourstroming

De impact van scheepvaart op de oever bestaat uit scheepgolven en -retourstroming tijdens passage. Op de meeste riviervaarwegen houdt geladen opvaart de linkeroever aan en lege afvaart de rechter. Dan is langs de linkeroever de scheepsretourstroming vooral stroomafwaarts gericht en bewegen invallende golven stroomopwaarts en langs de rechteroever het omgekeerde. Dat betekent dat op de linkeroever, het bovenstrooms deel van een oeverbres de meeste golfenergie opvangt. Op de rechteroever is dat juist het benedenstroomse deel van de bres.

Als niet alleen sprake is van gescheiden op- en afvaart maar ook van rivierstroming, dan kunnen vooral langs de linkeroever, rivier- en scheepsretourstroming elkaar versterken en de stroomopwaarts gerichte scheepgolven wat steiler worden. Beide leidt tot een hogere belasting op de linkeroever. De meeste grotere oeverbressen in deze notitie bevinden zich op de linkeroever.

- rivierstroming

De beschouwde oeverbressen liggen vooral in stuwpannen, dus met sterkere rivierstroming alleen in een beperkte periode van het jaar. Omdat ook dat relevant kan zijn worden voor bankvullende rivierafvoeren, twee typen bresstroming onderscheiden; i) *retourstroming* door de bres, tegengesteld aan de stroomrichting in de hoofdgeul en ii) *langsstroming* door de bres, gelijk aan de stroomrichting in de hoofdgeul (dus zonder relevante loslating in de bres).

Zo'n onderscheid is relevant, omdat de bresstroming het uit de oever losgeraakt sediment verplaatst en dat beïnvloedt de verdere ontwikkeling van de bres.

i) retourstroming door de bres

Met retourstroming door de bres wordt niet de retourstroming rond varende schepen zelf bedoeld, maar de stromingen in de bres die stroomopwaarts zijn gericht, ook als deze worden opgewekt bij passerende schepen. De retourstroming door de bres is vooral te verwachten als stroming (rivier- of scheepsretourstroming) in de hoofdgeul

- o bij de *bovenstroomse aansluiting van de bres losraakt* van de rechte rivieroever.
Dat is het geval als op deze aansluiting de hoek tussen bresrand en rechte rivieroever groter is dan een grenswaarde (orde 5° á 15°).
- o bij de *benedenstroomse aansluiting in de bres wordt geschept*.
Dat is het geval als bij deze aansluiting de bresrand wordt aangestroomd door stroombanen uit de hoofdgeul, die vervolgens momentum-gedreven afbuigen in de bres. Het afbuigen vergt een grote hoek tussen bresrand en de richting van de aankomende stroombanen.

Retourstroming in de bres ontwikkelt alleen met grotere hoeken. Zo'n hoek is het gevolg van een ongelijke, richtingsafhankelijke bresgroei, bijvoorbeeld landinwaarts veel sneller dan stroomop-/afwaarts. Dat kan het gevolg zijn van ruimtelijk variërende erodeerbaarheid van oeversediment (zie sectie 4). Retourstroming in de bres is vanwege het ontstaan van grotere hoeken dus waarschijnlijk voor oevers met heterogene erodeerbaarheid (natuurlijke of antropogene lagen, erosie-remmende vegetatie,...).

ii) langsstroming door de bres

Voor kortere bressen is retourstroming bresvullend, voor langere bressen kan langsstroming domineren. Immers, retourstroming kan vooral ontwikkelen zolang de energiehoogte bij de benedenstroomse instroming (stuwpunt) hoger is dan bij die bij uitstroming. Door rivierverval is de lengte daarvan begrenst.

Als lange bressen met langsstroming ontwikkelen vanaf een bovenstrooms hard oeverstuk, dan dicteert mogelijk de stroming vanaf dit harde oeverstuk een groot deel van de stroming over de oever (zie als voorbeeld de oeverontwikkeling bij Venlo km 126). Met als gevolg dat de harde oever via de invloed op stroming ook de positie van hoogtelijnen op de nieuwe oever dicteert.

4) Sterkte van de oever

De sterkte van de oever lijkt afhankelijk van de erodeerbaarheid van het oeversediment dat wordt aangesneden en van het profiel dat in het eroderend deel van de oever wordt gevormd.

- variaties in erodeerbaarheid van het aangesneden sediment

Grofweg geldt voor de bres dat deze vanwege de ondergrond

langer wordt (in de richting stroomop-/afwaarts)

- o als hardere bodemlagen in de oever (natuurlijk of antropogeen), parallel aan de hoofdgeul, de bresgroei *landinwaarts* remmen zodat alleen uitbreiding stroomop-/afwaarts resteert

dieper wordt (dus verder landinwaarts)

- o als afwijkend erodeerbare bodemlagen (natuurlijk of antropogeen) loodrecht op de hoofdgeul, de bresgroei landinwaarts stimuleren
- o als hardere punten in de oever, de bresgroei *stroomop-/afwaarts* remmen zodat alleen uitbreiding landinwaarts resteert.

- ontwikkeling van een oeverstrand

Als stroming door de bres en de erodeerbaarheid van aangesneden sediment door de jaren niet veranderen, lijken oeverbressen *gelijkvormig* en asymmetrisch te ontwikkelen. Asymmetrie

vermoedelijk vanwege ongelijke ruimtelijke verdeling van invallende golven en van stroming door de bres.

In bressen op de linkeroever vangt het bovenstrooms deel de meeste golfenergie op, op de rechteroever is dat het benedenstroomse deel. De bresstroming bepaalt waar sediment in de bres verzamelt of juist verdwijnt. Een aantal van de beschouwde oevers laat een grote hoek zonder breed oeverstrand op de benedenstroomse aansluiting tussen bres en rechte rivieroever zien. Dat duidt op retourstroming die benedenstrooms de bres instroomt. In die voorbeelden wordt, ter plekke van de instroming van sneller-stromend, sediment-armer water uit de hoofdgeul, het sediment dat uit de oever is losgeraakt, bres-inwaarts verplaatst. Met als gevolg dat een oeverstrand op het instroompunt niet goed ontwikkelt en er hogere erosiedruk blijft bestaan op de bresrand ter plekke.

Waar stroomsnelheden in bres inzakken, accumuleert sediment tot een breder oeverstrand. Met oeverstrand voor de bresrand kan een deel van de golf & stroomenergie op het strand dissiperen en dat vermindert de belasting op de steile bresrand daarachter. De aanwezigheid van een oeverstrand is daarmee een indicatie van erosie druk op de bresrand ter plekke.

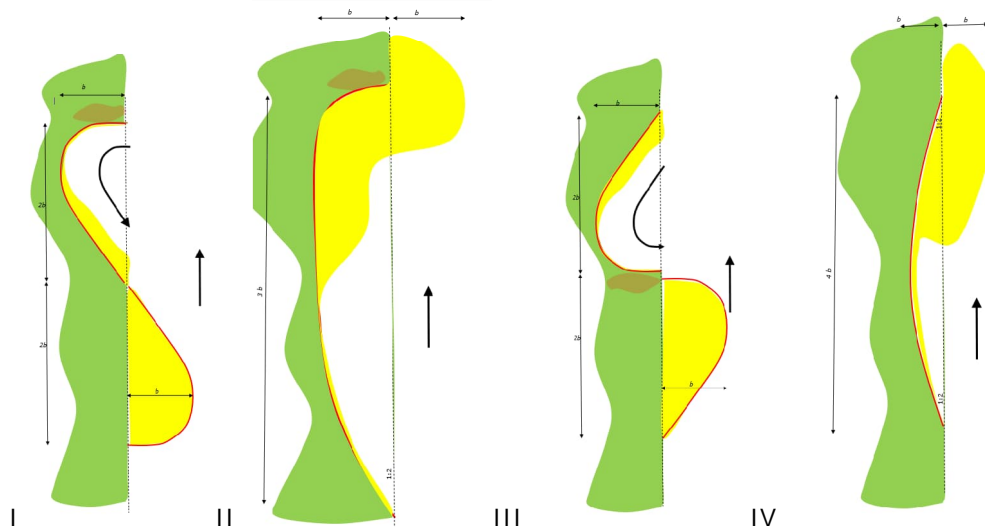
Als vanwege een lagere erodeerbaarheid delen van de bres niet uitbreiden, ontbreekt daar in het algemeen een breder oeverstrand. Immers, als andere stukken van de bres blijven uitbreiden, groeien stroming door de bres en gradiënten in oeverprofiel door. Dat leidt tot een toenemende druk op deze stabielere stukken.

Naast het oeverstrand in de bres is het onderwateroever op de uitstroompunten relevant. Bij een aantal van de oeverbressen is deltavorming op de onderwateroever van de hoofdgeul te zien. Hoogstwaarschijnlijk is dit gevormd door sediment dat uit de oever is losgeraakt, uit de bres is gestroomd en vanwege lagere snelheden op de onderwateroever van de hoofdgeul achterblijft. Deze delta's zijn in stuwpannen mogelijk wat duidelijker te herkennen dan in permanent vrij-afstromende trajecten.

5 Karakteristieken bresvorm.

De verkenning leidt tot de volgende typen bresvorm:

- I) een bres met één rechte hoek op de benedenstroomse aansluiting met de rechte oever en retourstroming in met name het benedenstroomse deel van de bres
- II) een bres met één rechte hoek op de benedenstroomse aansluiting met de rechte oever zonder retourstroming
- III) een bres met één rechte hoek op de bovenstroomse aansluiting met de rechte oever en retourstroming.
- IV) een bres zonder rechte hoeken op beide aansluitingen



Grubbenvorst km 115.4 lo (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)



Benedenstroomse oever bij de bres is in de beschouwde jaren stabiel, vermoedelijk vanwege lokale bestorting bij de bakenboom. De instroom naar de bres vindt plaats aan de benedenrand van de bres, langs het stabiele oeverstuk van de bakenboom. De initiële bres groeit landwaarts tot grofweg in 2010 een stabielere laag wordt aangesneden. Dan stagneert de uitbreiding landinwaarts en blijft bresgroei in de richting stroomopwaarts over. In 2020 wordt een deel van de oever in het benedenstroomse deel van de bres hersteld en vermoedelijk bestort. In stroomopwaartse richting blijft de bres uitbreiden (orde 1 m/jaar). Het sediment uit de bres slaat in de hoofdgeul neer direct bovenstrooms van de bresrand. De lengte van de sedimentatie op de onderwateroever van de hoofdgeul is voornamelijk vergelijkbaar met de breslengte landinwaarts.

