

## Pilot houten schermen in de IJssel

Analyse waarnemingen tot een jaar na aanleg



**Pilot houten schermen in de IJssel**  
Analyse waarnemingen tot een jaar na aanleg

**Auteur(s)**

Frans Buschman  
Anna Kusters

**Partners**

Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud Gebouw Westraven, UTRECHT  
BAM / Van den Herik  
Aquatic drones

## Pilot houten schermen in de IJssel

Analyse waarnemingen tot een jaar na aanleg

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Grote Projecten en Onderhoud Gebouw Westravenleerteam SSRS IJssel Twentekanaal
<b>Contactpersoon</b>	Leerteam SSRS (Yuri Wolf, Tim van der Lugt en Heleen Vreugdenhil)
<b>Referenties</b>	Self supporting rivier systeem; KPP Corporate Innovatie Programma
<b>Trefwoorden</b>	Oevererosie, sedimentsturing, binnenbocht, rivierhout, morfologie

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	30-03-2021
<b>Projectnummer</b>	11205244-005
<b>Document ID</b>	11205244-005-GEO-0003
<b>Pagina's</b>	88
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Frans Buschman	
	Anna Kusters	

# Samenvatting

In de IJssel bij Zalk zijn drie houten schermen gerealiseerd in november 2019. De houten schermen hebben als doel om sediment naar de oever te geleiden en golven te dempen, zodat de vooroever aanzandt. De schermen zijn gerealiseerd door Corsicaanse Dennen de grond in te trillen als standers. Daartussen zijn relatief kleinere en krommere stammen uit de uiterwaarden gelegd. Als bovenste laag zijn Corsicaanse Dennen neergelegd en verankerd met staalkabels, zodat er geen stammen uit de schermen kunnen ontsnappen. Deze pilot is een samenwerking tussen Rijkswaterstaat, BAM/Van den Herik en Deltares en is onderdeel het programma *Self Supporting River Systems* (SSRS).

De bodemligging is op verschillende momenten in het jaar na realisatie bepaald in de rivier met een multibeamecholood vanaf een varende drone en op de vooroever met peilstokmetingen. Bij de houten schermen is de oever en vooroever stabiel gebleven. Benedenstrooms van de schermen is tussen de houten schermen en een veerstoep oevererosie waargenomen, net als voorafgaand aan de pilot. Hoewel een periode met verhoogde afvoer is opgetreden (deze piekafvoer komt ongeveer eens in de 2 jaar voor), is het beoogde effect van de houten schermen niet zichtbaar.

Het is mogelijk dat het geleidende effect pas sterk optreedt bij een hoogwater, wanneer nog meer sedimentrijk water langs de bodem wordt getransporteerd dan tijdens de periode met verhoogde afvoer. Om dit effect te bevorderen kan, zoals gepland, een vierde scherm geplaatst worden stroomafwaarts van de drie bestaande houten schermen. Dit vierde scherm lijkt geen gevaar voor erosie bij de veerstoep op te leveren, maar de vraag is of het scherm op die beoogde locatie het meest effectief is. Omdat het beoogde effect nog niet zichtbaar is, stellen we voor om extra scherm(en) richting de vaargeul te plaatsen, zodat extra sedimentrijk water naar de vooroever met de bestaande drie schermen wordt geleid. We bevelen aan de stabiliteit van de schermen en de bodemligging te blijven monitoren en ook het effect van de schermen op ecologie in kaart te gaan brengen.



# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
1.1	Kader	8
1.2	Probleemomschrijving	9
1.3	Houten schermen	10
1.3.1	Locatie en processen in een bocht	10
1.3.2	Ontwerpprincipe	11
1.3.3	Ruimtelijk ontwerp en realisatie	12
1.3.4	Schermen in de Redichemse waard	13
1.4	Doel en onderzoeksvragen	14
1.5	Afbakening	15
1.6	Leeswijzer	15
1.7	Organisatie	15
<b>2</b>	<b>Historische verandering in de beneden-IJssel</b>	<b>16</b>
2.1	Inleiding	16
2.2	Oorzaken bodemhoogteverandering	16
2.2.1	Ingrepen in het systeem	16
2.2.2	Baggeronderhoud	18
2.2.3	Variatie in hydrodynamische condities	19
2.3	Oeverafkalving	20
2.3.1	Oeverachteruitgang en sedimentsamenstelling	20
2.3.2	Oorzaken oevererosie	21
2.4	Vergelijking jaarlijkse bodemligging	22
2.4.1	Jaarlijkse peilingen	22
2.4.2	Bodemontwikkeling rkm 981 - 997	23
2.4.3	Ontwikkeling bij pilotlocatie (rkm 984.5 – 985)	24
2.4.4	Conclusie en discussie	25
2.5	Verwachte ontwikkeling in pilotjaar zonder houten schermen	26
<b>3</b>	<b>Vorbereiding en realisatie</b>	<b>28</b>
3.1	Algemeen	28
3.2	Wateren van stammen	29
3.3	Realisatie	30
3.3.1	Plaatsen staanders	30
3.3.2	Plaatsing liggend hout	31
3.4	Vergelijking met ontwerp	32
3.4.1	Bouwen met een natuurproduct	32
3.4.2	Geometrie	33
3.5	Beantwoording onderzoeksvragen	35
<b>4</b>	<b>Bodemligging in jaar na realisatie</b>	<b>36</b>
4.1	Overzicht	36
4.2	Methode	36
4.2.1	Multibeam vanaf varende drone	36
4.2.2	Peilstok	37
4.2.3	Lidar	37
4.3	Verificatie meetmethode	38

4.4	Ontwikkeling bodemligging in bocht	38
4.4.1	Afvoerconditie	38
4.4.2	Verandering over een jaar	39
4.4.3	Ontwikkeling tijdens het jaar	41
4.5	Ontwikkeling bodemligging rond schermen	43
<b>5</b>	<b>Overige waarnemingen in jaar na realisatie</b>	<b>47</b>
5.1	Overzicht	47
5.2	Bodemsamenstelling	47
5.3	Oevererosie	48
5.3.1	Ondergraving vegetatielaag	48
5.3.2	Steilrand	49
5.3.3	Bodemmateriaal	51
5.4	Verzakking houten schermen	52
5.5	Golfdemping	53
5.6	Ervaring scheepvaart en omwonenden	54
5.6.1	Schippers	54
5.6.2	Omwonenden	55
<b>6</b>	<b>Discussie en vooruitblik</b>	<b>56</b>
6.1	Werking en effect	56
6.1.1	Demping van scheepsgolven	56
6.1.2	Geleiding sedimentrijk water	56
6.2	Verandering in de kom	57
6.3	Afwegingskader	58
6.4	Ontwerpaanpassingen	58
6.4.1	Optimalisatie schermontwerp	58
6.4.2	Nieuwe houten schermen	58
6.5	Beantwoording onderzoeksvragen bodemontwikkeling	59
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>61</b>
7.1	Conclusies	61
7.2	Aanbevelingen	61
	<b>Literatuurverwijzingen</b>	<b>62</b>
<b>A</b>	<b>Jaarlijkse bodemverandering 2010 – 2019</b>	<b>63</b>
A.1	Overzicht aangeleverde data	63
A.2	Jaarlijkse bodemverandering 2010 - 2019	64
A.2.1	rkm 981 tot 997	64
A.2.2	rkm 993 tot 997	68
<b>B</b>	<b>Overzicht verzamelde meetgegevens</b>	<b>69</b>
<b>C</b>	<b>Overzicht meetresultaten</b>	<b>70</b>
C.1	Multibeampeilingen	70
C.2	Peilstokmetingen	74
<b>D</b>	<b>Baggeronderhoud</b>	<b>79</b>
<b>E</b>	<b>Bodemsamenstelling</b>	<b>80</b>
<b>F</b>	<b>Visuele inspecties</b>	<b>84</b>
F.1	13 november 2019	84

F.2	15 april 2020	84
F.3	9 september 2020	85
F.4	2 februari 2021	85
F.5	Vergelijking per inspectie	86

# 1 Inleiding

## 1.1 Kader

Het Nederlandse rivierengebied krijgt een steeds natuurlijker aanzicht door grootschalige maatregelen zoals voor Ruimte voor de Rivier, Natura2000 en Kaderrichtlijn Water (KRW). Tegelijkertijd staat het rivierengebied onder druk. Klimaatverandering leidt tot grotere risico's op overstroming tijdens een hoogwater, terwijl de rivieren ook tijdens laagwater zo lang mogelijk optimale bevaarbaarheid moeten garanderen. Daarbij komt dat de budgetten voor beheer en onderhoud krap zijn en dat de maatschappij vraagt om steeds meer in te spelen op actuele en lokale ontwikkelingen in de regio. Om tot innovatieve oplossingen te komen voor de knelpunten in het rivierengebied heeft Rijkswaterstaat het programma *Self Supporting Rivier Systeem* (SSRS) opgezet. Binnen het programma SSRS zoeken Rijkswaterstaat, BAM / Van den Herik en Deltares samen naar nieuwe mogelijkheden gericht op een betaalbaar, betrouwbaar en duurzaam beheer en onderhoud van het riviersysteem.

De combinatie BAM / Van den Herik voert momenteel het beheer en onderhoud uit van de Twentekanal en de IJsseldelta. In het prestatiecontract hiervoor is opgenomen dat dit gebied kan functioneren als proefgebied. Dit wordt de 'leerruimte' van SSRS genoemd. Deze 'leerruimte' van SSRS maakt het mogelijk om een kansrijke mogelijkheid op werkelijke (prototype) schaal uit te voeren en ervaring op te doen.

Een pilot met houten schermen is gestart bij Zalk en een pilot met flexibele kribben is gestart bij Kampen (Figuur 1.1). Deze rapportage beschrijft de resultaten van monitoring tot een jaar na realisatie van de pilot met houten schermen. Voorafgaand aan deze pilot hebben Rijkswaterstaat en Deltares gezamenlijk een onderzoeksplan, de verwachte werking en een monitoringsplan uitgewerkt (Buschman et al., 2019). Dat document is als uitgangspunt gebruikt voor de analyse van de meetgegevens en de evaluatie van de houten schermen.





Figuur 1.1 Globale ligging van de houten schermen (gele stippen) en de flexibele kribben (rode stippen) in de IJssel tussen Zwolle en Kampen. De nummering van de schermen zoals aangegeven in deze figuur wordt door het rapport heen gebruikt om de schermen aan te duiden.

## 1.2 Probleemomschrijving

De IJssel heeft meerdere functies, zoals waterafvoer naar het IJsselmeer, vaarweg voor beroeps- en recreatievaart en natuur. De IJssel is niet gestuwd, waardoor altijd een afvoer nodig is om voldoende waterdiepte voor de scheepvaart te kunnen garanderen. Door het meanderende karakter van de rivier, met een bochtige en smalle vaargeul, wordt de IJssel gezien als lastig te bevaan. De karakteristieke bochtprofielen, met ondiepe binnenbocht en diepe buitenbocht, zorgen voor een krap vaarwegprofiel. Lokale ondieptes kunnen ontstaan bij plaatselijke verbredingen van het zomerbed, en ter hoogte van kribvakken waar de stroming kan uitwaaiëren en daardoor ondieptes vormt in het zomerbed (kribvlammen). Deze lokale ondiepten vormen knelpunten voor de scheepvaart, vooral wanneer deze optreden boven op de al ondiepe binnenbochten. Doorgaans worden deze knelpunten verholpen door te baggeren. Door de beperkte bevaarbare breedte ligt een baggervaartuig sneller in de weg dan op andere grote rivieren van Nederland.

Daarnaast is de biodiversiteit van de IJssel over de afgelopen eeuwen sterk afgenomen door de grote mate van rivierregulering (de aanleg van kribben en dijken, het afsnijden van bochten en het in steen vastleggen van oevers) en intensivering van de landbouw in de uiterwaarden (peilbeheer) (Zuideveld-Venema et al., 2011). Door het uitvoeren van KRW maatregelen is de verwachting dat de biodiversiteit wordt vergroot. Voor de functie als vaarweg kunnen deze KRW maatregelen (of Ruimte voor de Rivier maatregelen) tot een verhoogde baggerinspanning leiden. Een van deze maatregelen is het ontstenen van trajecten van oevers, zodat een natuurlijke oever ontstaat.

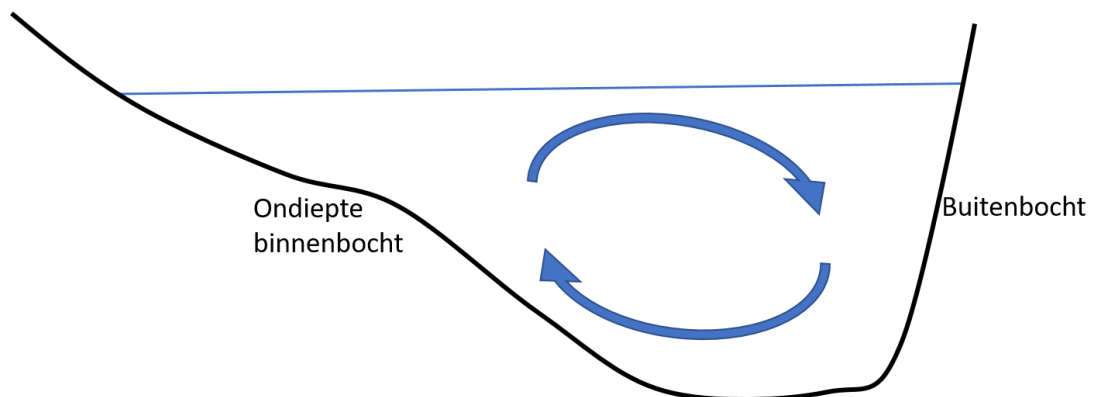
Door het verwijderen van de oeverbescherming kan oevererosie optreden tot een evenwichtstalud van de oever is ontstaan (Baar et al., 2014). Een probleem kan zijn dat lokaal erosie verder doorzet dan gewenst door de rivierbeheerder. Wanneer de oevererosie zo ver doorzet dat de dwarsdoorsnede significant groter wordt dan in omliggende riviersecties, kan aanzanding in de vaargeul optreden omdat hier dan sprake is van een plaatselijke verbreding. Ook kan bij grootschalige ontstening en snelle erosie sprake zijn van een verhoogd aanbod van sediment naar de rivier, wat bijdraagt aan het ontstaan van tijdelijke ondieptes.

Een tweede reden voor een verminderde biodiversiteit is dat nauwelijks hout aanwezig is in de rivier. Ooibos is grotendeels uit de uiterwaarden verdwenen en dode bomen en grote takken worden uit het water verwijderd (Liefveld et al., 2017). Rivierhout vormt echter een belangrijk onderdeel van het voedselweb van de rivier en levert bijvoorbeeld habitat voor vissen en macrofauna.

## 1.3 Houten schermen

### 1.3.1 Locatie en processen in een bocht

Een locatie waar veel van bovengenoemde problemen spelen is de bocht bij Zalk (km 985). De binnenbocht is hier zeer ondiep en de vaargeul is smal, waardoor de bocht een knelpunt vormt voor de scheepvaart. De ondiepte wordt voornamelijk veroorzaakt door de spiraalstroming in deze scherpe bocht. In een bocht ontwikkelt een spiraalstroming onder invloed van centrifugale krachten (hard stromend water bij oppervlak wordt sterker naar buiten 'geslingerd' dan langzaam stromend water bij de bodem) en de invloed van hydrostatische druk (waterspiegel in buitenbocht is hoger). Hoe scherper de bocht, hoe sterker dit effect. Dit 3D effect zorgt er voor dat de bodem een karakteristiek bochtprofiel krijgt (Figuur 1.2). Hoewel de spiraalstroming slechts een zwakke circulatie oplevert, zorgt het ervoor dat het langs de bodem getransporteerde sediment iets wordt afgebogen naar de binnenbocht. Hierdoor zal meer sediment door deze binnenbocht stromen en zal deze ondieper worden. Voor de buitenbocht geldt het omgekeerde. De dwarshelling van dit profiel is een balans van spiraalstroomintensiteit (en dus een functie van de bochtstraal) die sediment de helling op richt, en van de invloed van zwaartekracht op sedimentdeeltjes die het weer de helling af richt.



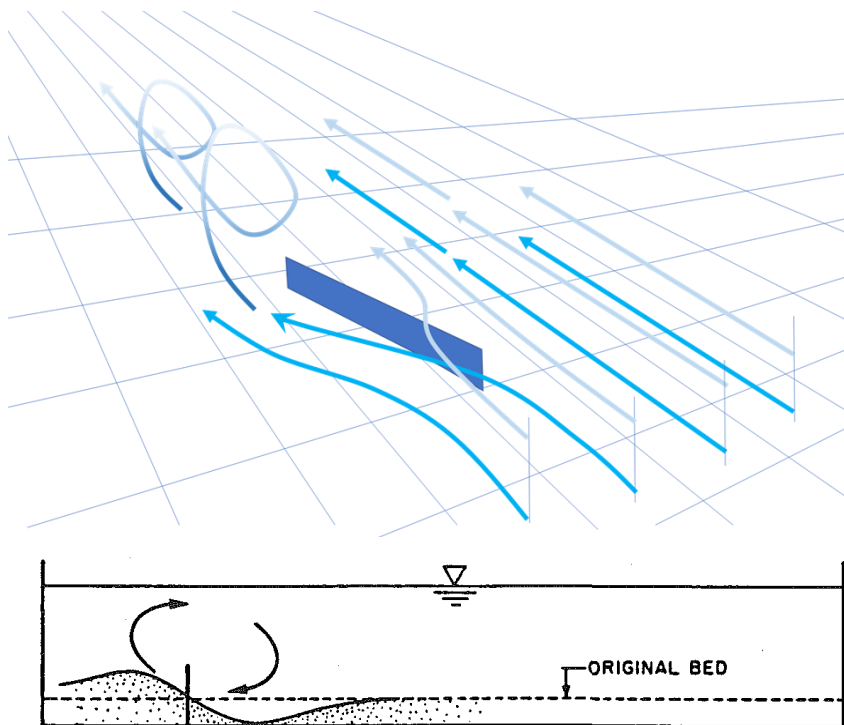
*Figuur 1.2 Schets van de stroming dwars op de hoofdstroom in een bocht, waardoor sediment naar de binnenbocht wordt getransporteerd en daar een ondiepte ('point bar') ontstaat.*

Omdat de bocht bij Zalk de scherpste bocht in de IJssel is, is de ondiepte maatgevend voor de vaarroute: een aanzienlijk deel van de binnenbocht is relatief ondiep. Wanneer de ondiepte in de vaargeul komt, moet gebaggerd worden. Ondanks dat deze ondiepte als stabiele vooroever de linkeroever beschermt tegen erosie en de stroomsnelheid nabij de oever wordt gereduceerd door de ondiepte, lijken gedeelten van de oever in de binnenbocht in de afgelopen jaren toch af te kalven.

Omdat oevererosie op lijkt te treden, en omdat baggeren soms nodig is in de IJssel ter hoogte van Zalk, is deze locatie geselecteerd om het effect van houten schermen te bepalen op werkelijke schaal middels een pilot.

### 1.3.2 Ontwerpprincipe

In literatuur is weinig informatie beschikbaar hoe houten schermen technisch ontworpen kunnen worden. Over bodemschermen is meer kennis beschikbaar. Bodemschermen staan in een hoek van 15-25 graden ten opzichte van de hoofdstroom, hebben een hoogte van 0,2-0,4 maal de waterdiepte en worden in rijen achter elkaar en rijen naast elkaar geplaatst (Odgaard en Wang, 1991). Het effect van de schermen neemt toe met de hoek waaronder de bodemschermen zijn geplaatst. Tegelijk neemt bij een grotere hoek de weerstand toe en is de kans op vorming van een ontgrondingskuil achter het scherm groter. De werking van bodemschermen is dat ze een dwarscirculatie opwekken, vergelijkbaar met een lokale spiraalstroming, waardoor benedenstrooms een aanzanding aan een kant en erosie aan de andere kant optreedt (Figuur 1.3.).



Figuur 1.3 Schets van het effect van een enkel bodemscherm op de stroming (boven) en op de bodemligging benedenstrooms van het bodemscherm (onder; overgenomen uit Odgaard en Wang, 1991a).

Op basis van gootproeven laten Poelman et al. (2019) zien dat gestapelde boomstammen tot een kwart van de waterdiepte een vergelijkbaar effect hebben op bodemtransport en bodemligging als standaard bodemschermen van een plaat. Het ontwerp van de houten schermen is gestoeld op een werking zoals voor bodemschermen. Rijkswaterstaat heeft het ontwerp van de houten schermen hoger gemaakt dan een bodemscherm, zodat het bij lage en gemiddelde waterstand ook golven dempt. Rijkswaterstaat heeft als werking voor de houten schermen bij Zalk aangegeven dat (Buschman et al., 2019):

- (1) ze golven door de scheepvaart dempen, waardoor minder oevererosie optreedt en minder sediment in de vaargeul komt;
- (2) ze bij hoogwater sedimentrijk water naar de binnenbocht geleiden, zodat tussen de schermen en de oever een ondiepte ontstaat die beschermt tegen oevererosie. Ze versterken daarmee als het ware het effect van de spiraalstroming in de bocht.

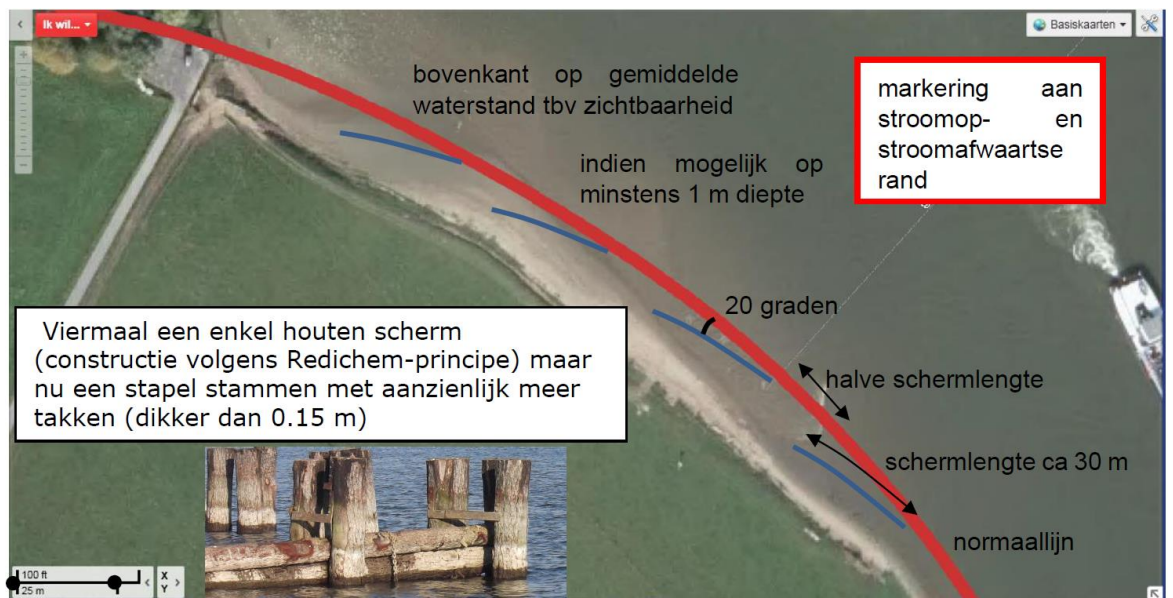
De maatregel is succesvol als de gemiddelde oevererosie vermindert, minder onderhoud nodig is om de vaargeul op diepte te houden en de scheepvaart geen hinder ondervindt van de houten schermen.

Daarnaast hebben houten schermen mogelijk ook een positief effect voor ecologie door een schuilplaats of habitat te bieden, maar dat is in deze studie niet onderzocht. In literatuur is slechts beperkt ervaring met vergelijkbare schermen beschreven, zodat het ruimtelijk ontwerp vooral is gebaseerd op de veronderstelde werking.

### 1.3.3 Ruimtelijk ontwerp en realisatie

Het ruimtelijk ontwerp bestaat uit langgerekte, verdrongen houten schermen van gewaterd hout uit de uiterwaarden die geplaatst worden tussen de normaallijn en de oever (Figuur 1.4). Elk scherm begint vanaf de normaallijn en heeft een lengte van 30 m. Vanaf de normaallijn buigt het scherm zich geleidelijk richting oever, met een maximale afwijking van 20 graden ten opzichte van de normaallijn. De afstand tussen het eindpunt van een scherm en het beginpunt van het volgende scherm is ongeveer 15 m.

November 2019 zijn drie houten schermen gerealiseerd, welke in grote lijn overeen komen met het ruimtelijk ontwerp (Figuur 1.4). Enkele verschillen worden in hoofdstuk 3 beschreven en toegelicht. Omdat het risico voor ondermijning van de veerstoep door een erosiekuil te groot werd geacht, is het vierde scherm het dichtst bij de veerstoep (linksboven in Figuur 1.4) nog niet aangelegd. Dit past bij de stapsgewijze aanpak die was beoogd bij het ontwerp.



Figuur 1.4 Ruimtelijk ontwerp van de houten schermen in de IJssel bij Zalk.





*Figuur 1.5 Luchtfoto's van de houten schermen gezien in bovenstroomse richting (boven) en in benedenstroomse richting (onder met van links naar rechts scherm 1, 2 en 3); Foto's Han Schenk, Rijkswaterstaat, november 2020.*

#### 1.3.4 Schermen in de Redichemse waard

Het ontwerp van de houten schermen in de IJssel bij Zalk is geïnspireerd op houten schermen die medio 2015 zijn geplaatst in de Lek bij de Redichemse waard nabij Culemborg (Figuur 1.6; Liefveld et al. 2017). Daar zijn vier schermen aangebracht van boomstammen met een tweeledig doel: (1) om de stroming meer naar het midden van de rivier te geleiden, zodat de vaargeul verdiept of niet aanzandt en (2) om te bepalen of het gebruik van hout in riviercorrigerende constructies ook een positief effect heeft op de vis- en macrofaunagemeenschap. Palen zijn de bodem ingetrild waartussen boomstammen (zonder takken en wortels) zijn afgezonken (foto 1.6). Deze bomen zijn aan elkaar verankerd met kettingen om eventueel wegdrijven te voorkomen. Bovenop is de constructie afgesloten met staaldraad. Deze locatie is relatief ondiep (ca. 2m) en ligt in een gestuwd traject van de Lek, waardoor de stroomsnelheid meestal kleiner is dan bij de houten schermen in de IJssel bij Zalk. Na een jaar monitoren was op deze locatie nog geen duidelijk effect op de bodemligging zichtbaar (Liefveld et al. 2017).



Figuur 1.6 De houten schermen in de Lek bij de Redichemse waard nabij Culemborg kort na realisatie in 2015 (foto Kees Sloff, 2020).

## 1.4 Doel en onderzoeksvragen

Het algemene doel van het plaatsen van houten schermen is vermindering van de baggerinspanning voor het onderhoud van de vaargeul. Het doel van de voorliggende analyse in het eerste jaar na realisatie is: **de werking en het effect van houten schermen aan te geven op basis van monitoring van bodemligging en visuele waarneming van oeverafkalving**. Op basis van de werking en de effecten kan het perspectief op een business case worden bepaald bij grootschalige toepassing, waarbij door besparing van onderhoudskosten de investeringskosten worden terugverdiend.

Specifiek voor de voorbereiding (fase 1), voor de realisatie (fase 2) en voor de monitoring in het eerste jaar na realisatie (fase 3) zijn onderzoeksvragen geformuleerd:

- 1 In het jaar voorafgaand aan de realisatie:
  - a) Hoe kan het wateren van de stammen een volgende keer beter uitgevoerd worden?
- 2 Tijdens de realisatie:
  - b) Hoe goed zijn verzadigde houten stammen te vervoeren en te verwerken tot houten schermen?
  - c) Hoe efficiënt zijn houten schermen van de stammen te maken?
  - d) Hoe diep moeten de staanders worden geplaatst om stabiele schermen op te leveren?
- 3 Ontwikkeling in eerste jaar na de realisatie:
  - e) Hoe ontwikkelt de bovenwateroever nabij de schermen?
  - f) Hoe ontwikkelt de bodemligging onder water bij en rondom de schermen?
  - g) Hoe ontwikkelt de bodemligging in de rivierbocht en leidt dit tot vermindering van vaargeulonderhoud?
  - h) Wat zijn de ervaringen van de gebruikers van het vaarwater?
  - i) Welke ontwerpaanpassingen zijn naar verwachting effectief?

## 1.5 Afbakening

Het effect van de houten schermen op de ecologie is in het eerste jaar niet bepaald. De monitoring is alleen gericht op het bepalen van bodemligging boven en onder water.

## 1.6 Leeswijzer

Na deze inleiding van de pilot volgt een beschrijving van de historische verandering in de Beneden-IJssel (hoofdstuk 2). Op basis van de eerder opgetreden veranderingen, kunnen veranderingen tijdens de pilot in bodemligging (hoofdstuk 4) en visuele, kwalitatieve waarnemingen en ervaringen (hoofdstuk 5) geïnterpreteerd worden. Hoofdstuk 3 beschrijft de realisatie van de houten schermen en wat hieruit geleerd kan worden voor een volgende keer. In de discussie en vooruitblik (hoofdstuk 6) worden de bevindingen samengevoegd en worden de onderzoeksvragen over de ontwikkeling van de bodem beantwoord. De conclusies en aanbevelingen (hoofdstuk 7) besluiten dit rapport.

