



RWS INFORMATIE

Morfologische analyse naar de erosiekuil bij Spijk

Datum	10 april 2024
Versie	V3
Status	RWS Informatie – definitief

Colofon

Uitgegeven door Rijkswaterstaat Oost-Nederland, afdeling NOV
Auteur M.J.J. Reneerkens

Telefoon +31 (0) 6 50 166 182
E-mail michiel.reneerkens@rws.nl

Datum 10 april 2024
Versie v3
Status Definitief

Versiebeheer

v1	Concept
v2	Definitief concept - n.a.v. review R. Tönis
v3	Definitief - Dwarsdoorsnede toegevoegd ter hoogte van OH SPIJK

1 Inleiding

1.1. Aanleiding

In januari 2024 is door de WSV een ondiepte in de vaarweg waargenomen op de Boven-Rijn in het grensgebied tussen Duitsland en Nederland (rkm 860.300). Het is uitzonderlijk dat op deze locatie een ondiepte optreedt in de vaarweg. Tevens was ook in beeld de aanwezigheid van een omvangrijke erosiekuil net stroomopwaarts van deze ondiepte. Deze erosiekuil bevindt zich op Duits en Nederlands grondgebied. Het ontstaan van ondiepten en erosiekuilen in de Boven-Rijn is een punt van zorg, omdat het civiele werken kan ondermijnen en het de scheepvaart kan gaan hinderen.

De WSV/WSA Duisburg heeft dan ook contact opgenomen met Henk Oskam (RWS-PPO) en Rico Tönis (RWS-ON NOV). Tönis heeft het punt besproken met Mike Peters (plv. districtshoofd RWS-ON zuid). Peters heeft het daarna op het directiebord van RWS-ON netwerkmanagement geplaatst. Afgesproken is tussen Tönis en Peters is, dat RWS-ON NOV gaat analyseren wat de oorzaak is en wat de beste oplossing is. Dit rapport geeft deze analyse en advies voor een korte termijn en meer permanente oplossing. Op 10 april 2024 zijn oorzaak en oplossingen besproken op een bijeenkomst van de directie van RWS-ON en de directie van WSV/WSA Duisburg.

De periode van december 2023 tot februari 2024 kenmerkt zich door opeenvolgende pieken van verhoogde Rijnafoeren. Met het afnemen van de afvoer op de Boven-Rijn begin februari 2024 is ook het diepteknelpunt op natuurlijke wijze afgevlakt waardoor deze geen hinder meer vormde voor de scheepvaart. Ingrijpen door middel van baggeren is daarom uiteindelijk niet nodig gebleken. De erosiekuil is echter nog wel aanwezig en vormt een mogelijk risico in de toekomst:

- De kuil zou zich kunnen verplaatsen waardoor de ligging van bijv. de vaste laag bij Spijk ondermijnt zou kunnen worden;
- Bij volgende hoogwaters zou het gat wederom kunnen ontstaan wederom onverwachte ondiepten in de vaarweg kunnen veroorzaken;
- Indien de erosiekuil aanwezig blijft, zal deze waarschijnlijk gaan functioneren als sedimentvang, waardoor sediment minder talrijk naar Nederland gaat stromen. In Nederland is sediment hard nodig om de effecten van de grootschalige rivierbodemerose niet te verergeren.
- De aanwezigheid van een kuil van deze omvang kan resulteren in het zakken van de waterstanden bij laagwater in de Niederrhein. Dit komt de internationale scheepvaart niet ten goede komt i.v.m. nieuwe diepteknelpunten nabij Emmerich.

1.2. Doelstelling

In dit rapport wordt 1) een analyse gedaan naar de oorzaak van het ontstaan van de erosiekuil. Het vermoeden is dat de kuil is ontstaan door een combinatie van:

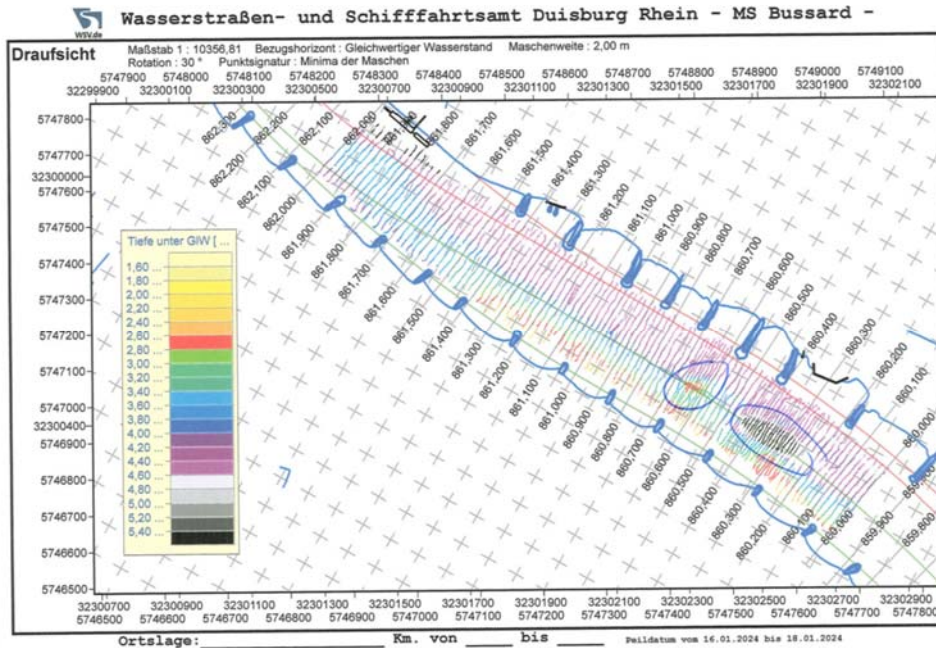
- afvoercondities rond de jaarwisseling 2023-2024,
- lokale gebiedsveranderingen, zoals:
 - o de aanleg van de overnachtingshaven Spijk in 2021-2023 (OH Spijk)
 - o de aanleg van de vaste laag Spijk in 2012 (VLS)
- de plaatselijke bodemopbouw van het zomerbed op de Boven-Rijn

Om vervolgens 2) beheermaatregelen te formuleren om de gevolgen van de kuil te mitigeren.

2 Beschrijving en vormingscondities van de erosiekuil Spijk

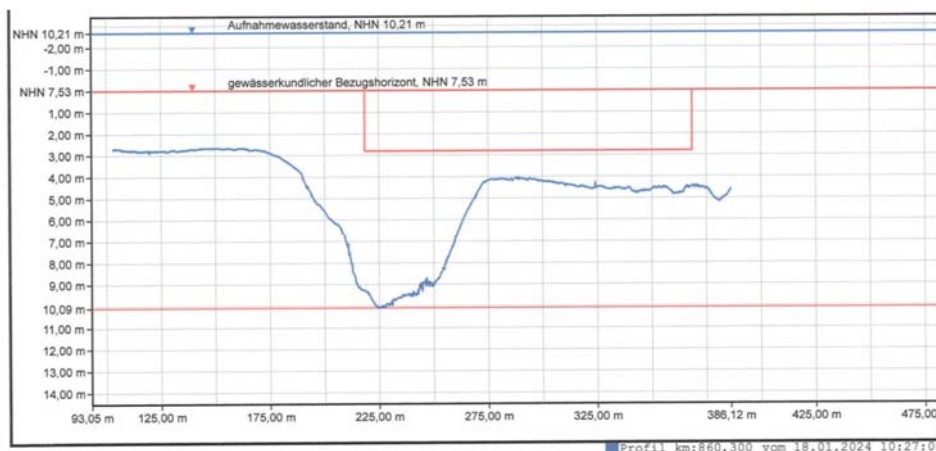
2.1. Beschrijving van de erosiekuil Spijk

De erosiekuil bij Spijk is voor het eerst waargenomen in de single beam metingen van de WSV (zie figuur 1). De kuil is gelegen in de as van de rivier in de vaargeul van de Boven-Rijn (rkm 860.300) op de Duits-Nederlandse grens.



Figuur 1: Bodemligging op de Boven-Rijn (rkm 860 – 862) in het grensgebied NL-DL op basis van single beam raaien onder GIW (komt overeen met OLR). De erosiekuil is blauw omcirkeld evenals het stroomafwaarts gelegen diepteknelpunt. Bron: meetgegevens WSV, 17-18 januari 2024.

Gebaseerd op de WSV-metingen van januari 2024 had de kuil in die periode een lengte van circa 200-250m en lag het diepste punt op -2,56m t.o.v. NHN (= NAP) en daarmee 6-7m lager ten opzichte van de omliggende bodem, zie figuur 2.



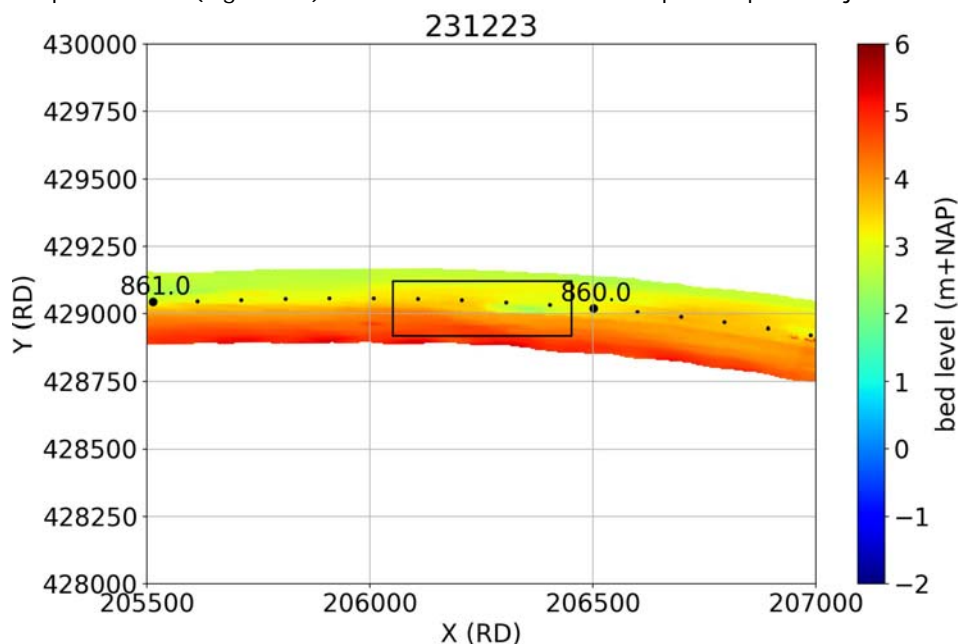
Figuur 2: Dwarsprofiel over de erosiekuil ter hoogte van de maximale diepte van de kuil (rkm 860.300), t.o.v. NHN (komt overeen met NAP). Bron: meetgegevens WSV, 17-18 jan. 2024.