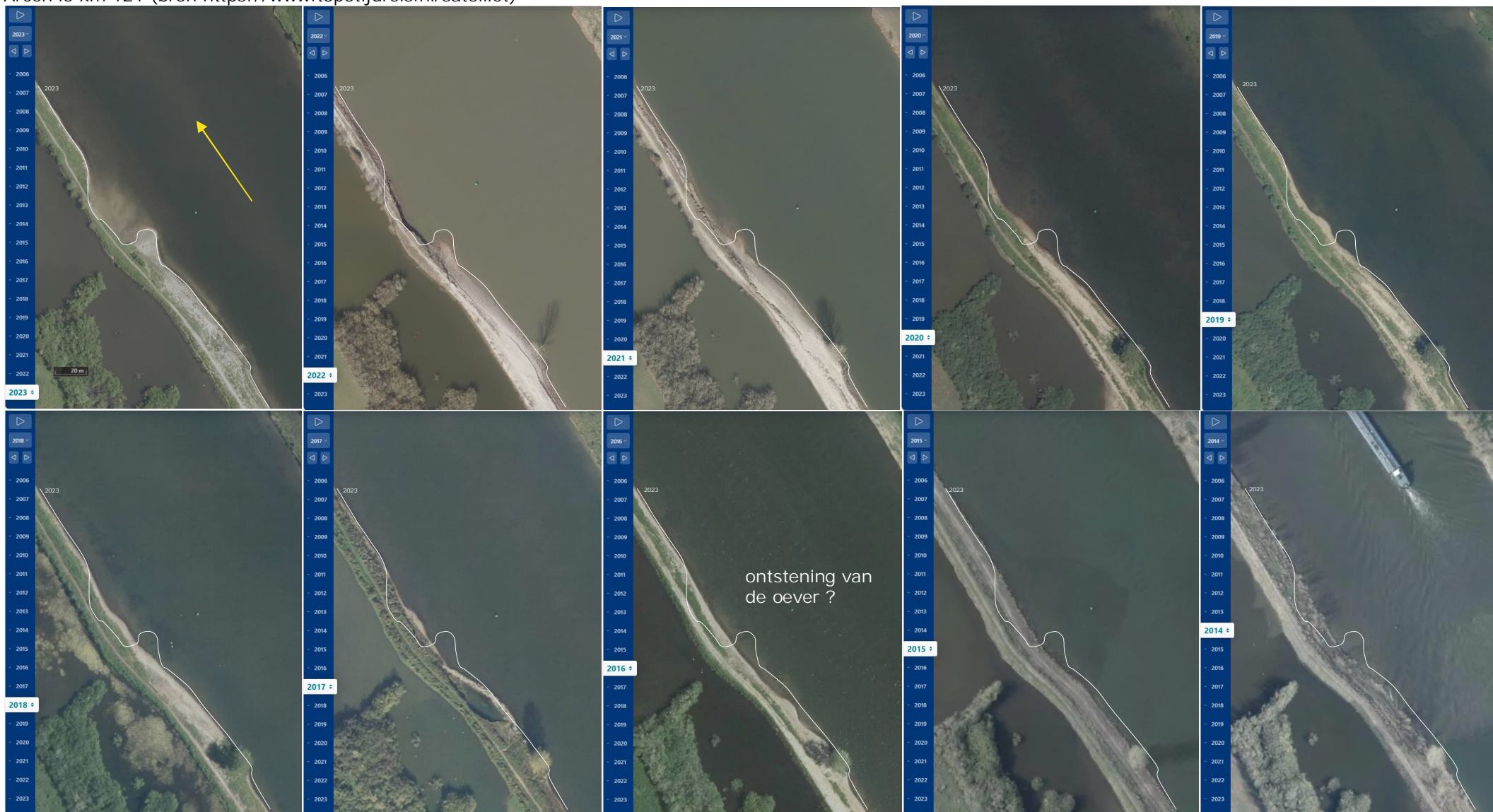
Lottum, km 188 lo (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)



De groei van de bres landinwaarts lijkt te zijn geremd, mogelijk omdat hardere lagen zijn aangesneden. In bovenstroomse richting breidt de bres zich met ongeveer 3 m/jaar uit. Deze bresrand staat vrijwel loodrecht op de hoofdgeul. Het sediment uit de bres lijkt als gevolg van de retourstroming door de bres direct bij de bovenstroomse bresrand in de hoofdgeul te worden neergelegd.

De ontwikkeling van een oeverstrand valt uit deze waarnemingen niet goed af te leiden. Als de opbouw daarvan afwezig is, blijft verdere bresgroei landinwaarts in de toekomst nog steeds mogelijk.

Arcen lo km 121 (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)



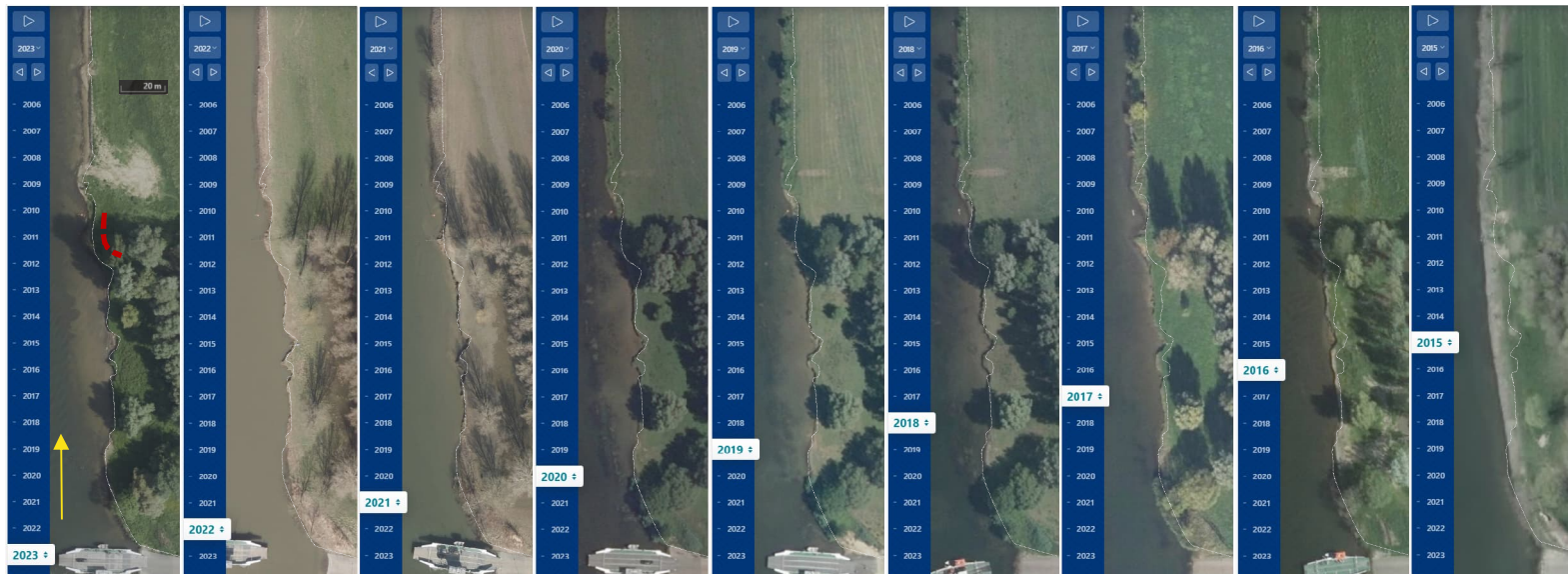


Deze “bres” ontwikkelt op een locatie waar een hogere oever overgaat in een lagere oever. Vermoedelijk is tussen in 2014 of 2015 bestorting van de oever verwijderd. Omdat sindsdien een duidelijke steilrand is te herkennen, lijkt met die ingreep de oevererosie op deze plek op gang te zijn gekomen.

De steilrand ligt, net als de oeverlijn grotendeels parallel aan de hoofdstroom richting van de geul. Ondanks dat de erosie niet tot een echte komvormige bres ontwikkelt, lijkt ook hier sprake van geconcentreerde uitstroming van sediment stroomopwaarts. Dit valt af te leiden uit de sedimentatie in de hoofdgeul, direct aan de bovenstroomse rand van de bres.

Omdat ter plekke van de bres geen oeverstrand aanwezig lijkt, is verdere erosie van de oever in komende jaren waarschijnlijk.

Venlo km 122 ro

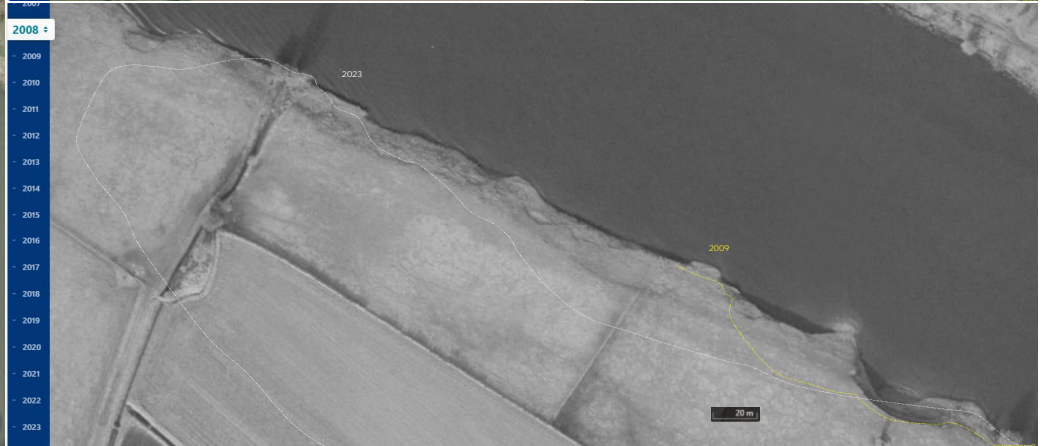


De oevererosie ontwikkelt op een oeverdeel direct benedenstrooms van de bestorting bij de veerstoep. Hoewel er enkele kleine bressen zijn ontstaan, is de oever als geheel in deze jaren redelijk stabiel. Een gradiënt lijkt te ontstaan aan de benedenstroomse rand van de bomerrij (gemarkeerd met rode contour). Dat kan bresgroei landinwaarts gaan stimuleren, maar deze ontwikkeling is nog te klein om verschillen in oeverstabiliteit te vermoeden.