## 1.7 Organisatie

Rijkswaterstaat, BAM / Van den Herik en Deltares werken samen om de doelen van SSRS te behalen. Deze groep vormt samen het 'leerteam' SSRS. Iedere 2 weken worden nieuwe initiatieven en de pilots in de IJssel besproken, waarbij in elk geval het kernteam van het leerteam aanwezig is.

Tabel 1.1 geeft aan hoe deze studie tot stand is gekomen. Alleen de meest belangrijke personen voor deze studie zijn opgenomen. Verschillende andere personen hebben bijgedragen, waaronder omwonenden, schippers en vissers die zijn bevestigd over hun indruk over de houten schermen.

Tabel 1.1 De belangrijkste rol van partijen die hebben bijgedragen aan deze studie.

Samenwerkingspartners	Personen	Belangrijkste rol
<b>BAM / Van den Herik</b>	Tim van der Lugt Redmer Leegstra John van Lit	Kernteam leerteam SSRS (vertegenwoordiger combinatie) Werkzaam binnen contract op IJssel Uitvoering onderhoud
<b>Rijkswaterstaat</b>	Arjan Sieben Yuri Wolf Marja Hamilton Laura Zweerus Joyce Zuidam	Ontwerp en initiator houten schermen Kernteam leerteam SSRS SSRS IPM-team - omgevingsmanager SSRS
<b>Deltares</b>	Heleen Vreugdenhil Frans Buschman Anna Kusters Kees Sloff	Kernteam leerteam SSRS Analyse en rapportage Analyse en rapportage Review en evaluatie werking
<b>Aquatic drones</b>	Maarten Ruysenaers Job van Beem Jozef Hendricks	Monitoring bodemligging Monitoring bodemligging Monitoring bodemligging



## 2 Historische verandering in de beneden-IJssel

### 2.1 Inleiding

Met betrekking tot de morfologische verandering zijn verschillende onderzoeksvragen opgesteld voor de pilot houten schermen, zie paragraaf 1.4. Om deze vragen te beantwoorden dienen de morfologische veranderingen als gevolg van de pilot zoveel mogelijk geïsoleerd te worden van de autonome bodemontwikkeling van de rivier op deze locatie, die optreedt als gevolg van natuurlijke processen en maatregelen (anders dan de pilot zelf) die binnen of buiten het studiegebied zijn getroffen. Om deze autonome bodemontwikkeling te bepalen hebben we bodempeilingen uit de jaren voorafgaand aan de pilot geanalyseerd. Het doel van deze analyse is om de volgende vragen te beantwoorden:

- 1 Door welke langjarige trends wordt de bodemontwikkeling van de IJssel bij Zalk gekenmerkt?
- 2 Hoe heeft de bodem zich lokaal rond de pilotlocatie ontwikkeld in de jaren voorafgaand aan de pilot?
- 3 Wat is de verwachte bodemontwikkeling in het pilotjaar op basis van de historische analyse (dus zonder het effect van de pilot zelf)?

In de eerste plaats is gekeken naar de mogelijke oorzaken van bodemveranderingen in het systeem. Deze oorzaken kunnen worden onderverdeeld in menselijke en natuurlijke oorzaken.

### 2.2 Oorzaken bodemhoogteverandering

#### 2.2.1 Ingrepen in het systeem

Bij menselijke oorzaken kan gedacht worden aan baggerwerkzaamheden, Ruimte-voor-de-Rivier-maatregelen en anderszins ingrijpen in het systeem. Uit eerder onderzoek is bekend dat ter hoogte van het studiegebied geen significante autonome erosietrend is waargenomen over de afgelopen 70 jaar (Ylla Arbós, Schielen, & Blom, 2020). Deze constatering is gebaseerd op een analyse van jaarlijkse bodempeilingen, die sinds 1926 worden verzameld voor de Rijntakken. Om onze analyse te beperken kijken we daarom alleen naar ingrepen vanaf het jaar 2005. Daarnaast beschouwen we alleen het meest benedenstroomse gedeelte van de IJssel vanaf ongeveer rkm 970, waar de pilot zich bevindt.

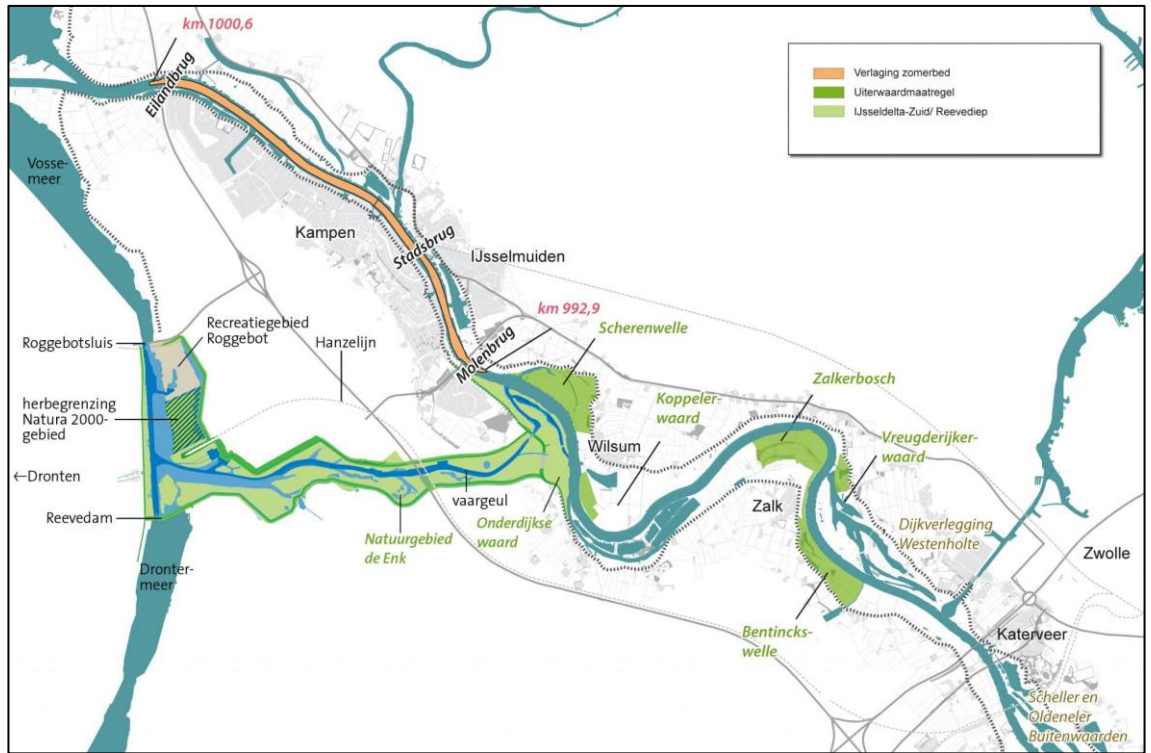
In de afgelopen 15 jaar zijn de grootste ingrepen in het studiegebied gedaan in het kader van het programma Ruimte voor de Rivier IJsseldelta<sup>1</sup>. Het doel van dit programma is het vergroten van de hoogwaterveiligheid voor Zwolle, Kampen en het achterland. Binnen dit programma zijn 2 grote projecten inmiddels afgerond, als geïllustreerd in Figuur 2.1:

- 1 Zomerbedverlaging: van ca. juli 2015 tot juli 2016 is het zomerbed van de IJssel tussen rkm 993.3 en rkm 1000.4 met ongeveer 2 meter verlaagd. Hiervoor was een baggervolume van ca. 2 miljoen m<sup>3</sup> benodigd.
- 2 Reevediep: Het Reevediep is een ca. 7 kilometer lange hoogwatergeul, die de IJssel bij Kampen verbindt met het Drontermeer. Ten tijde van hoogwater kan een gedeelte van de afvoer op deze manier via het Drontermeer en het Vossemeer naar het IJsselmeer worden geleid. Het Reevediep kan sinds begin 2019 in gebruik worden genomen.

---

<sup>1</sup> <https://www.ijsseldeltaprogramma.nl/>

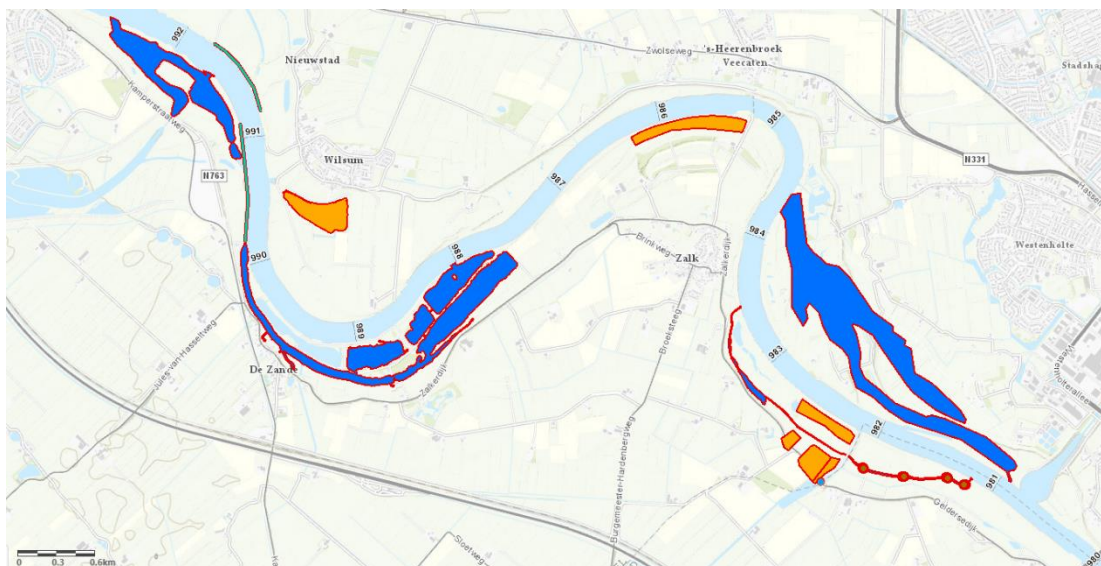




Figuur 2.1 Overzicht van maatregelen uitgevoerd in het kader van Ruimte voor de Rivier IJsseldelta. Bron: <https://www.ijsseldeltaprogramma.nl/>

Omdat het Reevediep tot dusver nog niet als hoogwatergeul heeft gefunctioneerd is de verwachting dat vooral de zomerbedverlaging gevolgen heeft gehad voor de bodemligging in het studiegebied, zowel direct als indirect door de daling van de waterstand ter plaatse van de ingreep, waardoor stroomopwaarts via een stuwkromme de waterstand wordt beïnvloed.

Daarnaast zijn op verschillende plaatsen langs de IJssel maatregelen genomen in de context van Kaderrichtlijn Water (KRW). Figuur 2.2 geeft een gedetailleerder beeld van de KRW-maatregelen die rond de pilotlocatie zijn uitgevoerd. Net bovenstrooms van de bocht bij Zalk ligt de meestromende nevengeul Vreugderijkerwaard, die in 2003 werd voltooid. Tijdens hoogwater kan een significant percentage van de afvoer door deze nevengeul stromen. Benedenstrooms van de veerstoept (de stippellijn in Figuur 2.2 geeft de veerroute aan) is in 2017 een uiterwaardverlaging in het Zalkerbosch gerealiseerd. In aanvulling op Figuur 2.2 is de oever in de binnenbocht rond rkm 985 ontsteend en is het geotextiel verwijderd vanaf ongeveer rkm 984.8 tot de veerstoept.



Figuur 2.2 KRW Maatregelen tussen rkm 981 en rkm 992. Oranje: uiterwaardverlaging; Blauw: nevengeul; Groen: natuurvriendelijke oever; Punten: rivierhout/vispassage. Bron: mail Arjan Sieben d.d. 30 maart 2020



Figuur 2.3 De overgang van een zandige oever naar een beschermde oever (met geotextiel en stenen tot 20 cm). Tussen deze locatie en de veerstoep is de oever van de binnenbocht ontsteend (foto Kees Sloff mei 2019).

### 2.2.2 Baggeronderhoud

De vaargeul wordt op diepte gehouden door te baggeren. Bij baggeractiviteiten wordt bij een knelpunt voor de scheepvaart (ondiepte) gebaggerd en wordt op een diepere nabij gelegen locatie het baggermateriaal terug gestort. Op 2 oktober 2020 is door Van den Herik informatie aangeleverd over het baggeronderhoud dat is uitgevoerd op het traject van rkm 984 tot rkm 1006 in de jaren 2018, 2019 en 2020. Een compleet overzicht van deze informatie is gegeven in bijlage D. In de jaren 2015, 2016 en 2017 is alleen gebaggerd op enkele kleine plekkjes. In Tabel 2.1 zijn de totale baggervolumes per periode opgenomen. Hieruit blijkt dat in februari 2018, kort na de hoge afvoer van januari 2018 (Figuur 2.4), een relatief groot volume is gebaggerd en in de recentere perioden minder.

Tabel 2.1 Overzicht baggervolumes rkm 984 – 1006.

Periode	Gebaggerd volume rkm 984 – 1006 [m <sup>3</sup> ]
Februari 2018	23069
Maart 2019	1001
Oktober 2019	8437
Februari 2020	7890
Totaal	40396

Op het traject van rkm 984 tot 987 is in februari 2020 zo'n 180 m<sup>3</sup> gebaggerd. Het grootste gedeelte hiervan, zo'n 100 m<sup>3</sup>, is gebaggerd op het traject van rkm 984.0 tot 984.45. Op basis van de bodempeilingen kan niet worden achterhaald waar de baggerwerkzaamheden exact hebben plaatsgevonden. Het volume is dermate klein dat dit baggeronderhoud naar verwachting geen significante invloed heeft op de resultaten van de pilot.

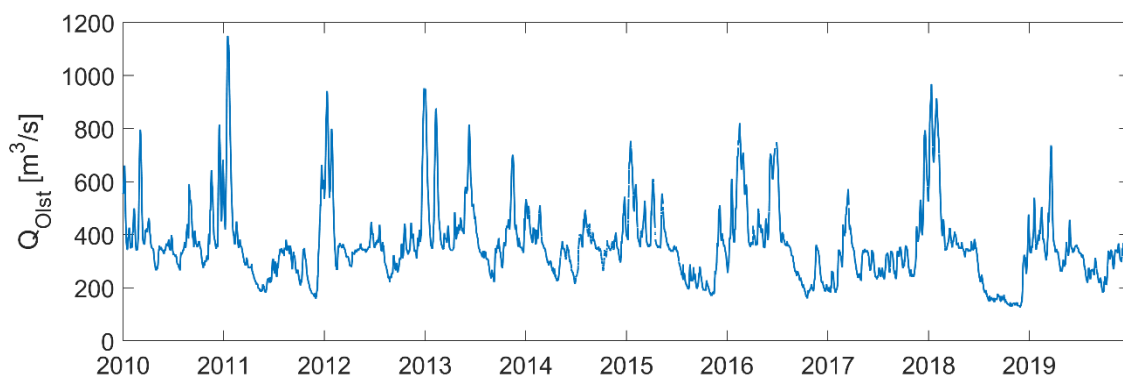
### 2.2.3 Variatie in hydrodynamische condities

Natuurlijke variatie in bodemligging wordt op deze schaal met name veroorzaakt door variatie in hydrodynamische condities. Deze condities worden in belangrijke mate bepaald door de afvoer. Om de variaties in beeld te brengen gebruiken we daarom afvoeren afkomstig van het dichtstbijzijnde meetstation, in dit geval Olst, voor dezelfde periode als de periode waarin bodempeilingen beschikbaar zijn. De metingen zijn verkregen van Waterinfo.

Figuur 2.4 geeft de afvoer bij Olst van 2010 t/m 2019. Tot 27 november 2013 is elk uur een afvoer beschikbaar, daarna zijn de afvoeren per 10 minuten gegeven. In Tabel 2.2 zijn de vijf hoogste afvoeren opgenomen die in deze periode voorkwamen.

Tabel 2.2 Top 5 hoogste afvoeren in de periode 2010 – 2020. \*740 m<sup>3</sup>/s wordt door RWS gehanteerd als grens voor verhoogde afvoer.

Periode	Duur Q > 740 m <sup>3</sup> /s* [dagen]	Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]
11 – 25 januari 2011	14	1149
06 – 15 januari 2012	10	942
23 dec 2012 – 06 jan 2013	14	952
04 – 16 januari 2018	12	967
22 jan – 07 feb 2018	16	915



Figuur 2.4 Afvoer bij Olst.



## 2.3 Oeverafkalving

### 2.3.1 Oeverachteruitgang en sedimentsamenstelling

In delen van de binnenbocht bij Zalk is in een periode van 12 jaar erosie van de linkeroever opgetreden. Uit opnames in Google Earth blijkt dat alleen de 'kom' net bovenstrooms van de veerstoep een achteruitgang van de oever vertoont (Figuur 2.5). De onbeschermde oever in de binnenbocht tussen ongeveer rkm 984.8 (begin witte lijn in Figuur 2.5 en foto in Figuur 2.3) en rkm 985.1 is zelfs aangegroeid door aanzanding. Bovenstrooms van rkm 984.8 is de oever beschermd en zijn enkele korte kribben aanwezig.



Figuur 2.5 Luchtopnames van de oever bij Zalk in 2006 en 2018 (Google Earth). De witte lijn geeft de onbeschermde (ontsteende) oever weer.

Figuur 2.6 geeft de situatie weer voorafgaand aan de pilot aan de linkeroever ter hoogte van de 'kom'. De aanwezigheid van de ondiepte behorend bij de scherpe bocht leidt tot een flauw verlopend zandstrandje dat doorloopt tot aan een steilrand van enigszins cohesief materiaal (met vegetatie, orde 1 m hoog). De steilrand begint bij de oeverwal, die hoger ligt dan de achterliggende uiterwaard. Onder het zand liggen ook erosieresistente (cohesieve) pakketten die zichtbaar zijn rond de gemiddelde waterlijn. In de binnenbocht onder water is het sediment met name samengesteld uit zand met organisch materiaal en schelpen (Figuur 2.7). Op de ondiepte in de binnenbocht groeien waterplanten (een fonteinkruid; Figuur 2.7).





Figuur 2.6 Eroderende oever aan benedenstroomse zijde van projectgebied (net bovenstrooms van veerstoep). Oranje pijl geeft overeenkomstige locatie aan in beide foto's (Foto's Kees Sloff, mei 2019).

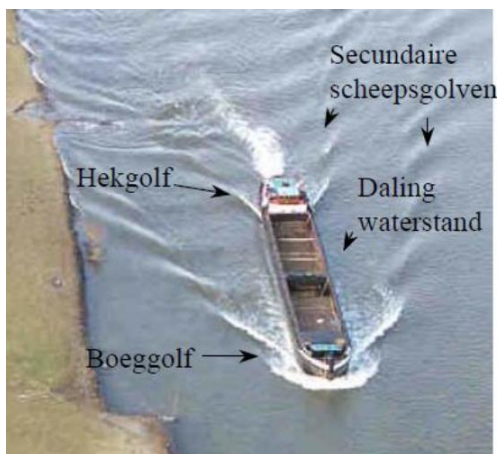


Figuur 2.7 Een schelp met zandig bodemmateriaal en een waterplant aangetroffen in de ondiepte van de binnenbocht (Foto Frans Buschman, augustus 2020).

### 2.3.2 Oorzaken oevererosie

Om verschillende redenen kan oevererosie in de 'kom' optreden. We bespreken deze oorzaken hier kort om aan te kunnen geven of deze oorzaken zijn veranderd voorafgaand aan de pilot. Vanwege de locatie in de binnenbocht in combinatie met de flauwe vooroever, lijkt het onwaarschijnlijk dat **spiraalstroming** de oorzaak van de oevererosie is.

De onverdedigde oever lijkt vooral te worden belast door **scheepsgolven**, en erosieverschijnselen zijn alleen te vinden langs de (gemiddelde) waterlijn. Bij passage van een schip ontstaan primaire golven en secundaire golven die de oever bereiken. Primaire golven worden veroorzaakt door de opstuwing van het water bij de boeg van het schip (boeggolf), de waterspiegeldaling aan de zijkant van het schip en de golf bij het achtersteven van het schip (hekgolf) (Ten Brinke et al., 2004; Figuur 2.8). De golfhoogte is afhankelijk van de vaarsnelheid, de verhouding tussen de dwarsdoorsnede van het schip en de dwarsdoorsnede van de vaargeul en de afstand tot de oever (Hoffmans en Verheij, 1997). Secundaire golven worden opgewekt aan de zijkant en achterkant van het schip en verplaatsen zich onder een hoek naar de oever (Hoffmans en Verheij, 1997).



*Figuur 2.8 De waterstands- en stromingsverschijnselen bij passage van een schip (naar Ten Brinke et al., 2004)*

In een kribvak wordt het effect van een passerend schip versterkt. Hoewel we in de bocht bij Zalk niet met een kribvak te maken hebben, vertonen de erosieve processen die hier een rol spelen wel overeenkomsten met die in kribvakken. De veerstoep vormt in dit geval een obstakel dat de stroming in de 'kom' sterk beïnvloedt, zoals de krib dit doet in het kribvak. Wanneer een schip een kribvak (de kom) passeert stroomt water vanuit het kribvak naar de depressie aan de zijkant van het schip. Na passage van het schip stroomt water weer terug het kribvak in. Op dit moment treden in het kribvak de hoogste stroomsnelheden op. Het effect van primaire en secundaire golven op de oever in kribvakken is in meer detail beschreven in (Baar, Kleinhans, & Stouthamer, 2014).

In de 'kom' net bovenstrooms van de veerstoep wordt dit voor kribvakken beschreven proces ook waargenomen. Het is echter niet duidelijk welk onderdeel van dit proces zorgt voor het grootste transport van sediment, of waarom dit proces met name bovenstrooms van de veerstoep optreedt, terwijl benedenstrooms juist sprake van sedimentatie lijkt te zijn geweest. Dit kan te maken hebben met de vorm van de 'kom', het stromingspatroon rond de veerstoep wanneer er geen schip passeert of de dominante vaarrichting van (geladen) schepen. Erosie van het strandje in een kribvak wordt vooral bepaald door het volume, de frequentie en de afstand waarop schepen passeren (Ten Brinke et al., 2004). In de hoek van een kribvak is vaak de erosie sterk, wat ook de sterk ontwikkelde steilrand in de oever bij de 'kom' (Figuur 2.6) zou kunnen verklaren.

## 2.4 Vergelijking jaarlijkse bodemligging

### 2.4.1 Jaarlijkse peilingen

Om de bodemveranderingen te identificeren zijn bodempeilingen uit de jaren voorafgaand aan de pilot verzameld. Om de omvang van de analyse te beperken wordt gekeken naar de bodemontwikkeling vanaf 2010 tot heden, ruwweg tussen rivierkilometer 981 en 997. Peilingen die binnen deze scope vallen zijn opgevraagd bij de Servicedesk Data van Rijkswaterstaat. Hierop hebben twee leveringen plaatsgevonden. Een overzicht van aangeleverde data is gegeven in bijlage A.1.

De aangeleverde data is vervolgens met behulp van ArcGIS verwerkt tot rasterbestanden met een uniforme projectie (EPSG:28992) en extent. Hierbij is een resolutie van 1 meter gehanteerd. Bij de tweede levering waren naast de gemeten punten ook de daaruit verkregen rasterbestanden al inbegrepen. Na het projecteren en knippen van de rasters op het studiegebied zijn deze rasterbestanden gebruikt voor de verdere analyse. Bij de eerste levering waren deze bestanden niet inbegrepen en zijn de gemeten punten eerst verwerkt tot rasters.

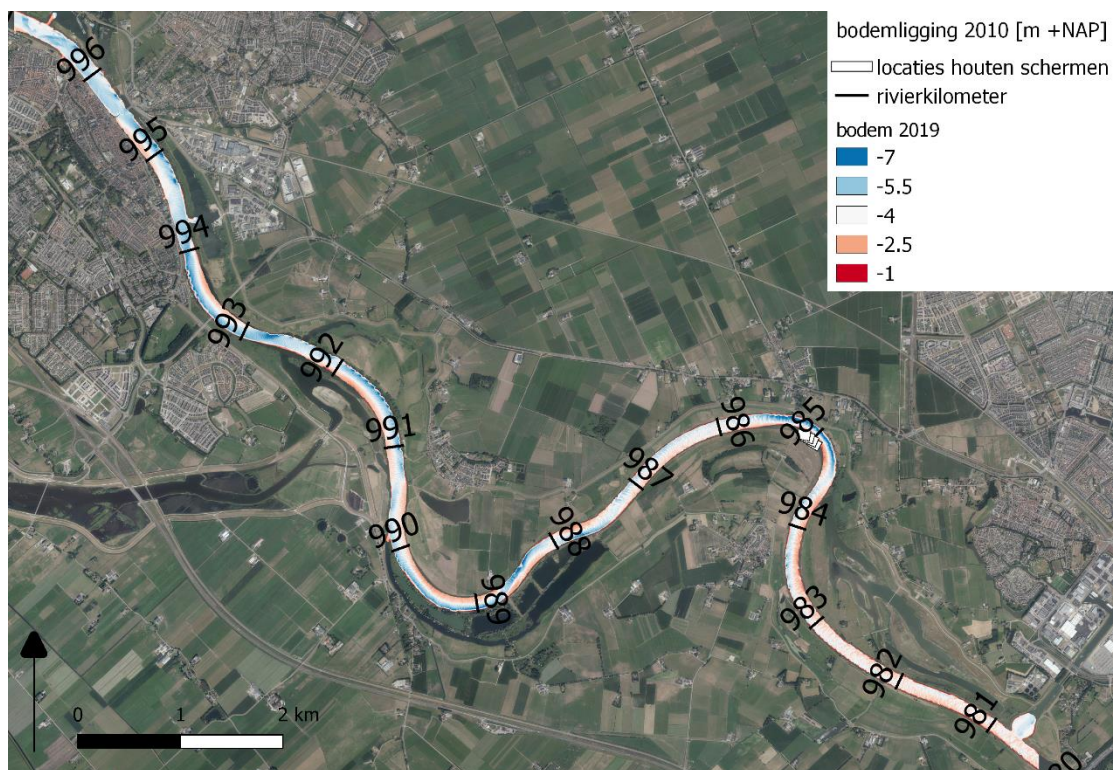
Met deze methode zijn jaarlijkse bodempeilingen van 2010 tot en met 2019 verkregen, met uitzondering van de jaren 2013 en 2018. Voor 2017 is naast de jaarlijkse peiling in september een extra meting uit februari/maart van dat jaar beschikbaar. Deze extra meting bevat echter data op slechts een paar kleine oppervlaktes binnen het studiegebied. De jaarlijkse peiling voor 2014 is zowel bij de eerste als de tweede levering inbegrepen. Dit gaf de mogelijkheid om het verkregen rasterbestand uit de punten van de eerste levering direct te vergelijken met het rasterbestand uit de tweede levering. Deze vergelijking resulteert in verticale afwijkingen kleiner dan 1 mm, een teken dat de gebruikte verwerkingsmethode voor de eerste en tweede levering consistent zijn.

Door de verschillende rasterbestanden van elkaar af te trekken kunnen veranderingen in de bodemligging tussen twee meetmomenten worden bepaald. Oorzaken van opvallende verschillen worden vervolgens bepaald door deze te relateren aan menselijke ingrepen dan wel natuurlijke variatie in afvoer.

#### 2.4.2 Bodemontwikkeling rkm 981 - 997

Figuur 2.9 toont de bodemligging van 2010 op het traject van rkm 981 tot 997. Met deze bodemligging als startpunt zijn steeds de jaarlijkse bodemveranderingen bepaald door de bodempeilingen van opeenvolgende jaren van elkaar af te trekken. Het resultaat van deze jaarlijkse verschilanalyse is opgenomen in bijlage A.2.

Om de bodemontwikkeling over een langere periode in beeld te krijgen kijken we hieronder naar het verschil tussen de bodem van 2019 en 2010. Vervolgens kijken we in meer detail naar opvallende verschillen en naar de ontwikkeling van de bodem rond de pilotlocatie.

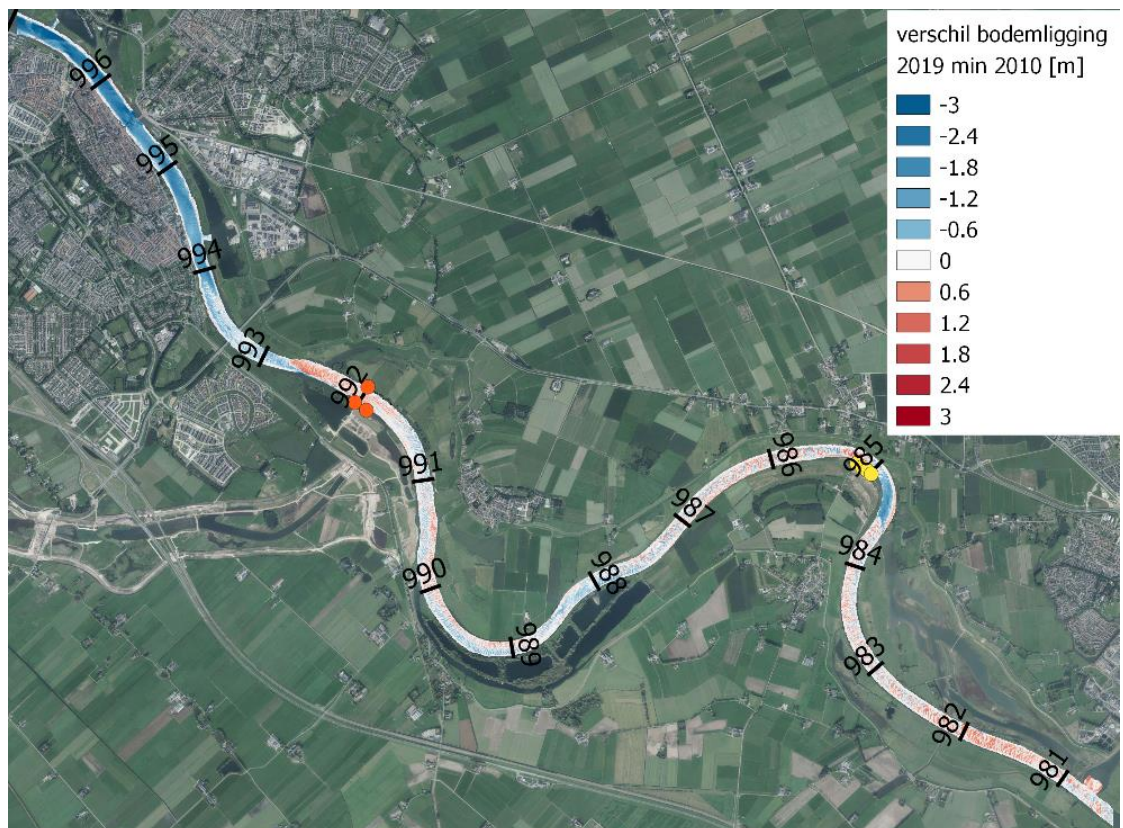


Figuur 2.9 De bodemligging van de IJssel volgens de JMP van 2010.