2.2. Moment van vorming

Op basis van Covadem peilgegevens is gekeken naar het moment van ontstaan van de kuil. Covadem data bestaat uit een verzameling van peilgegevens die door de beroepsvaart worden opgenomen. Schepen die zijn uitgerust met een Covademsysteem geven continue de GPS-positie en diepteligging (met single beam) van hun schip door. Deze gegevens worden door Covadem verzameld, verwerkt en opgeslagen in een database voor nadere toepassing.

RWS ON heeft Covadem gegevens ingekocht voor de periode van 1 december 2023 – 1 maart 2024. Op basis van dagelijkse aangeleverde Covadem bodemgrids is het moment van ontstaan van de kuil vastgesteld. De kuil is voor het eerst duidelijk waarneembaar in het Covadem bodemgrid van 23 dec 2023 (Figuur 3). Daarna blijft hij duidelijk zichtbaar als kuil in de Covadem data. Bijlage 1 toont van meerdere dagen de bodemligging rondom de erosiekuil.

Het moment dat de erosiekuil is waargenomen door de WSV, op 17-18 januari is opvallend. Op basis van de Covadem bodemgrids van opeenvolgende dagen is geconstateerd dat de erosiekuil op deze dag de diepste ligging had. De dagen erna begint de kuil zich langzaam op te vullen met sediment. Op basis van RWS peilingen is op 5 februari (Figuur 10) de kuil alweer 1m minder diep dan op 17-18 januari.

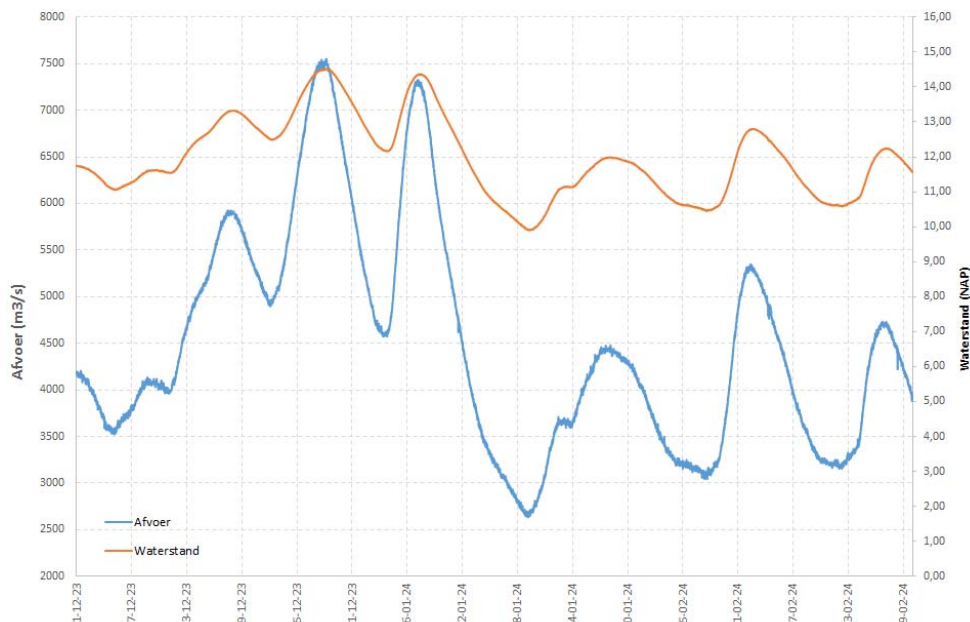


Figuur 3. Covadem bodemgrid van 23 december 2023. De dag dat de erosiekuil voor het eerst duidelijk zichtbaar is.

2.3. Hydraulische condities: dec 2023 – jan 2024

Figuur 4 toont het afvoer- en waterstandsverloop over de maanden december 2023 t/m februari 2024, voor het meetstation Lobith. Dit meetstation ligt circa 3km stroomafwaarts van de erosiekuil. In deze periode is sprake van een aantal opeenvolgende hoogwatergolven in Rijntakken. De afvoer bij Lobith bereikte een maximale waarde van 7.552 m³/s op 28 december (4:00) met een bijhorende piekwaterstand van 14,5m+NAP.

Op de dag dat de erosiekuil ontstond (23 dec 2023) was er een afvoerverloop van 5.000 naar 5.600 m³/s, met een bijbehorend waterstandsverloop van 12,6m – 13,0m + NAP.



Figuur 4: Afvoer- en waterstandsverloop bij Lobith van 1 december 2023 tot 1 maart 2024

Op basis van modelberekeningen (Witteveen + Bos in 2022) is geschat hoe groot de diepte-gemiddelde stroomsnelheid op deze locatie is geweest gedurende het ontstaan van de kuil. Er is een berekening beschikbaar voor een afvoer van 6.000 bij Lobith. Onder deze condities wordt de lokale diepte-gemiddelde stroomsnelheid geschat op 1,8 m/s. De bijbehorende lokale waterdiepte bedraagt dan 9m.

2.4. Bodemsamenstelling toplaag en transport

De samenstelling van de toplaag van de Boven-Rijn is slecht gesorteerd en heeft een bimodale korrelgrootteverdeling (Stoff, 2022). Het wordt geclassificeerd als matig tot grof grindig (Tabel 1), maar bevat dus ook duidelijk een piek in de (matig grove) zandfractie. Figuur 5 toont een impressie van bemonsterde oppervlakte materiaal ter hoogte van de kuil. Daarnaast is er ruimtelijke variatie aanwezig. Zo is de rechter- en linkerzijde van de rivier (rond rkm 860) zichtbaar grover dan de as.

	D10 (mm)	D50 (mm)	D90 (mm)
BR_860.000_as	2,4	7,7	16,1
BR_860.000_links	0,4	7,1	23,3
BR_860.000_rechts	0,5	22,2	41,9
BR_860.500_as	2,3	5,2	11,8

Tabel 1: Korrelverdeling (mm) voor een 4-tal punten van de toplaag rondom de erosiekuil, rkm 860 (linkerzijde, rivieras en rechterzijde van het zomerbed). De gegevens zijn gebaseerd op bemonstering met een Hamon happer en genomen in het najaar van 2019.

Uitgaande van berekende stromingscondities (zie §2.3) wordt de bodemschuifspanning, die nodig is om het lokale bodemmateriaal in beweging te krijgen, ruimschoots overschreden (Van Rijn, 1983). Bodemtransport is één van de voorwaarden om een erosiekuil te vormen. Maar is op zichzelf niet voldoende want indien de bovenstroomse sediment aanvoer in evenwicht is met het transport, treedt er netto geen erosie op. Er is een gradiënt nodig voor erosiekuilvorming.



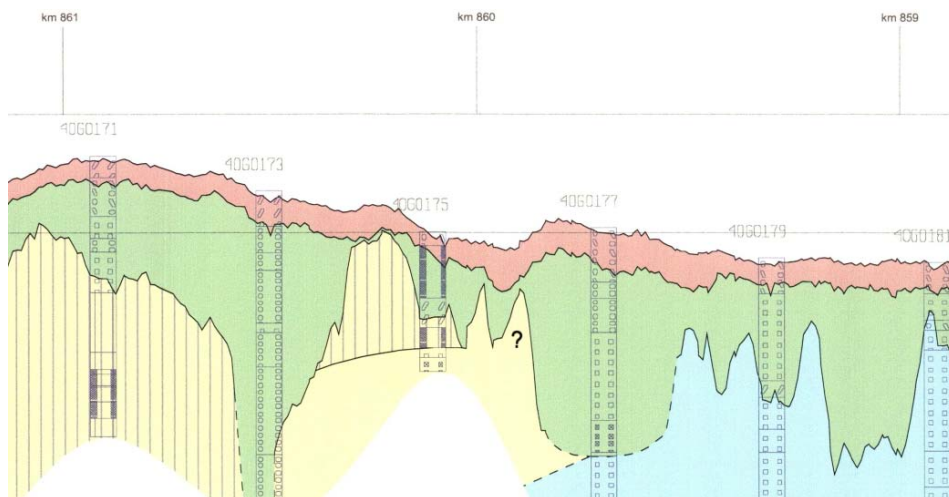
Figuur 5: Sediment aan het oppervlak van het zomerbed op de as van de rivier bij rkm 860.5; bemonsterd in het najaar 2019.