Km 126 Venlo (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)



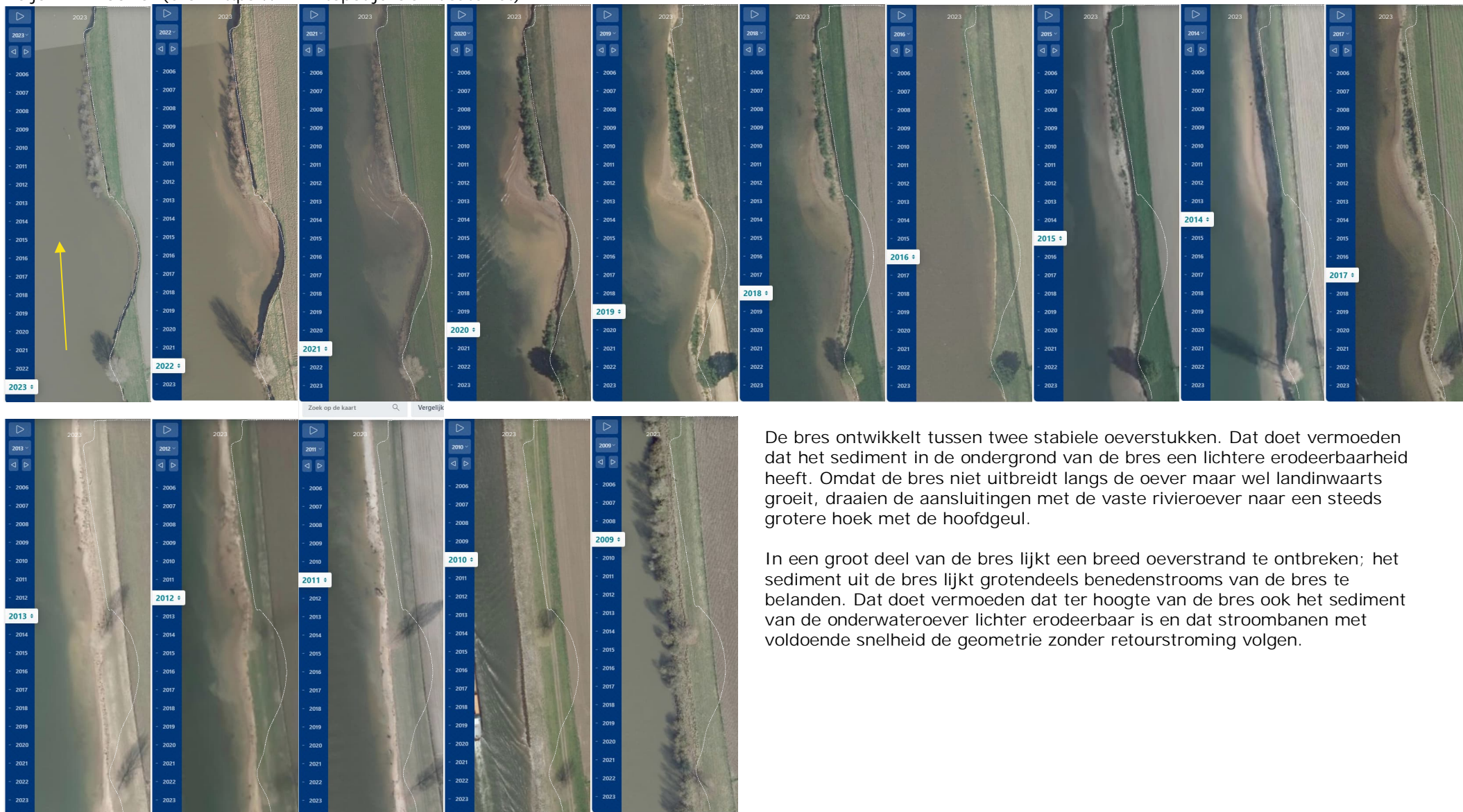




Deze oever is door de jaren aangepast van een gewone, hogere (tov stuwpeil) en vermoedelijk onbeschermd zandige binnenbocht-oever (2006) naar uiteindelijk een door stroming gevormde staart van een landstrook tussen hoofdgeul en een nieuwe, gegraven geul in de uiterwaard. De bres in de eerste jaren van de beschouwde periode, ontwikkelt vanaf een vast oeverpunt stroomafwaarts. Een opvallend grote bresgroei (circa 60 m in benedenstroomse richting) vond plaats tussen 2006 en 2009. Bij de ontwikkeling van de bres valt op dat de ligging van de steilrand rondom het vaste oeverpunt door volgende jaren nauwelijks verandert. De oriëntatie van de steilrand vanaf dit vaste oeverpunt, lijkt uiteindelijk zelfs de ligging van de steilrand over de hele dynamische oever te bepalen. Kortom, dit vaste oeverpunt bovenstrooms fungeert als een "morfologische randvoorwaarde" voor de oever stroomafwaarts daarvan.

Tussen 2013 en 2006 lijkt de benedenstroomse rand van de bres te stuiten op een harder oeverstuk. Na 2013 is ook dit hardere stuk bezweken en zet de bresgroei stroomafwaarts zich met grofweg 5 m/jaar voort. In het beeld van 2023 heeft alleen het bovenstroomse deel van de nieuwe oever, dus het deel dat door de jaren heen een vrijwel onveranderde steilrand heeft vanaf het vaste oeverdeel, een flauw oeverstrand. In het benedenstroomse deel van de nieuwe oever ontbreekt dit nog, als indicatie dat erosie van dat deel voorlopig door kan gaan.

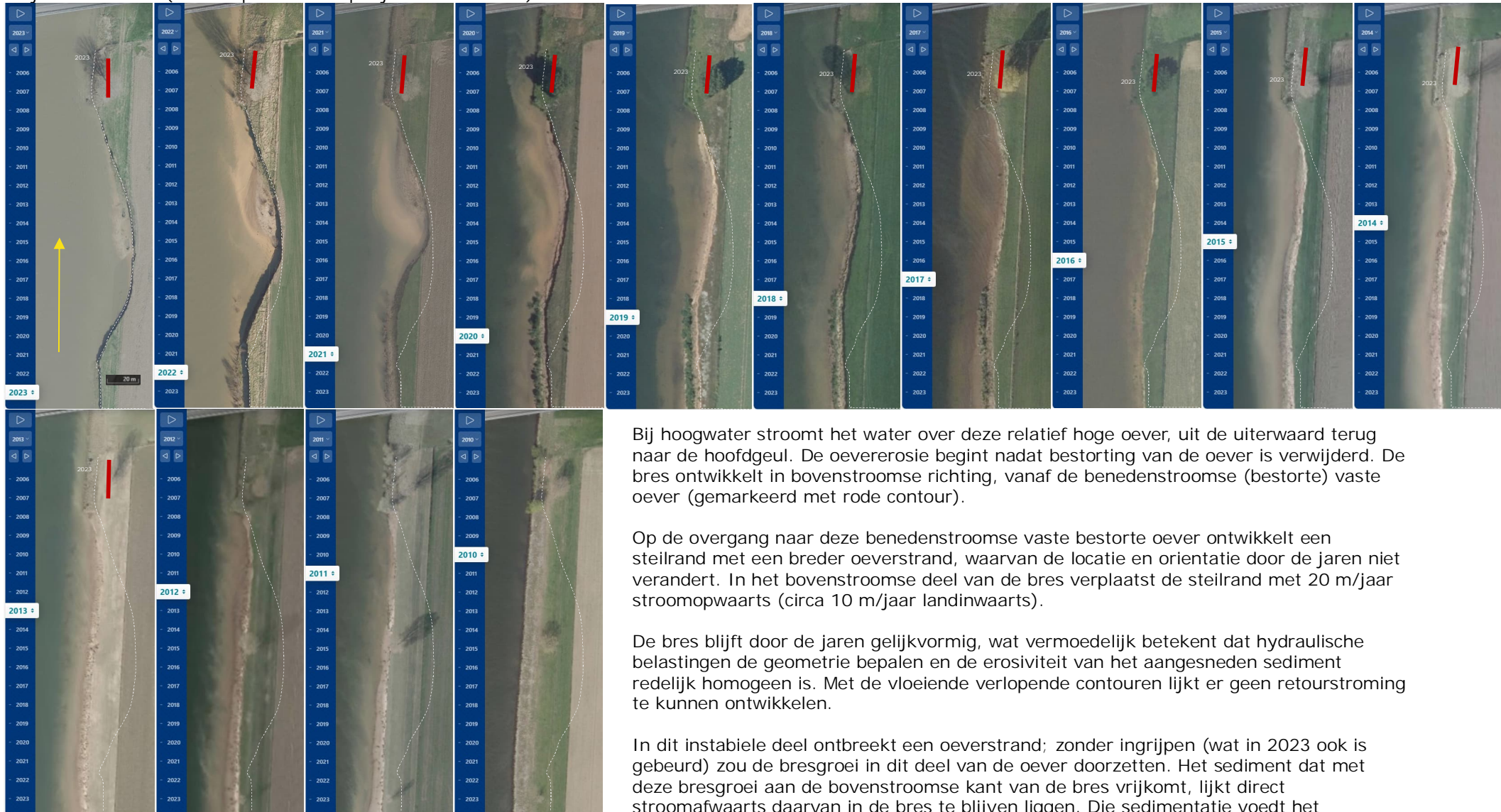
Heijen km 150 ro (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)



De bres ontwikkelt tussen twee stabiele oeverstukken. Dat doet vermoeden dat het sediment in de ondergrond van de bres een lichtere erodeerbaarheid heeft. Omdat de bres niet uitbreidt langs de oever maar wel landinwaarts groeit, draaien de aansluitingen met de vaste rivieroever naar een steeds grotere hoek met de hoofdgeul.

In een groot deel van de bres lijkt een breed oeverstrand te ontbreken; het sediment uit de bres lijkt grotendeels benedenstrooms van de bres te belanden. Dat doet vermoeden dat ter hoogte van de bres ook het sediment van de onderwateroever lichter erodeerbaar is en dat stroombanen met voldoende snelheid de geometrie zonder retourstroming volgen.