Figuur 2.10 laat het verschil tussen de bodemligging van 2019 en die van 2010 zien. Grofweg kunnen hierin de volgende trends worden onderscheiden, in benedenstroomse richting:

rkm 981.0 – 982.8	Aanzanding van maximaal ongeveer 70 cm.
rkm 982.8 – 984.5	Geen significante trend.
rkm 984.5 – 985	In het bovenstroomse deel van de bocht bij Zalk is erosie van de bodem te zien tussen 2010 en 2019. In 2019 ligt de bodem 1 tot lokaal 2 meter lager dan in 2010.
rkm 985.0 – 985.4	Aanzanding van circa 1 m.
rkm 985.4 – 989.0	Geen significante trend.
rkm 989.0 – 991.0	In deze bocht, net bovenstrooms van de flexibele kribben, is lichte erosie van de buitenbocht en sedimentatie van de binnenbocht zichtbaar. De verschillen lopen op tot zo'n 70 cm.
rkm 991.6 – 992.6	In dit gebied is aanzanding zichtbaar, met maxima van zo'n 1 meter.
rkm 993.0 – 997.0	In dit gebied is een algehele verlaging van de bodem van 2 tot 3 meter zichtbaar.



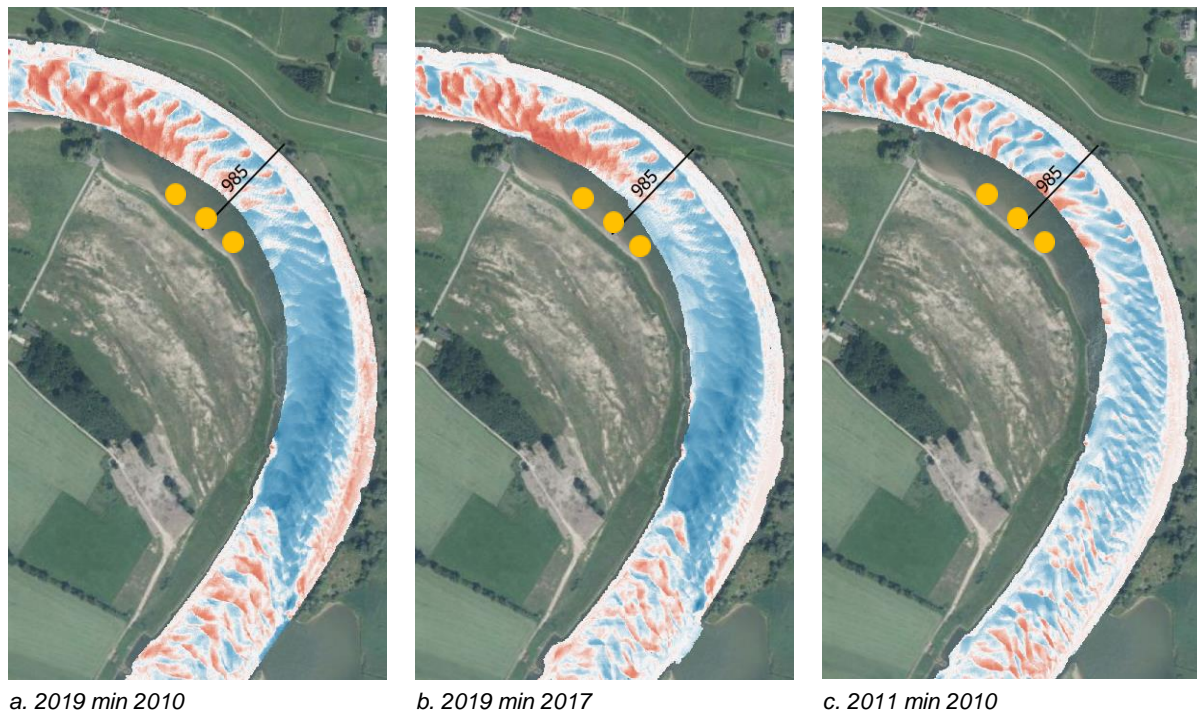
Figuur 2.10 Verskil tussen de bodem van 2019 en 2010. De locatie van de houten schermen is aangegeven in geel. De rode stippen markeren de locatie van de nabijgelegen pilot 'flexibele kribben'.

### 2.4.3 Ontwikkeling bij pilotlocatie (rkm 984.5 – 985)

Voor de pilotlocatie (rkm 984.5 – 985) analyseren we de bodemontwikkeling in meer detail. De significante erosie die zichtbaar is in de bocht bij Zalk (Figuur 2.11 a) vond voornamelijk plaats in de periode tussen de peiling van 2017 en die van 2019 (Figuur 2.11 b) en, in mindere mate, in de periode 2010 – 2011 (Figuur 2.11 c). Dit doet vermoeden dat de verhoogde afvoeren van 2018 en 2011 de voornaamste oorzaken van deze bodemverandering zijn. Door de scherpe bocht heeft een hoogwatergolf hier een ander effect op de bodem dan op andere locaties, maar in theorie zou dit bij hoogwater juist moeten leiden tot een aanzanding van de binnenbocht in plaats van erosie.

Mogelijke belangrijke effecten zijn toe te schrijven aan de uitwisseling met de uiterwaarden tijdens een hoogwater, waardoor lokale morfologische veranderingen optreden in het zomerbed die zich vervolgens als golven stroomafwaarts verplaatsen. Daarbij leveren ook bovenstroomse maatregelen (met name de invloed van de nevengeul Vreugderijkerwaard) een bijdrage aan de erosie. Verderop in de bocht vindt weer aanzanding plaats. Dit hangt samen met de erosie van de binnenbocht stroomopwaarts, wat leidt tot een stroomafwaarts verplaatsende zandgolf. De analyse van de bodemontwikkeling in het pilotjaar in sectie 0 toont de verplaatsing van een zandgolf met een tijdsinterval van enkele maanden (Figuur 4.7).

Ook de oeverafkalving in de binnenbocht en de in 2017 uitgevoerde uiterwaardverlaging kan een rol spelen bij het aanzanden van de hoofdgeul op deze locatie. De invloed op de erosie door de waterstandsverlaging van de benedenstroomse zomerbedverdieping kan hier ook worden genoemd als een potentiële bijdrage aan de waargenomen processen. Meer duidelijkheid over de oorzaken van de waargenomen morfologische veranderingen vraagt om verder onderzoek, bijvoorbeeld met behulp van een 2D morfologisch model. Een dergelijk onderzoek valt echter buiten de scope van dit project.



Figuur 2.11 Bodemontwikkeling rond de pilotlocatie (Blauw -3 m; Rood: +3m verschil, net als in Figuur 2.10). De huidige locatie van de reeds gerealiseerde schermen is met een gele markering ruwweg aangegeven.

#### 2.4.4 Conclusie en discussie

Op basis van een analyse van jaarlijkse bodempeilingen uit de periode 2010-2019 kunnen globaal de oorzaken van bodemveranderingen in deze periode worden vastgesteld. De zomerbedverlaging tussen rkm 993.3 en rkm 1000.4 (2015-2016) heeft een grote directe invloed gehad op de bodemligging in de Beneden-IJssel. Daarnaast hebben het aanleggen van nevengeulen en mogelijk uiterwaardmaatregelen een grote invloed op de bodemhoogteverandering. Tijdens verschillende periodes met verhoogde afvoer is de bodemligging het meest veranderd. Op de pilotlocatie lijken met name de verhoogde-afvoerperiodes van januari 2011 en 2018 voor erosie te hebben gezorgd.

Uit eerder onderzoek was al bekend dat ter hoogte van het studiegebied geen autonome erosietrend kan worden geconstateerd over de afgelopen 70 jaar (Ylla Arbós, Schielen, & Blom, 2020), zoals dat verder bovenstrooms en in andere riviertakken wel het geval is. Hierbij moet vermeld worden dat de uitgevoerde analyse beperkt is in zowel ruimte als tijd. Ingrepen buiten het studiegebied en buiten de periode 2010 – 2019 kunnen een invloed hebben gehad op de beschreven bodemontwikkeling, maar zijn buiten beschouwing gelaten. Daarnaast is de consistentie van de gebruikte meettechnieken niet onderzocht. Voor de peilingen in de periode 2010 – 2012 is gebruik gemaakt van een ‘single beam’ echolood, daarna is overgestapt naar het gebruik van een multibeamecholood. Het is bekend dat er systematische verschillen (0,1-0,2 m) kunnen optreden tussen de gemeten en verwerkte bodemligging door de twee methoden.

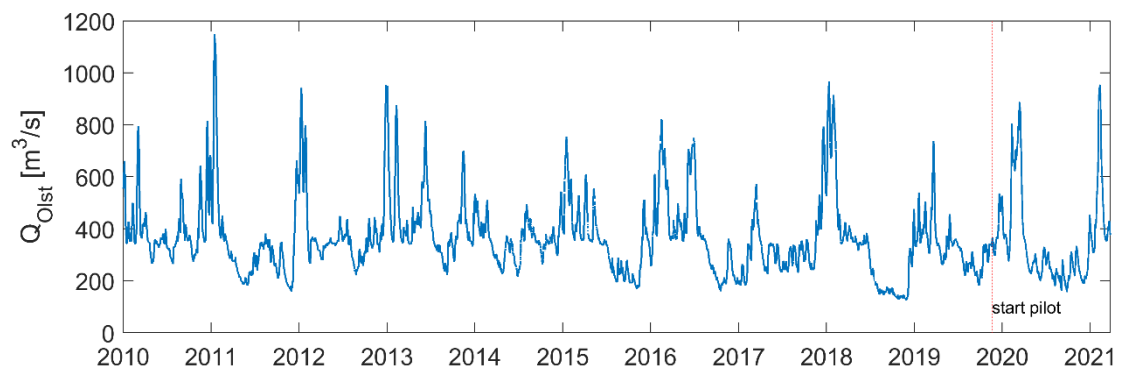
Ten slotte kunnen met de huidige analyse geen trends in de bodemontwikkeling op specifieke locaties worden gesignaleerd. Daarvoor is verdere bewerking en middeling van de data afkomstig van de bodempeilingen nodig, die niet binnen de scope van deze studie valt.

## 2.5 Verwachte ontwikkeling in pilotjaar zonder houten schermen

Uit bovenstaande analyse kan een ruwe indicatie van de te verwachten bodemontwikkeling gedurende het pilotjaar worden verkregen, als het effect van de pilot zelf niet wordt meegenomen. Ten eerste zal het gebied waar verlaging van het zomerbed is uitgevoerd in de periode 2015-2016 verder opgevuld worden als gevolg van de verminderde transportcapaciteit van de rivier aldaar. De resulterende aanzanding in het pilotjaar kan in de orde van decimeters bedragen.

Daarnaast wordt de bodemontwikkeling gedurende het pilotjaar grotendeels bepaald door de heersende hydrodynamische condities. Figuur 2.12 geeft de afvoer bij Olst over de afgelopen 10 jaar, inclusief de eerste 16 maanden van de pilotperiode. Binnen de pilotperiode is tweemaal sprake van een verhoogde afvoer ( $Q_{Olst} > 740 \text{ m}^3/\text{s}$ ), zie Tabel 2.3 (de verhoogde afvoer van februari 2021 niet meegerekend). De afvoeren zijn in deze periodes minder hoog dan de top 5 hoogste afvoeren over de afgelopen 10 jaar. De hoogst gemeten afvoer van  $885 \text{ m}^3/\text{s}$  gedurende de pilotperiode heeft op basis van WTI-2017 een herhalingstijd van ongeveer 2 jaar (Chbab, 2017).

De condities gedurende de pilotperiode lijken het meest vergelijkbaar met de periode juni 2015 – augustus 2016: een jaar dat een vergelijkbare piekafvoer kende en vooraf werd gegaan door een periode met relatief lage afvoeren. In deze periode trad net bovenstrooms van rkm 985 aanzanding van ongeveer 0.5 m op in de binnenbocht, zie Figuur 2.13. Voor de pilotperiode wordt daarom ook aanzanding bovenstrooms van de schermen verwacht, wanneer het effect van de schermen zelf niet in beschouwing wordt genomen.

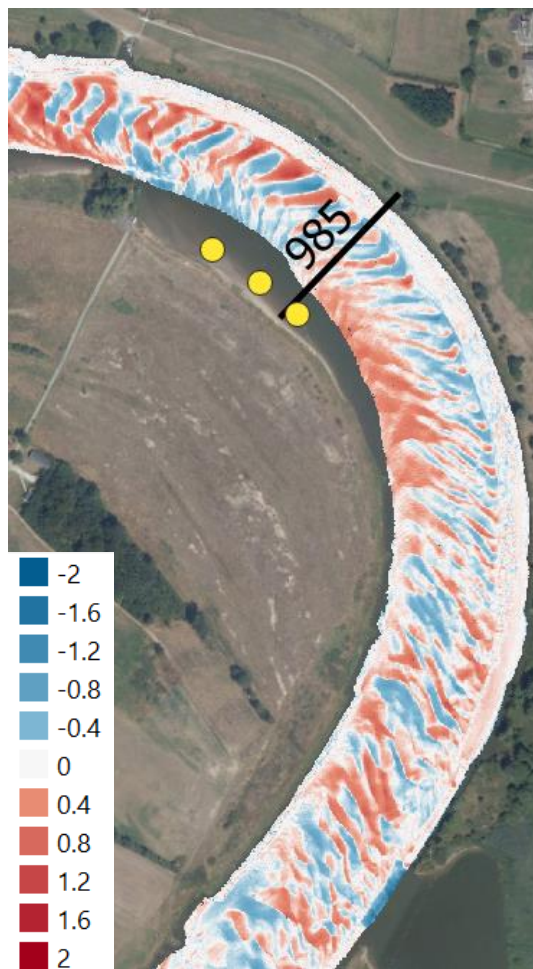


Figuur 2.12 Afvoer bij Olst in de periode januari 2010 – maart 2021.



Tabel 2.3 Verhoogde afvoeren gedurende de pilotperiode (vet gedrukt), in vergelijking met de top 5 hoogste afvoeren in de periode 2010 – 2020. \*740 m<sup>3</sup>/s wordt door RWS gehanteerd als grens voor verhoogde afvoer.

Periode	Duur Q > 740 m <sup>3</sup> /s* [dagen]	Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]
11 – 25 januari 2011	14	1149
06 – 15 januari 2012	10	942
23 dec 2012 – 06 jan 2013	14	952
04 – 16 januari 2018	12	967
22 jan – 07 feb 2018	16	915
<b>09 – 12 februari 2020</b>	<b>3</b>	<b>802</b>
<b>05 – 18 maart 2020</b>	<b>13</b>	<b>885</b>



Figuur 2.13 Bodemontwikkeling rond de pilotlocatie in de periode juni 2015 – augustus 2016. De locatie van de reeds gerealiseerde huidige schermen is met een gele markering ruwweg aangegeven.

## 3 Voorbereiding en realisatie

### 3.1 Algemeen

Verschillende afwegingen meenemend, heeft Rijkswaterstaat een ruimtelijk ontwerp gemaakt voor vier houten schermen in de binnenbocht van Zalk (Figuur 1.4). Elk scherm bestaat uit een stapel horizontaal op elkaar geplaatste boomstammen, welke aan weerszijden en aan de uiteinden opgesloten zijn door staanders.

De voorbereiding (fase 1) bestond uit het wateren van de stammen. Op 22 oktober 2019 is het gewaterde hout naar de binnenbocht bij Zalk gebracht. De realisatie (fase 2) bestond uit meerdere stappen. De houten schermen zijn voltooid op 22 november 2019 (Figuur 3.1). De eerste peiling van de bodemhoogte is een maand hiervoor uitgevoerd (-1 meting).

De hoeveelheid gewaterd hout bleek voldoende om drie schermen aan te leggen (Figuur 3.2). Gezamenlijk is besloten om direct niet de geplande twee van vier, maar drie schermen te realiseren. Het vierde scherm (meest benedenstrooms) ligt het dichtst bij een veerstoep en vormt een mogelijk risico voor ondergraving van de veerstoep (Buschman et al., 2019). De ervaring van de eerste drie schermen wordt afgewacht, voordat het vierde scherm wordt gerealiseerd.



*Figuur 3.1 De gerealiseerde drie houten schermen (foto BAM / Van den Herik, December 2019). In de voorgrond scherm 1, daarachter scherm 2 en in de achtergrond scherm 3.*



*Figuur 3.2 Een groot deel van het gewaterde rivierhout na transport naar de binnenbocht bij Zalk (foto Frans Buschman, november 2020).*

### 3.2 Wateren van stammen

In het algemeen is nog weinig bekend over hoe snel stammen verzadigd raken met water. Aangenomen is dat een jaar voldoende lang is om de lucht uit een stam te laten verdringen, zodat de dichtheid van een stam groter is dan van water. Dit voorkomt dat de stammen zonder stroming opdrijven. Stammen afkomstig uit uiterwaarden zijn gewaterd in 'het Doosje' (Figuur 3.3). In juni 2018 zijn ongeveer 110 stammen in 'het Doosje' geplaatst. Sommige hiervan zijn vrij recht, terwijl andere behoorlijk krom zijn (notulen leerteamoverleg 5-6-2018). In oktober heeft het rivierhout 1 jaar en 4 maanden gewaterd. In deze periode zakten steeds meer stammen naar de bodem, hoewel altijd stammen zichtbaar bleven aan het wateroppervlak.



*Figuur 3.3 De locatie waar het rivierhout is gewaterd: 'het Doosje' bij het gelijknamige dorpje (Foto BAM / Van den Herik, maart 2018).*



## 3.3 Realisatie

### 3.3.1 Plaatsen staanders

De gewaterde stammen zijn gebruikt als liggers in de houten schermen. De staanders zijn gerealiseerd van Corsicaanse Den, een type hardhout. De Corsicaanse Dennen zijn niet lang na de kap naar de pilotlocatie vervoerd en zijn niet vooraf gewaterd om de dichtheid verder te laten toenemen.

De Corsicaanse Dennen zijn recht en sterk, waardoor ze de bodem in kunnen worden getrild (Figuur 3.4). BAM / Van den Herik heeft aan de onderzijde van de staander een punt gemaakt en heeft de bovenzijde rechthoekig gemaakt (Figuur 3.5), zodat het trilblok eraan bevestigd kon worden. Vervolgens zijn de staanders 6-8 m de bodem in getrild (Figuur 3.4). De lengte in de bodem is meer dan tweemaal de lengte boven water zoals was ontworpen, waarmee we kunnen aannemen dat de staanders stabiel zijn. De staanders aan de kopse kanten zijn in dit stadium nog hoog (Figuur 3.4), zodat de houten schermen ook bij de hogere waterstand die werd verwacht goed zichtbaar zijn. Later zijn de staanders afgezaagd tot een hoogte van maximaal 0,8 m NAP (Figuur 3.5 links).



*Figuur 3.4 De realisatie van de houten schermen (foto BAM / Van den Herik, begin November 2019).*

*Linksboven: een Corsicaanse Den wordt opgepakt; Rechtsboven: Een Corsicaanse Den wordt de grond in getrild; Onder: de laatste staanders voor het eerste scherm worden geplaatst en het tweede scherm is gereed*





*Figuur 3.5 De staanders voor houten scherm 2 (links), de punt onderaan de staander (midden) en de bovenkant waar het trilblok aan bevestigd werd (rechts); Foto's Frans Buschman 13 november 2019.*

De breedte tussen de staanders varieert tussen 0,47 en 0,88 m en is gemiddeld ongeveer 0,65 m (afstand is bepaald zoals getoond in Figuur 3.6, zie ook bijlage F.3). De variatie wordt veroorzaakt door de uitvoeringstolerantie voor het werken met natuurproducten en door verschil in dikte van de stammen. Bij dikkere stammen is de breedte tussen de staanders mogelijk kleiner, omdat bij de realisatie gericht is om het hart van een stam op de aangegeven locatie te krijgen.

### 3.3.2 Plaatsing liggend hout

Bij het plaatsen van het liggend hout voor van het eerste scherm werd duidelijk dat de passage van schepen een grote belasting vormt op de bodem rondom de schermen. Na ongeveer één dag werden al ontgrondingskuilen van lokaal ongeveer 0.3 m diep waargenomen. Als gevolg van de bodemerosie zakten de geplaatste boomstammen. Ook kwamen een aantal stammen los te liggen, waardoor beweging in horizontale richting mogelijk was. De uitvoerder heeft navraag gedaan of in het ontwerp rekening is gehouden met inzakking door de lokale erosie. Zakking van een stamdiameter hoogte werd geaccepteerd, waarmee de realisatie weer in gang is gezet nadat de waterstand was gedaald.

Bij voldoende lage rivierafvoer is het gewaterde hout uit de uiterwaarden geplaatst voor de drie schermen. Deze stammen zijn tijdelijk vastgezet met een dunne staalkabel. Vanwege de grote variatie in lengte en vorm van dit hout, was het niet uit te sluiten dat een stuk hout uit het scherm zou ontsnappen en in de vaargeul terecht kwam. Om dit te voorkomen en om de houten schermen langdurig stabiel te maken, is als bovenste laag horizontaal hout een Corsicaanse Den aangebracht. De staalkabels zijn bevestigd om en aan de Corsicaanse Den, zodat de kans op verlies van hout uit het scherm minimaal lijkt (Figuur 3.6). Het blijft wel nodig de houten schermen op inzakken te blijven monitoren en de kabels een aantal keer per jaar strak te trekken. Bij te veel inzakking, kunnen de schermen aangevuld worden met extra stammen.



*Figuur 3.6 De bovenste houtlaag is geborgd met staaldraad; de gele pijl geeft de bepaalde afstand tussen de standers aan.*

Van het gewaterde hout zijn de meest rechte en de grootste stammen gebruikt voor schermen 1 tot en met 3. Het overgebleven hout is relatief kort en krom, waardoor het minder geschikt is om hier een (vierde) scherm van te realiseren. Voor het realiseren van een nieuw scherm is het goed om meer hout te wateren dan nodig is, zodat de uitvoerder de meest geschikte stammen kan selecteren.

De bovenkant van de horizontale liggers, van Corsicaanse Den, lag op een hoogte van ongeveer 0,4 m NAP kort na realisatie. Aan de oeverzijde zijn de houten schermen meestal 1 stam hoog. Aan de rivierzijde zijn 3 boomstammen op elkaar geplaatst voor schermen 2 en 3, en 4 stammen voor houten scherm 1. Bij een iets hoger dan gemiddeld debiet ( $340 \text{ m}^3/\text{s}$ ) is de rivier ter plaatse van de schermen ondiep en komen zowel de standers als de liggende stammen gedeeltelijk boven water uit. Alleen bij flink hoge afvoer raken de houten schermen verdronken, en kunnen de schermen werken als een geleider voor sedimentrijk water naar de binnenbocht.

## 3.4 Vergelijking met ontwerp

### 3.4.1 Bouwen met een natuurproduct

Vanwege het experimentele karakter van het project kon de optimale geometrie, zoals lengte en hoek met de rivieras, niet vooraf worden onderbouwd. In het plan werd daarom een stapsgewijze aanpak beschreven, waarbij in eerste instantie twee van de vier beoogde schermen zouden worden aangelegd. Op basis van de ervaring, zou het ontwerp van de nieuwe schermen en eventueel de al geplaatste schermen kunnen worden aangepast. De ervaring van de realisatie van de drie schermen vergelijken we met het ontwerp.

Het plaatsen van de **staanders** verliep soepel. Door ze dieper in te trillen dan volgens het ontwerp, is de verwachting dat dit gedeelte van de constructie stabiel blijft. Bij het plaatsen van het **liggende hout** tussen de staanders was het gezien de wisselende vorm, dikte en lengte van het rivierhout nodig om per stam te puzzelen om tot een stapel zonder te grote **openingen** te komen. Het was een uitdaging om met het beschikbare hout een dichte stapel hout te realiseren tussen de staanders. We hebben geen kieren groter dan een boomdiameter waar genomen. Figuur 3.7 toont dat in het minst hoge deel van een scherm kieren aanwezig zijn en een aanzienlijk gat aanwezig is tussen het scherm en de bodem. Omdat verder de rivier in, meer stammen op elkaar gestapeld zijn, kunnen de gaten daar groter zijn. Dat hebben we niet goed kunnen waarnemen, omdat het onder water staat. In de laag Corsicaanse Den bovenop het liggende hout zijn de gaten tussen stammen doorgaans klein.



*Figuur 3.7 Een deel van houten scherm 3, waarbij kieren tussen de stammen zichtbaar zijn.*

In het ontwerp was een **afsluiting** van hout aan de bovenzijde van de staanders voorzien, om opdrijven van het horizontaal geplaatste rivierhout te voorkomen. Uiteindelijk is besloten om het opdrijven te voorkomen met een vlechtwerk van staalkabels (Figuur 3.6). Omdat staalkabels aangetrokken kunnen worden als dat nodig is, lijkt de kans voor ontsnapping van een stam met de gehanteerde methode minder groot dan met een afsluiting op een vaste hoogte. Monitoring van de stabiliteit van de stammen blijft noodzakelijk om te voorkomen dat een stam losraakt.

### 3.4.2 Geometrie

De ligging van de gerealiseerde houten schermen verschilt enigszins met het ontwerp (vergelijk Figuur 3.8 met Figuur 1.4). De gerealiseerde houten schermen liggen ongeveer 10-20 m verder stroomopwaarts, waarmee mogelijk meer sediment wordt ingevangen uit het diepere deel van het begin van de binnenbocht, maar ook bieden de houten schermen (zelfs met het vierde eveneens ingetekende scherm geplaatst) minder bescherming voor de oever in de 'kom' bij de veerstoep.





*Figuur 3.8 De ligging van de gerealiseerde houten schermen (nadere uitwerking ruimtelijk ontwerp door BAM / Van den Herik ten behoeve van de realisatie). Het vierde scherm is weergegeven als onderbroken lijn en is niet gerealiseerd.*

In de praktijk bleek het niet goed mogelijk om de **kromming** aan te brengen in de houten schermen zoals in het ontwerp, vanwege de variatie in lengte van het gewaterde hout en de Corsicaanse Den die als toplaag zijn geplaatst (Figuur 1.4). Deze kromming had als doel om een zo geleidelijk mogelijke afbuiging van de stroming met sedimentrijk water te realiseren. Wanneer het begin van een scherm een te grote hoek maakt met de hoofdstroomrichting, kan de stroming loslaten van het scherm en ontstaat extra turbulentie. Hierdoor bestaat het risico op aanzienlijke erosie stroomafwaarts van het scherm. Bovendien leidt stromingsloslating tot extra weerstand voor het afvoeren van water. Hoewel de openingshoek nu groter is dan in het ontwerp, is geen aanzienlijke erosie rond de schermen waargenomen (zie hoofdstuk 4).

De **bovenzijde** van het liggende hout is, mede vanwege het plaatsen van de laag Corsicaanse Dennen, ongeveer 0,2 m hoger geworden dan vooraf beoogd. Hierdoor steken de schermen vaker boven water uit. In het gedeelte dat vaak boven water ligt kan houtrot sneller optreden. Het is goed om de stabiliteit van dat deel en ook de fixering van het liggend hout met de staanders enkele keren per jaar te controleren.

Ten slotte wordt opgemerkt dat de schermen niet bedoeld (en niet geschikt) zijn om de spiraalstroming in de bocht te beïnvloeden om daarmee het bochtprofiel te verflauwen, zodat meer vaarbreedte beschikbaar komt. Dat principe berust op het afbuigen van sediment richting de buitenbocht (Odgaard & Kennedy, 1983), en vraagt een andere opstelling en locatie van de schermen.



## 3.5 Beantwoording onderzoeksvragen

Op basis van de ervaring tijdens de voorbereiding en de realisatie kunnen we de onderzoeksvragen van fase 1 en 2 beantwoorden:

### 1 In het jaar voorafgaand aan de realisatie:

#### a) Hoe kan het wateren van de stammen een volgende keer beter uitgevoerd worden?

De stammen uit de uiterwaarden (de Corsicaanse Dennen niet) hebben een jaar en 4 maanden gewaterd, waarna de meeste maar niet alle stammen naar de bodem waren gezonken. Deze periode lijkt lang genoeg om de dichtheid van deze stammen te vergroten tot minimaal de dichtheid van water. Of een kortere periode voldoende is, kan bepaald worden door de dichtheid van de vers gekapte stammen vooraf en enkele malen tijdens het wateren te bepalen. Het Doosje is praktisch gezien een geschikte locatie voor het wateren.