2.5. Ondergrondgegevens op basis van boringen

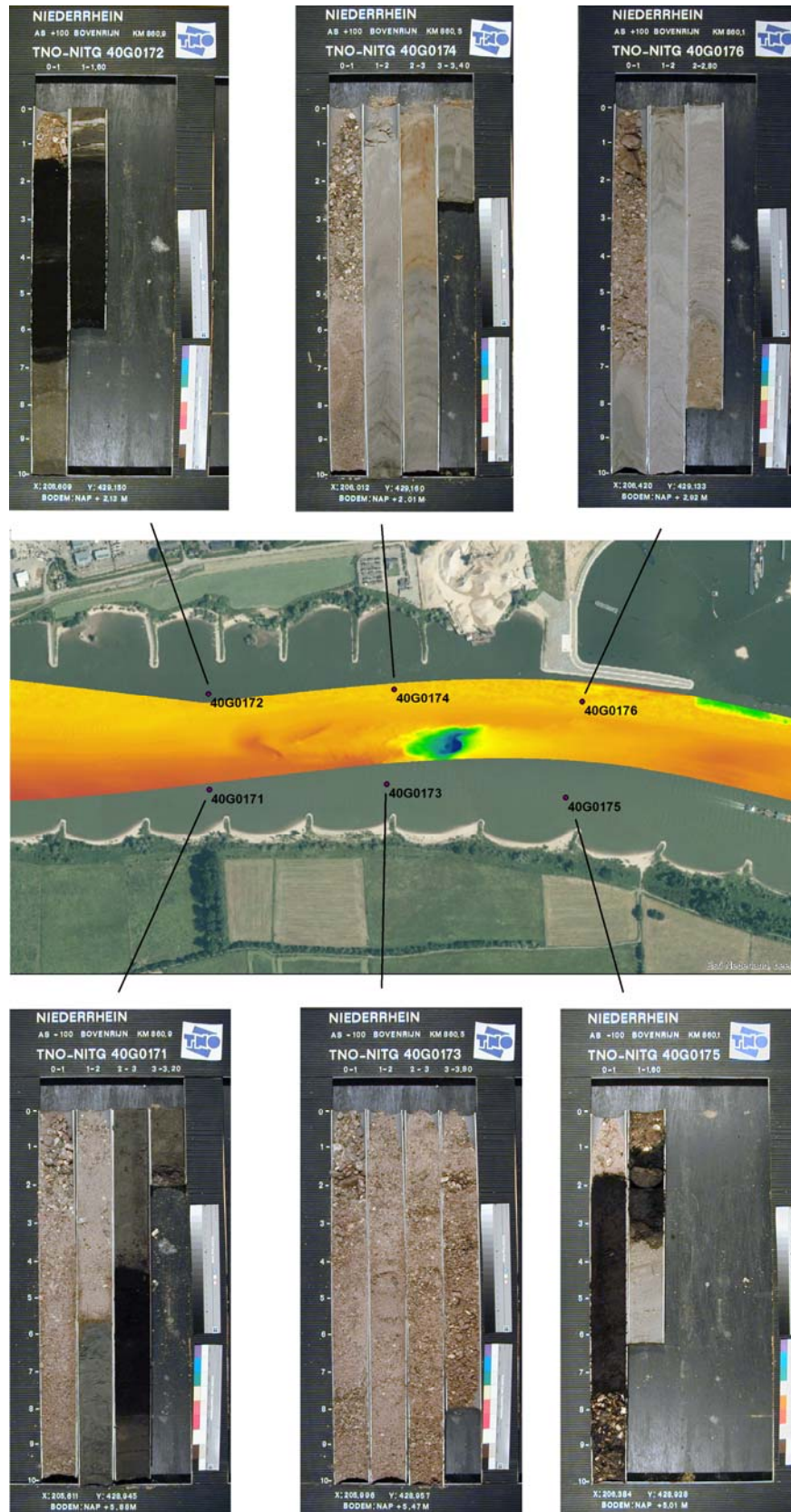
Figuur 6 toont een lithostratigrafisch profiel dat 100m ten zuiden van de rivieras is gelegen. Het langsprofiel is opgebouwd uit boorgegevens die in 2000 zijn genomen in het splitsingspuntengebied in de rivier. De boorgegevens en profielen zijn uitgebreid beschreven in Gruijters (2001). Figuur 7 toont de locatie van enkele van deze boorkernen. De beschrijving van het lithostratigrafisch profiel is als volgt:

- Oranje/ Rood: actieve (pleister)laag met grof grind, grofzand en schelpen (Echteld Formatie)
- Groen: grofzand en fijn grind: Holocene (Echteld) en Pleistocene afzettingen (Kreftenheije)
- Geel: fijn zand, klei (Twente) en veen (Asten). Dit zijn periglaciaire afzettingen afgewisseld met moerasafzettingen
- Blauw: oude rivierafzettingen (Formatie van Urk en Waalre)

Het gebied rondom de erosiekuil heeft een sterk variërende bodemopbouw. De actieve laag varieert van 20-70cm en onder de actieve laag bevinden zich afwisselend erodeerbare (fijne) zanden en / of klei- veenlagen. Gruijters (2001) beschrijft de veen- en kleilagen als "dermate samenhangend dat erosie zeer beperkt zal blijven".



Figuur 6: lithostratigrafisch lengteprofiel langs de zuidkant van de rivieras op de Boven-Rijn, gebaseerd op boorkernen uit 2000.



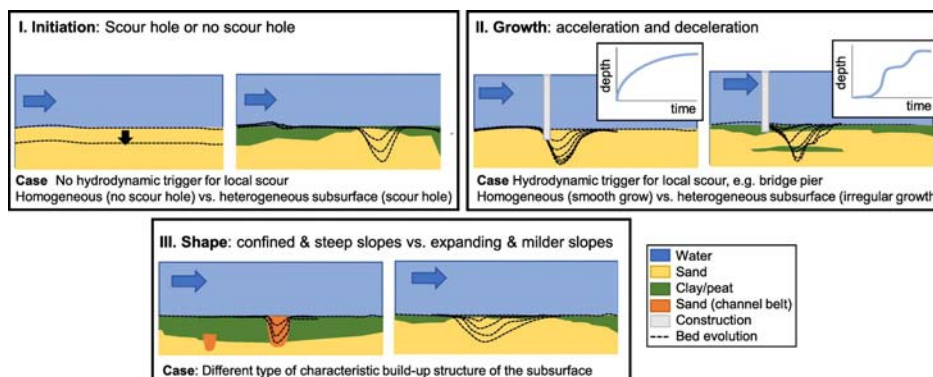
Figuur 7: Boorkernen van de ondergrond van het zomerbed uit 2000, rondom de erosiekuil

3 Oorzaak ontstaan van de erosiekuil

3.1. Theorie en hypothese

Een erosiekuil is een lokaal fenomeen en kan onder wisselende omstandigheden ontstaan. Een erosiekuil vormt zich daar waar lokaal sterke gradiënten ontstaan in (een combinatie van):

- Stromingscondities,
- Sedimentaankvoer, en /of
- Heterogene opbouw van de bodem (Huismans, 2021).
- En wordt vaak *getriggerd* door waterbouwkundige constructie.



Figuur 8: Concept van erosiekuilvorming en ontwikkeling als gevolg van constructies en / of verschillen in bodemopbouw (Huismans, 2021)

Veranderingen in stromingscondities (door ingrepen of obstakels) zijn de belangrijkste oorzaak om te komen tot erosiekuilvorming. Verandering in stroming veroorzaakt een gradiënt in de sedimenttransportcapaciteit en zorgt voor een lokale disbalans tussen het actuele sedimenttransport en de capaciteit van de stroming om sediment te transporteren. Een nieuwe evenwicht wordt uiteindelijk gevormd doordat de hydraulisch condities zich aanpassen aan de lokale kuil (Hoffmans en Verheij, 1997).

Een goed voorbeeld is de erosiekuil achter de vaste laag van Nijmegen. Direct stroomafwaarts van deze laag treden sterke en turbulente wervels op in de stroming. In combinatie met een alluviale erodeerbare bodem en bijna geen sedimentaankvoer over de vaste laag, ontstaat hier een diepe erosiekuil.

Kijkend naar de erosiekuil gevormd bij Spijk dan zijn de afvoercondities van de winter 2023-2024 alleen dan ook niet voldoende om een erosiekuil te vormen (afbeelding linksboven, Figuur 8). Ook de aanwezige heterogeniteit van de aanwezige pleisterlaag en de samenstelling van het onderliggend substraat spelen een rol (zie §2.5 en figuur 8). Dergelijke intrinsieke condities kunnen bepalend zijn voor de locatie en grootte van de erosiekuil, maar zullen niet de "trigger" zijn geweest waardoor de kuil is ontstaan. Immers, ook voor december 2023 was deze bodemopbouw aanwezig en zijn er zeer geregeld afvoeren geweest $> 5.500 \text{ m}^3/\text{s}$, zonder dat dit heeft geleid tot vorming van een erosiekuil.

Het vermoeden (hypothese) is dan ook dat veranderende situatie rondom de vaste laag Spijk (VLS) en overnachtingshaven (OH) Spijk extra gradiënten in stroomsnelheden en morfologie hebben veroorzaakt waardoor onder de verhoogde

afvoercondities van de winter 2023-2024 de pleisterlaag heeft kunnen doorbreken en het (fijnere) substraat verder heeft kunnen eroderen. Dit wordt bekeken in de navolgende analyse.

3.2. Bodemligging en historische peilgegevens

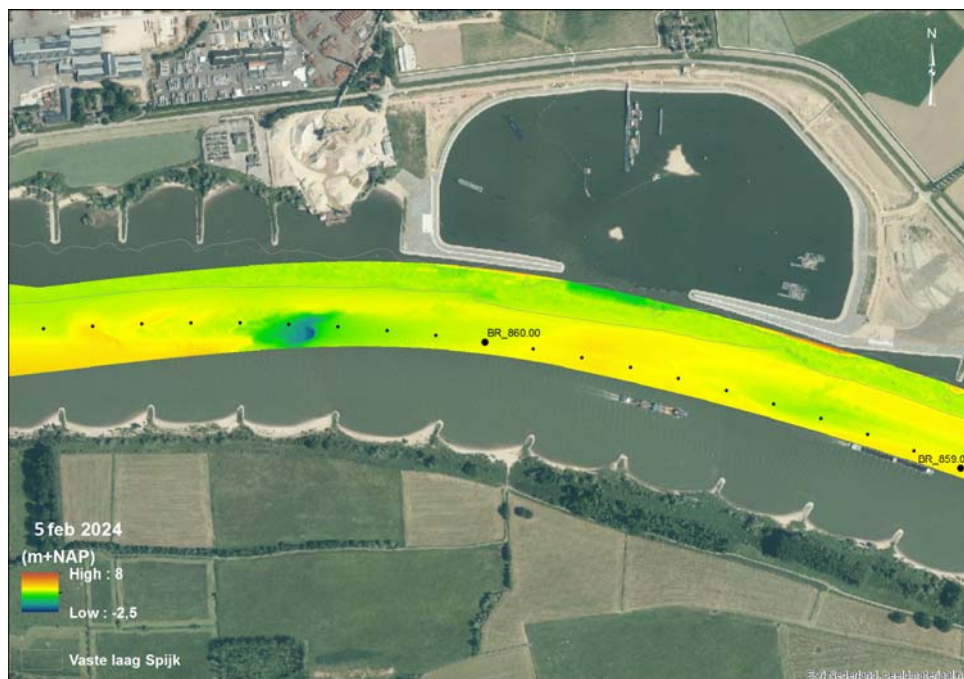
Om een beeld te krijgen van de ontwikkeling van de bodemligging ter hoogte van Spijk zijn de volgende gegevens gebruikt om de plaatselijke bodemdynamiek inzichtelijk te krijgen voor de situatie vóór en na de aanleg van de vaste laag én OH Spijk.

