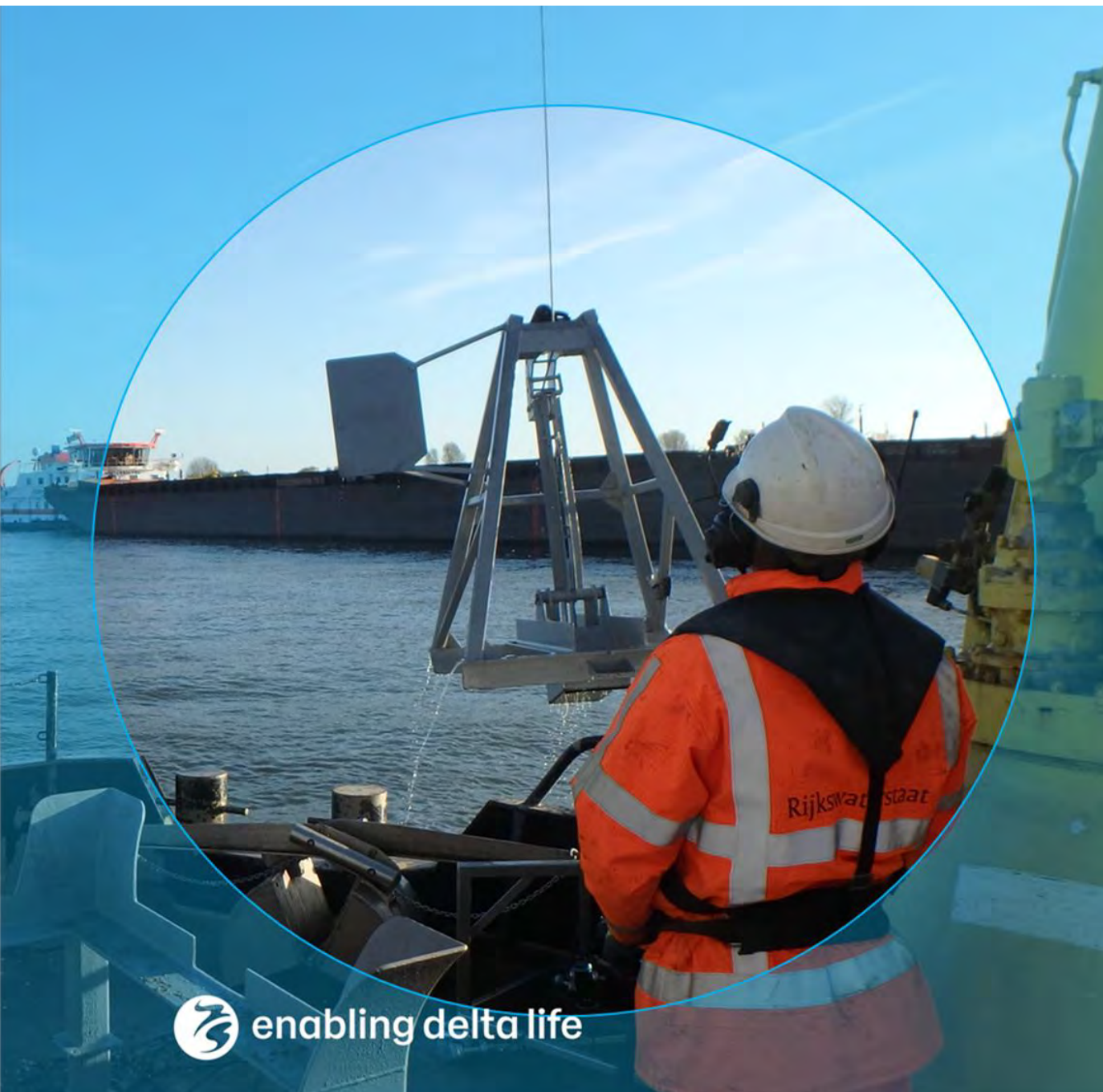


## Ruimtelijke en temporele interpretatie van bemonstering bodemsamenstelling Rijntakken



# Ruimtelijke en temporele interpretatie van bemonstering bodemsamenstelling Rijntakken

**Auteur(s)**

Kees Sloff

## Ruimtelijke en temporele interpretatie van bemonstering bodemsamenstelling Rijntakken

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Arjan Sieben, Yvo Snoek (RWS WVL) en Michiel Reneerkens (RWS ON)
<b>Referenties</b>	KPP Rivierkunde 2021, 2022
<b>Trefwoorden</b>	Morfologie, sedimenttransport, bodemsamenstelling, korreldiameter, Rijntakken