Heijen ro km 151 (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)



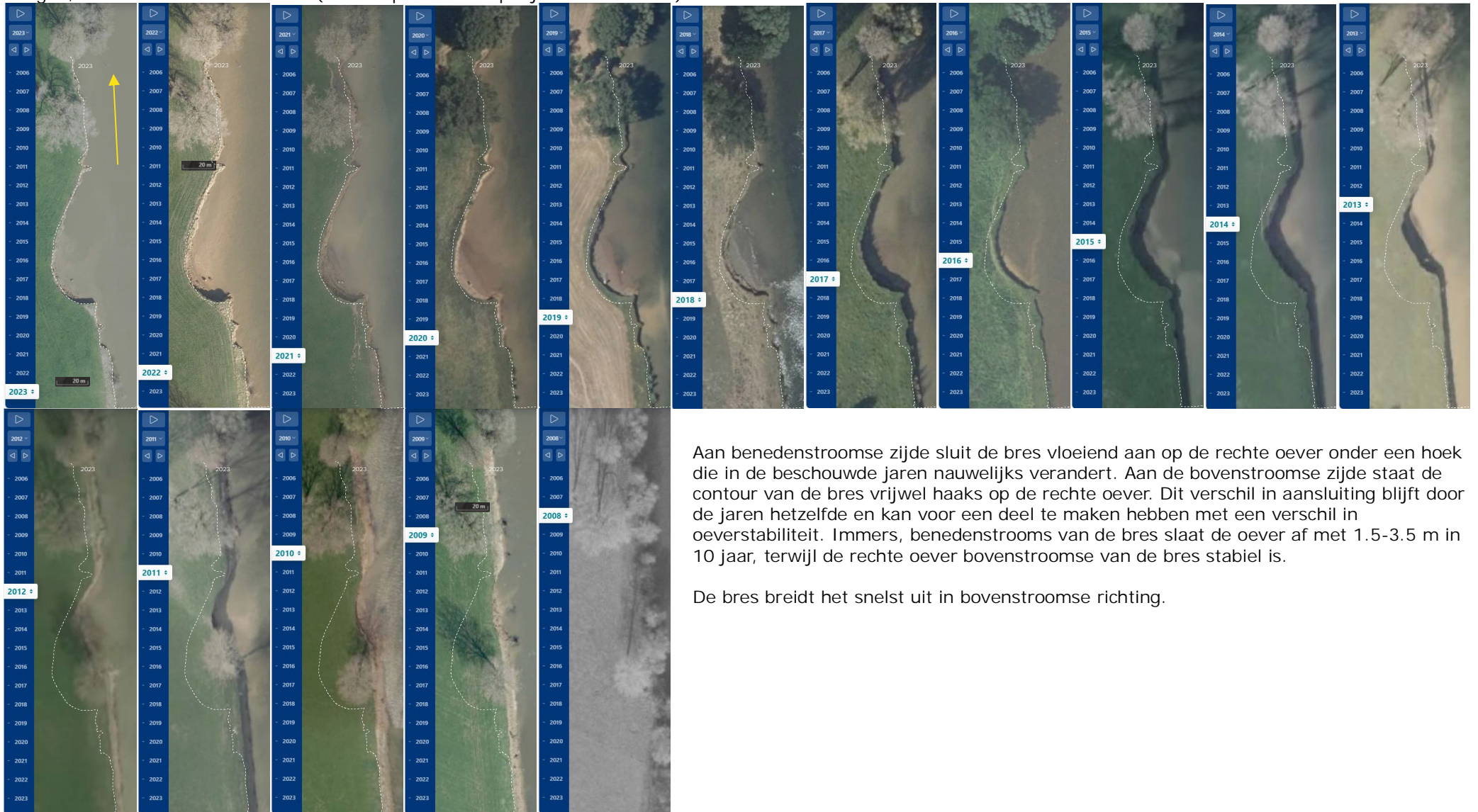
Bij hoogwater stroomt het water over deze relatief hoge oever, uit de uiterwaard terug naar de hoofdgeul. De oevererosie begint nadat bestorting van de oever is verwijderd. De bres ontwikkelt in bovenstroomse richting, vanaf de benedenstroomse (bestorte) vaste oever (gemarkeerd met rode contour).

Op de overgang naar deze benedenstroomse vaste bestorte oever ontwikkelt een steilrand met een breder oeverstrand, waarvan de locatie en oriëntatie door de jaren niet verandert. In het bovenstroomse deel van de bres verplaatst de steilrand met 20 m/jaar stroomopwaarts (circa 10 m/jaar landinwaarts).

De bres blijft door de jaren gelijkvormig, wat vermoedelijk betekent dat hydraulische belastingen de geometrie bepalen en de erosiviteit van het aangesneden sediment redelijk homogeen is. Met de vloeiende verlopende contouren lijkt er geen retourstroming te kunnen ontwikkelen.

In dit instabiele deel ontbreekt een oeverstrand; zonder ingrijpen (wat in 2023 ook is gebeurd) zou de bresgroei in dit deel van de oever doorzetten. Het sediment dat met deze bresgroei aan de bovenstroomse kant van de bres vrijkomt, lijkt direct stroomafwaarts daarvan in de bres te blijven liggen. Die sedimentatie voedt het oeverstrand (en de daarvan afhankelijke stabiliteit van de steilrand) in het benedenstroomse deel van de bres.

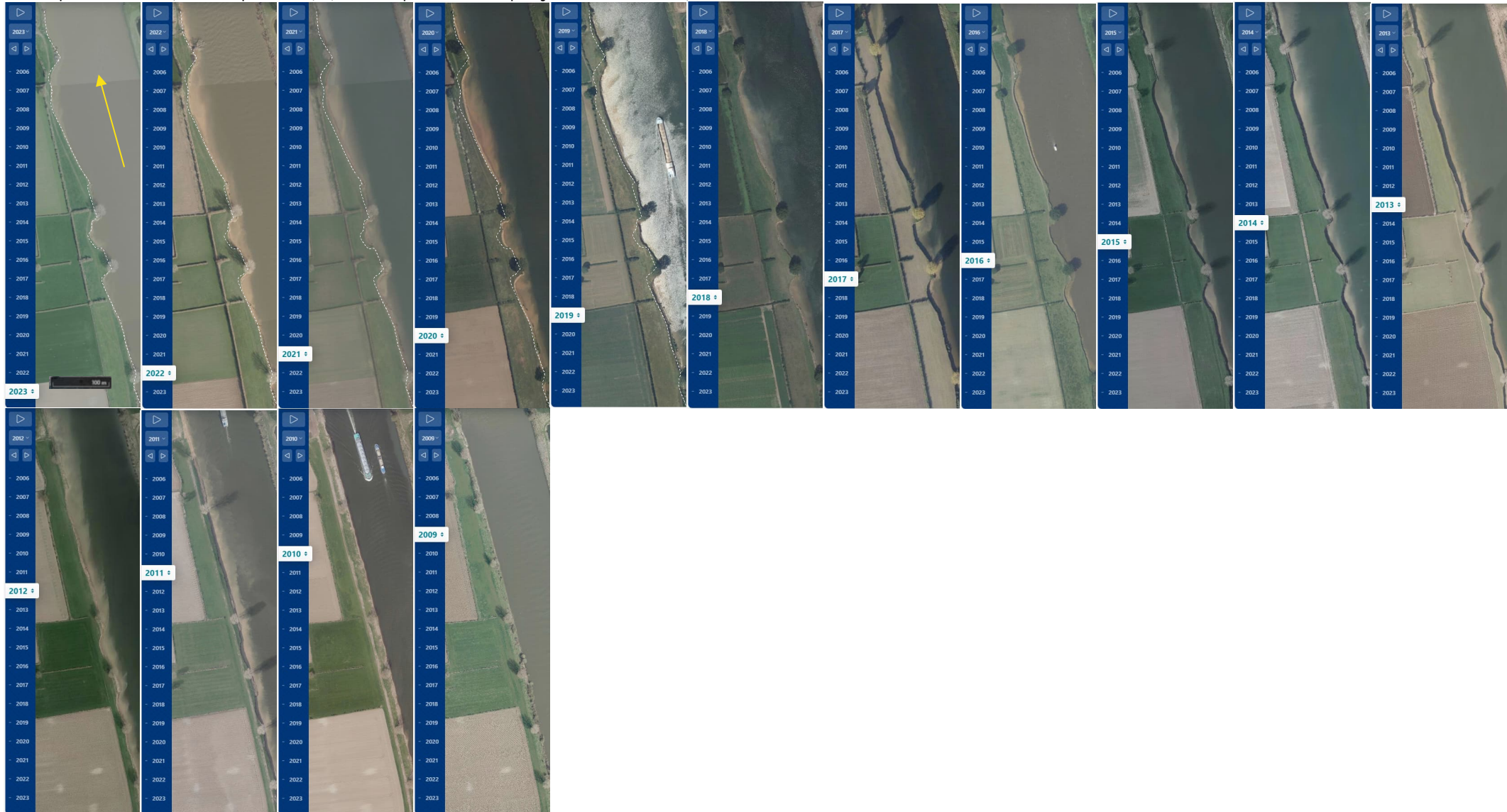
Beugen, De Witte Steen Km 153 lo (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)