Gebruikte peilgegevens in rasterformaat (1x1m):

- Tweewekelijkse multi-beam peilingen van de vaargeul van 2005 t/m het jaar 2020. Na 2020 is de peilfrequentie van de vaargeul naar 8 weken gegaan.
- Tweejaarlijkse multi-beam peilingen van het volledige zomerbed tussen 1999 – 2022. Om een enigszins seizoenafhankelijk beeld te vormen zijn voor de analyses alleen de voorjaarspeilingen opgenomen. Deze situatie is representatief voor de bodemligging t.g.v. van het voorgaande hoogwaterseizoen.
- Recente vaargeulpeilingen van 2023 en 24 februari 2024

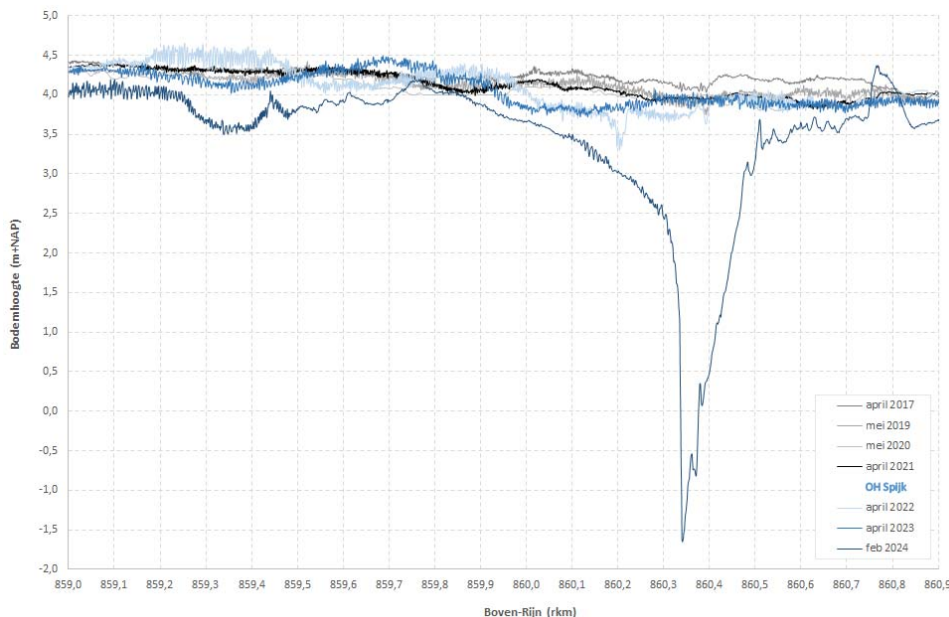
Kaarten van de absolute bodemligging van afgelopen jaren 2017 t/m 2024 (bron b en c) zijn opgenomen in Bijlage 2.

Daarnaast is in deze figuren telkens de luchtfoto opgenomen die zo goed als mogelijk correspondeert met het moment van de peiling. Hierin is de ontwikkeling van de aanleg van OH Spijk sinds 2022 te zien. Figuur 9 toont de laatst beschikbare peiling van 5 februari 2024, waarin de kuil zichtbaar.



Figuur 9: Bodemligging van de vaargeul opgenomen op 5 februari 2024 met als achtergrond de laatst beschikbare luchtfoto van het najaar 2023. De grijze lijn is de contour van de vaste laag Spijk.

Op basis van de absolute bodemligging van 2017 t/m 2024 (bron b en c) is er een lengteprofiel geconstrueerd, parallel aan de rivieras. Het profiel heeft een offset van 20m naar het zuiden ten opzichte van de rivieras zodat het diepste gedeelte van de kuil wordt meegenomen. Het profiel is geconstrueerd met een resolutie van 1m (figuur 10).

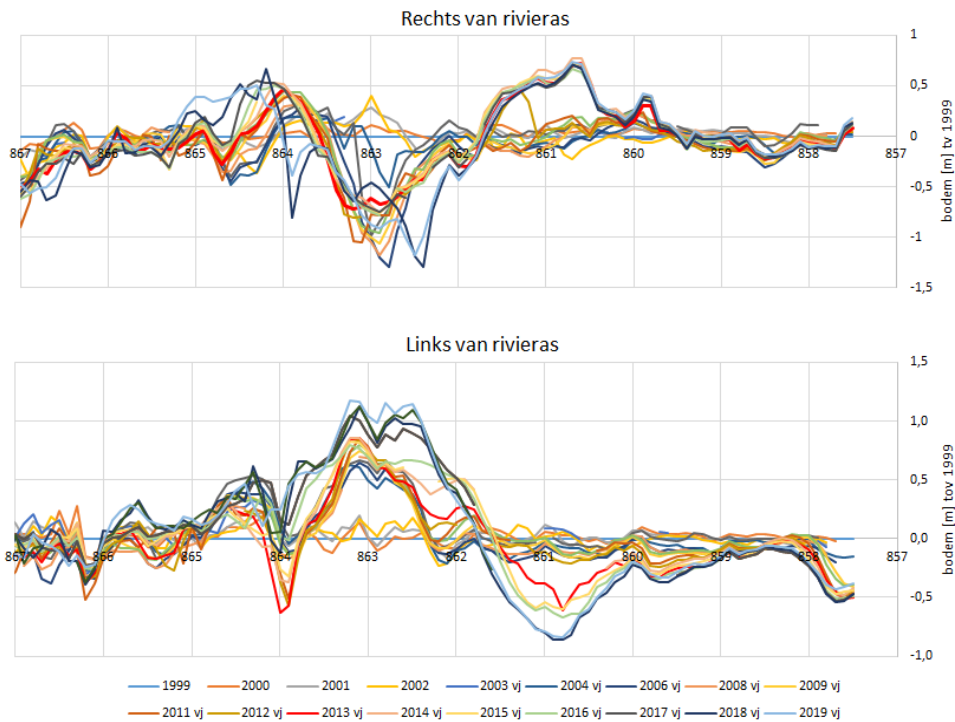


Figuur 10: Bodemligging langs de as van de rivier voor de jaren 2017 t/m 2024 rondom rkm 860 op de Boven-Rijn. De aanleg van OH Spijk is vanaf 2022 zover in ontwikkeling dat deze hydraulisch van invloed op de rivier is. De 3 bodemprofielen vanaf die periode zijn blauw gekleurd. De "ruizige patronen" in de profielen geven het voorkomen van rivierduinen weer.

3.3. De aanleg vaste laag Spijk

Als gevolg van bochtwerking ontstaan verschillen in bodemhoogte tussen de binnenbocht (aanzanding) en buitenbocht (verdieping). Dit kan nadelige gevolgen hebben voor de scheepvaart. In een Duits-Nederlandse samenwerking op de Boven-Rijn is in 2008 besloten om een suppletie aan te leggen in de buitenbocht bij rkm 864. Dit is uitgevoerd door RWS in 2016 en 2019. Tevens is door de WSV in 2012-2013 een vaste laag aangelegd op de rivierbodem in de buitenbocht tussen rkm 858-862. Deze ingrepen hebben tot doel om de diepe buitenbocht minder te laten eroderen én de ondiepe binnenbocht van de vaargeul op autonoom op diepte te houden doordat de vaste laag Spijk de stroomsnelheid in de binnenbocht verhoogt. De vaste laag van Spijk (VSL) ligt aan de rechteroever in het gebied tussen de erosiekuil en de OH Spijk (zie polygoon in figuur 9).

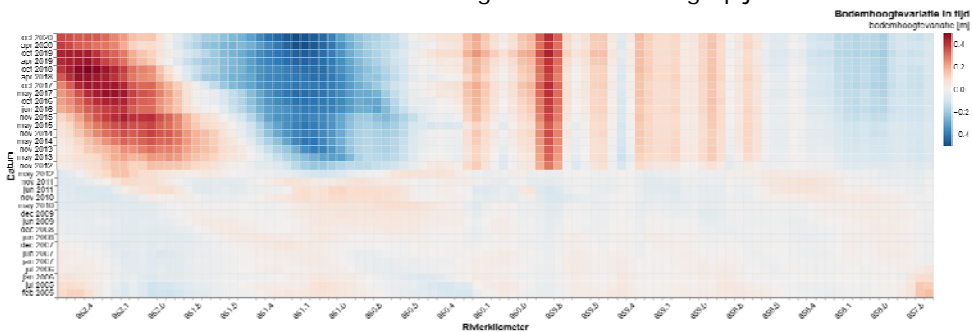
Figuur 11 toont de bodemligging voor zowel de linker als rechterdeel van het zomerbed ten opzichte van de historische bodem van 1999. In het figuur is het jaar 2013 (aanleg VLS) rood gemarkeerd. Zichtbaar is dat het rechterdeel van het zomerbed stroomafwaarts van rkm 860 duidelijk is gezakt in de jaren daarna. Dit betreft de binnenbocht ter hoogte van de erosiekuil. Terwijl de linkeroever (buitenbocht) in bodemhoogte is gestegen door de aanleg van de vaste laag Spijk.



Figuur 11: Bodemlengteprofielen van het voorjaar (vj) gemiddeld over het linker en rechter deel van het zomerbed, weergegeven t.o.v. de bodemligging van 1999.

Om het effect van de vaste laag Spijk op de bodem verder inzichtelijk te maken toont Figuur 12 een wavelet filtering op basis van de tweewekelijkse bodempeilingen in de vaargeul tussen 2005 en 2020 (bron a).

Een wavelettransformatie is qua functie vergelijkbaar met een Fourier analyse. Met behulp van deze filteringstechniek is het mogelijk om de effecten van maatregelen op verschillende ruimteschalen inzichtelijk te maken ten opzichte van een referentiebodemp (Van Denderen, et. al., 2024). In dit geval is de bodemdynamiek van de vaargeul tussen rkm 857 tot 863 onderzocht. Hierbij wordt een 1D benadering, gehanteerd waarbij er langs de vaargeul gewerkt wordt met één bodemgemiddelde waarde per strekkende meter. De wavelet analyse is ingesteld voor een ruimtelijke schaal van 200m – 4.000m. Dit correspondeert met de dimensie van de vaste laag Spijk (circa 3,5km lang). Deze analyse toont dat vanaf eind 2012 – begin 2013 de bodemdynamiek sterk is toegenomen in het gebied. Dit komt overeen met het moment van aanleg van de vaste laag Spijk.



Figuur 12: Wavelet transformatie (schaal: 200 – 4000m) van de bodemligging van de vaargeul in 1D tussen rkm 857-863.

De verwachting is dan ook dat door erosie van het linker (zuidelijk) deel van het zomerbed, de pleisterlaag ter hoogte van de erosiekuil, de laatste jaren dunner is geworden door de aanleg van de vaste laag Spijk. In lijn met figuur 11, die een dalende rivierbodemplaat laat zien in de binnenbocht vanaf 2013 in het gebied van de vaste laag Spijk.

Echter, ondanks de waargenomen verandering in bodemdynamiek en daling van de bodem in de binnenbocht t.g.v. de aanleg van de VLS zijn er tot 2022 geen tekenen van erosiekuilvorming zichtbaar in de bodempeilingen (Figuur 10). Terwijl er bijv. in de periode 2017 t/m 2021 enkele forse hoogwaters zijn gepasseerd, zie Tabel 2. Met name de hoogwaters van 2018 en 2021 zijn noemenswaardig. Deze gaan gepaard met Lobith afvoeren die vergelijkbaar zijn met de afvoeren van afgelopen winter.