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	23/12/2022
<b>Projectnummer</b>	11208033-012
<b>Document ID</b>	11208033-012-ZWS-0001
<b>Pagina's</b>	129
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Kees Sloff	

# Samenvatting

Periodieke opname van de bodemsamenstelling in de Rijntakken geeft inzicht in de lange termijn systeemontwikkeling van de Rijn. Echter, afwijkingen in bodemsamenstelling in tijd en ruimte zijn groot. Vanwege het belang van de bodemsamenstelling voor de morfologische modellering en het beheer van de rivier, is het belangrijk grip te krijgen op de onzekerheden en de oorzaken van variabiliteit in de gegevens.

In deze studie is gebruik gemaakt van een groot aantal gegevens-sets van bodembemonsteringen. Analyses zijn gemaakt van beschikbare zeefkrommes en percentielen van het bimodale sediment. Omdat de monsters allen worden genomen van de toplaag van de bedding (tot 1 á 2 dm diepte) worden deze sterk beïnvloed door lokale condities, maar zijn wellicht niet representatief voor de gehele actieve laag (de laag die bijdraagt aan sedimenttransport en morfologie). De resultaten tonen significante variaties in karakteristieke diameters (zoals  $D_g$ ) en zandgehalte. In dit rapport is op basis van literatuur en analyse van de gegevens een overzicht gegeven van bronnen van de waargenomen variabiliteit. Naast de methode van monsternamen en verwerking, zijn ruimtelijke en temporele processen beschreven die optreden in de Rijntakken. Veel waarnemingen zijn goed te duiden met bestaande kennis, en te reproduceren met de theoretische concepten, bijvoorbeeld bochtsortering en stroomafwaartse verfijning. Maar dat geldt niet voor alle waarnemingen en processen. Zo is het significante verschil tussen samenstelling links (zand) en rechts (zand en grind) in de Midden-Waal toe te schrijven aan scheepvaart, maar is niet onderzocht welke processen rond de schepen deze sortering opwekken. Het ontbreken van deze kennis leidt tot onzekerheden in voorspellingen (modellen) en tot speculatie over het gedrag en de oorzaken.

In November 2021 zijn circa 50 monsters genomen van de bedding rond de Pannerdensche Kop en Boven Rijn, met het doel de lokale en temporele variaties in relatie met eerdere bemonsteringen (met name 2020) te signaleren en inzicht te krijgen in variabiliteit in ruimte en tijd. Monsters zijn genomen met zowel een Hamon happer als een Van Veen happer. De verschillen in geometrisch gemiddelde diameter  $D_g$  tussen de 2 meetmethodes zijn in de orde van 50%, maar kunnen oplopen tot een factor 2. Daarbij moet worden opgemerkt dat lokale variaties in samenstelling (patches) hier ook een rol kunnen spelen omdat de happers niet precies op dezelfde plek op de bodem kunnen worden neergelaten (door de stroming). De nieuwe gegevens tonen grote spreiding in karakteristieke diameters op korte afstanden bij beddingvormen en vaarsporen (effect scheepvaart), maar binnen deze spreiding zijn de waarden vergelijkbaar met de 2020 campagne.

Vanwege de variabiliteit in bodemsamenstelling is het noodzakelijk voor de ruimtelijke interpolatie en onderlinge vergelijking van monsters, in ruimte en van verschillende campagnes, geostatistische methoden toe te passen die op correcte wijze omgaan met de onzekerheden. Om dit te illustreren zijn deze methoden uitgewerkt en toegepast voor testen van twee hypothesen voor de gegevens van de Waal, namelijk of er een verschil is tussen gemiddelde diameter  $D_g$  van 1995 en 2020 campagne, en of er een verschil is in gemiddelde diameter tussen linker- en rechterzijde van de rivier. Beide hypothesen geven een statistisch significant verschil in diameters. Ook is getoond hoe zeefkromme-data verder statistisch kunnen worden gekarakteriseerd en geclusterd wat mogelijkheden biedt voor meer gedetailleerde vergelijking van monsters, en meer gerichte bemonstering. Uit deze toepassing wordt geconcludeerd dat verdere uitwerking van deze methoden een grote potentie biedt voor toekomstige campagnes en modellering.