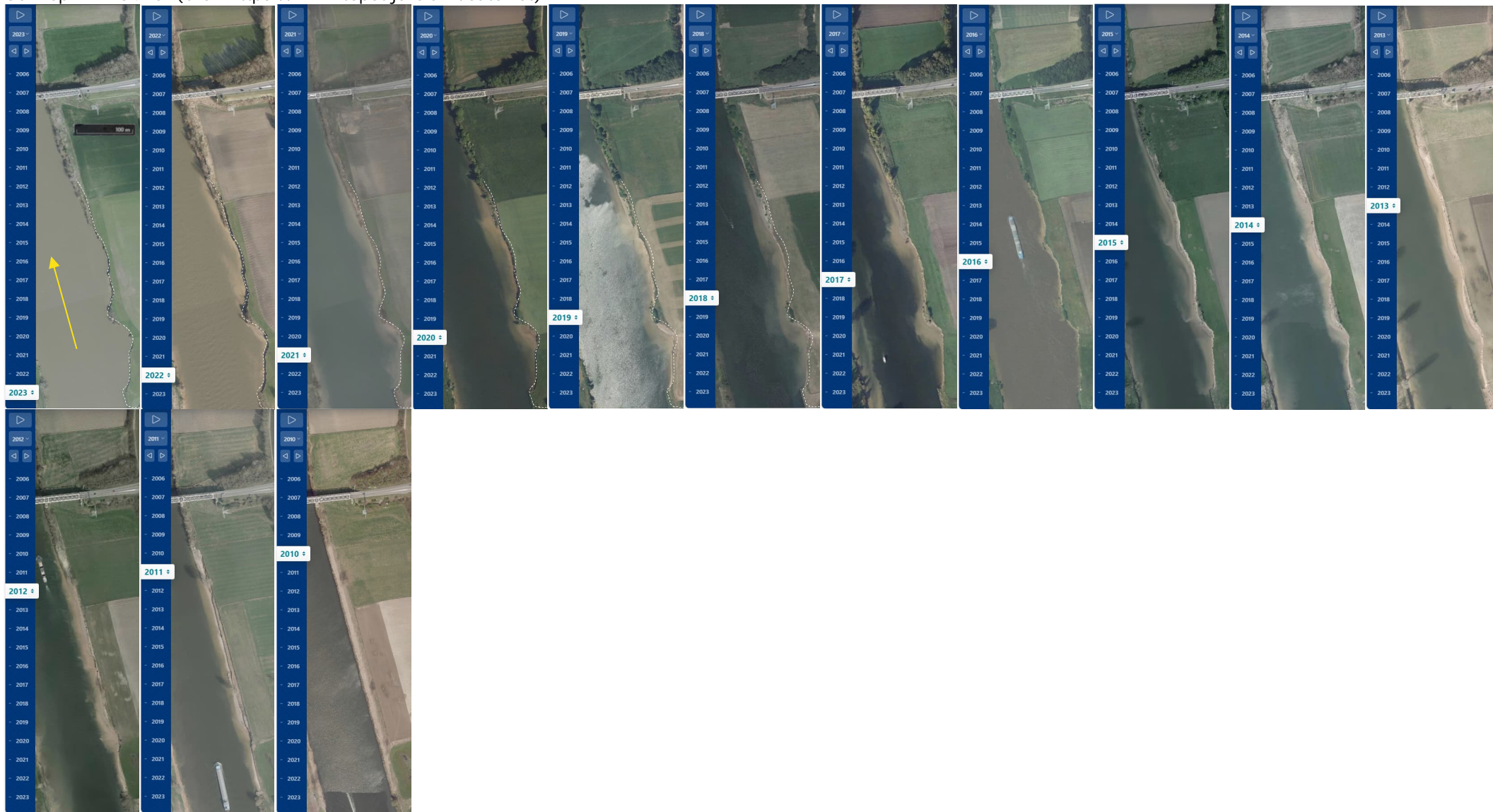
Aan benedenstroomse zijde sluit de bres vloeiend aan op de rechte oever onder een hoek die in de beschouwde jaren nauwelijks verandert. Aan de bovenstroomse zijde staat de contour van de bres vrijwel haaks op de rechte oever. Dit verschil in aansluiting blijft door de jaren hetzelfde en kan voor een deel te maken hebben met een verschil in oeverstabiliteit. Immers, benedenstrooms van de bres slaat de oever af met 1.5-3.5 m in 10 jaar, terwijl de rechte oever bovenstroomse van de bres stabiel is.

De bres breidt het snelst uit in bovenstroomse richting.

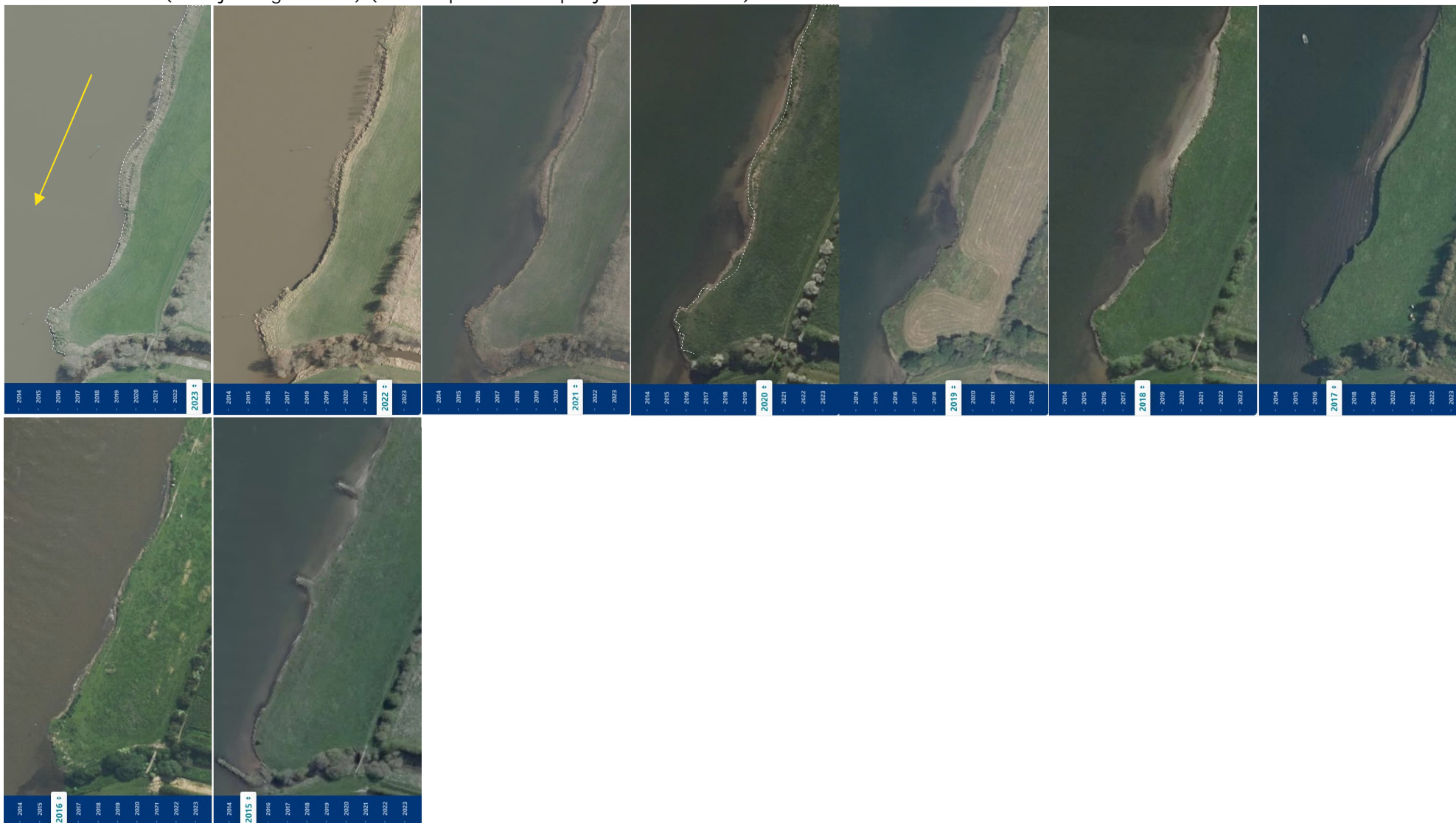
Gennep km 153 lo (100 m ipv 20 m) (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)



Gennep km 154 ro (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)

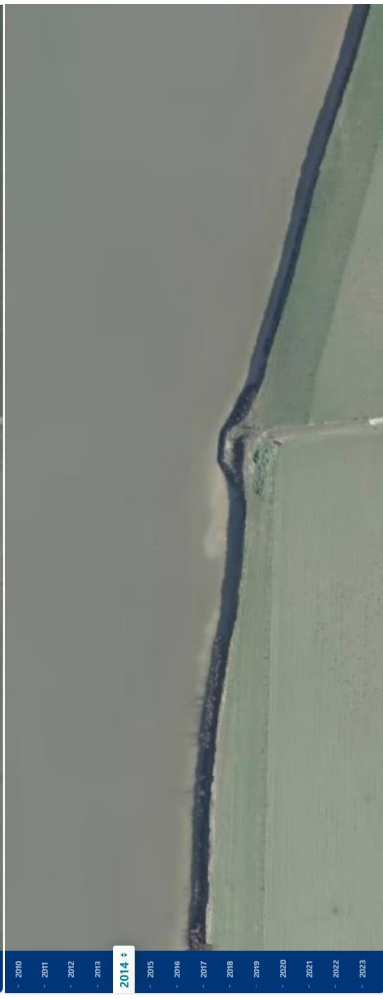
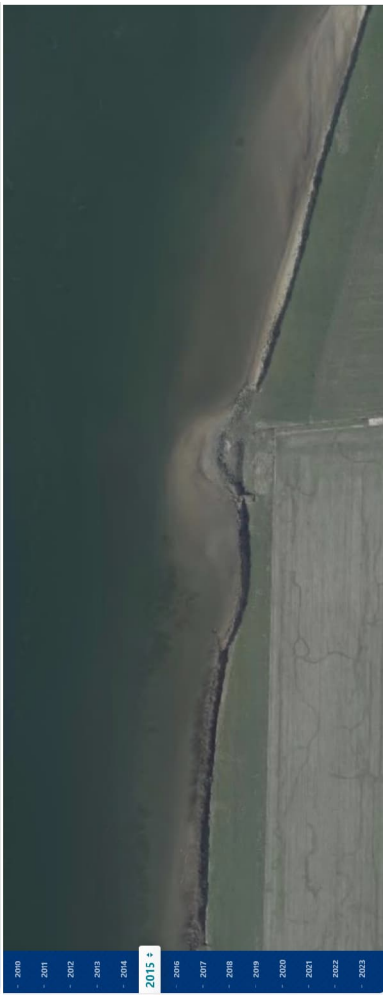


Oeffelt lo km 157 (verwijdering kribben) (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)