Seizoen met Datum piekafvoer	Piekafvoer per seizoen (m ³ /s)	Aantal hoogwaters > 5.000 m ³ /s per seizoen
12 mrt 2017	3.779	-
10 jan 2018	7.553	2
28 jan 2018	6.839	
19 mrt 2019	5.226	1
7 feb 2020	6.142	1
8 feb 2021	7.389	1
17 jul 2021	6.894	1
Aanleg OH Spijk		
8 jan 2022	5.368	1
19 jan 2023	4.987	-
17 dec 2023	5.906	3
28 dec 2023	7.552	
1 jan 2024	7.267	

Tabel 2: Lobith piekafvoer per winterseizoen op basis van de vigerende Qf-relatie per jaar met hierin ook het zomer hoogwater van 2021. De strekdammen van de stromen over vanaf circa 5.000 m³/s, te Lobith.

Samenvattend: de aanleg van de vaste laag Spijk (VLS) leidt tot grotere morfodynamiek en sterkere gradiënten in de bodemligging in het gebied rondom de VLS. Dit heeft tot gevolg dat het gebied waar de erosiekuil is ontstaan, sterker is gaan eroderen. Dit heeft tot verlaging van de binnenbocht ter hoogte van rkm 860 geleid. Deze erosieve trend leidt op zichzelf niet direct tot erosiekuilvorming maar draagt wel duidelijk bij aan de condities die hier voor nodig zijn.

3.4. Aanleg overnachtingshaven (OH) Spijk

In de lengteprofielen (Figuur 10) van de bodemligging ter hoogte van de erosiekuil, zijn de jaren sinds 2022 blauw gemarkeerd. Dit jaartal komt overeen met de aanleg van de overnachtingshaven (OH) Spijk.

In deze lengteprofielen is een eerste aanzet tot erosiekuilvorming al zichtbaar in 2022, ten gevolge van het hoogwater van 2022 (Tabel 2). Kijken we vervolgens naar het hoogwater van januari 2023 (Tabel 2) dan had deze een enigszins vergelijkbare doch relevant lagere piekafvoer dan 2022. Maar het is in januari 2023 dan ook niet tot erosiekuilvorming gekomen; de bodem heeft zich kunnen herstellen (Figuur 10). Vervolgens is ten gevolge van de opeenvolging van hoogwaters $>5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ eind 2023 de pleisterlaag wél doorgebroken waardoor de erosiekuil is ontstaan. Deze heeft vanaf de doorbraak op 23 dec 2023 verder kunnen groeien omdat de piekafvoer uiteindelijk nog een flink stuk hoger lag en tot tweemaal toe boven de $7.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith uitkwam.

Kortom: het proces van erosiekuilvorming rondom rkm 860 is voor het eerst waargenomen in 2022, weliswaar in mindere omvang. Dit jaartal komt overeen met het jaar dat OH Spijk is aangelegd.

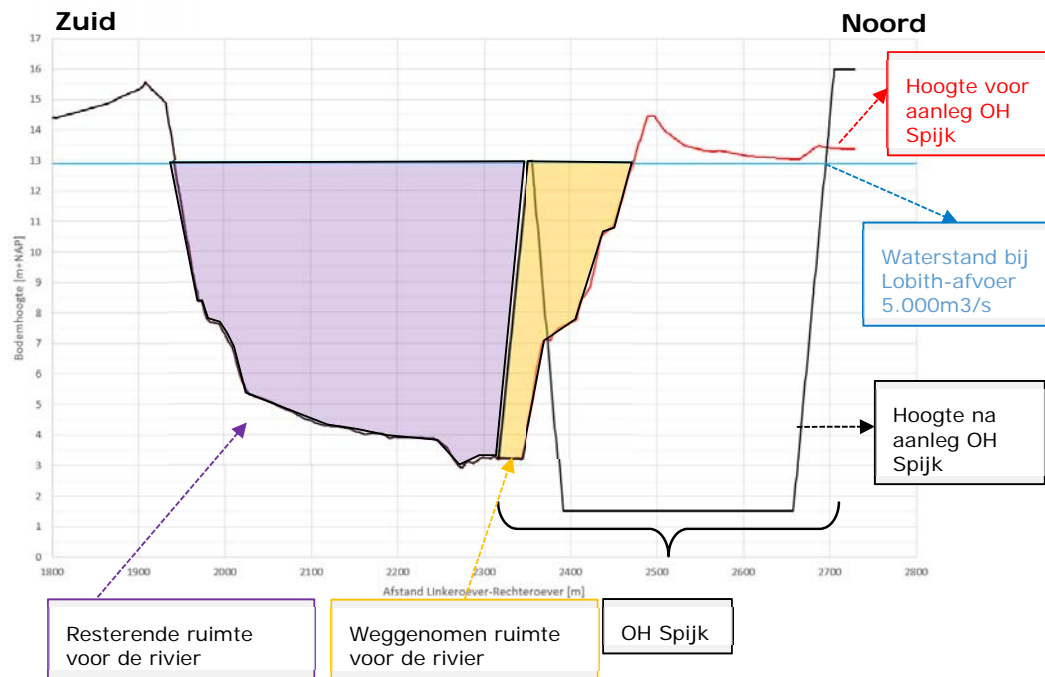
Om het causale verband tussen OH Spijk en de erosiekuil verder te verklaren is gekeken naar ruimtelijke verschillen in de bodemligging t.o.v. de bodem van 2017 en enkele jaren daaropvolgend, zie bijlage 3. Er is consequent gekeken naar bodempeiling die zijn gemeten in het voorjaar.

Figuur 13 toont de verschilbodem tussen het voorjaar van 2017 en 2022. De vaste laag Spijk kleurt overwegend wit en wordt geclassificeerd als 'stabiel'. De rest van de rivier kleurt vooral blauw; dit toont het erosieve karakter van dit gedeelte van de rivier. Daarnaast zijn er meer lokale patronen zichtbaar van sedimentatie (rood) en erosie (blauw). Deze patronen zijn genummerd in figuur 13 en zijn rivierkundig goed te verklaren vanuit de geometrie van de haven:

1. Erosie: op deze locatie ligt de bovenstroomse havendam. Deze dam heeft een hoogte van circa 13m en in dwarsrichting $15,5\text{m} + \text{NAP}$. Hierdoor wordt de stroming t.o.v. de oude situatie met de kribben tot veel hogere Lobith afvoeren (tot circa $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$) door het zomerbed geleid dan in de oude situatie met kribben. De kribben lagen immers op een hoogte, overeenkomstig met een afvoer van $3.500 \text{ m}^3/\text{s}$, waardoor het water eerder de uiterwaard in kon.
2. Sedimentatie: ter plaatse van de ingang van de haven als gevolg van de verruiming;
3. Erosie: dit is de locatie waar uiteindelijk de erosiekuil ontstaat:
 - a) Stroomafwaarts van de sedimentatie uit 2) ontstaat erosie door een gebrek aan aanvoer van sediment;
 - b) Idem als argument 1). Dit argument geldt ook voor de benedenstroomse havendam. Figuur 14 toont de weggenomen ruimte in het stroomvoerend oppervlak tot $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith t.g.v. de aanleg van OH Spijk ter hoogte van rkm 860 waardoor de stroomsnelheden en dito erosieve krachten in het zomerbed toe nemen.
 - c) De erosiekuil heeft na het ontstaan kunnen groeien doordat de afvoer uiteindelijk nog dagen hoog was en toenam tot $> 7.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Bij dergelijke hoge waterstanden wordt het havengebied steeds meer stroomvoerend. Er treedt daarbij sterke terugstroming op richting het zomerbed, bij 3) doordat de retourstroming sterk het zomerbed in wordt geleid door de benedenstroomse havendam die dwars op de rivier ligt.



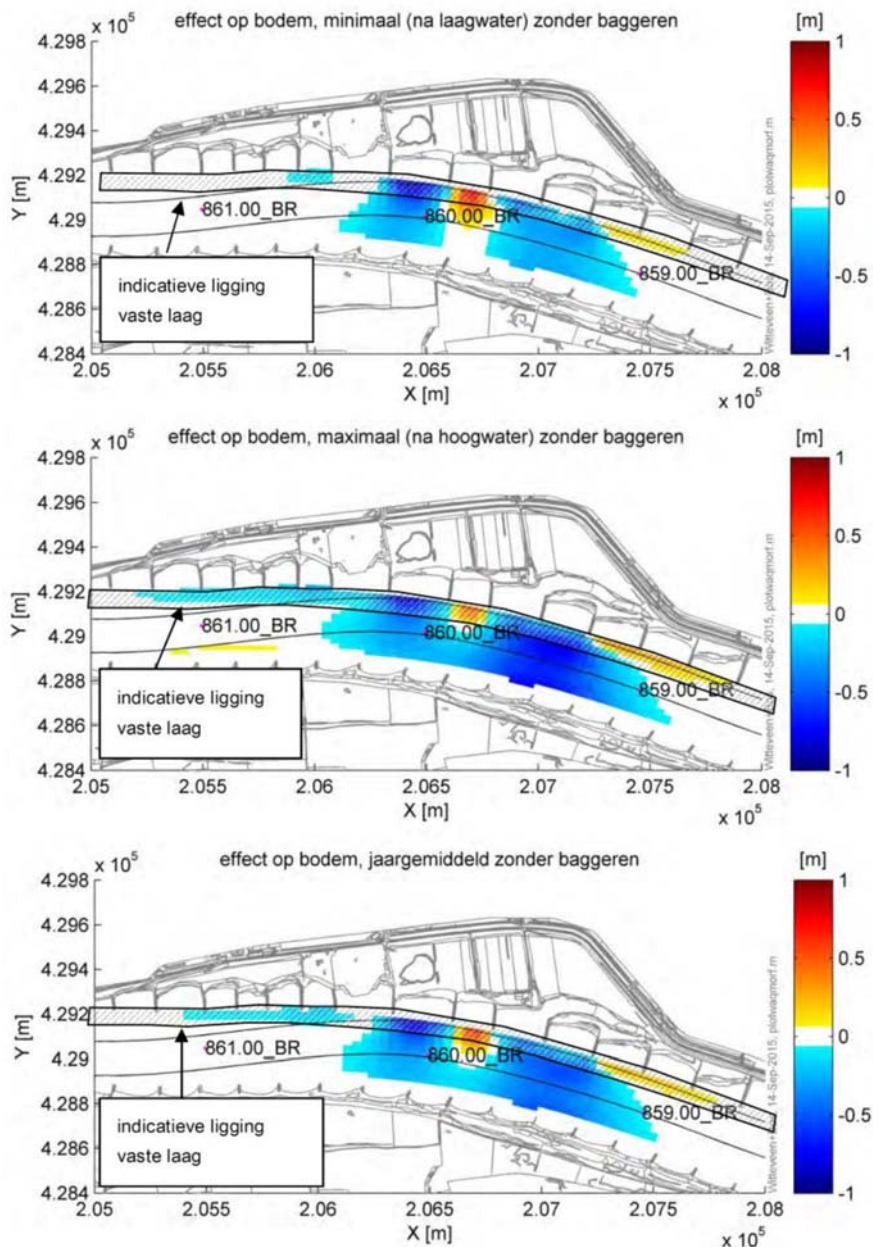
Figuur 13: Bodemverschilkaart (m) tussen de voorjaarspeiling 2017 en de meest recente vaargeulpeiling van 5 februari 2024". Let op: de schaal is gelimiteerd zodat erosie en sedimentatie patronen goed te onderscheiden zijn. Voor de absolute ligging wordt verwezen naar het lengteprofiel (figuur 10). De nummers geven erosie en sedimentatie patronen weer die zijn te relateren aan de geometrie van de haven.