In de numerieke 1D en 2D morfologische modellen wordt gerekend met het actieve laag concept, waarbij veranderingen in sortering redelijk zijn te reproduceren. Voor de huidige praktijk voldoet het concept goed, en is de gemiddelde berekende samenstelling redelijk goed vergelijkbaar met de waarnemingen. Echter, de details van de processen die leiden tot variabiliteit in samenstelling worden slechts ruw benaderd of ontbreken in geheel. Recente vooruitgang is geboekt met implementatie van functionaliteit voor parametrisatie van verticale sortering in combinatie met 'semi-vaste lagen'. Maar invloed van aansnijden van fijnzandige onderlagen, invloed van scheepvaart of details van sortering op de riviersplitsingen zijn niet of slechts beperkt te simuleren. Dergelijk onderzoek leidt tot geleidelijke verbetering van modellering en begrip van het complexe samenspel tussen stroming, bodemruwheid (beddingvormen), sedimenttransport, en actieve laag sortering.

Het rapport geeft een aantal aanbevelingen voor toekomstige bemonsteringen. Daarbij is onderscheid gemaakt in:

- bemonsteringen voor rivierbeheer: grootschalige campagnes iedere 5 à 10 jaar herhalen met procedures, locaties en methoden gelijk aan de campagne in 2020, met een aantal extra monsters op specifieke locaties voor inzicht in variabiliteit;
- projectgerelateerde bemonsteringen: bijvoorbeeld voor inschatten effecten en risico's bij ingrepen;
- bemonsteringen voor onderzoek: bijvoorbeeld meer gerichte metingen met hogere frequentie op specifieke locaties voor inzicht in dynamiek, en boringen voor inzicht in verticale sorteringsprocessen en betrouwbaarheid van hap-monsters.

Uit deze studie concluderen we dat vanwege bimodaliteit van het sediment, de geometrische diameter  $D_g$  en een scheiding in zand en grind percentages, een betere karakterisering geeft dan de sterk variabele mediane diameter  $D_{50}$ . Verder blijven de kleinschalige ruimtelijke variaties ('patches') in samenstelling zorgen voor variabiliteit/onzekerheid in de monsters, ook al zou de resolutie (nu elke kilometer) van bemonstering verhoogd worden (bijvoorbeeld elke 100 m). De inzet van geostatistische technieken voor de verwerking en interpretatie van de metingen is daarom aan te bevelen. Op basis van analyse van gegevens van 1995 en 2020 voor de Boven Rijn en Waal volgt dat door verschuivingen in zand en grindfractie de Boven Rijn geleidelijk is vergrofd over de volle breedte en lengte. Echter voor de Waal is dit niet duidelijk aantoonbaar binnen de spreiding van monsters in tijd en in ruimte. Het kan worden verondersteld dat veranderingen in samenstelling zijn te relateren aan menselijke ingrepen, zoals de normalisaties. Er zijn hypothesen over de oorzaken van vergroving in de Boven Rijn, maar deze zijn onvoldoende onderbouwd. Het is aannemelijk dat hier sprake is van een cumulatief effect van maatregelen zowel boven- als benedenstrooms.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Gegevens</b>	<b>10</b>
2.1	Algemeen	10
2.2	Statistische eigenschappen van sedimentmonsters	14
2.3	Statistiek van ruimtelijke variaties	19
2.4	Gemeten bodemsamenstelling	21
2.5	Sedimentverdeling op Pannerdensch Kop	26
2.6	Proefbemonstering november 2021	31
<b>3</b>	<b>Bronnen van variaties in de bodemsamenstelling</b>	<b>37</b>
3.1	Inleiding	37
3.2	Bemonstering	38
3.2.1	Mechanische meetinstrumenten en methode	38
3.2.2	Onzekerheden ten aanzien van de bemonsteringsmethode met bodemhappers	41
3.2.3	Onzekerheden met betrekking tot volume van monster	42
3.2.4	Scheiden en verwerking van de monsters in het lab	45
3.3	Uitzeving en sortering	47
3.4	Variabiliteit in ruimte (horizontaal)	50
3.5	Variabiliteit in diepte	60
3.6	Variabiliteit in tijd	68
3.7	Variabiliteit overzicht	74
<b>4</b>	<b>Statistical analysis of grain size samples from the river Waal</b>	<b>75</b>
4.1	Introduction	75
4.2	Plan of approach	75
4.2.1	Hypothesis testing	75
4.2.2	Parameter estimation	77
4.2.3	Model selection criterion	78
4.3	Analysis results	78
4.3.1	Hypothesis testing for Q1 and Q2	78
4.3.2	Parameter estimation for Q1 and Q2	79
4.3.3	Parameter estimation for sieving curves	80
4.4	Conclusions	81
4.5	Recommendations for further steps	81
<b>5</b>	<b>Toepassing in modellen</b>	<b>83</b>