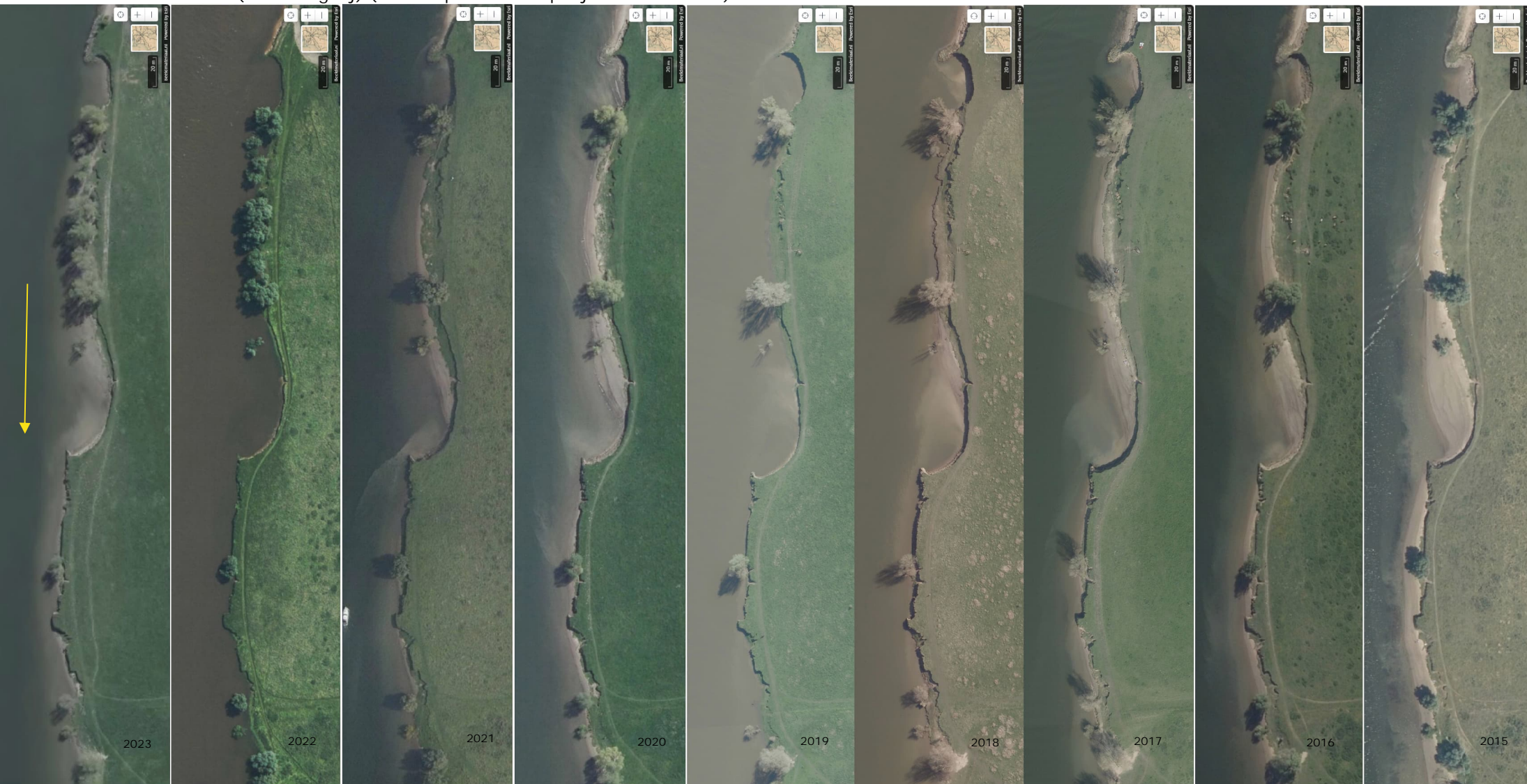
Grave, lo km 177 (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)





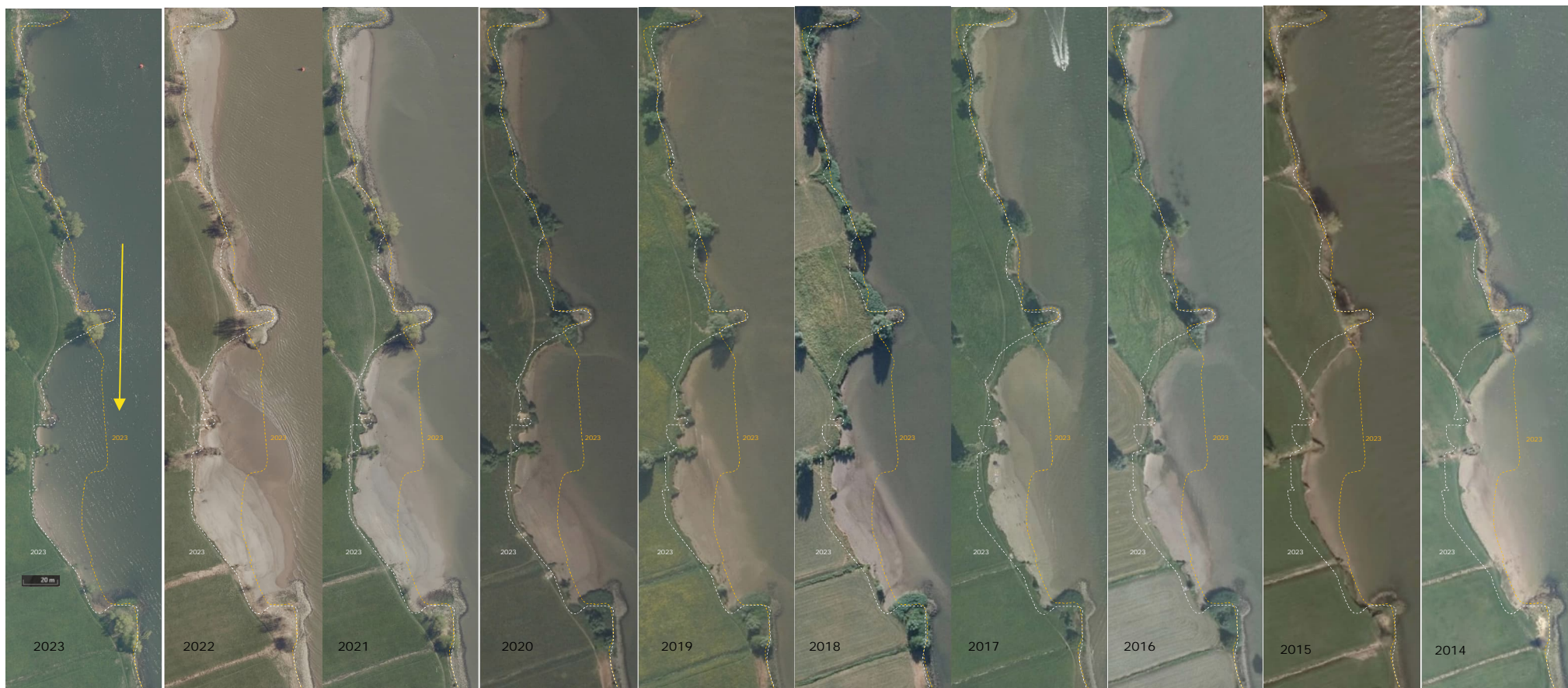


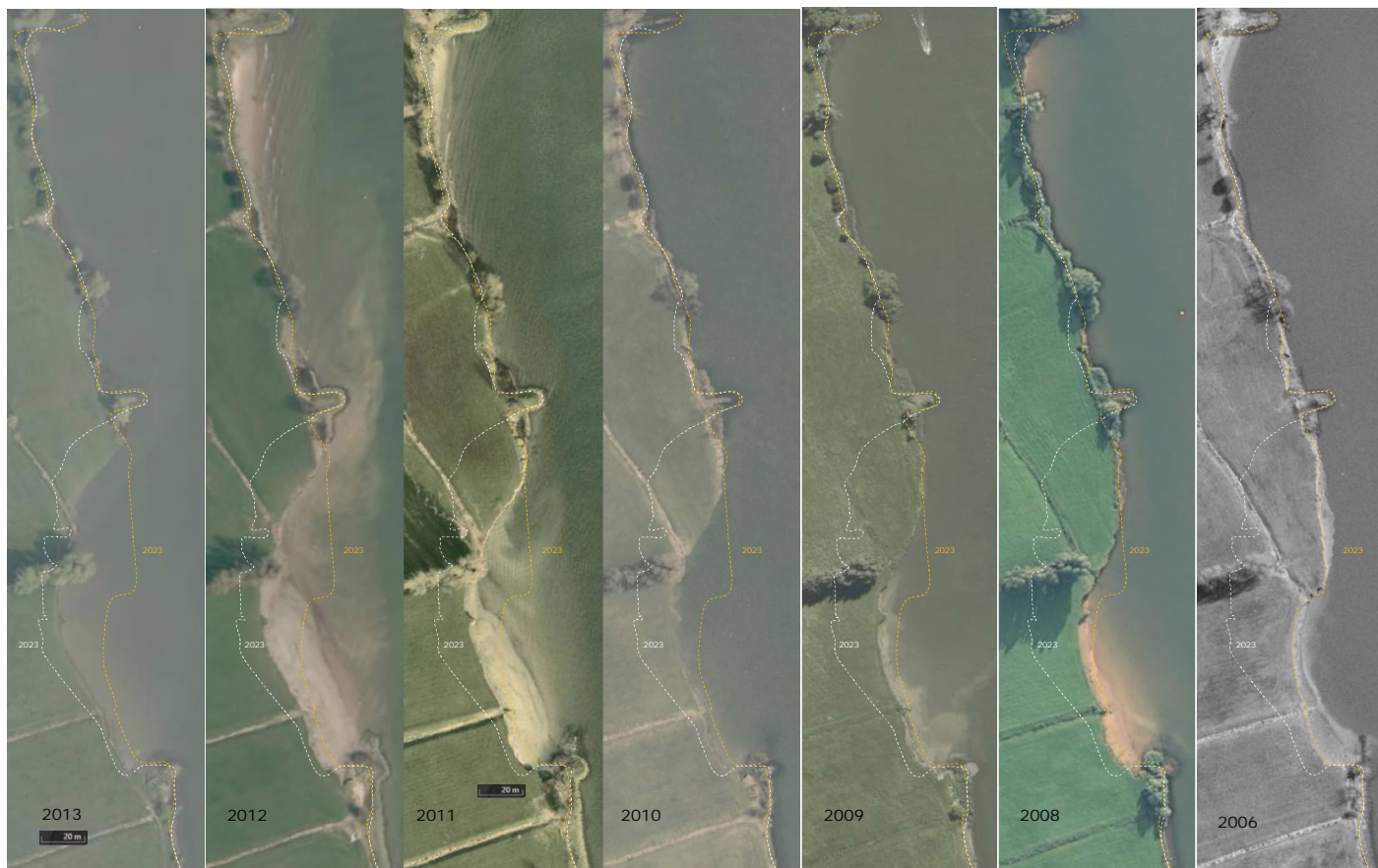
Den Bosch km 219 (inclusief getij) (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)





Lek km 968 ro (inclusief getijde) (bron <https://www.topotijdreis.nl/satelliet>)