Figuur 14: Dwarsdoorsnede van de rivier ter hoogte van rkm 860 voor de oude situatie met kribben (in rood) en de nieuwe situatie met OH Spijk (in zwart). Het figuur toont de afname van het stroomvoerend oppervlak t.g.v. de aanleg van OH Spijk tot een afvoerniveau van 5.000 m³/s te Lobith waardoor de stroomsnelheden in het zomerbed toenemen.

Alle tot nu toe uitgevoerde analyse zijn gebaseerd op meetgegevens. Er is echter tijdens de planfase van OH Spijk ook een modelstudie uitgevoerd door Witteveen+Bos (2015). Hierbij is met behulp van de analytische tool WaqMorf (Sieben, 2011) gekeken naar de morfologische effecten ten gevolge van OH Spijk. Het voorspelde patroon van erosie en sedimentatie getoond in Figuur 15 komt goed overeen met Figuur 13.

De lokale diepe erosiekuil komt echter niet tot uiting in de WaqMorf analyse maar dat is een tekortkoming van de methodiek. WaqMorf gaat enkel uit van relatieve snelheidsverschillen die optreden tussen een referentie en maatregel situatie, effecten van bodemdynamiek, samenstelling en bodemopbouw worden niet meegenomen.



Figuur 15: Morfologische berekende effecten op basis van WaqMorf (Witteveen + Bos, 2015) ten gevolge van de aanleg OH Spijk.

3.5. Samenvatting en conclusies

Op basis van analyses van historische meet- en veldgegevens is het volgende te concluderen over de oorzaak van de erosiekuilvorming bij rkm 860.0 op de Boven-Rijn:

1. De veranderde stromingscondities in het zomerbed, ten gevolge van de aanleg van overnachtingshaven (OH) Spijk, wordt gezien als de trigger voor de vorming van de erosiekuil;
 - a) hierbij lijken opeenvolgende afvoeren $> 5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ te Lobith in één hoogwaterseizoen, bepalend voor het doorbreken van de bodempleisterlaag.
 - b) Tot aan dergelijke afvoercondities blijft de stroming, t.g.v. de havendammen van OH Spijk, langer in het zomerbed in vergelijking met de oude situatie die was ingericht als kribboever. Dit betekent een hogere snelheden van stroming water in de vaargeul en dito verhoogde erosiekracht. In de situatie met kribben kon op deze locatie de uiterwaard aan de rechteroever al vanaf $3.500 \text{ m}^3/\text{s}$ meestromen, waardoor de stroming en resulterende bodemschuifspanning in het zomerbed minder hoog opliep.
 - c) de kuil heeft fors kunnen groeien doordat de afvoer vanaf het moment van doorbreken van de pleisterlaag nog tot 2 maal toe boven de $7.000 \text{ m}^3/\text{s}$, te Lobith uit is gekomen. Bij het doorbreken van de pleisterlaag zijn (fijnere) zanden uit de ondergrond bloot komen te liggen. Deze zanden eroderen makkelijk.
2. Er wordt sinds de aanleg van de vaste laag Spijk (2012) een verhoogde bodemdynamiek waargenomen in het zomerbed parallel aan de vaste laag. Ter hoogte van de erosiekuil vindt sinds de aanleg van deze vaste laag sterkere erosie plaats in de binnenbocht waardoor de pleisterlaag (zeer waarschijnlijk) al dunner was geworden, voorafgaand aan het ontstaan van de erosiekuil. De vaste laag spiijk heeft de rivierbodem, waar nu het erosiegat is ontstaan, kwetsbaarder gemaakt voor het ontstaan van erosiegaten.
3. De variërende dikte van de gepleisterde toplaag van de bodem én sterk variërende samenstelling van het onderliggende substraat (bodem onder de toplaag) draagt sterk bij aan het feit dat de erosie op dit traject zich uit in de vorm van een kuil, zie ook 1c).

4 Beheeradvies

4.1. Vormen van beheer

Er zijn grofweg een drietal beheervormen denkbaar voor het lokale zomerbed om toekomstig te verwachten gevolgen van de erosiekuil te mitigeren:

1. Niet ingrijpen;
2. Verstevenen van het lokale zomerbed;
3. Herstellen van het lokale zomerbed;
4. Extra ruimte creëren voor de rivier

4.2. Niet ingrijpen

De Boven-Rijn is een dynamisch traject en er ontstaan vaker (kleinere) erosiekuilen. Tijdens de hoogwaterafvoergolf van 2021 is bijv. parallel aan de sediment suppletie Boven-Rijn een erosiekuil ontstaan ter hoogte van rkm 864. Deze heeft niet tot hinder geleid en is door natuurlijke dynamiek en aanvoer van sediment weer opgevuld en niet nogmaals verschenen tijdens het afgelopen hoogwaterseizoen.

Hoewel ook de erosiekuil Spijk gedurende het laagwaterseizoen grotendeels zal migreren en opvullen, is niets doen in dit geval niet aan te raden. Erosiekuilen herstellen langdurig alleen indien de oorzaak een tijdelijk en / of dynamisch karakter kent. De effecten van de sediment suppletie op de Boven-Rijn (rkm 864) doven langzaam uit omdat de suppletie mobiel is. Het gehele gebied kan zich als het ware aanpassen richting een evenwicht, er zijn geen harde obstakels. De oorzaak van de erosiekuil bij Spijk kent door de aanleg van de overnachtingshaven (OH) Spijk wel een permanent en plaat vast karakter. Bij toekomstige opeenvolgende Lobith afvoeren > 5.000 m³/s zal de kuil wederom rond deze locatie ontstaan, met alle hinder van dien. Er wordt dan ook aanbevolen om wél in te grijpen.

4.3. Verstevenen van het lokale zomerbed

Het lijkt op het eerst gezicht een logisch concept om het zomerbed lokaal te verstevenen door de kuil te vullen met materiaal dat significant hogere mobiliteitseigenschappen (robuuster tegen erosie) heeft, zoals met keien en stenen. Hierdoor zal de lokale erosiegevoeligheid inderdaad afnemen. Echter, het hele gebied parallel aan de vaste laag Spijk is gevoelig voor erosie en een lokale versteving creëert juist meer bodemdynamiek met als gevolg dat de kans op het ontstaan van nieuwe kuilen en erosiegolven (Arbós, et al., 2024) vrijwel zeker zal toenemen. Hetgeen op termijn niet bijdraagt aan een stabiele bodemligging. Er wordt dan ook aanbevolen het lokale zomerbed niet te verstevenen, maar te herstellen.

4.4. Herstellen van het lokale zomerbed – aanbevolen concept

Met herstellen van het zomerbed wordt bedoeld dat niet alleen de bodemligging wordt hersteld (opvullen van de kuil) maar dat ook de lokale mobiliteit wordt hersteld. Hiermee wordt bedoeld dat de kuil wordt opgevuld met sediment dat dezelfde eigenschappen heeft als de oorspronkelijke bodemopbouw. Door aan te sluiten bij de oorspronkelijk mobiliteit van het materiaal wordt de lokale bodemdynamiek (= erosie en sedimentatie patronen) niet versterkt waardoor het omliggende zomerbed niet of slechts beperkt zal reageren. Dit voorkomt nog grotere erosievormen.

Bij het vullen van de kuil kan worden gekozen voor materiaal dat “een fractie” grover is dan het aanwezige substraat. De afdekkende pleisterlaag moet wél zo goed als mogelijk aansluiten bij de lokale eigenschappen.

Deze maatregel zal het ontstaan van de erosiekuil bij Spijk niet meteen voorkomen. Deze zal periodiek opnieuw kunnen ontstaan waarna het herstel weer moet worden herhaald. Echter, de kuil wordt zo “op zijn plek gehouden” waardoor de hinder enigszins voorspelbaar wordt terwijl het onderliggend substraat beetje bij beetje wordt verstevigd waardoor de hinder beperkt blijft. Het extra materiaal dat wordt gesuppleerd en op transport gaat, draagt positief bij aan de sedimentaanvoer en daarmee aan een stabielere ligging van de bodem van benedenstroomse trajecten.

4.5. Rivierverruiming

Een meer duurzame oplossing zou op termijn gezocht kunnen worden in rivierverruiming (bijv. in Duitsland in de zuidelijke gelegen uiterwaard tegenover de OH Spijk). Hierdoor kunnen de verhoogde stroomsnelheden t.g.v. de overnachtingshaven Spijk bij morfologisch relevante Lobith afvoeren (tussen 4.000m/s en 8.000m/s) weer wat afnemen. Hierdoor neemt de kans op zomerbederosie af.

5 Referenties

Arbós C. Y., A. Blom, S.R. White, R. Patzwahl, R.M.J. Schielen (2024). Large-scale Channel Response to Erosion-Control Measures.

<https://doi.org/10.1029/2023WRO36603>

Denderen, R.P. van, R.M.J. Schielen, A.J. Paarlberg, M.J.J. Reneerkens, D.C.M. Augustijn (2024). Analyzing natural bed-level dynamics to mitigate the morphological impact of river interventions. <http://doi.org/10.1002/rra.4270>

Gruijters, S.H.L.L. (2001). *De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Pannerdensch Kop*. TNO rapport NITG 01-166-B.

Hoffmans, G.J.C.M. en H.J. Verheij (1997). Scour manual

Huisman, Y., H. Koopmans, A. Wiersma, T. De Haas, K. Berends, K. Sloff, E. Stouthamer (2021). Lithological control on scour hole formation in the Rhine-Meuse Estuary. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107720>

Rijn, L.C. Van (1983). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.