<b>6</b>	<b>Aanbevelingen voor monitoren en analyseren van bodemsamenstelling</b>	<b>86</b>
6.1	Discussie	86
6.2	Bemonstering	86
6.3	Methode voor verwerking meetdata	88
<b>7</b>	<b>Conclusies</b>	<b>89</b>
<b>8</b>	<b>Referenties</b>	<b>92</b>
<b>A</b>	<b>Verdelingen</b>	<b>96</b>
A.1	Boven-Rijn	96
A.2	Pannerdensch Kanaal	98
A.3	Waal	99
A.4	Waal 1995	102
<b>B</b>	<b>Data</b>	<b>105</b>
B.1	Gegevens Boven-Rijn	105
B.2	Gegevens duikerklok 2011	106
B.3	Gegevens en resultaten proefbemonstering november 2021	109
B.3.1	Tabellen	109
B.3.2	Bemonstering Waal	111
B.3.3	Bemonstering Boven-Rijn	117
B.3.4	Bemonstering Pannerdensch Kanaal	127

# 1 Inleiding

Periodieke opname van de bodemsamenstelling geeft inzicht in de lange termijn systeemontwikkeling van de Rijn. In het verleden is de bodemsamenstelling van de bedding van de Rijntakken bepaald: in 1951, 1966, 1974/1976, 1984, 1995 en 2020. Gezien de ruimtelijke en temporele resolutie van deze opnames behoorlijk beperkt is én de bemonsteringstechniek door de jaren is veranderd, vragen de gegevens om nadere duiding als het gaat om het gebruik ervan binnen RWS-toepassingen. De directe aanleiding voor een nadere analyse is de laatste grootschalige bemonstering van 2020 in de Rijntakken. Uit de verdere analyses van deze data hebben de onderzoekers een opvallende vergroving geconstateerd ten opzichte van eerdere bemonsteringen, met name ten opzichte van 1995 (en een aantal voorgaande jaren). Er zijn diverse mogelijkheden die ten grondslag kunnen liggen aan een dergelijke systematische afwijking, zowel door sorteringprocessen in de bedding als door de bemonsteringsmethodes. Omdat dergelijke systeemwijzigingen grote consequenties kunnen hebben voor de morfologie, voor de morfologische voorspellingen en voor het beheer van de rivieren, is het belangrijk grip te krijgen op de onzekerheden en variabiliteit in de gegevens. Vervolgens moet worden uitgezocht wat dit betekent voor toekomstige meetcampagnes.

In deze studie wordt ingegaan op de volgende onderzoeksvragen:

- a. Welke statistiek / methodiek is er nodig om een juiste vergelijking te maken tussen de dataset van 2020 en 1995, en mogelijk ouder?
- b. Hoe verhouden zich met name 2020 en 1995 data op riviertrajectniveau (indien mogelijk). Er wordt hiervoor gebruik gemaakt van de verwerkte gegevens van alle riviertakken en van projectanalyses van de monsters voor Boven-Rijn (o.a. suppletie proef) en Waal (o.a. langsdammen), en verwerking van gegevens door Claudia Ylla Arbos (TU-Delft);
- c. Wat zijn mogelijke oorzaken van waargenomen trends (als die waarneembaar zijn!) en wat de mogelijke gevolgen hiervoor zijn voor het bodembeleid van Rijkswaterstaat (als advies aan IRM).
- d. Wat kan worden geadviseerd over het toepassingsbereik van de verschillende parameters. Bijvoorbeeld wanneer en waarom gebruik je een  $D_g$  in plaats van een  $D_{50}$ ? Wat is beter, duidelijker voor welke toepassing?
- e. Wat kan worden geadviseerd over analyse methodieken in relatie tot de toepassing? Mag je drie korrelgroottes (links, as, rechts) middelen om te komen tot een representatieve korrelgrootte per kilometer? Over welke afstand in de lengterichting kun je korrelgroottes het beste middelen in welke situatie?
- f. Welke mogelijke invloeden spelen een rol bij de variabiliteit in ruimte en tijd, die relevant zijn voor de interpretatie van de gegevens (bijvoorbeeld sorteringseffecten, hoogwater, scheepvaart, beddingvormen, etc.)?
- g. Hoe houdt de nieuwe data zich tot de huidige modelschematisatie, en wat wordt op basis daarvan aanbevolen? Is er een actualisatie nodig?
- h. Wat zijn consequenties voor lopende adviezen ten aanzien van maatregelen zoals suppleties (ook i.r.t. IRM)
- i. Welke aanbevelingen kunnen worden gegeven in relatie tot bovenstaande advies voor toekomstige bemonsteringsmethoden / plannen. Welke zeefdiameters zijn noodzakelijk, wat is de gewenste ruimtelijke en temporele resolutie?