### 2 Tijdens de realisatie:

#### b) Hoe goed zijn verzadigde houten stammen te vervoeren en te verwerken tot houten schermen?

Het vervoer van de stammen, zowel verzadigd als vers gekapt, verliep zonder problemen. De Corsicaanse Dennen bleken goed bewerkbaar en stevig, zoals verwacht. Het was een uitdaging om de gewaterde stammen te plaatsen tussen de staanders, vanwege de variatie in lengte, mate van kromheid, aanwezigheid van zijtakken of uitstulpingen en de variatie in dikte. De langste en rechtste stammen zijn geselecteerd om de houten schermen te realiseren. Door het plaatsen direct op de zandbodem trad lokaal erosie op bij een passage van beroepsvaart, waardoor het liggend hout zakte. De inzakking werd niet meer dan stamdiameter, waarmee de houten schermen konden worden voltooid. Het blijft wel nodig de houten schermen op inzakken te blijven monitoren, en zo nodig stammen aan te vullen en de kabels strak te trekken.

#### c) Hoe efficiënt zijn houten schermen van de stammen te maken?

Omdat de stammen een natuurproduct zijn (zie antwoord op vraag 2a), was het tijdrovend om de schermen op te bouwen. Overleg met de ontwerper was nodig om preciezere instructie te krijgen hoe om te gaan met het zakken van de stammen de rivierbodem in. De nodige ervaring is opgedaan om te zorgen dat er geen grotere gaten (groter dan stamdiameter) in de schermen aanwezig zijn: stap voor stap werden de best passende stammen geselecteerd om de schermen op te bouwen. Bovendien steeg de waterstand door een toenemende afvoer. Toen de waterstand weer was gezakt, konden de schermen worden afgerond. Met deze ervaring zullen de uitvoerders van BAM / Van den Herik een volgende scherm efficiënter kunnen realiseren.

#### d) Hoe diep moeten de staanders worden geplaatst om stabiele schermen op te leveren?

Deze vraag kan niet goed beantwoord worden met de opgedane ervaring. De staanders zijn zo ver mogelijk de grond in getrild: of er zat geen beweging meer in of ze zijn dieper dan volgens de ontwerpformule de rivierbodem in getrild. Meestal zijn ze 6-9 m de rivierbodem in getrild, wat naar verwachting stabiel is.

## 4 Bodemligging in jaar na realisatie

### 4.1 Overzicht

In bijlage B is een overzicht gegeven van de peilingen waarmee de bodemligging is bepaald. Tabel 4.1 geeft een beknopt overzicht van dit overzicht. De eerste peilingen vonden plaats een maand voor de realisatie van de houten schermen en de laatste een jaar na realisatie. Grofweg zijn drie verschillende soorten peilingen uitgevoerd. Ten eerste heeft Aquatic Drones met een varende drone waaronder een multibeam echolood is geïnstalleerd de rivierbodem van rkm 984 tot rkm 987 ingemeten. De dekking is de vaargeul en de delen tussen vaargeul en oever waar het bij iedere afzonderlijke peiling voldoende diep is (ongeveer 1,5 m). In het ondiepe deel zijn peilstokmetingen uitgevoerd. Het gaat hierbij om de ondiepte in de binnenbocht waar ook de houten schermen op zijn geplaatst, van rkm 984.7 tot rkm 985.5. Daarnaast zijn incidenteel Lidar-metingen beschikbaar van delen van de oever en is de bodemsamenstelling bepaald.

Tabel 4.1 Samenvatting monitoring.

Wat	Waar	Wie	Wanneer (mnd na realisatie)
Lidar en Multibeampeiling varende drone tot zo dicht mogelijk bij de oever	Rkm 984 - 987	Aquatic Drones	-1, 0, 1, 3, 6, 9, 12
Peilstokmetingen rondom de houten schermen tot ongeveer 1,5 m waterdiepte	Rkm 984.7 – 985.5	Aquatic Drones	-1, 0, 1, 3, 6, 9, 12
Visuele inspectie en foto's: schermen, oever en golfdemping	Rkm 984.7 – 985.5	Deltares	0, 6, 9, 12
Bodemsamenstelling	Rkm 984 - 987	Deltares	14

### 4.2 Methode

#### 4.2.1 Multibeam vanaf varende drone

De bodemligging is bepaald met een varende drone van Aquatic Drones (Figuur 4.1). Op deze drone zijn een multibeamecholood, een Light Detection and Ranging (LiDar), bewegingssensoren en een GPS geïnstalleerd. Ter verificatie van het systeem is op 22 februari 2021 met de "Phoenix 1.5" de bodemhoogte bepaald van de drempel van de Algerasluis (Capelle a/d IJssel), en is tegelijkertijd een landmeting uitgevoerd. Het meetsysteem bleek 0.02m ondieper te meten dan de landmeting met een standaardafwijking van 0.02m, waarmee het meetsysteem voldoet aan de nauwkeurigheidseis van 0.05m (Hydrographx, 2021).

Omdat de drone niet autonoom mag varen in de vaargeul en om de scheepvaart te informeren, is de drone begeleid door een meetschip van Rijkswaterstaat. De meetmomenten staan beschreven in Tabel 4.1: eerst maandelijks om het initiële effect van de schermen te monitoren en vervolgens iedere 3 maanden om het langetermijn effect zichtbaar te maken.



Figuur 4.1 De varende drone "Phoenix 1.5" van Aquatic Drones op de IJssel bij Kampen.

#### 4.2.2 Peilstok

De peilstokmetingen worden op dezelfde momenten als de multibeampeilingen uitgevoerd, zodat de verschillende bronnen gecombineerd kunnen worden tot één beeld van de bodem op elk meetmoment. Langs de oever van de binnenbocht wordt ongeveer elke 10 meter een raai gelopen, waarbij tot ongeveer 1 meter diepte gemeten wordt. Het aantal punten dat per raai geprikt wordt kan hierdoor variëren van een paar tot enkele tientallen. Door de aanzienlijke afstand tussen raaien, kan de bodemhoogte niet worden geïnterpoleerd en zijn de bodemhoogten per raai vergeleken voor de verschillende meetmomenten. De peilstokmetingen zijn zo goed als praktisch mogelijk iedere keer op dezelfde raai bepaald om deze directe vergelijking mogelijk te maken.

#### 4.2.3 Lidar

Om het terrein boven water in te meten voert de varende drone ook metingen met behulp van Light Detection and Ranging (LiDaR) uit. Het meetprincipe is dat een laser pulserend signaal uitzendt in verschillende richtingen, en de (zeer korte) tijd wordt bepaald voordat een reflectie op een oppervlak terugkomt. Uit deze tijd kan de afstand tot het oppervlak worden bepaald, omdat we de snelheid van licht in lucht kennen. Op basis van vele reflecties kan de afstand tot het terrein worden geschat. Bij toepassing vanaf een bewegend object kan de horizontale positie en hoogte van het terrein bepaald worden als de locatie en oriëntatie van het object bekend is.

Deze methode wordt vaker gebruikt om vanuit de lucht het terrein in te meten. De nauwkeurigheid van de verticale positie is bepaald in verschillende studies. Bij goede omstandigheden (vlak terrein zonder obstakels en laag vliegen) is de *Root Mean Square Error* (RMSE) 15 cm. Voor laag gras en vlak terrein is een RMSE bepaald van 18 cm voor laag gras en 26 cm voor loofbos (Hodgson en Bresnahan, 2004). Ook bij regen of mist kan met een LiDaR in principe het terrein worden ingemeten, maar het aantal detecties van het terrein vermindert. Hierdoor neemt de nauwkeurigheid af. Omdat de hoek vanaf de drone met de horizontaal klein is en de drone beweegt op de golven, is de verwachting dat de nauwkeurigheid voor de toepassing van de LiDaR vanaf de drone minder groot is.

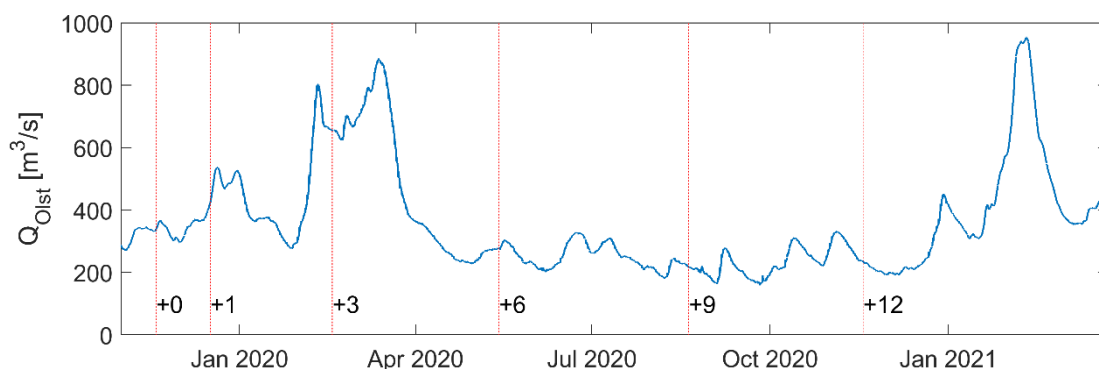
### 4.3 Verificatie meetmethode

Omdat het inmeten van de bodem vanaf een varende drone nog geen bewezen technologie is, vindt bij voorkeur een vergelijking met standaardmetingen plaats. Voor de pilot houten schermen zijn echter geen standaardmetingen beschikbaar die rond dezelfde datum zijn uitgevoerd als de dronemetingen. Voor de pilot met flexibele kribben is wel een vergelijking uitgevoerd (Buschman en Kusters, 2021). Voor de analyse van de bodemhoogteverschillen nemen we aan het eventuele verschil met de werkelijke bodemligging (0.02 m volgens Hydrographx, 2021) gedurende het jaar na realisatie van de houten schermen constant is gebleven.

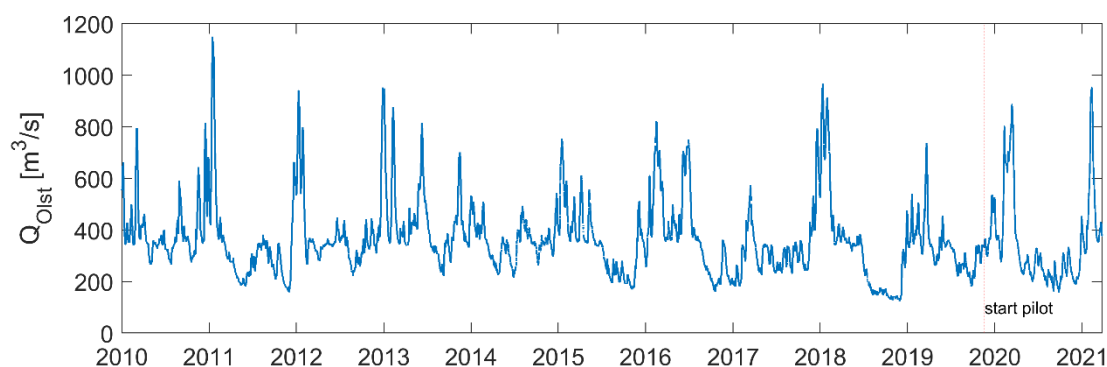
### 4.4 Ontwikkeling bodemligging in bocht

#### 4.4.1 Afvoerconditie

Figuur 4.2 toont de afvoer bij Olst gedurende de pilotperiode. Ter vergelijking is deze tijdserie nogmaals weergegeven in Figuur 4.3, samen met de afvoer over de afgelopen 10 jaar. Vlak voor en na de +3-meting was sprake van een verhoogde afvoer, met lokale maxima van 802 m<sup>3</sup>/s op 10 februari 2020 en 885 m<sup>3</sup>/s op 12 maart 2020. Een afvoer van 885 m<sup>3</sup>/s bij Olst heeft een herhalingsstijd van ongeveer 2 jaar (Chbab, 2017). Op basis van deze gegevens worden de grootste bodemveranderingen verwacht in de periode tussen de +1- en +3-meting, en tussen de +3- en +6-meting. Paragraaf 2.5 geeft een uitgebreidere analyse van de bepaalde afvoeren.



Figuur 4.2 Afvoer bij Olst in de periode november 2019 – maart 2021. De rode stippellijnen geven meetmomenten aan.



Figuur 4.3 Afvoer bij Olst in de periode januari 2010 – maart 2021.

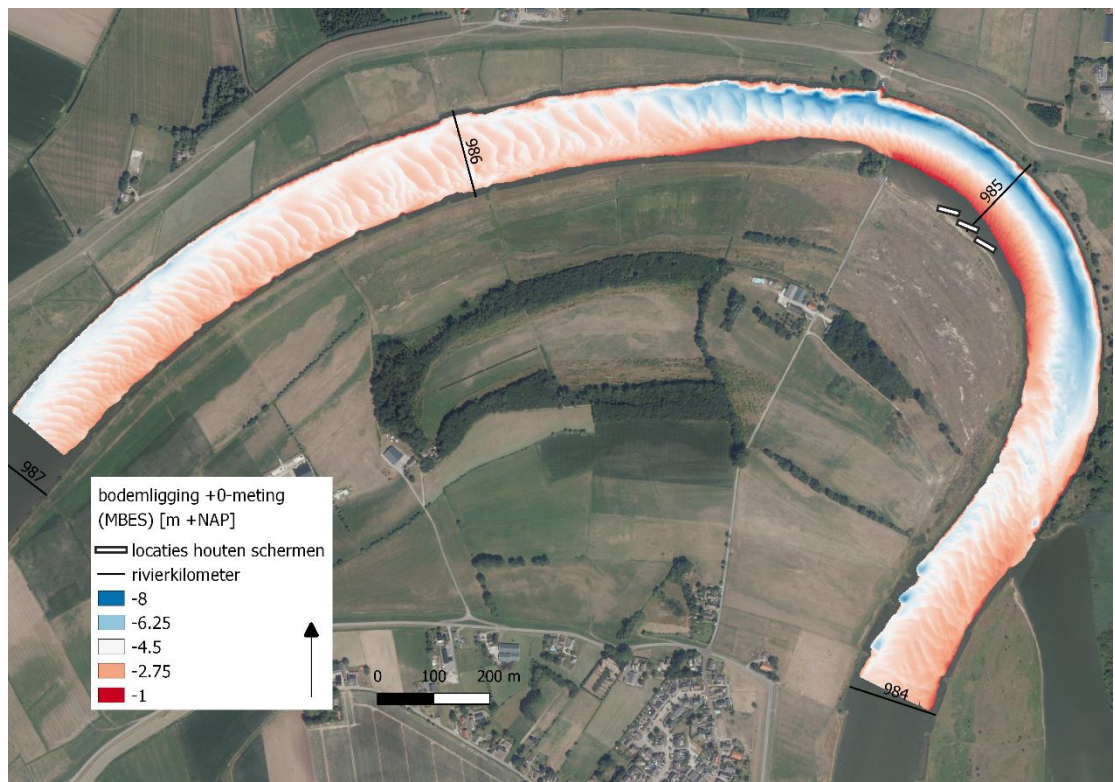


#### 4.4.2 Verandering over een jaar

In Figuur 4.4 is het resultaat van de bodempeiling ten tijde van realisatie weergegeven. Hierin is het typische bochtprofiel duidelijk zichtbaar, met een diepe buitenbocht en een ondiepe binnenbocht. Figuur 4.5 geeft het resultaat 12 maanden na realisatie. Uit een vergelijking van deze twee resultaten (Figuur 4.6) valt op dat met name net bovenstrooms van de schermen en net benedenstrooms van de veerstoept veranderingen zijn opgetreden. Een gewenst effect van de houten schermen is om de hoofdgeul te verdiepen. Een trend in verdieping van de hoofdgeul is niet zichtbaar in dit pilotjaar.

Het netto effect na 12 maanden net bovenstrooms van de schermen is erosie tot 2 m rond rkm 984.5 (Figuur 4.6). De samenkomst van de stroming uit de IJssel en de Vreugdenrijkse nevengeul heeft deze erosie waarschijnlijk veroorzaakt. Het geërodeerde sediment lijkt in de binnenbocht te zijn afgezet rond rkm 984.8 waar tot meer dan 1.5 m sedimentatie is opgetreden.

Bij en benedenstrooms van de veerstoept (rkm 985.3) heeft netto erosie plaats gevonden en sedimentatie iets verder benedenstrooms (rkm 985.5). Ook hier is de bodemverandering in de orde van meters. De erosie is te relateren aan de uitstroming van de nevengeul aan de overzijde waarbij tijdens hoogwater het sedimentarme water toestroomt in het zomerbed en leidt tot een verhoogde sedimenttransportcapaciteit (zonder toename van sedimentaanbod). Hier treedt daardoor plaatselijk erosie op in het zomerbed. Dit wordt vervolgens gevolgd door een aanzandingsgolf (het extra aanbod van geërodeerd materiaal geeft plaatselijk benedenstrooms een sedimentatie). Na afloop van het hoogwater verplaatsen deze golven zich stroomafwaarts en dempen geleidelijk uit. Deze verplaatsing van sediment door de bocht wordt duidelijker zichtbaar als we de verschillen tussen meetmomenten vergelijken, zoals in de volgende subparagraaf wordt getoond. Opgemerkt moet worden dat de verplaatsing van de golf aanzienlijk kleiner is dan de snelheid van de zandkorrels: het gaat hier om een traag bewegende vorm, en niet een verplaatsing van een equivalente hoeveelheid sedimentkorrels.



Figuur 4.4 Bodemligging 0-meting (19 november 2019). Rechtsonder is de Vreugdenrijkse nevengeul zichtbaar (in de nevengeul is geen peiling uitgevoerd).



Figuur 4.5 Bodempligging +12-meting (18 november 2020).



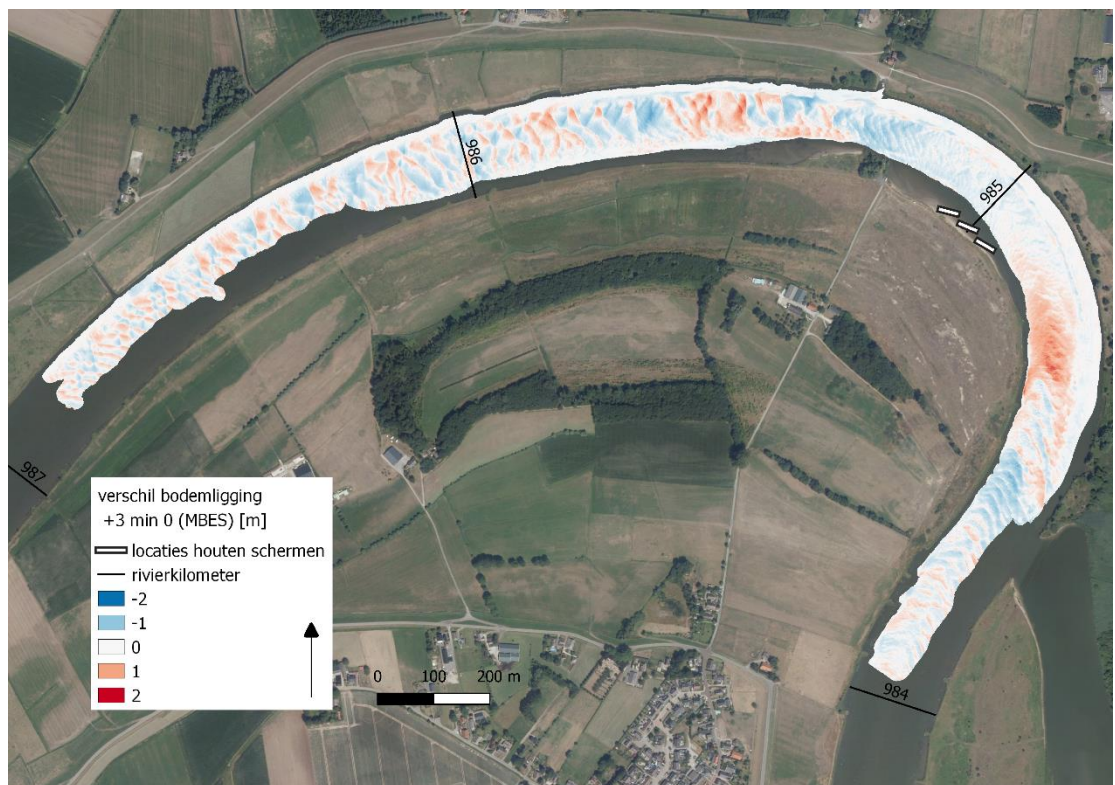
Figuur 4.6 Verschil bodempligging +12- en 0-meting.



#### 4.4.3 Ontwikkeling tijdens het jaar

Figuur 4.7 t/m Figuur 4.10 laten de bodemverandering in 4 opeenvolgende periodes van 3 maanden zien. De afzonderlijke multibeampeilingen zijn gegeven in bijlage C.1. In de verschilkaarten is duidelijk zichtbaar dat in de eerste 2 periodes grote veranderingen optreden, terwijl in de laatste 6 maanden de bodemligging niet veel verandert. Dit is in overeenstemming met de hogere afvoeren voor en na de +3-meting, en lagere afvoeren tussen de +6- en +12-meting (Figuur 4.2). De resultaten tonen duidelijk het in voorgaande paragraaf genoemde voortplantingsgedrag van de zandgolven die opgewekt zijn tijdens hoogwater, en samenhangen met de uitstroming van de Vreugdenrijkse nevengeul voor de bocht (km 984.4).

In de eerste 6 maanden treedt een significante verplaatsing van de zandgolf op in de linkerhelft van de binnenbocht bovenstrooms van de schermen. Deze verplaatsing begint in de eerste 3 maanden (Figuur 4.7) en zet zich voort in de 3 maanden erna (Figuur 4.8). Deze verplaatsing kan verklaard worden uit de eerder genoemde voortplanting van de rond km 984.4 opgewekte verstoring bij het hogere water. Onder invloed van de bochteffecten (spiraalstroming) treedt deze aanzanding en de daarop volgende voortplanting vooral op in de binnenbocht.



Figuur 4.7 Verskil bodemligging +3- en 0-meting.



Figuur 4.8 Verskil bodemligging +6- en +3-meting.



Figuur 4.9 Verskil bodemligging +9- en +6-meting.





Figuur 4.10 Verschil bodemligging +12- en +9-meting.

#### 4.5 Ontwikkeling bodemligging rond schermen

Rondom de schermen kan de rivierbodem vanwege de geringe diepte niet met multibeam worden ingemeten. Om de ontwikkeling van de bodem en de oever op deze locatie te kunnen monitoren zijn peilstokmetingen uitgevoerd, zie Figuur 4.11.



Figuur 4.11 Raaien peilstokmetingen. Verschillende kleuren geven verschillende meetmomenten aan.



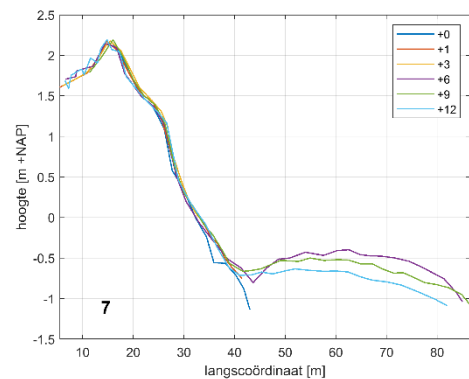
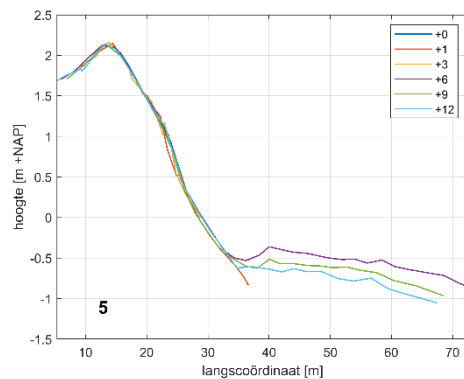
Figuur 4.12 toont de bodemligging langs een aantal lijnen. Op iedere lijn is voor verschillende meetmomenten de bodemligging geprojecteerd die is bepaald door punten te prikken langs de bijbehorende raai. Kleine verschillen in bodemligging kunnen optreden, omdat de raaien niet precies hetzelfde zijn gelopen op de verschillende meetmomenten. De nummering van de profielen correspondeert met de nummering in Figuur 4.11. De overige geprojecteerde bodemliggingen zijn weergegeven in bijlage C.2.

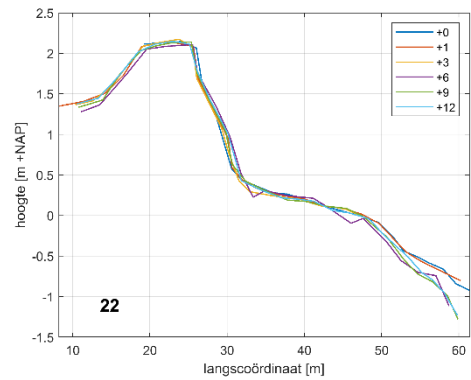
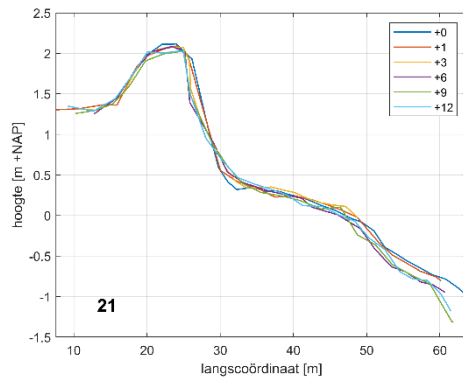
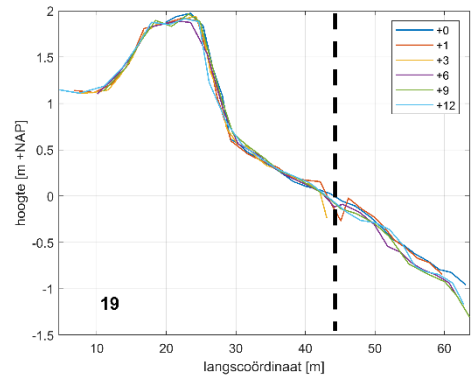
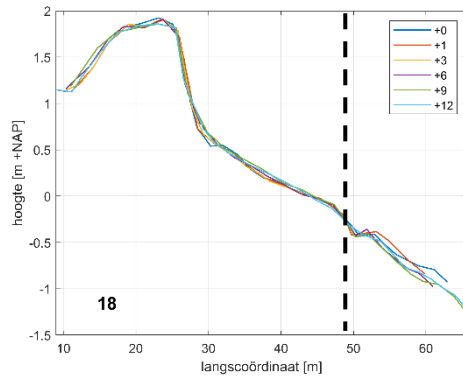
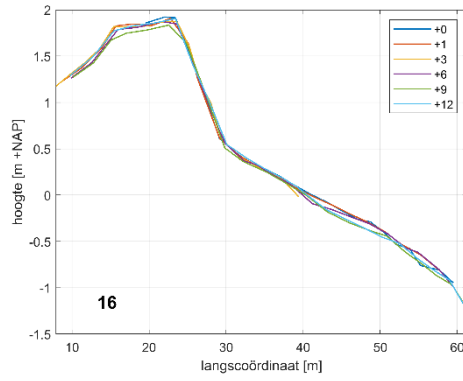
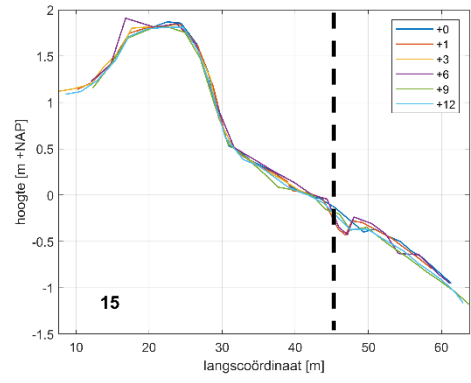
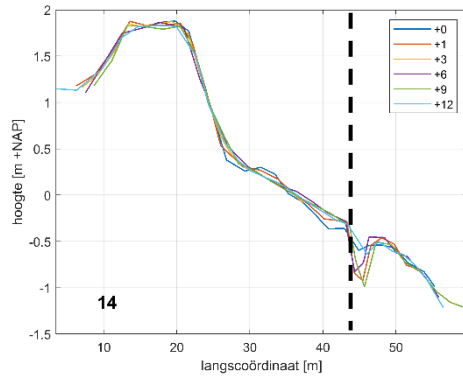
Bij lijn 5 en 7 is richting de vaargeul het sedimentatiefront zichtbaar dat ook in de multibeampeilingen werd geobserveerd. Vanaf de +6-meting is verder richting de vaargeul gelopen dan daarvoor, vermoedelijk was dit bij de eerdere meetmomenten niet mogelijk vanwege een te grote diepte. Opvallend is dat bij zowel de +9- als de +12-meting erosie (ongeveer 0,1-0,2 m) is opgetreden aan de vaargeulzijde ten opzichte van de meting ervoor.