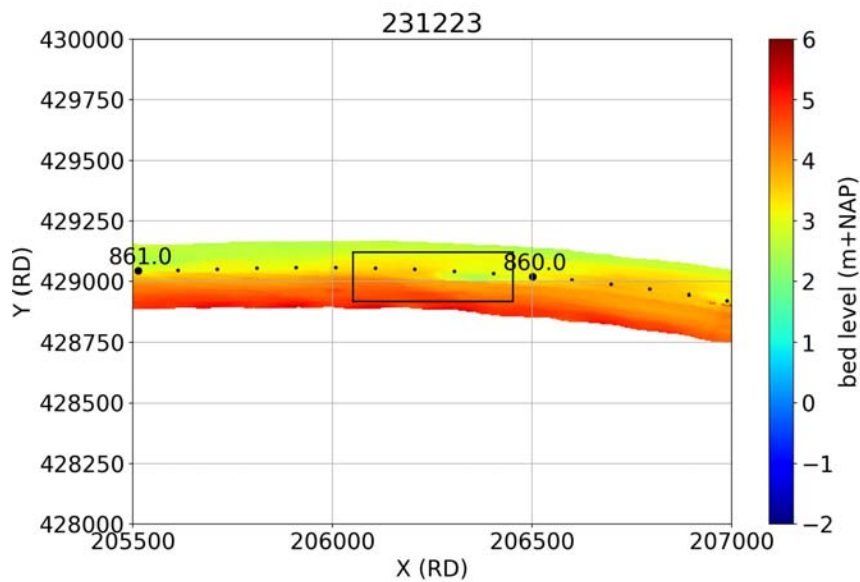
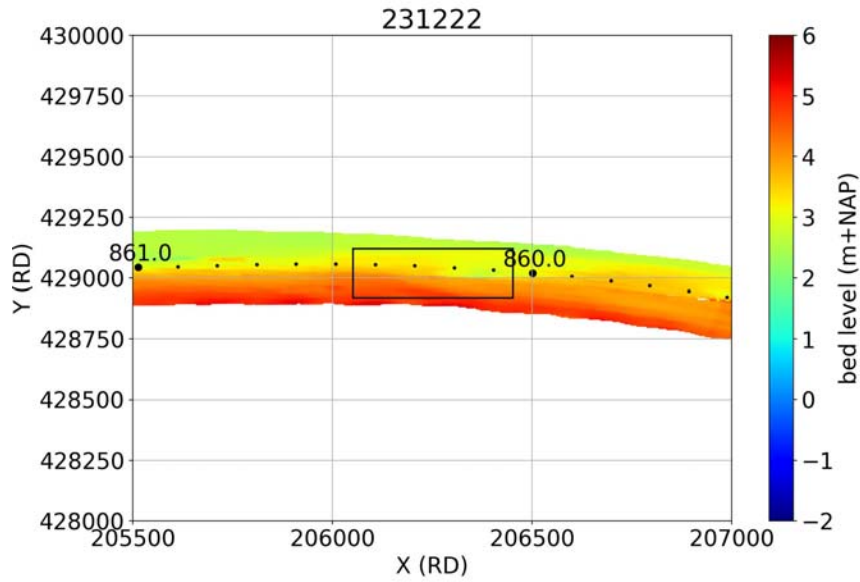
Sieben, A. (2011). Methodiek inschatting morfologische effecten in het zomerbed door lokale rivieringrepen

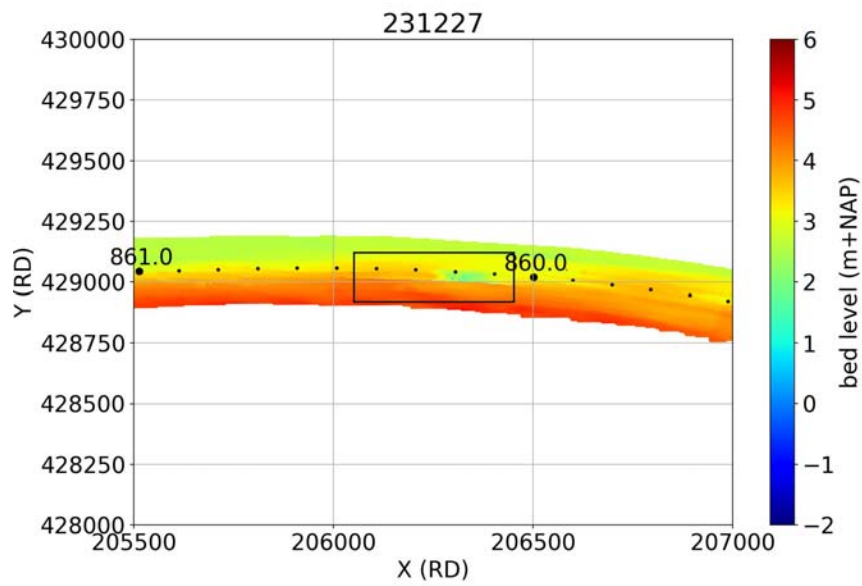
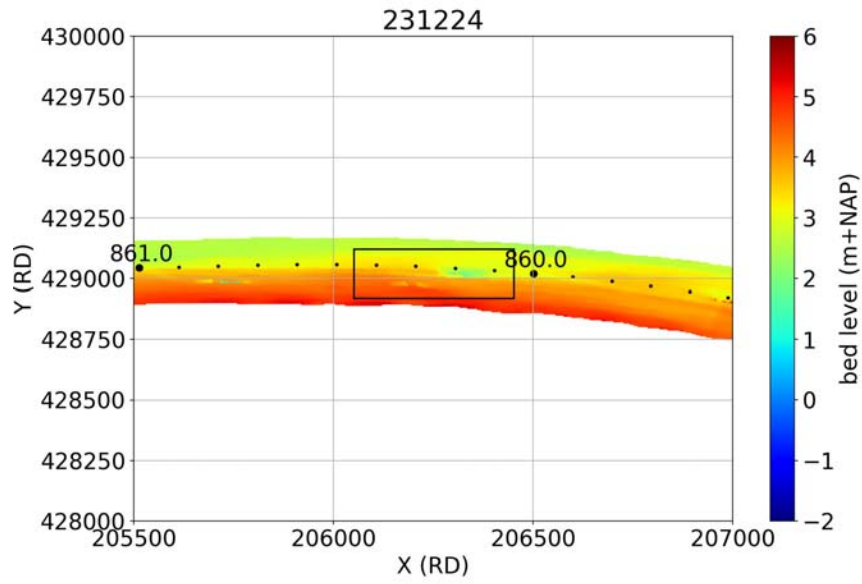
Sloff, K. (2022). Ruimtelijke en temporele interpretatie van bemonstering bodemsamenstelling Rijntakken. 11208033-012-ZWS-0001

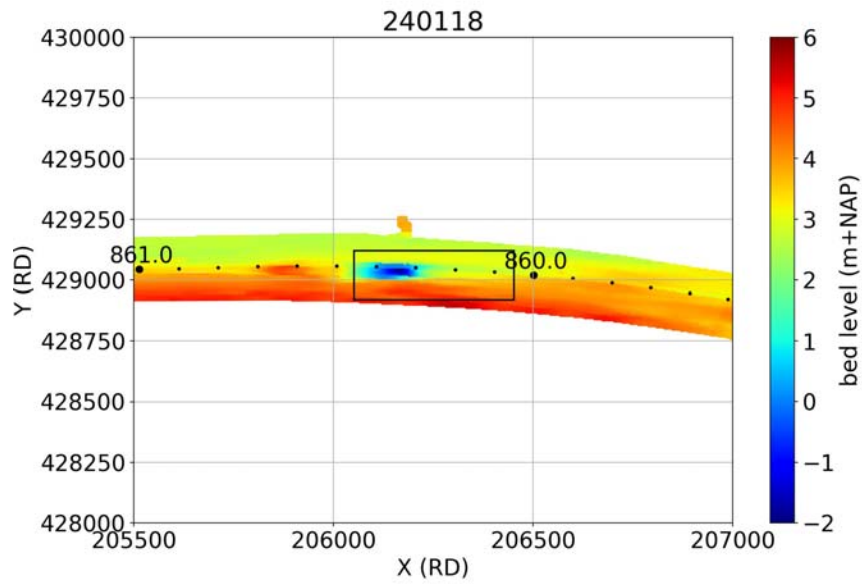
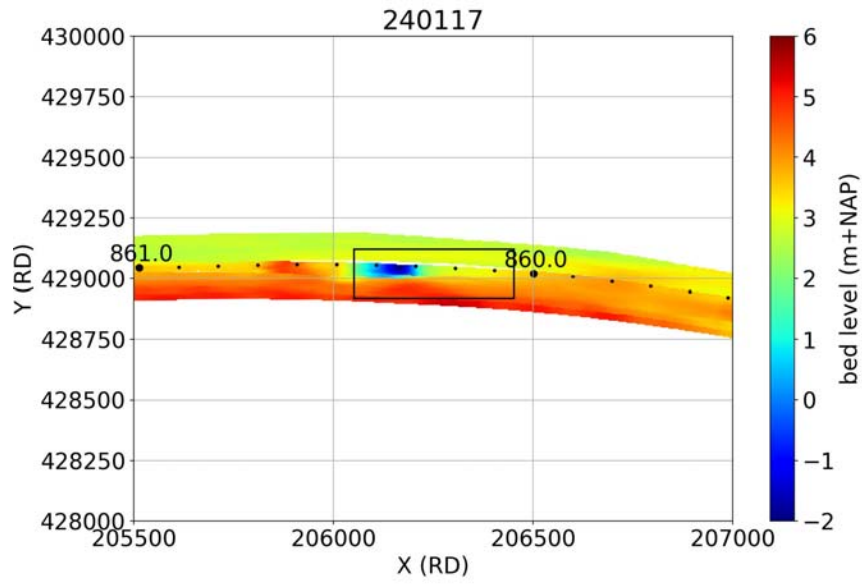
Witteveen+Bos (2015). Effectbeoordeling voorkeursvarianten. Milieueffectrapport Overnachtingshaven Lobith - deelrapportage rivierkunde AH660-1-225/15-014.816

WitteVeen +Bos (2022). Morfologische analyse extreme afvoeren Rijntakken. 133639/22-018.829