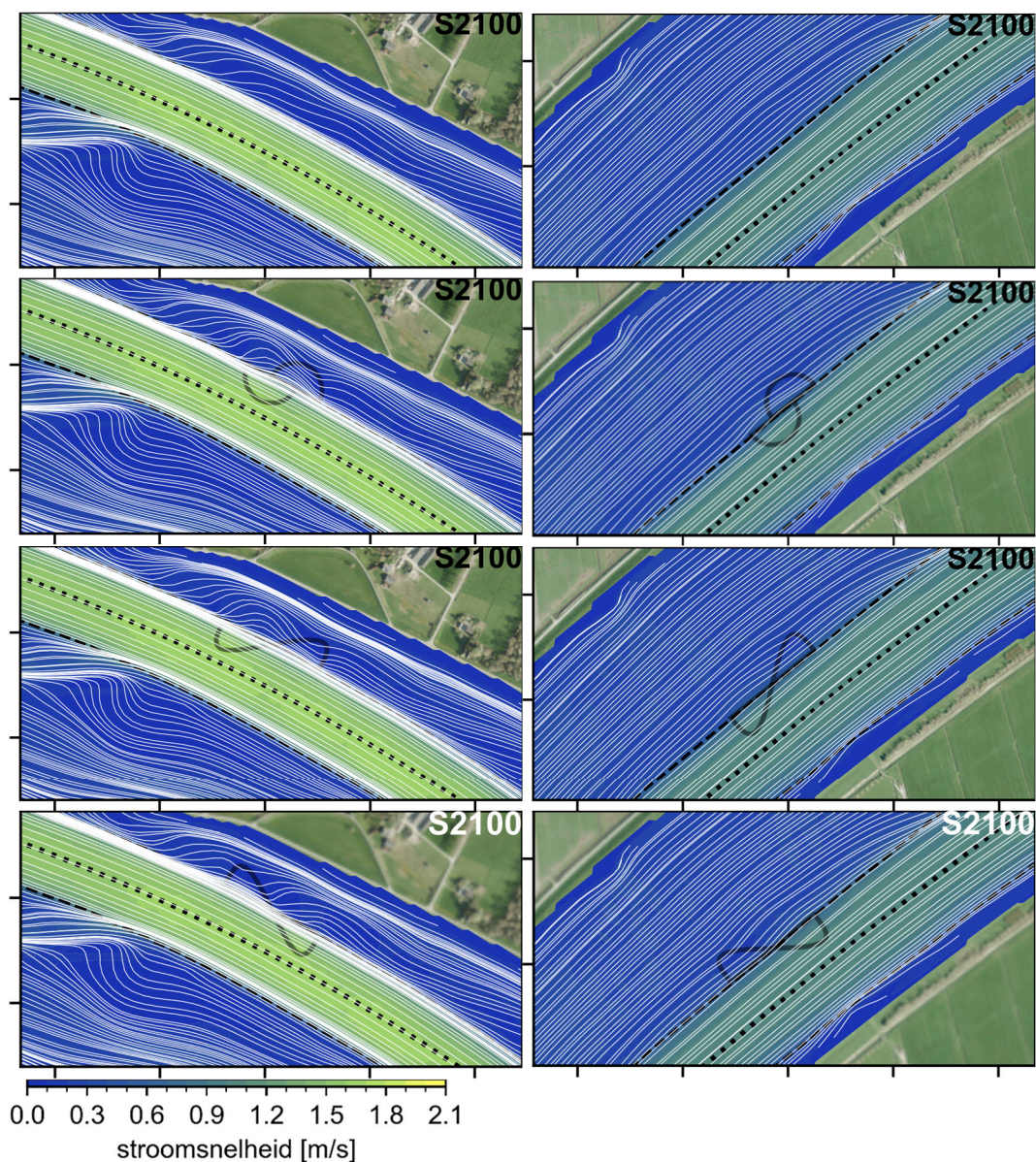


In deze beelden kan de ontwikkeling van de bres vanaf 2006 worden gevolgd. De bres groeit zowel landinwaarts als stroomopwaarts (met betrekking tot rivierafvoer).

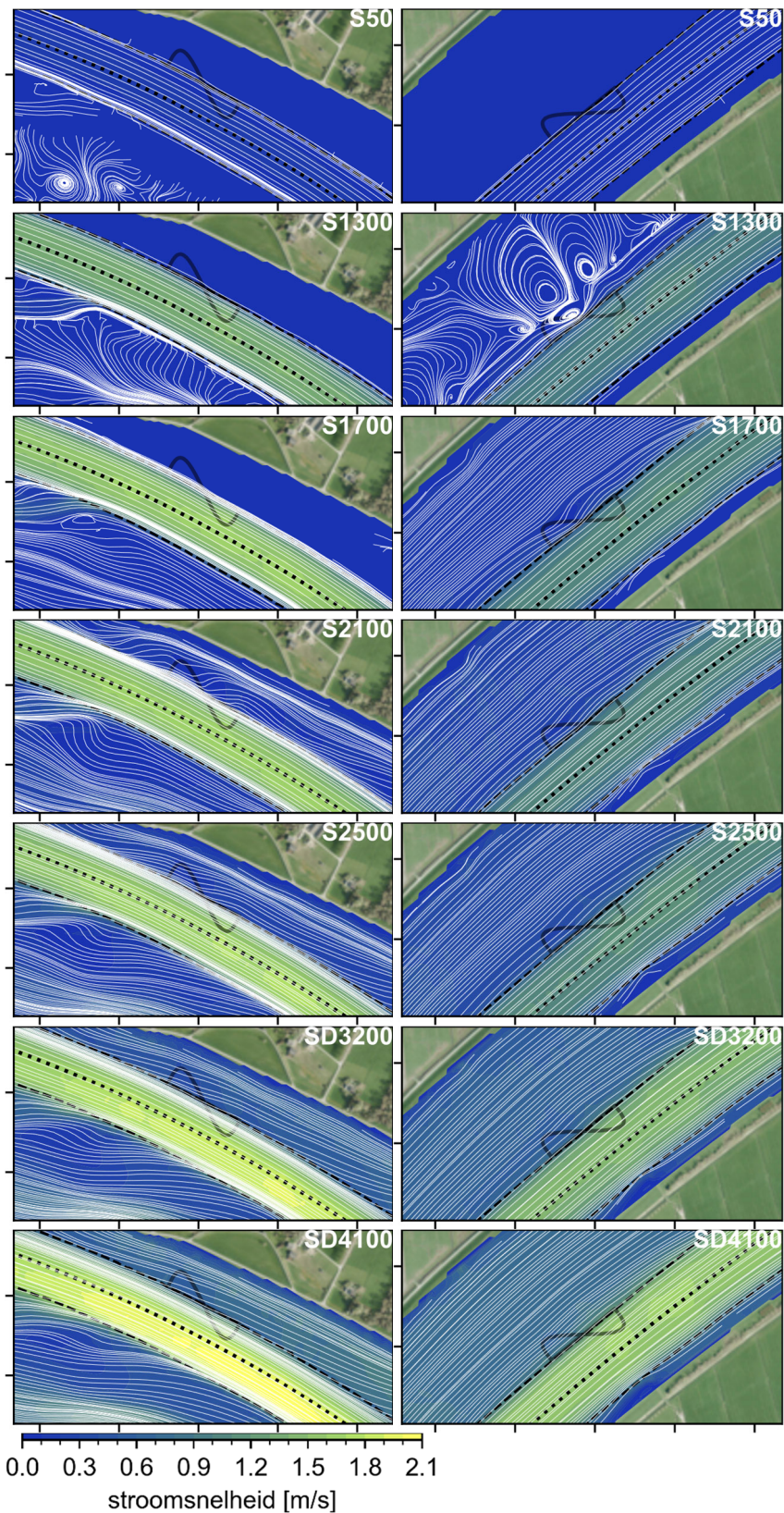
De bres groeit in de richting van de bovenstroomse krib met een snelheid van ongeveer 8 m/jaar. Langs deze stroomopwaarts verplaatsende bresrand is geen breed oeverstrand aanwezig.

Landinwaarts groeit de bres langzamer, ongeveer 1 a 2 m/jaar. Langs deze rand (in het benedenstroomse deel van de bres) ontwikkelt een breed oeverstrand.