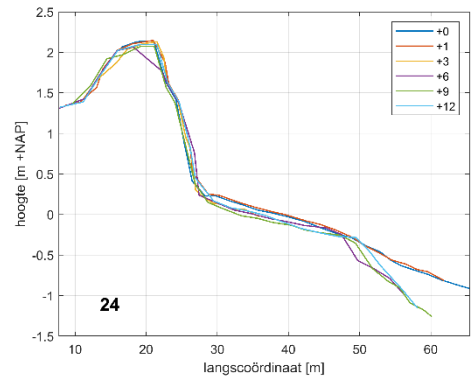
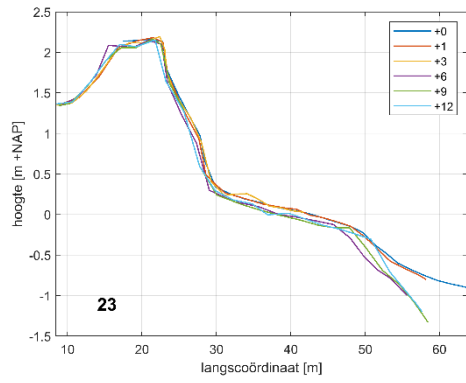
Bij lijn 14 en 15 is duidelijk te zien dat rond scherm 2 lokaal erosie van enkele decimeters is opgetreden. Dit lijkt voornamelijk in de eerste maand na realisatie te zijn gebeurd. Bij de visuele inspecties is geconstateerd dat ontgronding voornamelijk in een straal van ongeveer 1 meter rondom de standers optrad (Figuur 4.13). De diepte van de ontgrondingskuilen is hierbij geschat op maximaal 50 cm. Dit komt overeen met het resultaat van de peilstokmetingen.

Uit de geprojecteerde bodemligging op lijn 16 blijkt dat tussen scherm 2 en 3 weinig verandering is opgetreden. Iets verder benedenstrooms, ter hoogte van lijn 18 en 19, zijn daarentegen wel bodemveranderingen zichtbaar. Ook hier is lokale ontgronding zichtbaar, nu rond het derde scherm. Daarnaast is aan de vaargeulzijde van het scherm erosie van maximaal enkele decimeters zichtbaar. Deze erosie is voornamelijk tussen de +1- en de +6-meting opgetreden.

Ook verderop, bij lijnen 21 t/m 24, is richting de vaargeul significante bodemerosie zichtbaar. Bij lijn 21 en 22 is deze bodemverandering voornamelijk opgetreden bij het deel van het profiel dat bij de nulmeting al onder 0 m NAP lag. Bij lijn 23 en 24 zien we dat erosie ook op de vooroever optreedt, tussen -0.3 en +0.3 m NAP. Bij lijn 23 lijkt dit voornamelijk tussen de +3- en de +6-meting te zijn gebeurd, terwijl bij lijn 24 tussen de +1- en de +3-meting ook al erosie zichtbaar is op de vooroever. Daarnaast is richting de vaargeul bij beide lijnen tot 0,5 m erosie zichtbaar. Bij de +9- en +12-meting lijkt de vooroever echter weer wat aan te groeien richting de vaargeul.







*Figuur 4.12 Dwarsprofielen langs enkele van de lijnen weergegeven in Figuur 4.11. De verticale stippellijnen geven de locatie van de houten schermen aan (lijn 14, 15, 18, 19).*



*Figuur 4.13 Lokale ontgraving rond de staanders.*

## 5 Overige waarnemingen in jaar na realisatie

### 5.1 Overzicht

Als aanvulling op de bodempeilingen zijn foto's en filmpjes gemaakt om het effect en de werking van de schermen boven water aan te kunnen geven. Deltares heeft op verschillende momenten visuele inspecties uitgevoerd. Tijdens iedere visuele inspectie zijn vanuit eenzelfde standpunt foto's gemaakt van de ligging van de oever en van de houten schermen. Kwalitatief kan hiermee onder andere bepaald worden waar oevererosie is opgetreden en hoe stabiel de houten schermen zijn.

Tabel 5.1 geeft een overzicht van de visuele inspecties. Bij de eerste drie inspecties was de afvoer lager dan gemiddeld (ongeveer 350 m<sup>3</sup>/s), waardoor de houten schermen ruim boven water uit kwamen. Bij de vierde inspectie was de afvoer een stuk hoger dan gemiddeld en lagen de schermen geheel onder water. Tijdens de visuele inspecties is ook bepaald hoe de belasting door scheepsgolven op de oever verandert door de houten schermen en wat de werking zou kunnen zijn van de houten schermen op het moment van het bezoek.

Tabel 5.1 Overzicht van visuele inspecties: debiet en bijzonderheden.

Datum	Afvoer Olst (m <sup>3</sup> /s)	Bijzonderheden
13 november 2019	340	Alleen staanders stonden. Effect scheepvaart werd goed zichtbaar
15 april 2020	273	Eerste inspectie na het hogere water en na afronding; Aantal stammen geteld, erosie rond pijler
9 september 2020	265	Breedte tussen staanders bepaald
2 februari 2021	671	Schermen geheel onder water.

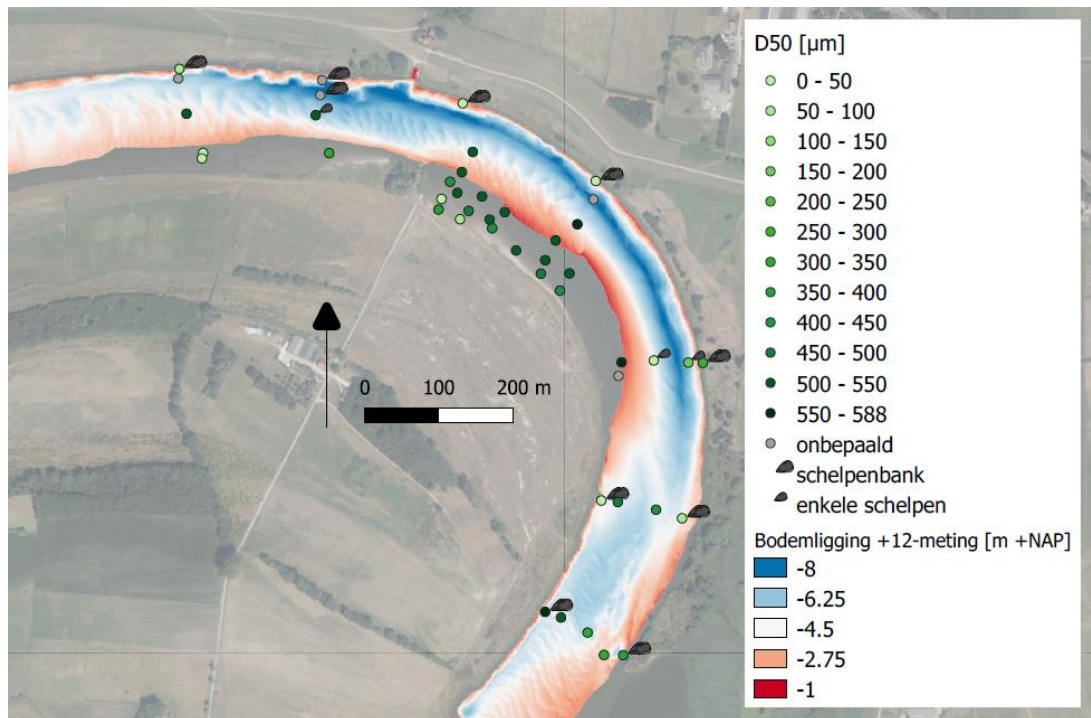
### 5.2 Bodemsamenstelling

Enkele weken na de hoogste afvoer van de winter 2020-2021 heeft Deltares bodemmonsters genomen en de samenstelling hiervan bepaald. Details van de meting en de analyse zijn beschreven in bijlage E. Figuur 5.1 geeft de mediane korrelgrootte en de locaties waar schelpen zijn gevonden. Het viel op dat 'schelpenbanken' (zoetwatermosselen) op meer dan de helft van de locaties dichtbij de oever zijn aangetroffen. Een 'schelpenbank' kan de rivierbodembodem stabiliseren.

Rond de as van de rivier bestaan de monsters vrijwel geheel uit grof zand. De D50 ligt over het algemeen tussen 0.3 en 0.6 mm. Dit komt overeen met een meetcampagne van Rijkswaterstaat in januari 2021 om de korrelgrootteverdeling langs de Rijntakken in kaart te brengen (Gegevens voor de IJssel hebben we verkregen via M. Reneerkens, februari 2021), waarbij iedere 500 m een monster genomen op de as en op een vierde deel van de normaalbreedte uit de linker- en rechternormaallijn. De D50 van bodemmonsters in een traject van de 3 km bij de houten schermen ligt in dezelfde range en is meestal 0.4 mm. In die campagne zijn geen bodemmonsters genomen dichtbij de oevers.



In de binnenbocht rond de houten schermen geldt ook dat de zandige monsters vrijwel geheel uit grof zand bestaan, waarbij de D50 tussen 0.4 en 0.5 mm ligt. Op enkele plaatsen is ook fijner sediment (klei) aanwezig. Net als in de linkeroever lijken in de rivierbodembodem lokaal zandige kleibanken voor te komen.



Figuur 5.1 De mediane korrelgrootte (D50) bij de houten schermen op basis van bodemmonsters genomen in februari 2021. Rondom de houten schermen zijn extra veel bodemmonsters genomen.

## 5.3 Oevererosie

### 5.3.1 Ondergraving vegetatielaag

Vanaf de steilrand ter hoogte van het derde scherm is bij elke inspectie zowel in bovenstroomse als in benedenstroomse richting een foto gemaakt. Tijdens de hogere afvoer in de periode tussen de eerste en tweede inspectie is duidelijk oevererosie opgetreden op de locatie van de schermen. De steilrand is over de gehele lengte van de pilotlocatie teruggetreden. Hierbij wordt vaak eerst de toplaag waarin vegetatie wortelt ondergraven, waarna de toplaag op een gegeven moment bezwijkt. Een voorbeeld hiervan is zichtbaar in Figuur 5.2.



*Figuur 5.2 Ondergraving van de toplaag.*

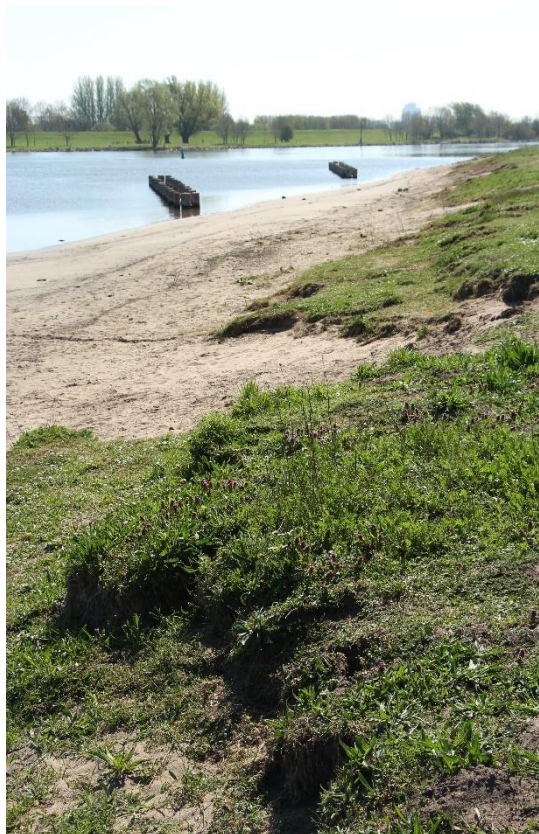
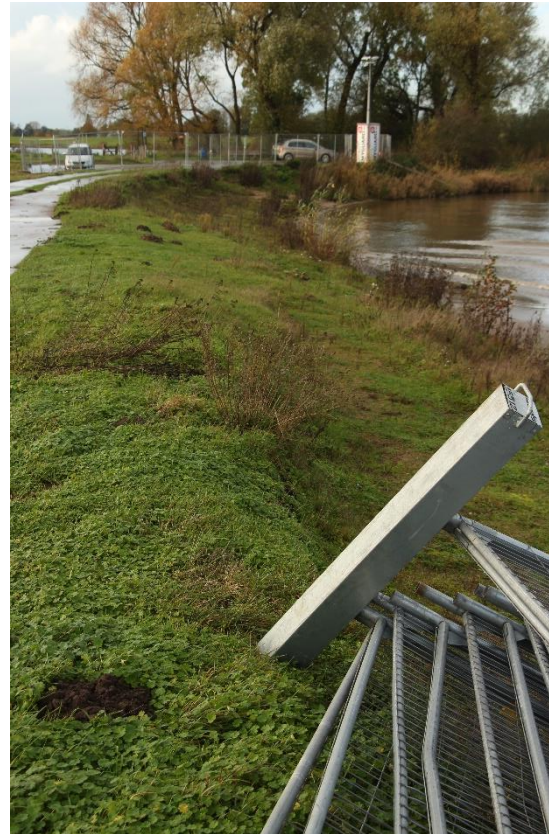
### 5.3.2

#### **Steilrand**

Tijdens de tweede inspectie kon visueel de grootste erosie worden geconstateerd net benedenstrooms van het derde scherm, terwijl de oever achter de drie nu geplaatste schermen (1, 2 en 3) in mindere mate geërodeerd leek (zie Figuur 5.3 en Figuur 5.4). Benedenstrooms van het derde scherm is ook sprake van een dubbele steilrand (Figuur 5.5), terwijl achter de schermen sprake is van slechts één steilrand.

Het kan worden aangenomen dat de geconstateerde terugschijding voor het grootste gedeelte is opgetreden tijdens het hoogwater van 7-9 februari 2020, omdat de steilrand een stuk hoger ligt dan de gemiddelde waterstand op de IJssel. Tijdens de tweede inspectie kon deze redenering worden bevestigd door een omwonende, die vertelde dat begin februari de waterstand tot aan de steilrand was gestegen.





*Figuur 5.3 Foto's van de oever in bovenstroomse (links) en benedenstroomse (rechts) richting tijdens de eerste (boven) en tweede inspectie (onder).*





*Figuur 5.4 Oevererosie ter hoogte van het derde scherm.*



*Figuur 5.5 Dubbele steilrand benedenstrooms van het derde scherm.*

### 5.3.3

#### **Bodemmateriaal**

Tussen het derde scherm en de veerstoep steken op de vooroever delen van een slecht-erodeerbare cohesieve laag boven het zand uit (zie Figuur 5.6). Dit is de zandige klei die lokaal is aangetroffen (Figuur 5.1). Onder water is naast zand ook veel organisch materiaal aangetroffen.



Bovendien is in multibeamopnamen te zien dat moeilijk erodeerbare lagen lijken voor te komen (Figuur 5.7). Deze banden worden mogelijk veroorzaakt door kleibanken (Figuur 5.1), die langzamer eroderen dan de omliggende zandige rivierbodem.



*Figuur 5.6 Erosiebestendig materiaal steekt boven het zand uit.*



*Figuur 5.7 Detail van bodemligging bepaald op de +3 meting, waarop banden zichtbaar zijn die mogelijk resistente kleilagen zijn.*

## 5.4 Verzakking houten schermen

Door de relatief lage waterstand bij de inspectie op 9 september 2020 konden de schermen makkelijk bereikt en geïnspecteerd worden. Hierbij sprong met name in het oog dat scherm 2 is verzakt aan de kant van de vaargeul. De horizontale stammen aan dit uiteinde lagen zelfs bij deze lage afvoer vrijwel geheel onder water, zie Figuur 5.8. Met name bij scherm 2 en 3 bleek verdere verzakking van de stammen ook uit het feit dat de staalkabels die zijn gebruikt om de stammen vast te maken niet meer strak zaten, zie Figuur F.2. Bij scherm 1 werd geconstateerd dat de erosiekuilen rondom de staanders enkele decimeters dieper zijn geworden ten opzichte van de vorige inspectie.



Figuur 5.8 Verzakking scherm 2.

## 5.5 Golfdemping

Het effect van de houten schermen op golven is alleen visueel bepaald tijdens de inspecties. Tijdens de eerste drie inspecties was de waterstand lager of gelijk aan de gemiddelde waterstand, en staken de schermen boven water uit. Bij passage van enkele geladen binnenvaartschepen werd waargenomen dat bij deze condities vooral de primaire golf hoge stroomsnelheden langs de oever veroorzaakt, zoals in een kribvak. Tijdens de vierde inspectie, waarbij de waterstand een stuk hoger was dan gemiddeld en de schermen onder water stonden, was geen hevige stroming of oevererosie zichtbaar bij passage van schepen. Hierbij wordt opgemerkt dat de snelheid van de retourstroming niet alleen afhangt van de vaarsnelheid, maar ook van de waterdiepte en de verhouding tussen de natte doorsnede van het schip en die van de rivier.

Secundaire golven worden gedeeltelijk gedempt door de schermen wanneer deze boven water uitsteken. Figuur 5.9 geeft een voorbeeld voor een afvarend schip. Bij een opvarend schip is ook demping waargenomen. Vaak leek achter de schermen de golfhoogte ongeveer gehalveerd.

Gezien de oriëntatie van de schermen beschermen de schermen een groter deel van de oever bij een opvarend schip. Hiermee vervullen de schermen tijdens laag tot gemiddelde afvoer één van hun bedoelde functies. Tijdens hoger dan gemiddelde waterstand zullen de secundaire golven naar verwachting nauwelijks worden gedempt, omdat ze over de schermen heen gaan.



Figuur 5.9 Breking van secundaire scheepsgolven.

## 5.6 Ervaring scheepvaart en omwonenden

### 5.6.1 Schippers

Op woensdag 21 oktober 2020 is telefonisch contact opgenomen met de schippers van de MS Vlieland en de MS Nautica, die regelmatig langs de pilotlocatie varen. Tijdens het gesprek zijn de volgende vragen gesteld:

- 1 Bent u bekend met de houten schermen bij Zalk?
- 2 Wat vindt u van de houten schermen?
- 3 Leveren de constructies belemmeringen op wanneer u erlangs vaart?
- 4 Merkt u verschil tussen de situatie voor en na aanleg van de schermen?
- 5 De schermen zijn onder andere bedoeld om de vaargeul op diepte te houden. Wordt de hoeveelheid lading die u mee kunt nemen vaak beperkt door de omstandigheden? Bij welke omstandigheden gebeurt dit/wanneer gebeurde dit voor het laatst?

Beide schippers zijn bekend met de houten schermen. De schipper van de MS Nautica was neutraal over de schermen. In de beleving van de andere schipper lagen de schermen er ineens, zonder dat hij van tevoren was geïnformeerd over de aanleg en de beoogde functie ervan. Het feit dat de binnenvaartsector niet (duidelijk) was geïnformeerd vond hij een negatief aspect van het project. Beide schippers ervaren de schermen niet als een obstakel of belemmering tijdens het varen en hebben ook geen verschil bemerkt in de situatie voor en na aanleg van de schermen.

De MS Vlieland heeft volledig geladen een diepgang van 3.76 m, maar het is eigenlijk nooit mogelijk om met deze diepgang te varen. Bij goede omstandigheden kan met een diepgang van 3.2 m worden gevaren, maar zeer regelmatig moet dit worden afgeschaald naar 3.0 of 2.9 m. Dit gebeurde in de week voorafgaand aan het gesprek nog. Onder zulke omstandigheden kan ook niet op de motor worden gevaren, omdat de kielspeling daarvoor te klein is. Op het benedenstroomse gedeelte van de IJssel wordt de waterdiepte niet alleen bepaald door de afvoer, maar speelt ook de wind een grote rol. Bij een zuidoostenwind is de waterdiepte merkbaar kleiner.

De schipper van de MS Vlieland heeft het idee dat het benedenstroomse gedeelte van de IJssel moeilijker bevaarbaar is geworden sinds de realisatie van Ruimte-voor-de-Rivier-maatregelen langs de IJssel. Voor die tijd vormden de omstandigheden beduidend minder vaak een belemmering voor de vaart.

#### **5.6.2 Omwonenden**

Tijdens de derde inspectiedag is gesproken met twee omwonenden. De eerste persoon waarmee is gesproken vist al jaren in de omgeving van de houten schermen. Hij staat positief tegenover het project en denkt dat er in de afgelopen periode sedimentatie is opgetreden rondom de schermen, met name net benedenstrooms van scherm 3.

Verder is gesproken met de veerman van het pontje dat benedenstrooms van de schermen in de vaart is. Ook de veerman staat positief tegenover de houten schermen, omdat dit een natuurlijker beeld geeft dan een harde oeverbescherming. Hij geeft aan dat het stroombeeld op de route van de veerpont en vooral bij de veerstoep is veranderd sinds de houten schermen zijn geplaatst.



## 6 Discussie en vooruitblik

### 6.1 Werking en effect

#### 6.1.1 Damping van scheepsgolven

Scheepsgolven zijn naar verwachting de belangrijkste oorzaak voor het genereren van golven die kunnen leiden tot oevererosie. Bij krachtige wind en voldoende strijklengte kunnen windgolven over het algemeen ook een belasting vormen, maar in de binnenbocht bij Zalk is de strijklengte niet groot en zullen windgolven geen grote rol spelen. Op basis van de visuele waarnemingen en de beschrijving van de golven die ontstaan wanneer een schip een kribvak passeert (sectie 2.3.2), proberen we het effect van de houten schermen op golfdamping te duiden. De versmalling door de veerstoep heeft een vergelijkbaar effect als een krib: wanneer een opvarend schip voorbij de veerstoep komt, duwt het water uit het bredere gedeelte (de kom) naar de depressie aan de zijkant van het schip. Na passage van de 'kom' stroomt water weer terug de 'kom' in. Op dit moment treden in het relatief brede deel de hoogste stroomsnelheden op. Deze stroomsnelheden zijn het gevolg van de primaire golven veroorzaakt door het schip.

Deze primaire golf veroorzaakt in de 'kom' en bij de houten schermen een tijdelijk sterke stroming langs de oever, zoals is waargenomen tijdens lage-gemiddelde afvoer. In appendix F.1 is een beschrijving en foto opgenomen van een dergelijke gebeurtenis. De stroomsnelheden zijn hoog, zoals te zien was aan hoe hoog het water opspatte bij een obstakel. Het lijkt waarschijnlijk dat de oevererosie die ook in 2020 is waargenomen in de 'kom' (onderste steilrand), veroorzaakt wordt door dergelijke gebeurtenissen. Door de krappe natte doorsnede in de IJssel veroorzaakt een geladen binnenvaartschip een grotere primaire golf dan wanneer het bijvoorbeeld in de veel bredere Waal langs een vergelijkbaar obstakel vaart, omdat het schip relatief een groter aandeel van de dwarsdoorsnede inneemt. We hebben waargenomen dat de primaire golf bij een middelhoge afvoer duidelijk tot minder grote stroomsnelheden leidt.

Secundaire golven veroorzaakt door schepen en hun demping zijn visueel waargenomen. Deze golfhoogte werd significant gereduceerd bij lage-gemiddeld waterstand. De houten schermen hebben op deze manier dus enig beschermend effect voor de naastgelegen oever. Bij deze oevers is geen erosie waargenomen. Echter, de oever ter hoogte van de houten schermen erodeerde ook voorafgaand aan de pilot niet. Er is dus geen effect zichtbaar bij de oever door demping van de secundaire golven. De houten schermen zijn niet ontworpen om primaire golven te reduceren. De verwachting is dat de houten schermen nauwelijks de hoge stroomsnelheden langs de oever dempen, omdat ze niet tot de oever doorlopen.

#### 6.1.2 Geleiding sedimentrijk water

De beoogde werking is dat sedimentrijk water door de houten schermen naar de oever wordt geleid. Vooral tijdens de periode met verhoogde afvoer (herhalingstijd van de piekafvoer is ongeveer 2 jaar) wordt hier een effect van verwacht. De peilstokmetingen laten in geen enkele periode een duidelijke aanzanding zien tussen de schermen en de oever. De bodem blijft langs de lijnen over het algemeen stabiel. Rond de staanders van de schermen vindt zoals verwacht lokaal erosie plaats zoals bij een brugpijler. Deze erosiekuiltjes kunnen 0,5 dieper zijn geworden dan de omgeving, maar bestrijken geen groot oppervlakte. Anders dan beoogd, is benedenstrooms van de schermen en tussen de schermen en de vaargeul op enkele plaatsen erosie opgetreden. Het is mogelijk dat alleen bij hoge afvoeren (groter dan de opgetreden verhoogde afvoeren) de geleidende werking van de houten schermen het beoogde effect heeft.

We vergelijken de werking van houten schermen hier met de werking van bodemschermen, omdat daar meer kennis en ervaring mee is en de werking enigszins vergelijkbaar is. Bodemschermen zijn vooral in de buitenbocht geplaatst om een spiraalstroming in tegengestelde richting op te wekken als de spiraalstroming in de bocht, en hiermee het bochtprofiel flauwer te maken (Figuur 1.2). Gesteld dat een bodemscherm in de binnenbocht bij Zalk zou zijn geplaatst met een oriëntatie als een van de houten schermen, zou de werking zijn dat benedenstrooms een circulatie wordt opgewekt die zorgt voor een asymmetrische sedimentatie en erosie (Figuur 1.3). Wanneer de houten schermen op deze manier zouden werken, zou een helling in de bodemligging moeten zijn opgetreden tijdens de verhoogde afvoer. Dit hebben we niet waargenomen. Het proces dat voor aanzanding direct naast de oever (naast de zone waar aanzanding bij bodemschermen optreedt) moet zorgen is niet duidelijk. Het is mogelijk dat het effect niet zichtbaar is, omdat bij Zalk maar één rij schermen staat. Bodemschermen worden doorgaans in meerdere rijen geplaatst. Slechts één rij houten schermen kon worden gerealiseerd, omdat de houten schermen niet buiten de normaallijn konden worden geplaatst.

Voor een goede werking is het van belang dat het houten scherm zo dicht mogelijk is. Hoewel we geen openingen van een boomdiameter hebben waar genomen, kan het beoogde effect van het geleiden van sediment naar de oever ook door kleinere openingen beperkt worden. Bij piekafvoeren kunnen stammen bovendien verschuiven, waardoor openingen mogelijk groter worden. Tijdens de realisatie bleek al dat de stroomsnelheid onder de liggende stammen snel leidt tot lokale erosie. Dergelijke lokale erosie kan ook optreden bij stijgende afvoer, waarbij het drukverschil tussen beide zijden van het scherm toeneemt. Dit risico is ook benoemd voor bodemschermen van stammen (Poelman et al., 2019). De verwachting is dat dit risico het grootst is voor de onderlaag van liggende stammen uit de uiterwaarden. De onderlaag bestaat uit kortere en krommere stammen dan de top laag van Corsicaanse Dennen. Bovendien hebben de stammen in de onderlaag een relatief kleine diameter. Een kleinere diameter geeft een lagere stabiliteit (Van den Berg, 2018). Het zou dus kunnen zijn dat de houten schermen niet dicht genoeg zijn om de geleidende werking te hebben.

## 6.2 Verandering in de kom

Direct bovenstrooms van de veerstoep en benedenstrooms van scherm 3 (de kom) erodeerde de oever al voorafgaand aan de pilot (Figuur 2.5). In dit gedeelte van de oever is ook in het pilotjaar oevererosie opgetreden. Visueel zijn twee steilranden waargenomen waar erosie actief leek: een rond de gemiddelde waterhoogte en een op de waterhoogte ten tijde van de verhoogde afvoer. De oorzaak van de oevererosie op beide niveaus is waarschijnlijk de belasting door de (primaire) scheepsgolven in combinatie met de gemiddelde stroming.

Vanaf het derde scherm tot de veerstoep (de kom) is de vooroever gedeeltelijk geërodeerd, voornamelijk in de periode met verhoogde afvoeren. Ook tussen de vooroever en de vaargeul erodeerde de bodem met maximaal 0,5 m. Ter hoogte van de veerstoep (rkm 985.3) trad ook erosie op, tot maximaal enkele m. Verder benedenstrooms (rkm 985.5) heeft juist netto aanzanding opgetreden. Onbekend is of de netto erosie aan de vooroever ook voorafgaand aan de pilot optrad, omdat toen niet zo vaak peilstokmetingen zijn uitgevoerd als in het jaar na de realisatie van de schermen.

Op basis van de beschikbare gegevens is niet te zeggen of en hoe snel de erosie van de oever doorzet in komende jaren. Een aanbeveling is de oevererosie te blijven volgen door peilstokmetingen van bovenop de zomerdijk uit te blijven voeren op dezelfde raaien. Aanvullend zou het goed zijn de ligging van de oever vlakdekkend op te meten, bijvoorbeeld met behulp van camerabeelden of LiDar metingen vanaf een hoge positie op de oever.

## 6.3 Afwegingskader

Het is nog vroeg om een afweging van kosten en baten te maken voor deze pilot. Het beoogde effect van de houten schermen is nog niet zichtbaar. In elk geval staan de gesproken recreanten, omwonenden en schippers positief tegenover de houten schermen. Omdat de houten schermen een habitat bieden voor macrofauna en vis, is de verwachting dat ze een positief effect hebben voor de ecologie (Liefveld et al., 2017). In aanvulling op de peilingen, is monitoring van de ecologie gepland in 2021, zodat dit effect kan worden gekwantificeerd.

De kosten bestaan vooral uit de realisatie van de schermen, de monitoring en de analyse van de meetgegevens. Deze inspanning levert niet alleen inzicht in het effect van de houten schermen, maar ook in de oorzaken van oevererosie en erosie in een rivierbocht. Dit inzicht kan mogelijk op andere locaties in het beheergebied van Rijkswaterstaat worden gebruikt om zonnig een juiste maatregel te kiezen. Voor een eventueel vierde scherm is de aanbeveling om met deskundigen samen het ontwerp te bespreken om zo tot het best onderbouwde ontwerp te komen. In de volgende sectie geven we een voorzet voor een ontwerp.