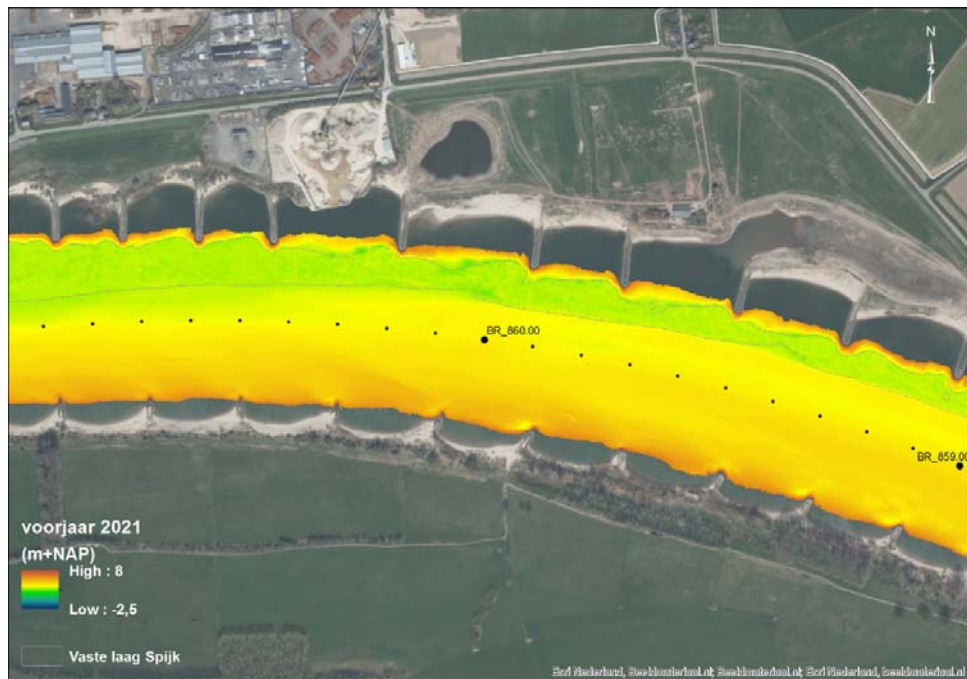
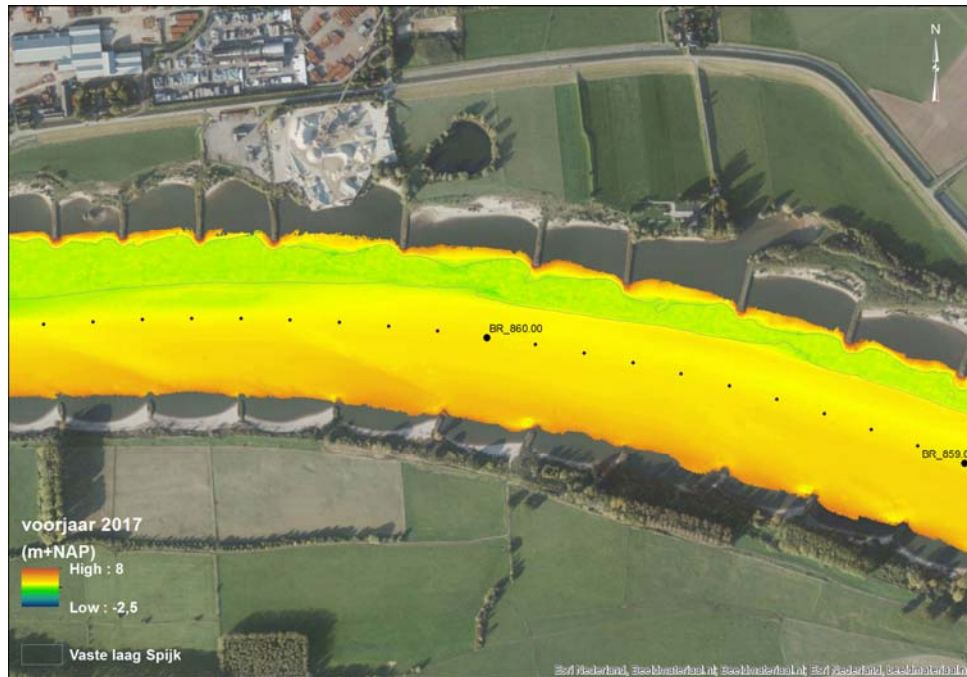
Bijlage 1 – Bodemkaarten op basis van COVADEM

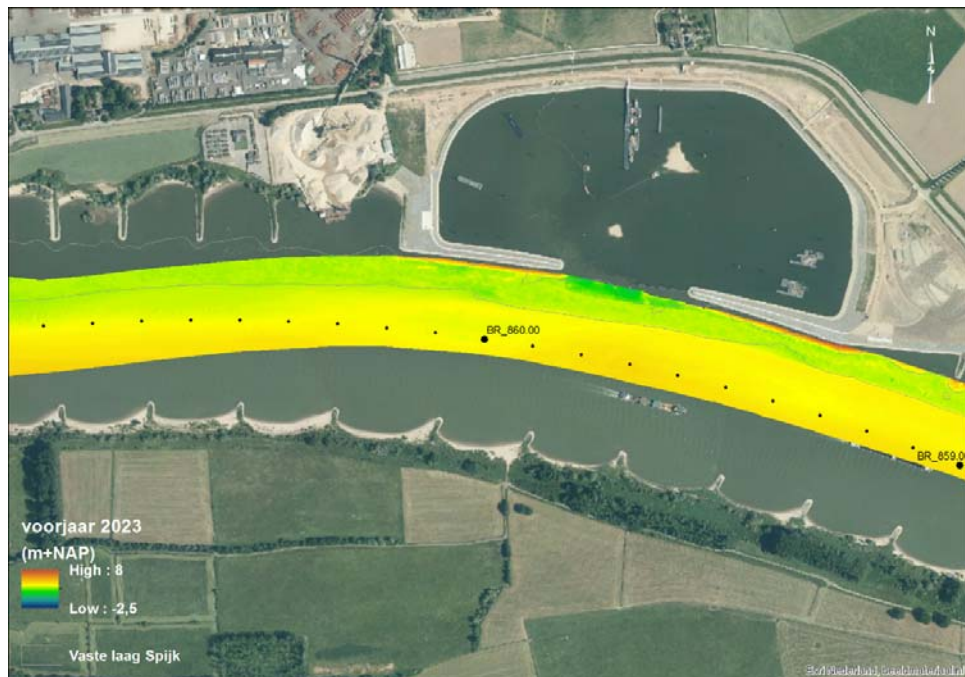
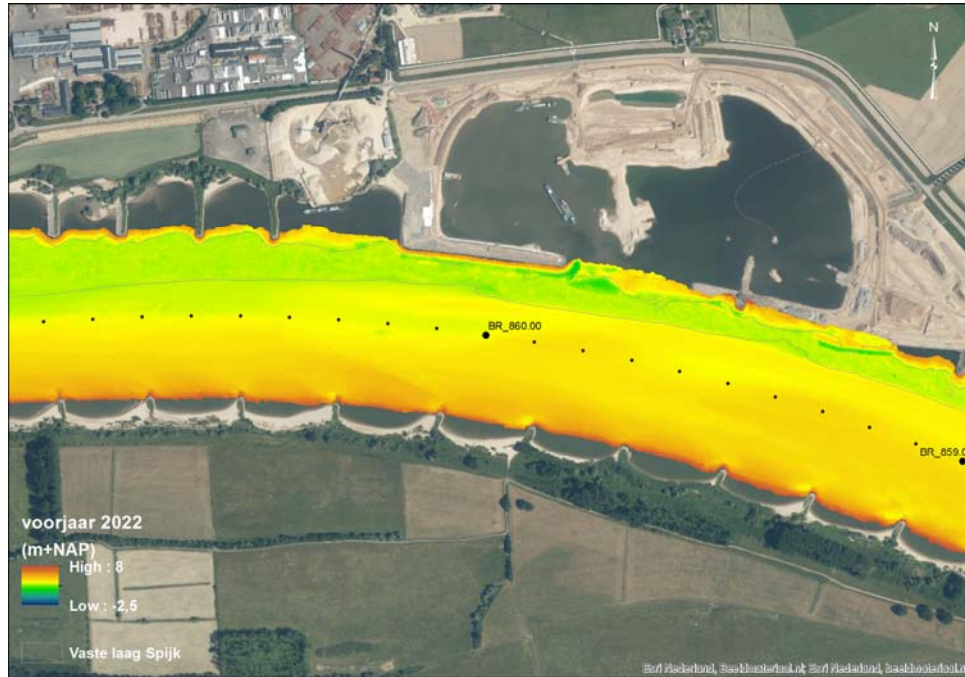


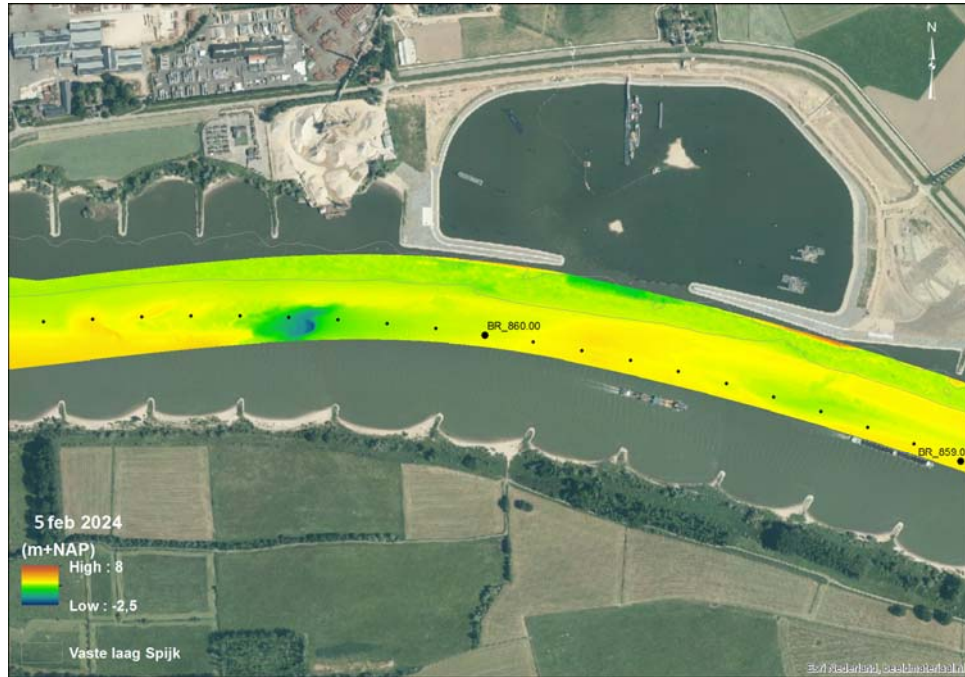




Bijlage 2 – Bodemkaarten op basis van multi-beam







Bijlage 3 – Bodemverschilkaarten op basis van multi-beam