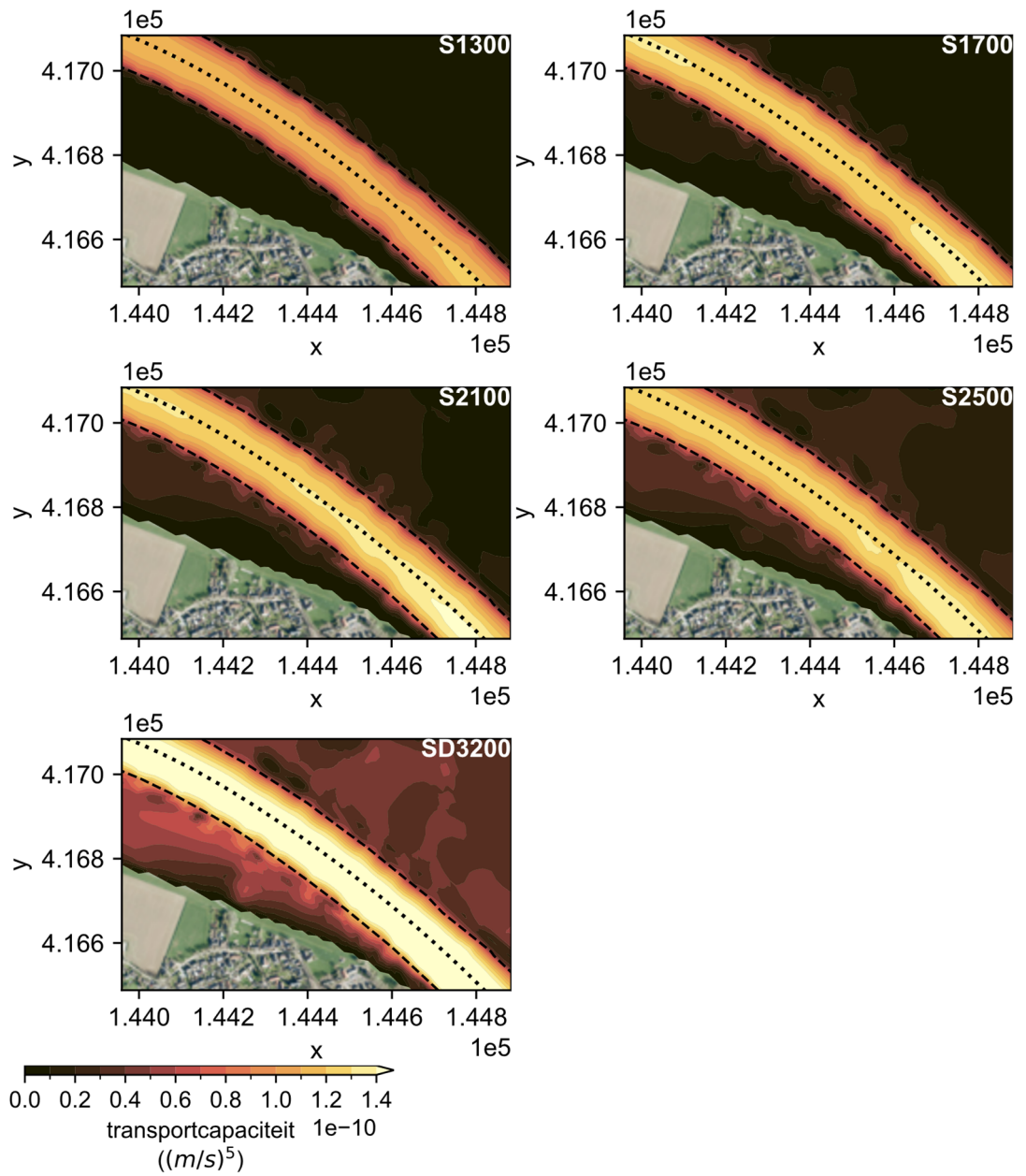
B Aanvullende stroombeelden



Figuur B-1. Stroombeelden met en zonder een NVO van 50 m breed (erosie én depositie) van verschillende vormen voor afvoer S2100. De witte lijnen geven de stroomlijnen aan en de zwarte gestippelde lijn de rivieras. Strooming is van rechts naar links. Links: locatie 1, rechts: locatie 2.

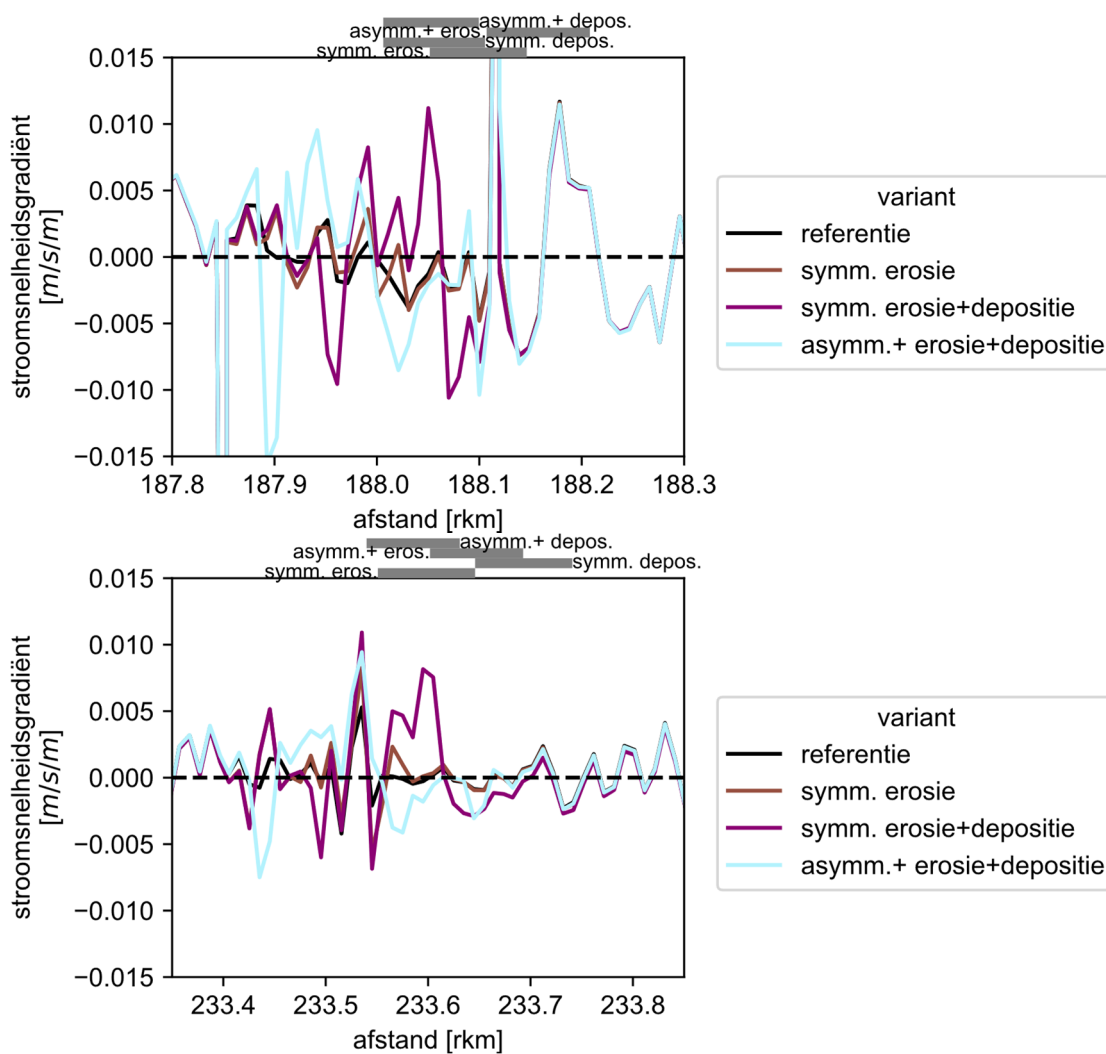


Figuur B-2. Stroombeelden met een asymmetrische NVO van 50 m breed (erosie én depositie) met retourstroming voor verschillende afvoeren. De witte lijnen geven de stroomlijnen aan en de zwarte gestippelde lijn de rivieras. Strooming is van rechts naar links. Links: locatie 1, rechts: locatie 2.

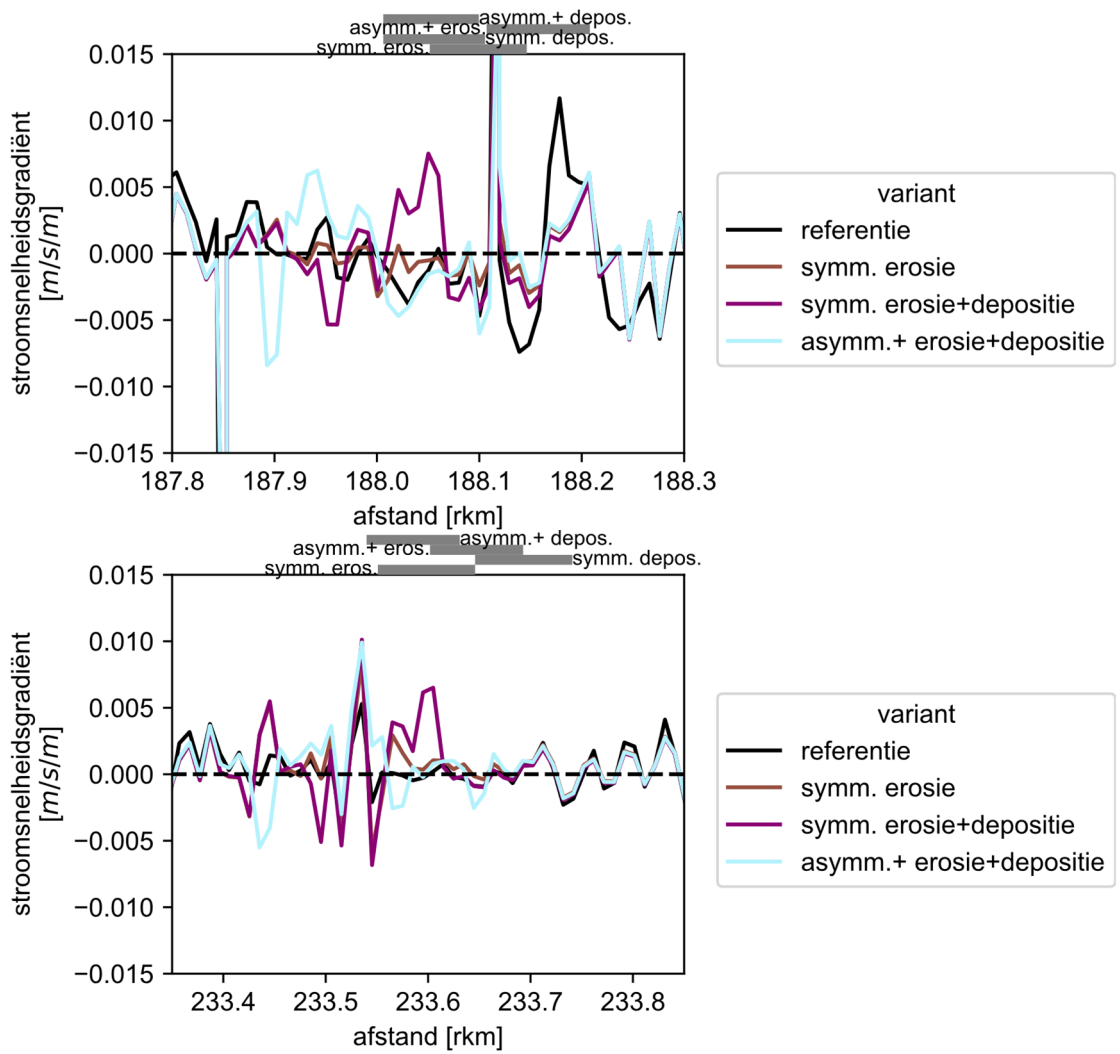


Figuur B-3. Transportcapaciteit van sediment in het gekozen riviertraject met kribben, voor verschillende afvoeren.

C Aanvullende effectbeoordeling



Figuur C-1. Stroomsnelheidsgradiënten langs de rechteroever uit Baseline (sectie 1) ter hoogte van een NVO van 50 m breed, afvoersom S1700. Boven: locatie 1, onder: locatie 2.



Figuur C-2. Stroomsnelheidsgradiënten langs de rechteroever uit Baseline (sectie 1) ter hoogte van een NVO van 50 m breed, afvoersom S2500. Boven: locatie 1, onder: locatie 2.

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