## 6.4 Ontwerpaanpassingen

### 6.4.1 Optimalisatie schermontwerp

Bij het ontwerp van de houten schermen zijn verschillende keuzen gemaakt: (1) de lengte van de schermen, (2) de afstand tussen schermen, (3) de hoek met de stroming, (4) de breedte en (5) de hoogte. We staan kort bij deze keuzen stil.

De lengte van de schermen en de afstand ertussen lijkt prima: de lengte is niet te lang zodat de benedenstroomse staanders te dichtbij de oever staan en niet te kort waardoor sediment eenvoudig tussen de schermen terug naar de diepere rivier kan worden getransporteerd. De hoek met de stroming is 20 graden, zoals vaker voor bodemschermen is toegepast. Dit heeft niet geleid tot grote erosiekuilen. Mogelijk hangt dit samen met de openingen tussen de liggende stammen. In elk geval is bij de opgetreden afvoeren de hoek met de hoofdstroomrichting niet te groot geweest. Het verder vergroten van deze hoek zou het geleidende effect kunnen vergroten, maar vergroot ook de kans op loslating van de stroming en daarmee vorming van een grotere ontgrondingskuil.

De breedte van de schermen is mogelijk te klein: door de kromming van veel stammen (vooral het hout uit de uiterwaarden) zijn duidelijk kieren in de schermen zichtbaar. Hier kan sediment mogelijk doorheen worden getransporteerd. Aanbeveling is om een volgende scherm breder te maken, zodat het dichter is. De hoogte lijkt prima om het sedimentrijke water (dit bevindt zich bij de bodem) naar de oever te geleiden. Voor het dempen van secundaire scheepsgolven tijdens hogere waterstand dan gemiddeld zouden de schermen hoger moeten zijn. Echter, de belasting door de primaire golven van schepen lijkt dominant voor de oevererosie, en dus heeft het dempen van de secundaire golven waarschijnlijk niet veel effect in vermindering van oevererosie. Dus lijkt de hoogte prima voor het beoogde effect van sediment naar de oever geleiden.

### 6.4.2 Nieuwe houten schermen

Gezien de ervaring dat de houten schermen geen grote ontgrondingskuil veroorzaken, lijkt het veilig om het vierde scherm te realiseren zoals eerder uitgewerkt (onderbroken lijn in Figuur 6.1). De vraag is echter of dat effectief is. In dat geval zou het vierde scherm een stuk oever beschermen, waar geen erosie optreedt. De oever van de 'kom' blijft onbeschermd. Bovendien is het nog niet waargenomen dat de geleiding van sediment effect heeft. Dit effect is juist in de 'kom' nodig om verdere erosie van de oever en vooroever te vermijden.

Een alternatief ontwerp voor een vierde en vijfde scherm is gegeven in Figuur 6.1. Met deze twee houten schermen wordt de beoogde werking van het geleiden van sediment naar de oever versterkt. Wanneer er maar een houten scherm extra geplaatst kan worden, lijkt de meest bovenstroomse het meeste effect te hebben. De lengte, hoogte en oriëntatie ten opzichte van de hoofdstroom zijn hetzelfde als voor de bestaande schermen. Aanbeveling is om de breedte van de nieuwe schermen groter te maken (bijvoorbeeld 1,5 m), zodat ze dichter zijn. Deze schermen liggen wel buiten de normaallijn, maar nog altijd meer dan 30 m verwijderd van de vaargeul. Omdat de afstand naar de vaargeul relatief groot is en de binnenbocht toch al ondiep is, kan mogelijk een vergunning worden verkregen voor schermen net buiten de normaallijnen.



Figuur 6.1 Mogelijk ruimtelijke inpassing van een vierde en vijfde houten scherm (rood).

## 6.5 Beantwoording onderzoeksvragen bodemontwikkeling

De onderzoeksvragen over de realisatie zijn al beantwoord (sectie 0). De antwoorden op de onderzoeksvragen over fase 3, de bodemontwikkeling in het eerste jaar na realisatie, staan hier kort beschreven.

### a) Hoe ontwikkelt de bovenwateroever nabij de schermen?

Op basis van visuele inspectie en de peilstokmetingen blijkt dat de ligging van dit gedeelte van de oever niet significant is veranderd gedurende de pilotperiode.

### b) Hoe ontwikkelt de bodemligging onder water bij en rondom de schermen?

Bodemveranderingen rondom de schermen zijn voornamelijk opgetreden in de periode tussen de +1- en de +6-meting, waartussen twee keer een verhoogde afvoer optrad. Lokaal is rondom de schermen ontgroning van maximaal ongeveer 50 cm opgetreden, met name in een straal van ongeveer 1 m rond de staanders. Dit lijkt voornamelijk in de eerste maand na realisatie te zijn gebeurd en is een direct gevolg van het plaatsen van de schermen. Uit de peilstokmetingen blijkt dat de oever tussen de schermen stabiel is gebleven.



c) *Hoe ontwikkelt de bodemligging in de rivierbocht en leidt dit tot vermindering van vaargeulonderhoud?*

Ook op de schaal van de rivierbocht zien we dat bodemveranderingen voornamelijk in de eerste 6 maanden van de pilot zijn opgetreden. In deze periode treedt een significante verplaatsing van sediment op in de binnenbocht bovenstrooms van de schermen. Rond rkm 984.5 treedt tot 2 meter erosie op, terwijl verderop rond rkm 984.8 tot meer dan 1.5 meter sedimenteert. Ook vindt erosie plaats in de 'kom' tot lokaal maximaal 2 m. De ontwikkeling is een direct gevolg van stroming uit de Vreugdenrijkse nevengeul net bovenstrooms van het project die tijdens hoogwater een erosie en daaropvolgende zandgolf initieert. De zandgolf verplaatst zich vervolgens langzaam door de binnenbocht langs de pilot site gedurende het jaar. Dit effect zal na ieder hoogwater terugkeren.

Over de consequenties van deze ontwikkelingen voor het vaargeulonderhoud kunnen geen uitspraken worden gedaan, omdat niet duidelijk is welk deel van de geobserveerde ontwikkelingen het effect is van de schermen, en welk deel ook was opgetreden als de pilot niet aanwezig was geweest. De tijdens de pilot geobserveerde erosie benedenstrooms van de schermen trad ook in het verleden al op. Of deze erosie nu meer of minder groot is dan zonder de schermen het geval zou zijn geweest is op deze korte termijn nog niet te zeggen.

d) *Wat zijn de ervaringen van de gebruikers van het vaarwater?*

De ervaringen zijn overwegend positief, behalve dat schippers vooraf geïnformeerd hadden willen worden. Voor de scheepvaart wordt de bocht bij Zalk niet als grootste knelpunt gezien. Omwonenden zien de houten schermen als positief.

e) *Welke ontwerpaanpassingen zijn naar verwachting effectief?*

Een vierde scherm stroomopwaarts van de huidige schermen en meer naar de vaargeul toe zou mogelijk de beoogde werking van de schermen versterken, zodat een effect zichtbaar wordt.

# 7 Conclusies en aanbevelingen

## 7.1 Conclusies

- 1) Drie schermen zijn gerealiseerd van stammen uit de uiterwaarden en van Corsicaanse Den als staanders en als bovenste laag liggend hout.
  - a) Met de bovenste laag van Corsicaanse Den zijn de schermen stabiel gebleven.
  - b) Alleen lokaal rondom de staanders vindt erosie plaats, zoals verwacht.
  - c) De uitvoering was uitdagend, vanwege de verschillende lengte, diameter en kromming van de stammen uit de uiterwaarden.
- 2) Bij verhoogde afvoeren is nog steeds sprake van oevererosie, vooral benedenstrooms van de schermen tot de veerstoep.
  - a) Primaire scheepsgolven lijken de belangrijkste oorzaak, in combinatie met stroming.
  - b) De secundaire golven worden gedeeltelijk gedempt door de schermen, maar het effect hiervan op vermindering van erosie lijkt gering.
- 3) De vooroever is ter hoogte van de houten schermen stabiel gebleven.
  - a) Het beoogde effect bij hoogwater (geleiding sediment naar oever) kon nog niet worden waargenomen bij de periode met verhoogde afvoer.
  - b) Mogelijk zijn de schermen hierin wel effectief bij een hoge afvoer.
- 4) Bij verhoogde afvoer ontstond een sedimentatiefront/zandgolf bovenstrooms van de schermen, dat zich geleidelijk in benedenstroomse richting heeft verplaatst.
  - a) De oorzaak hiervan is het meestromen van de bovenstrooms gelegen Vreugdenrijkse nevengeul tijdens de periode met verhoogde afvoer.
  - b) De houten schermen lijken geen invloed te hebben op deze verplaatsing van sediment.
- 5) Aanleg van het beoogde vierde scherm lijkt geen risico (door erosie) voor de veerstoep, maar de vraag is of het scherm op die beoogde locatie het meest effectief is.
  - a) In de 'kom' net bovenstrooms van de veerstoep is naast oevererosie ook erosie van de vooroever waargenomen.
  - b) Het is niet duidelijk hoe dit vierde scherm deze erosie zou kunnen afremmen.

## 7.2 Aanbevelingen

Voor de monitoring van het effect van de huidige drie houten schermen bevelen wij aan:

- 1) Ook ecologie te monitoren en in samenhang met de hydrodynamische (punt 4 hieronder) en morfologische monitoring (punten 2, 3 en 6 hieronder) te analyseren.
- 2) Oevererosie te blijven monitoren met peilstokmetingen, en ook vlakdekkend met bijvoorbeeld camera-observaties.
- 3) Monitoring van bodemligging voortzetten tot een hoogwater optreedt, waarbij de schermen voldoende zijn overstroomd en ze functioneren als bodemschermen.
- 4) De belasting door primaire en secundaire scheepsgolven kwantificeren door aanvullende metingen.
- 5) De stabiliteit van de houten schermen (vooral deel dat vaak boven water ligt) te monitoren en minstens tweemaal per jaar de kabels strak aan te trekken, indien nodig.

Voor de realisatie van een vierde (en eventueel vijfde) houten scherm bevelen wij aan:

- 6) Zo snel mogelijk hout te gaan wateren en meer hout uit de uiterwaarden te wateren dan nodig, zodat de langste en rechtste stammen geselecteerd kunnen worden.
- 7) Extra houten scherm(en) bovenstrooms van de huidige drie schermen te realiseren, in plaats van het eerder beoogde vierde scherm.

# Literatuurverwijzingen

- Baar, A., Kleinhans, M., & Stouthamer, E. (2014). Oeverstabiliteit Rivieren Oost Nederland. Opzet van een conceptueel model en aanzet tot projectmonitoring. In opdracht van Rijkswaterstaat Oost Nederland. Universiteit Utrecht, Faculteit Geowetenschappen, Departement Fysische Geografie.
- Buschman, Frans, Kees Sloff, Iris Niesten, Yuri Wolf, Arjan Sieben en Tim van der Lugt (2019) Onderzoeksplan, verwachte werking en monitoringsplan pilot houten schermen in de IJssel: Invulling leerruimte SSRS, kenmerk 11203691-001-GEO-0002, 14 november 2019.
- Buschman, Frans, Anna Kosters (2021) Pilot flexibele kribben in de IJssel: Analyse van waarnemingen tot een jaar na de aanleg, definitief rapport met kenmerk 11205244-005-GEO-0003, maart 2021.
- Chbab, H. (2017). Basisstochasten WBI-2017; Statistiek en statistische onzekerheid. Deltares rapport 1209433-012-HYE-0007.
- Hodgson, Michael E. and Patrick Bresnahan (2004) Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 70, No. 3, pp. 331–339.
- Hoffmans, G.J.C.M. en H.J. Verheij (1997) *Scour Manual*, CRC Press, 224 pages
- HydrographX (2021), Calibratie Rapport Phoenix Aqua Drone – Algerasluis 22-02-2021, i.o.v. Aquatic Drones, Report no. 2021-HDX-REP-004
- Liefveld, W.M., M. Dorenbosch & N. van Kessel (2017) Evaluatie pilot rivierhout. Effecten op vis, macrofauna en bodem (2014-2016). Rapportnr. 17-115. Bureau Waardenburg, Culemborg.
- Odgaard, A.J. and J.F. Kennedy (1983). River-bend protection by submerged vanes. *Journal of Hydraulic Engineering* 109. 1161 – 1173.
- Poelman, Judith Y., Antonius J.F. Hoitink en Timo V. de Ruijsscher (2019) Flow and bed morphology response to the introduction of wood logs for sediment management, 10.1016/j.advwatres.2019.05.023.
- Ten Brinke, W., Schulze, F. H., & Van Der Veer, P. (2004) Sand exchange between groyne-field beaches and the navigation channel of the Dutch Rhine: the impact of navigation versus river flow. *River Research and Applications* 20(8), 899-928.
- Van den Berg, Mario (2018) An overview of Wood in Rivers, TU Delft report, i.o.v. Rijkswaterstaat, december 2018.
- Ylla Arbós, C., Schielen, R. M., & Blom, A. (2020). Bed level change in the Upper Rhine Delta between 1926-2018. In M. P. Boersema, R. M. Schielen, & J. G. Rinsema (Red.), *Managing changing rivers: NCR DAYS 2020 Proceedings*. 44, pp. 91-92. Netherlands Centre for River Studies.
- Zuideveld-Venema, Nelleke, Daphne Willems, Anne Wijbenga (2011) Planstudie KRW maatregelen IJssel, Projectnr. 236673, i.o.v. Waterschap Veluwe.

# A Jaarlijkse bodemverandering 2010 – 2019

## A.1 Overzicht aangeleverde data

Tabel A.1 Overzicht aangeleverde data.

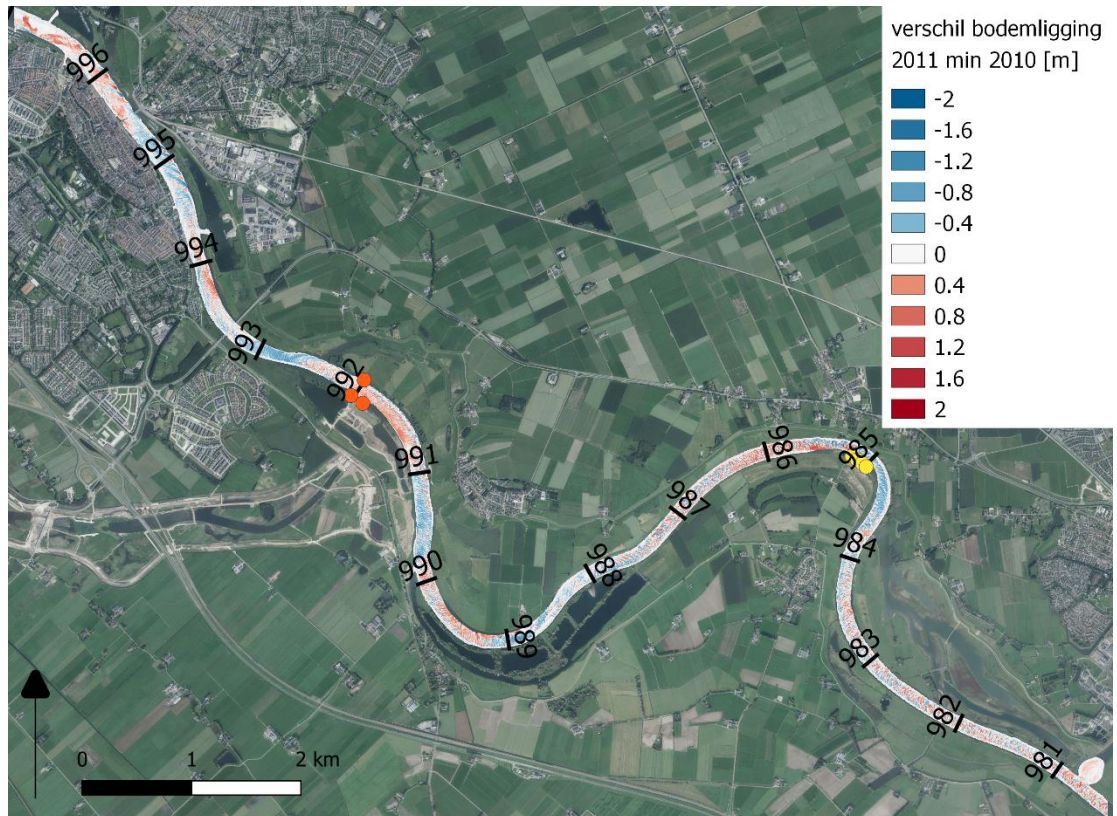
Levering 1								
Jaar	Bestandsnaam	Begin meting	Eind meting	Type	Instantie	Dekking	Resolutie	Opmerkingen
2010	20100916083000-IJssel.ascii	16-9-2010	22-9-2010	interferometer echoloden	RWS-ON	rkm 975-1006	1m	EPSG:7415
2011	20110923100100-IJssel.ascii	23-9-2011	29-9-2011	interferometer echoloden	RWS-ON	rkm 975-1006	1m	EPSG:7415
2012	20120816083100-IJssel.ascii	16-8-2012	20-8-2012	interferometer echoloden	RWS-ON	rkm 975-1006	1m	EPSG:7415
2014	Multibeamlodingen-IJssel Rivier-2014-9-201401.ascii	30-9-2014	15-10-2014	multibeam echoloden	RWS-ON	Gehele IJssel	1m	EPSG:7415. Zit ook in Servicedeskdata 2
2017	17YSL2982ml2_01.ascii	23-2-2017	8-3-2017	multibeam echoloden	RWS-ON	IJssel overige gebieden	1.5m	EPSG:7415. Niet dekkend
Levering 2								
Jaar	Bestandsnaam	Begin meting	Eind meting	Type	Instantie	Dekking	Resolutie	Opmerkingen
2014	IJssel_2014 -Arc Info- Deel 04.asc	30-9-2014	15-10-2014	multibeam echoloden	RWS Centrale Informatievoorziening	Gehele IJssel	1m	xyz (points) en asc (raster). Zit ook in Servicedeskdata 1
2015	2015 - 01 JP IJssel deel 4 van 4.asc	18-5-2015	18-6-2015	multibeam echoloden	RWS Centrale Informatievoorziening	Gehele IJssel	1m	xyz (points) en asc (raster)
2016	2016 JMP IJssel deel 4.asc	25-7-2016	2-8-2016	multibeam echoloden	RWS Centrale Informatievoorziening	Gehele IJssel	1m	xyz (points) en asc (raster)
2017	2017 - 01 JP IJssel deel 4.asc	29-8-2017	13-9-2017	multibeam echoloden	RWS-ON	Gehele IJssel	1m	xyz (points) en asc (raster)
2019	2019 - 01 JP IJssel ArcInfo ascii grid data deel 4 van 4.asc	16-1-2019	4-2-2019	multibeam echoloden	RWS Centrale Informatievoorziening	Gehele IJssel	1m	xyz (points) en asc (raster)



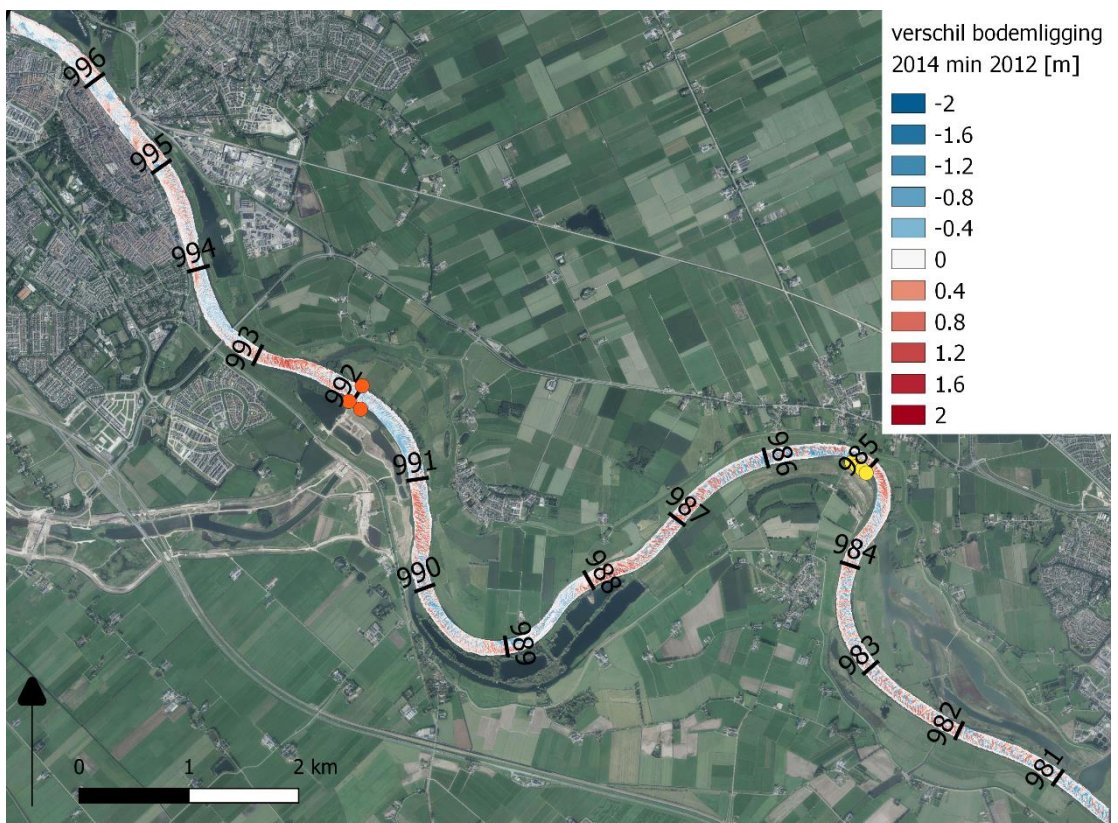
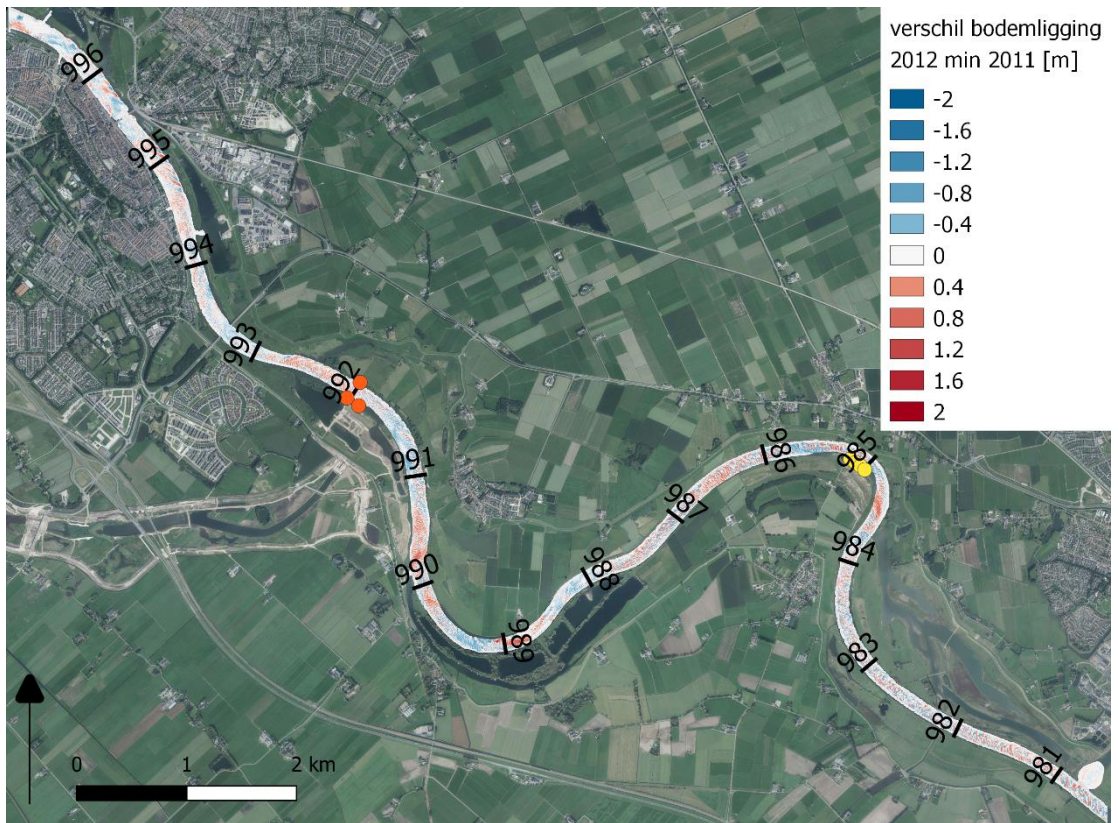
## A.2 Jaarlijkse bodemverandering 2010 - 2019

### A.2.1 rkm 981 tot 997

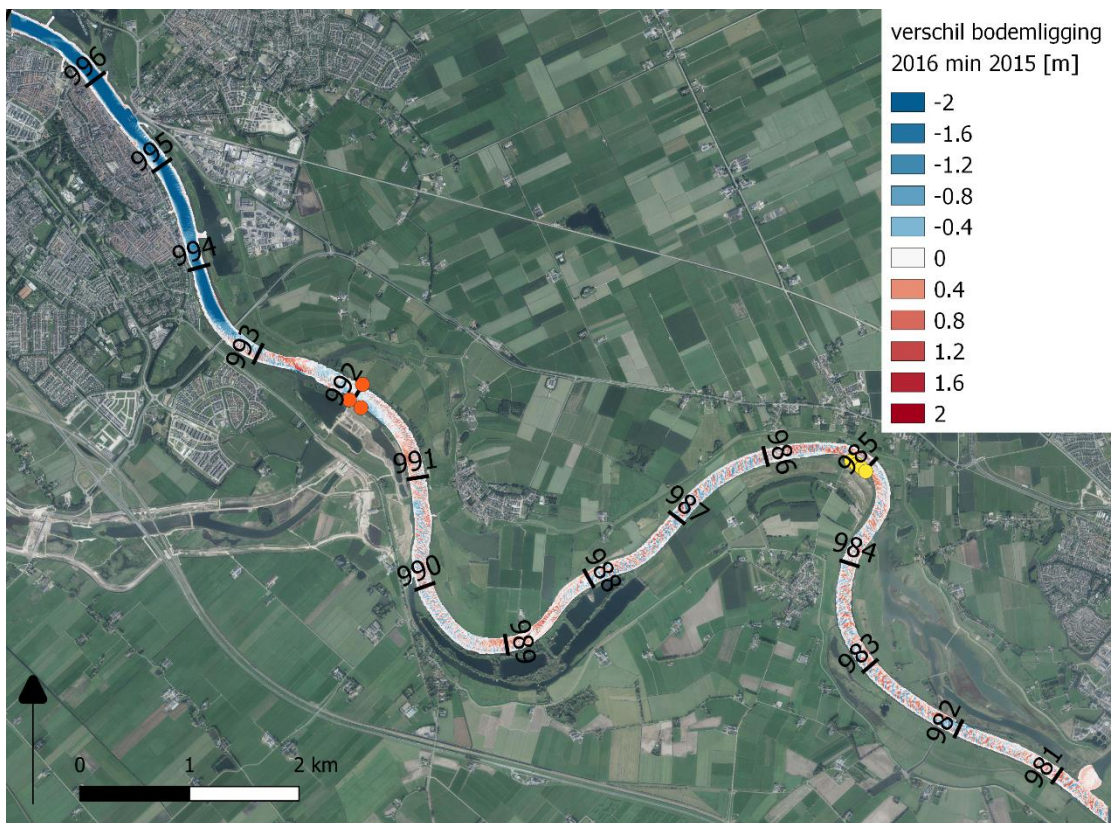
In onderstaande afbeeldingen is steeds het verschil tussen de bodemliggingen van opeenvolgende jaren weergegeven. Omdat voor de jaren 2013 en 2018 geen bodempeilingen beschikbaar zijn is hier het verschil over twee jaar weergegeven (2012-2014 en 2017-2019). De locatie van de houten schermen is met gele punten aangegeven. De oranje punten duiden de locatie van de naastgelegen pilot 'flexibele kribben' aan.



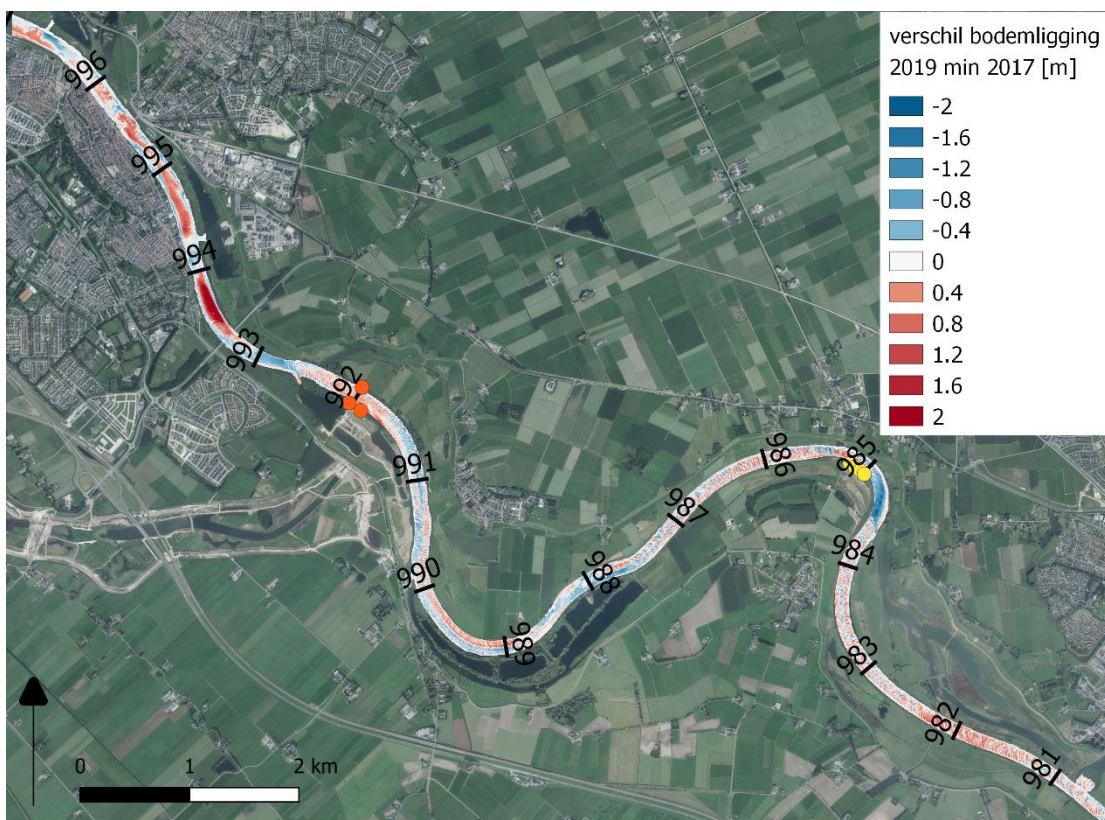
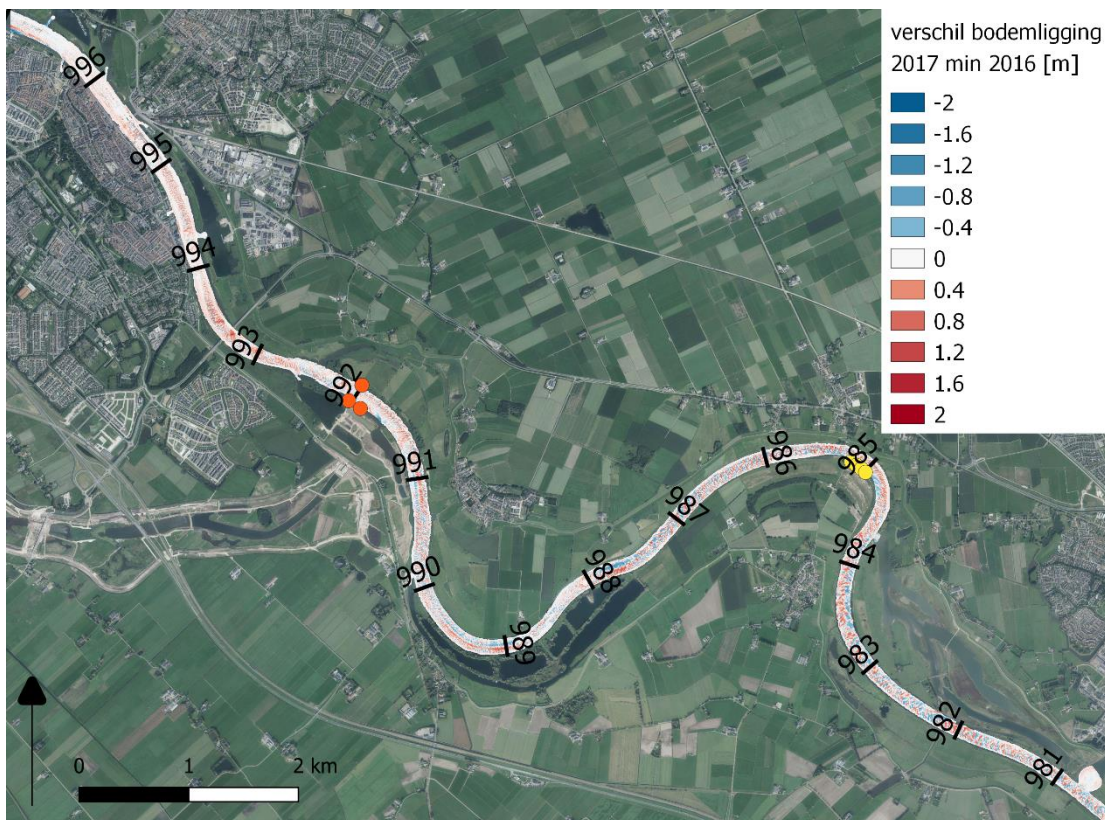








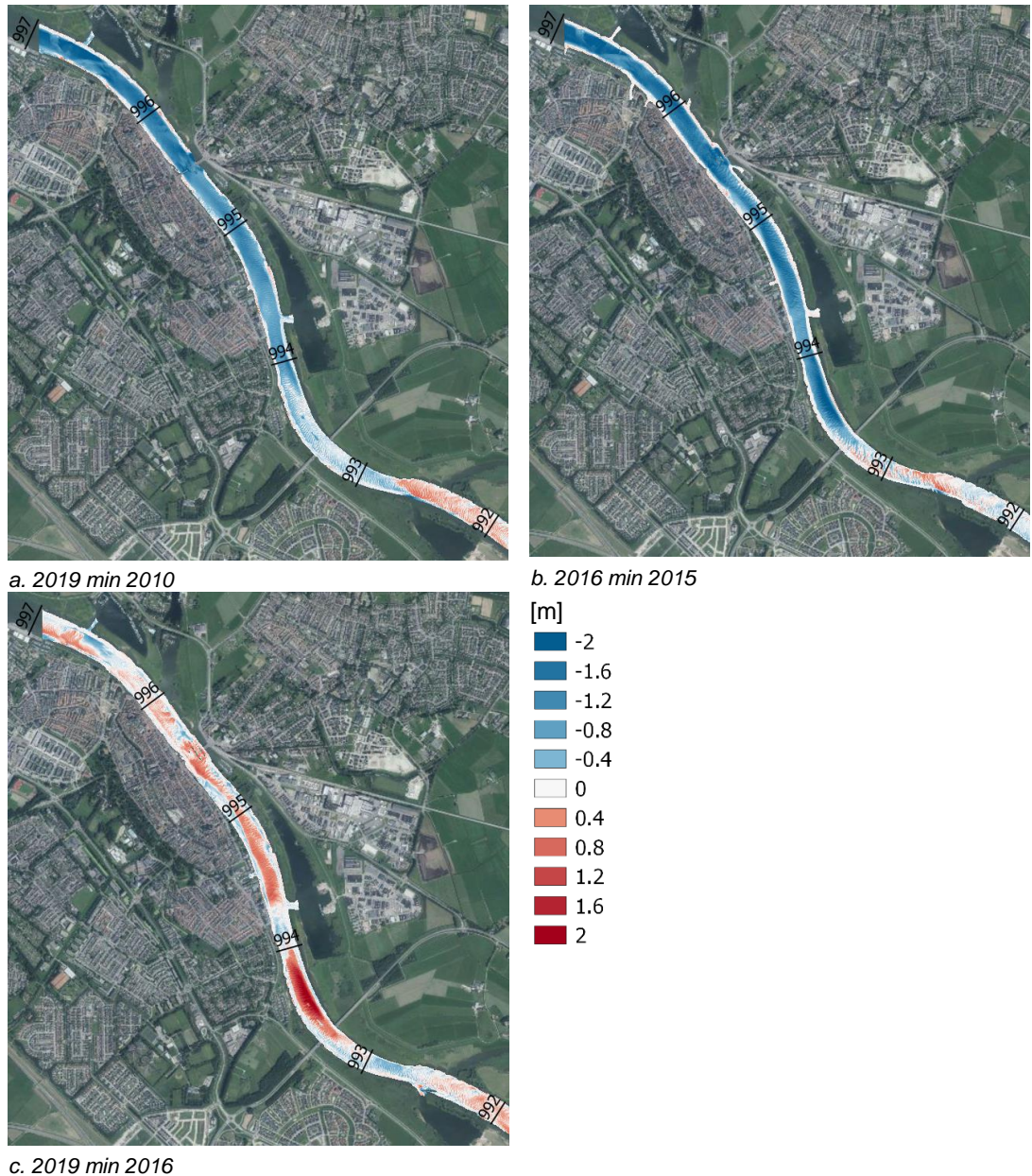




Voor het traject van rkm 993 tot 997 analyseren we de bodemontwikkeling hieronder in meer detail.



A.2.2 rkm 993 tot 997



Figuur A.1 Bodemontwikkeling rkm 993 – 997.

De verlaging van de bodem in dit gebied is het gevolg van de zomerbedverlaging die tussen de peiling van 2015 en 2016 is uitgevoerd (zie Figuur A.1 a en b). Tussen 2016 en 2019 is een gedeelte van deze verlaging echter alweer ongedaan gemaakt door natuurlijke aanzanding, met name direct benedenstrooms van de Molenbrug (rkm 993.3), zoals te zien in Figuur A.1c.

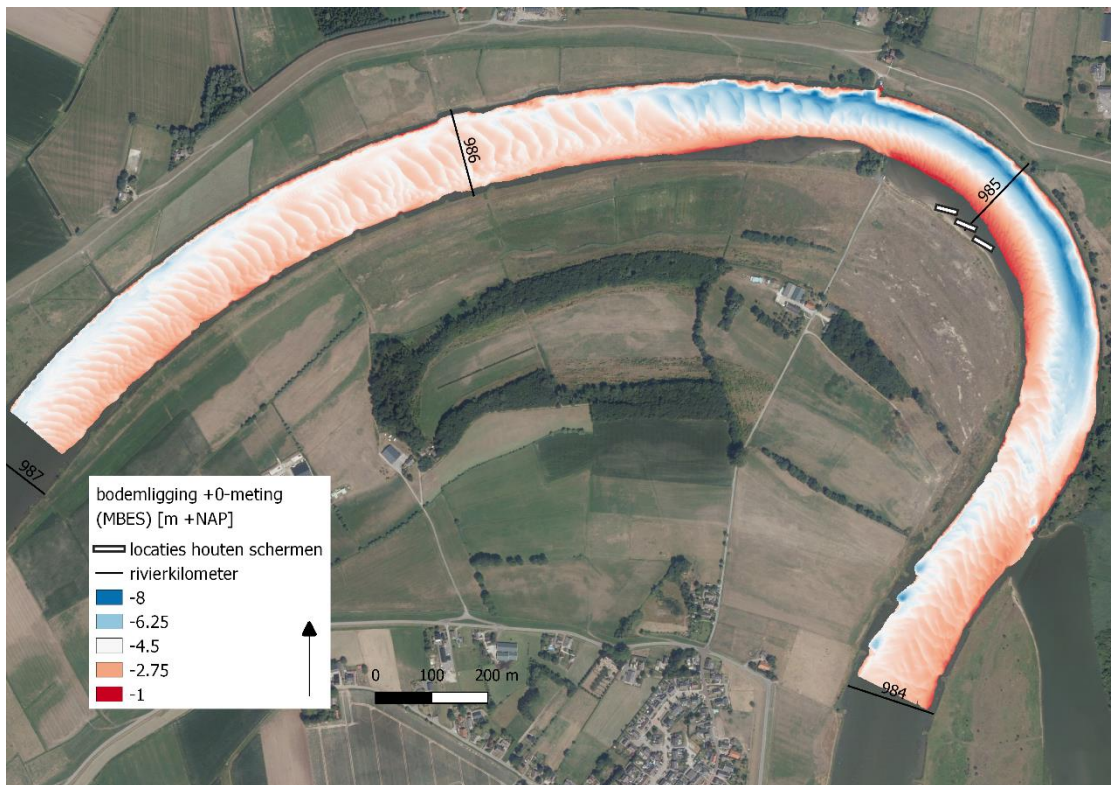
## B Overzicht verzamelde meetgegevens

Wat	Waar	Wie	Wanneer (tijd in maanden na realisatie)	Wanneer (datum)
Multibeam peiling meetschip in en op rand vaargeul	km 984 - km 987	BAM/van den Herik	-10	21-1-2019
			-1	eind-9-2019
Lidar en Multibeam peiling varende drone	km 984 - km 987	Aquatic drones	-1	23-10-2019
			0	19-11-2019
			1	17-12-2019
			3	18-2-2020
			6	14-5-2020
			9	20-8-2020
			12	18-11-2020
Peilstokmetingen tot ongeveer < 1,0 m waterdiepte	Binnenbocht km 984.7 - km 985.5	BAM/van den Herik	-1	31-10-2019
		Aquatic drones	0	19-11-2019
			1	17-12-2019
			3	19-2-2020
			6	13-5-2020
			9	21-8-2020
			12	19-11-2020
Foto's steilrand	Binnenbocht km 984.7 - km 985.5	Deltares	0	13-11-2019
			6	15-4-2020
			9	9-9-2020
			12	2-2-2021
Visuele waarneming golfdemping	Binnenbocht km 985	Deltares	0	13-11-2019
			6	15-4-2020
			9	9-9-2020
			12	2-2-2021



# C Overzicht meetresultaten

## C.1 Multibeampeilingen



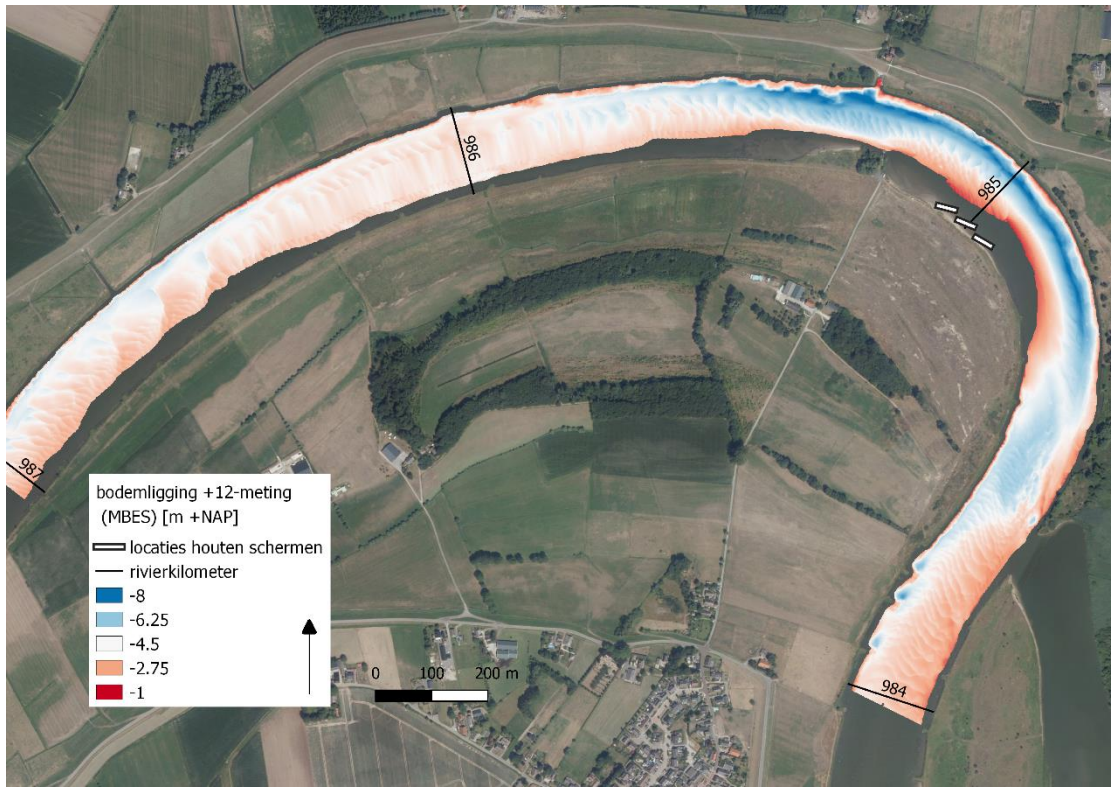




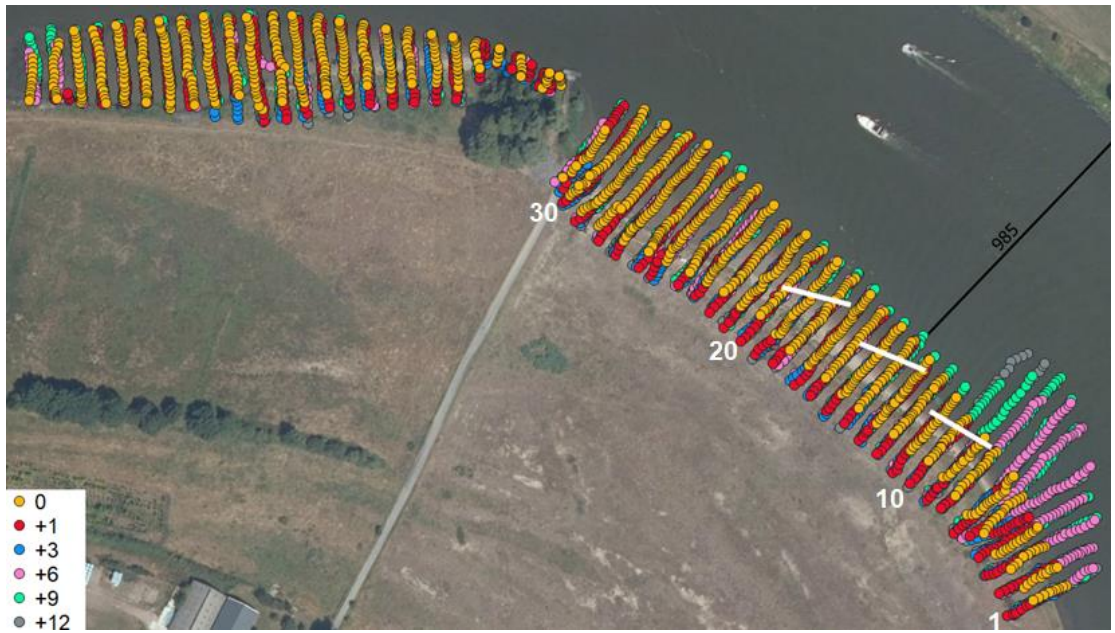




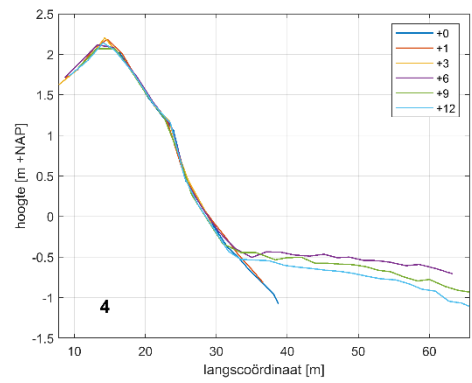
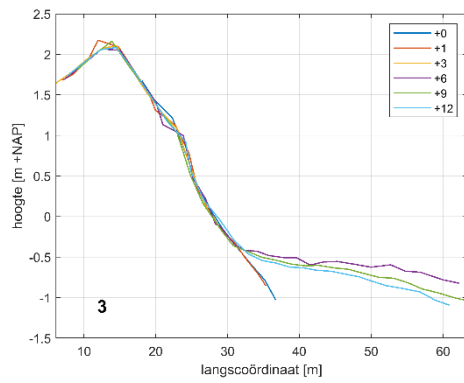
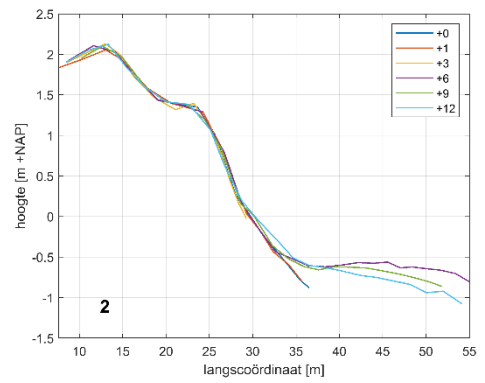
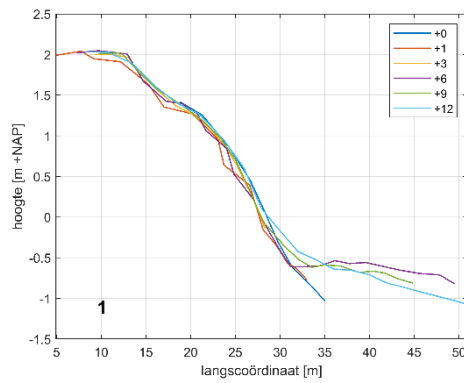


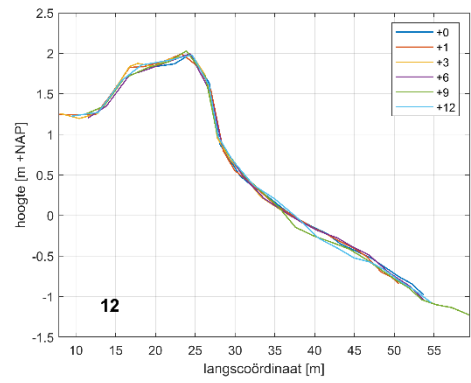
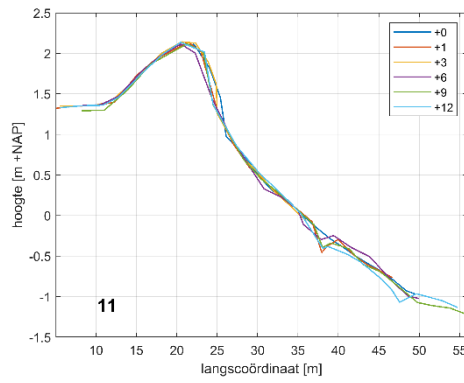
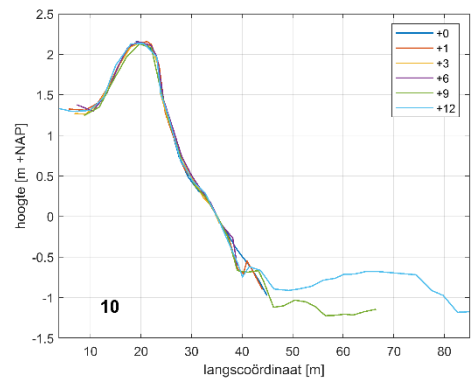
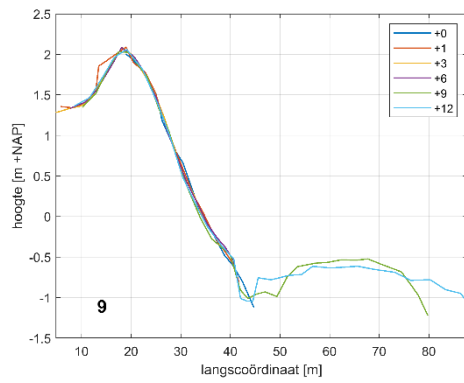
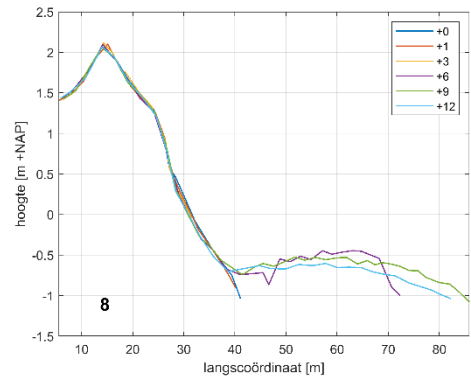
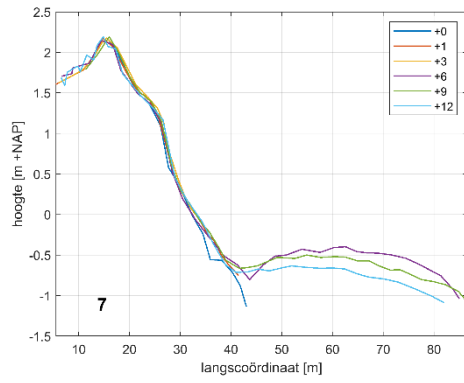
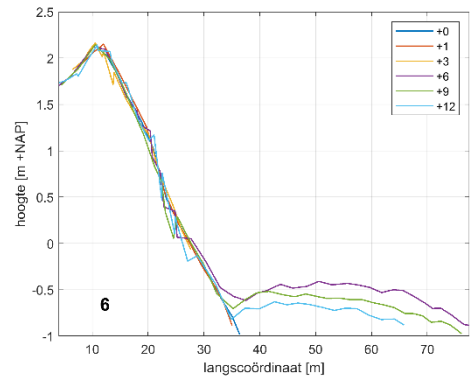
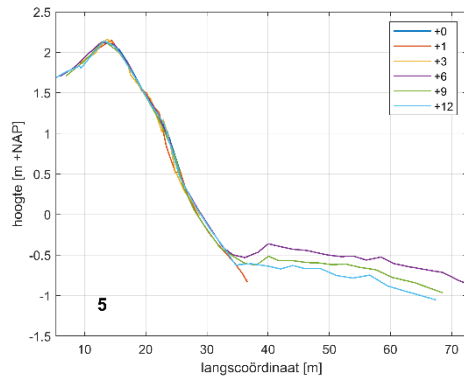


## C.2 Peilstokmetingen

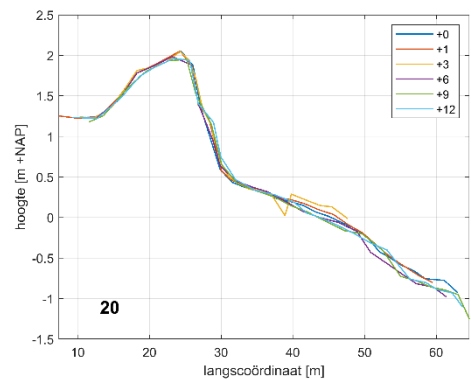
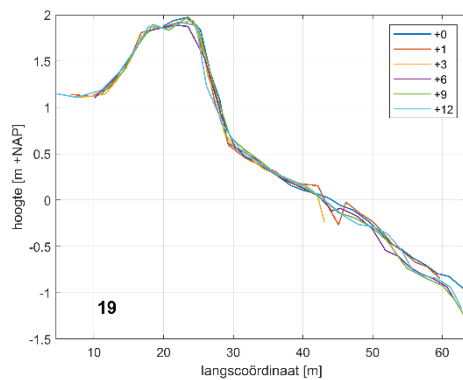
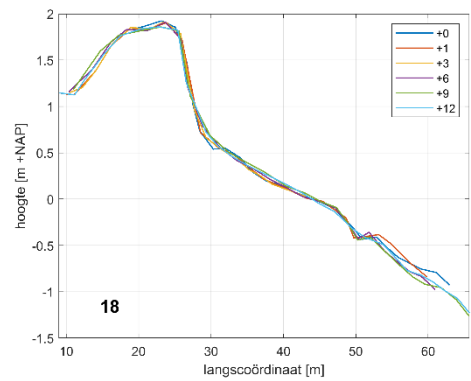
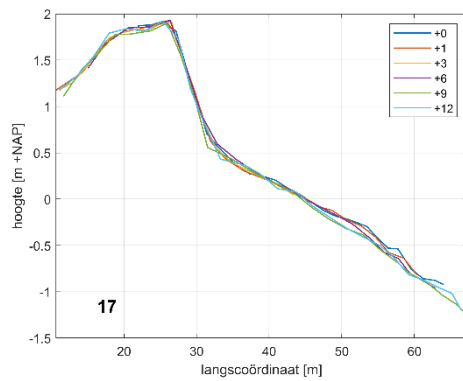
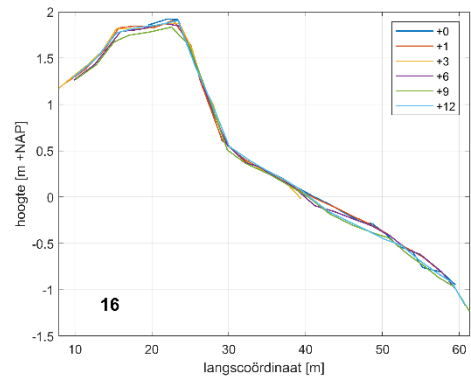
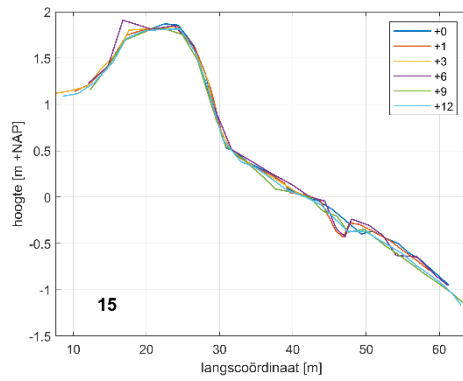
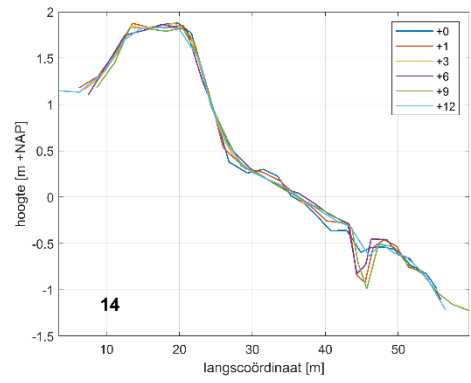
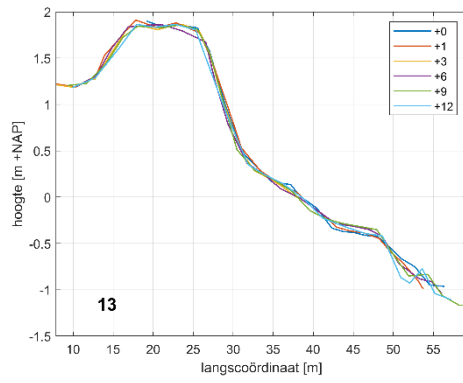


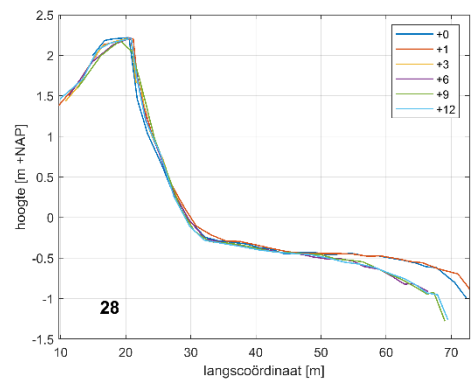
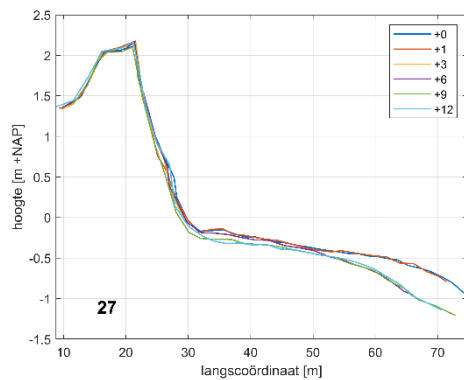
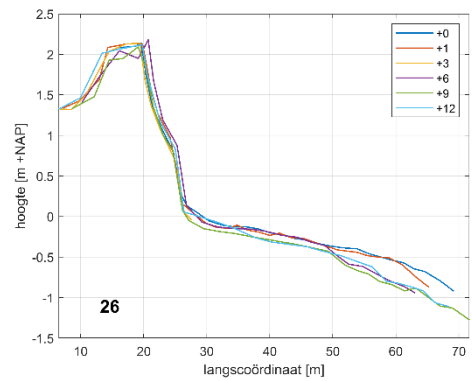
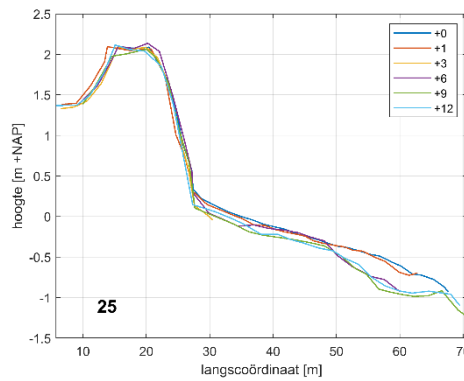
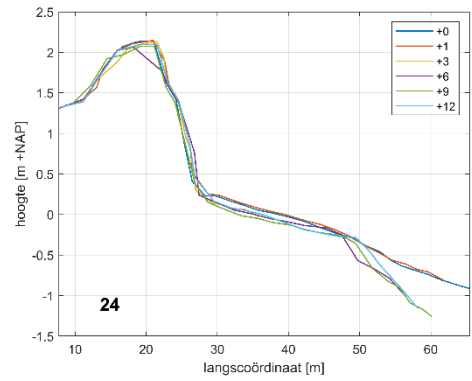
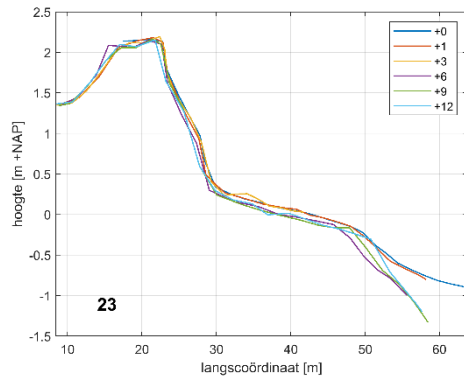
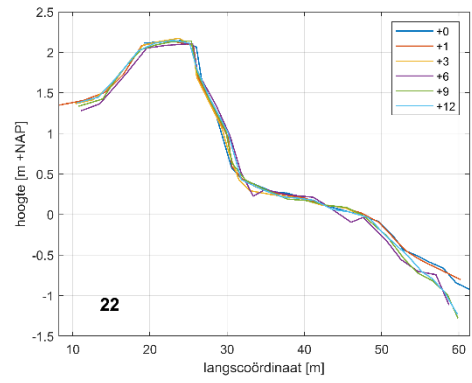
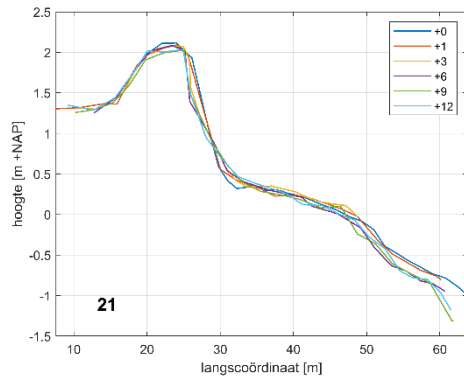
Figuur C.1 Locaties peilstokmetingen. Verschillende kleuren geven verschillende meetmomenten aan.

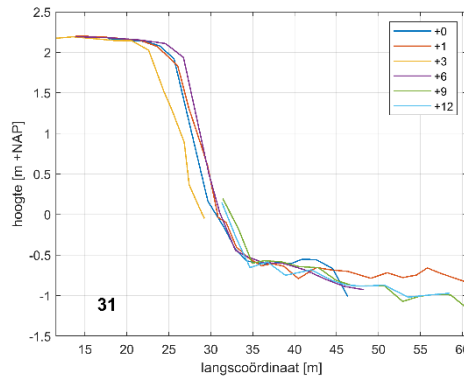
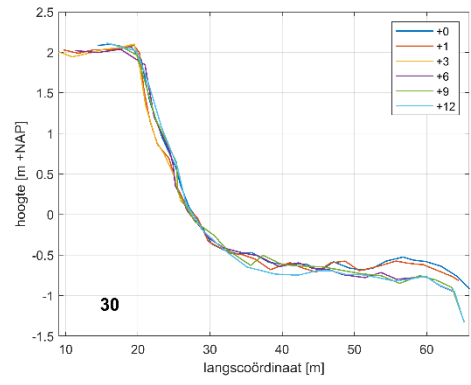
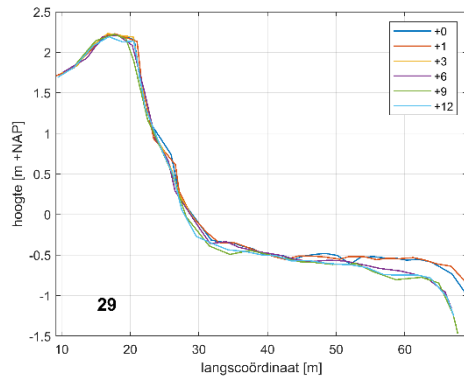












Figuur C.2 Dwarsprofielen langs de raaien weergegeven in Figuur C.1.



## D Baggeronderhoud

Tabel D.1 Baggeronderhoud op het traject van rkm 984 tot 1006 in de jaren 2018, 2019 en 2020.

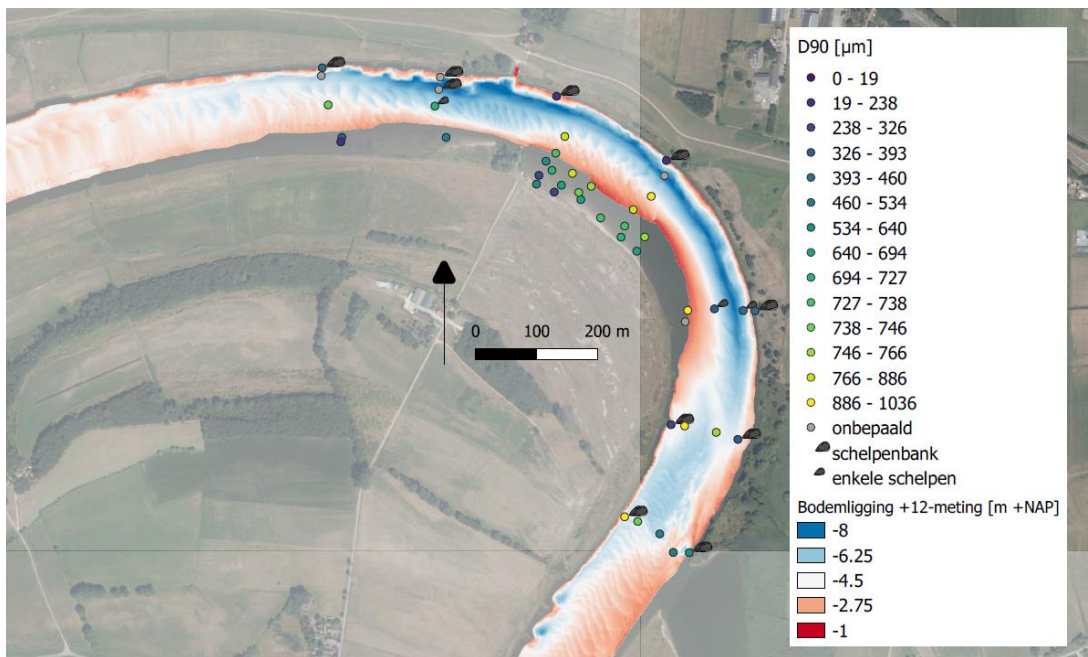
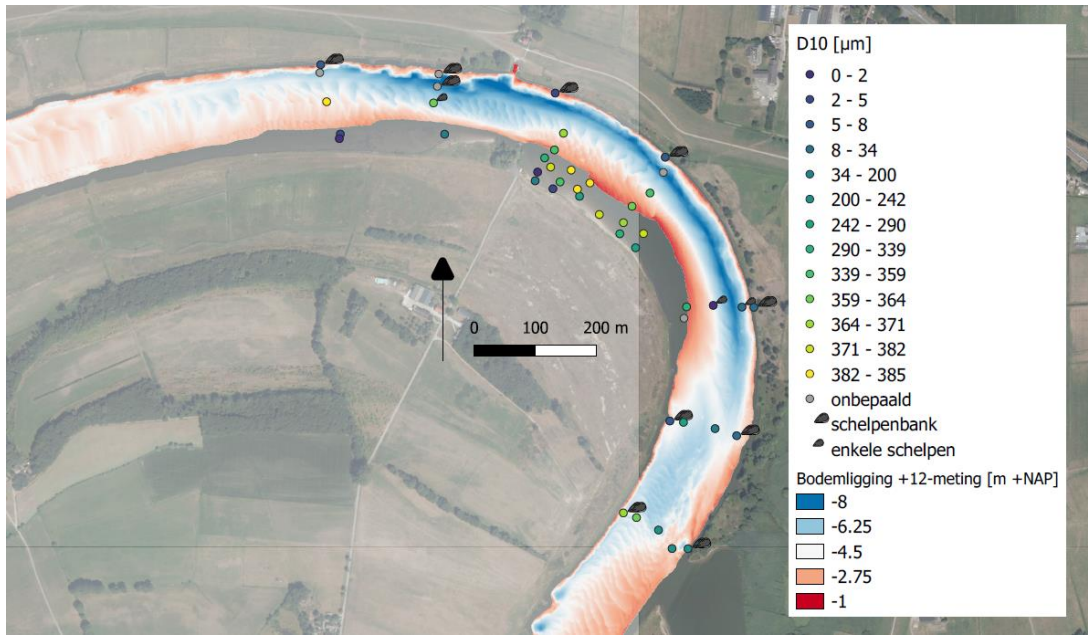
vakken	kmr van	kmr tot	feb-18	mrt-19	okt-19	feb-20
vak-54	984	984.445	170.37	157.3	107.86	104.87
vak-55	984.57	985.09	182.66	0	0	7.68
vak-56	985.09	985.565	237.88	425.94	29.62	53.49
vak-57	986.295	986.775	0.97	0	35.02	5.18
vak-58	986.775	987.265	0.49	0	4.67	15.61
vak-59	987.54	988.065	1103.57	68.33	818.22	1115.67
vak-60	988.245	988.69	0	0	0	0.1
vak-61	988.875	989.36	872.96	278.84	171.75	280.6
vak-62	989.36	989.845	437.77	69.97	135.17	289.14
vak-63	989.845	990.3	43.43	0	0.94	1.72
vak-64			2.21	0	14.05	7.22
vak-65			1.65	0	11.65	50.5
vak-65a			0	0	0	0.85
vak-66	991.675	992.195	768.13	0	106.07	206.01
vak-67	992.195	992.665	175.52	0.34	56.6	53.66
vak-68	992.665	992.875	0	0	0	0.06
Vak-68a			0.03	0	0	0
vak-69	998.66	998.755	4.3	0	0.94	1.89
vak-70	999.475	999.745	1.69	0	0.1	1.36
vak-70a	999.475	999.745	25.89	0	10.5	17.8
vak-71	999.745	1000.015	54.4	0	45.58	52.14
vak-71a	999.745	1000.015	10.07	0	6.81	8.33
vak-72	1000.12	1000.43	4.68	0	2.98	2.97
vak-73	1000.43	1000.83	0.47	0	0.11	0
vak-74	1000.155	1000.325	10.18	0	64.12	108.51
vak-75	1000.395	1000.83	2.07	0	0.44	0.2
vak-76	1001.015	1000.41	357.08	0	266.67	246.4
vak-77	1001.5	1001.875	5686.06	0	2432.37	723.03
vak-78	1001.875	1002.235	9205.05	0	713.67	632.6
vak-79	1001.55	1002.085	12.43	0	11.78	9.65
vak-80	1002.085	1002.585	1577.55	0	1524.5	1707.54
vak-81	1002.585	1002.985	525.08	0	609.25	672.49
vak-82	1002.985	1003.485	343.21	0	275.08	332.75
vak-83	1003.485	1003.985	359.64	0	266.61	335.85
vak-84	1003.985	1004.485	257.64	0	198.79	249.55
vak-85	1004.485	1004.995	263.33	0	183.24	215.15
vak-86	1004.995	1005.495	207.27	0	171.31	206.72
vak-87	1005.495	1006	163.31	0	160.39	172.39
Totaal m <sup>3</sup>			23069.04	1000.72	8436.86	7889.68

## E Bodemsamenstelling

In februari 2021 heeft Deltares bodemmonsters genomen van de rivierbodem op 46 locaties rondom de drie houten schermen. Een van Veenhapper is losgelaten vanaf een boot. Door de impact met de rivierbodem klapte de happer dicht, waarmee een monster is genomen van de toplaag. Voor ieder monster is de grofste fractie (groter dan 2 mm) afgezeefd (o.a schelpen, bakstenen en kiezelstenen) en is eventueel organische stof verwijderd. Omdat veel schelpen zijn aangetroffen in de bodemmonsters en omdat schelpen erosie en sedimentatie kunnen beïnvloeden, hebben we aangegeven (Figuur E.1, Tabel E.1) wanneer 'enkele schelpen' los tussen het sediment aanwezig waren, en wanneer het monster voornamelijk bestond uit aan elkaar geklitte schelpen ('schelpenbank'). Bij dergelijke monsters was soms onvoldoende sediment aanwezig om de korrelgrootte te analyseren. In de buitenbocht kwam het voor dat de van Veenhapper meermaals leeg boven water kwam. Op deze locaties ontbreekt om die reden een resultaat van de bodemsamenstelling in Figuur E.1. Waarschijnlijk hebben banken van mosselen door hun hardheid verhinderd dat een monster van de rivierbodem genomen kon worden.

Vervolgens is voor het residu het volumepercentage per korrelgrootteklasse bepaald door middel van laserdiffractie. Op basis van het volume per korrelgrootteklasse zijn percentielen bepaald: de D10 is de korrelgrootte, waarvoor 10% van het volume kleiner is (Figuur E.1). Net zo zijn de D50 (Figuur 5.1) en de D90 (Figuur E.1) bepaald. Rond de as van de rivier komt vooral grof zand voor met een korrelgrootte dat vaak in tussen 0.3 en 0.5 mm ligt. Op enkele plaatsen komt ook fijner sediment voor, waardoor de D10 kleiner is dan 0.3 mm.

In de binnenbocht rond de houten schermen valt op dat op de meeste plaatsen de rivierbodem vrijwel geheel bestaat uit grof zand (D10 is gelijk of groter dan 0.3 mm, zie Figuur E.1). Ook is de D10 en D90 op enkele locaties kleiner dan op omliggende locaties. Op deze plaatsen is klei aanwezig, welke blijkbaar is gemengd met silt en fijn zand. Net als in de linkeroever lijken in de rivierbodem zandige kleibanken voor te komen. Doordat dergelijke zandige kleibanken stabiel zijn, kunnen ze in de peilingen zichtbaar zijn als ondiepten.



Figuur E.1 De korrelgrootte waarvoor 10% van het bodemmonster kleiner is (D10 percentiel; boven) en net zo de D90 (onder) op basis van bodemmonsters genomen in februari 2021.



Tabel E.1 De D10, D50 en D90 voor alle bodemonsters die zijn genomen in februari 2021; Voordat de monsters zijn afgezeefd is een korte omschrijving gegeven van het monster en over het voorkomen van schelpen

Num- mer	Korte omschrijving	X_RD (m)	Y_RD (m)	D10 (um)	D50 (um)	D90 (um)	Schelpen in monster (enkele of bank)
101	mosselschelpen en fijn sediment met organisch materiaal	197303.1	505188.5	7.9	68.7	397.5	bank
102	grind en (grote) schelpen	197301.6	505175.4	NIET			
103	zandig	197312.8	505127.9	384.6	531.4	741.7	
104	fijn zand en brok (vette) klei	197335.2	505074.9	5.1	31.0	332.7	
105	klei	197333.5	505067.5	0.6	11.5	237.5	
106	(fijn) zandig	197505.9	505074.8	189.7	301.0	473.8	
107	zandig	197487.6	505125.9	362.2	502.1	694.7	enkele
108	zand, schelpen en grind	197493.9	505153.0	NIET			bank
109	mosselen en organisch materiaal+ fijn sediment	197496.3	505173.2	NIET			bank
110	mosselen en organisch materiaal+ fijn sediment	197686.8	505142.0	3.0	18.4	150.3	bank
111	zandig	197700.3	505076.3	367.3	548.5	819.1	
112	zandig	197685.5	505049.1	357.3	513.4	737.8	
113	zandig	197679.3	505021.0	373.0	518.5	724.6	
114	zandig	197798.4	504930.0	364.9	514.2	728.1	
115	zandig	197812.5	504956.8	362.9	546.3	843.7	
116	zandig	197841.9	504978.5	339.5	559.9	925.7	
117	grind en paar (bak)stenen	197863.8	505012.2	NIET			
118	Vooral mosselen, fijn organisch sediment	197866.8	505037.1	5.5	23.8	145.4	bank
119	Vooral mosselen, fijn organisch sediment ( <i>klein monster</i> )	198011.9	504791.4	28.1	253.2	450.6	bank
120	Fijn sediment en schelpen	197992.4	504791.8	8.6	187.3	441.2	enkele
121	Veel zand, ook schelpen (geen mosselen) en conglomeraat van grind	197945.4	504794.6	2.2	19.4	390.1	enkele
122	zandig (klein monster)	197901.8	504792.2	335.8	587.9	1035.9	
123	zandig met deel van baksteen	197897.6	504773.6	NIET			
124	mosselen (klein monster, nauwelijks sediment)	197874.4	504605.4	7.1	32.9	312.6	bank
125	zandig	197896.7	504603.3	286.0	493.1	888.8	
126	zandig (klein monster)	197948.4	504592.9	42.3	415.2	746.3	
127	mosselen en sediment (ook beestjes en organisch materiaal)	197983.7	504581.4	8.2	50.4	326.6	bank
128	Zand, veel schelpen en ook fijn silt/klei	197904.0	504396.4	208.5	353.4	554.5	bank
129	zandig	197878.0	504396.7	227.7	341.8	516.4	
130	zandig	197855.8	504427.0	238.6	343.4	496.1	
131	zandig	197819.8	504447.3	359.9	511.3	737.8	
132	Zand en veel schelpen	197798.3	504454.9	366.1	582.6	961.0	bank
133	zandig	197818.3	504888.9	247.6	401.0	646.3	
134	zandig	197792.5	504911.8	336.8	485.6	703.2	
135	zandig	197759.0	504943.3	376.6	524.8	734.2	
136	zandig	197726.6	504973.2	244.2	422.4	683.0	

Num- mer	Korte omschrijving	X_RD (m)	Y_RD (m)	D10 (um)	D50 (um)	D90 (um)	Schelpen in monster (enkele of bank)
137	zandig	197694.7	504996.7	342.9	487.0	692.3	
138	klei	197683.1	504985.4	4.0	83.9	326.0	
139	klei	197658.0	505012.8	1.3	11.3	238.0	
140	zandig met klei	197654.0	504998.5	192.8	352.4	585.3	
141	zandig	197723.1	504984.8	383.2	533.2	745.0	
142	zandig	197669.5	505036.0	293.3	430.8	632.3	
143	zandig	197712.9	505016.1	384.5	539.5	766.6	
144	zandig	197743.6	504995.0	382.1	535.9	757.2	
145	zandig	197831.2	504912.1	371.6	531.1	765.2	

## F Visuele inspecties

### F.1 13 november 2019

De eerste visuele inspectie vond plaats op woensdag 13 november 2019. Op dit moment was de aanleg van de houten schermen nog niet voltooid. Van 3 van de 4 schermen was de aanleg gestart, waarbij op het moment van inspectie alleen de staanders voor deze schermen geplaatst waren. Tussen deze staanders zullen gewaterde boomstammen horizontaal op elkaar worden geplaatst.

In de 'kom' net bovenstrooms van de veerstoep is duidelijk te zien dat oevererosie plaatsvindt. De vooroever ligt hier dieper dan verder bovenstrooms in de bocht en de steilrand is hoger. Ter plaatse van de vooroever steken slecht erodeerbare delen uit, een teken dat het zand eromheen geërodeerd is. In bovenstroomse richting is de steilrand minder geprononceerd. Doordat de vooroever hier hoger ligt kunnen scheepsgolven de oever minder goed bereiken.

Tijdens de inspectie kon een aantal keer de impact van golven van passerende binnenvaartschepen worden waargenomen. Het is duidelijk te zien dat een passage een hoge belasting op met name de oever in de 'kom' veroorzaken. Bij hogere waterstanden zal ook de oever meer bovenstrooms worden belast. Op basis van passage van enkele schepen lijkt de stuwning van schepen (het wegstromen van water wanneer een schip het kribvak in vaart en het weer volstromen nadat het schip het kribvak uit vaart) een groter effect te hebben dan de golven die ontstaan bij de boeg en het hek van het schip.

Ook rondom de staanders treden lokaal versnellingen op bij passage van schepen, waardoor hier ontgroning kan worden verwacht (Figuur F.1 ).



Figuur F.1 Stroombeeld rond de staanders bij passage van een schip (4388, 4389).

### F.2 15 april 2020

Ten tijde van de tweede inspectie waren 3 van de 4 oorspronkelijk beoogde schermen voltooid. De aanleg van het vierde scherm is uitgesteld, zodat eerst ervaring met de drie gerealiseerde houten schermen kan worden opgedaan.

Naast het visueel inspecteren van de schermen zoals dit ook tijdens de eerste inspectie is gedaan, zijn met behulp van een waadpak de schermen en de bodem daaromheen op armlengte geïnspecteerd, zowel visueel als op de tast. Aan de rivierzijde waren 3 boomstammen voelbaar boven elkaar in de waterkolom bij scherm 2 en 3. Bij scherm 1 waren 4 lagen voelbaar. Het is mogelijk dat hieronder nog een stam aanwezig is, die inmiddels grotendeels was ingegraven in de bodem.



### F.3 9 september 2020

Met name scherm 2 en 3 bleken verzaakt te zijn, onder meer uit het feit dat de staalkabels die zijn gebruikt om de stammen vast te maken niet meer strak zaten, zie Figuur F.2.



Figuur F.2 Loszittende staalkabels bij scherm 2 (onder, 5698) en scherm 3 (boven, 5688, 5693).

In Tabel F.2 is de range en het gemiddelde van de afstand tussen de staanders per scherm aangegeven.

Tabel F.2 Afstand tussen de staanders.

Scherf	Min [cm]	Max [cm]	Gemiddeld [cm]
1	47	80	55
2	62	88	75
3	55	75	65

### F.4 2 februari 2021

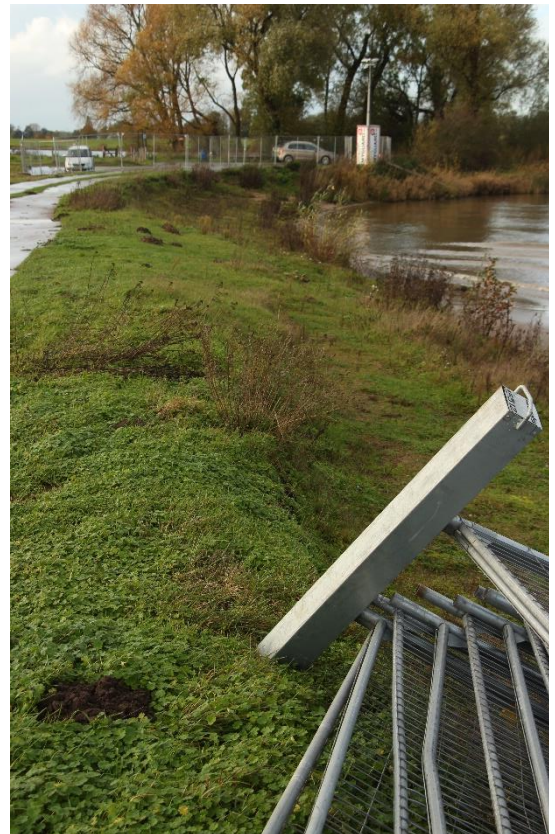
De afvoer was tijdens de vierde inspectie met 671 m<sup>3</sup>/s een stuk hoger dan gemiddeld. De schermen lagen geheel onder water. Bij passage van schepen was geen hevige stroming of oevererosie zichtbaar. Wel werd rondom de schermen sterke turbulentie waargenomen, zie Figuur F.3.



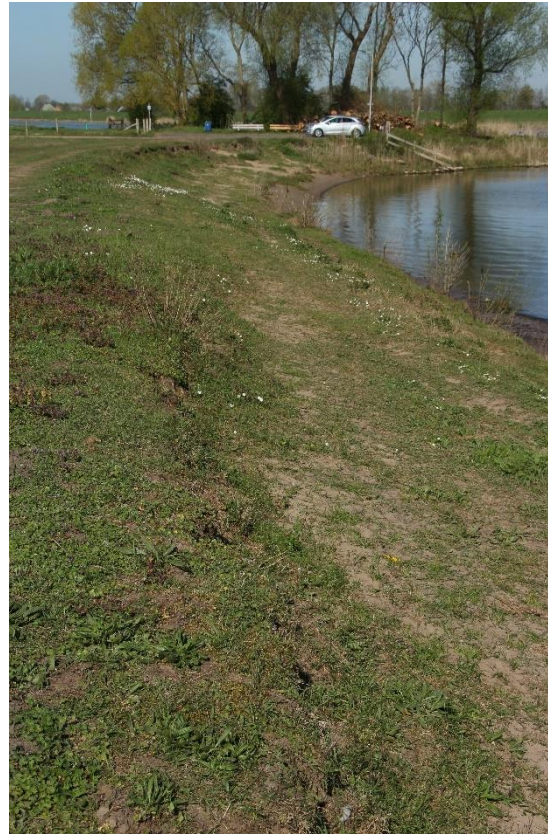
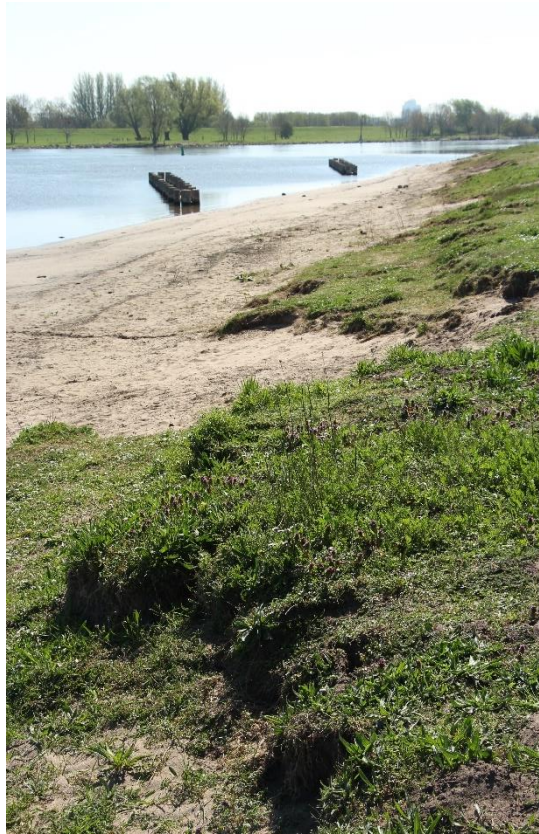
*Figuur F.3 Turbulentie rondom scherm.*

## F.5 Vergelijking per inspectie

Vanaf de steilrand ter hoogte van het derde scherm is bij de eerste drie inspecties zowel in bovenstroomse als in benedenstroomse richting een foto gemaakt. Figuur F.4 toont een overzicht van deze foto's.







*Figuur F.4 Standpunt oever. Foto's in bovenstroomse (links) en benedenstroomse (rechts) richting, tijdens de eerste (boven), tweede (midden) en derde (onder) inspectie.*



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](http://www.deltares.nl)