Het onderzoek bouwt voort op kennis en ervaring uit eerdere studies en analyses voor Rijkwaterstaat, Universiteiten en WL/Deltares. WL/Deltares voert al meer dan 50 jaar toegepast onderzoek uit naar ontwikkeling van bodemsamenstelling in de Rijntakken. Daarbij gaat het niet alleen over de gegevens zelf, maar ook de praktische consequenties.



*Figuur 1-1 Schaalmodel Pannerdensche Kop bij het Waterloorkundig Laboratorium in de Voorst in 1981: op achtergrond staat de loods met zeefinstallatie voor het sediment-recirculatiesysteem (Sloff et al., 2003)*

## 2 Gegevens

### 2.1 Algemeen

In de zeefanalyses voor de bodemmonster zijn de zeven toegepast zoals weergegeven in Tabel 2-1. De fractie fijner dan 63  $\mu\text{m}$  is slib. Materiaal met diameter kleiner dan 2 mm is zand, en erboven is grind (of stenen als diameter > 63 mm).

Tabel 2-1 Zevenset gebruikt voor zeefanalyses Rijntakken

N0	D- onder (mm)		D- boven (mm)	$\phi$ - onder (-)		$\phi$ - boven (-)	NL classificatie	Wentworthschaal
1	0.063	-	-	-3.99	-	-	Slib (fijne delen)	silt+klei
2	0.063	-	0.09	-3.99	-	-3.47	Uiterst fijn zand	Uiterst fijn zand
3	0.09	-	0.125	-3.47	-	-3.00	Zeer fijn zand	Zeer fijn zand
4	0.125	-	0.18	-3.00	-	-2.47	Zeer fijn zand	Zeer fijn zand
5	0.18	-	0.25	-2.47	-	-2.00	Matig fijn zand	Matig fijn zand
6	0.25	-	0.355	-2.00	-	-1.49	Matig grof zand	Middel zand
7	0.355	-	0.5	-1.49	-	-1.00	Zeer grof zand	Middel zand
8	0.5	-	0.71	-1.00	-	-0.49	Uiterst grof zand	Grof zand
9	0.71	-	1	-0.49	-	0.00	Uiterst grof zand	Grof zand
10	1	-	1.4	0.00	-	0.49	Uiterst grof zand	Zeer grof zand
11	1.4	-	2	0.49	-	1.00	Uiterst grof zand	Zeer grof zand
12	2	-	2.8	1.00	-	1.49	Fijn grind	Erg fijn grind
13	2.8	-	4	1.49	-	2.00	Fijn grind	Erg fijn grind
14	4	-	5.6	2.00	-	2.49	Fijn grind	Fijn grind
15	5.6	-	8	2.49	-	3.00	Matig grof grind	Fijn grind
16	8	-	11.2	3.00	-	3.49	Matig grof grind	Middel grind
17	11.2	-	16	3.49	-	4.00	Matig grof grind	Middel grind
18	16	-	22.4	4.00	-	4.49	Zeer grof grind	Grof grind
19	22.4	-	31.5	4.49	-	4.98	Zeer grof grind	Grof grind
20	31.5	-	45	4.98	-	5.49	Zeer grof grind	Zeer grof grind
21	45	-	63	5.49	-	5.98	Zeer grof grind	Zeer grof grind
22	63	-	90	5.98	-	6.49	Stenen	Stenen
23	90	-	-	6.49	-	-	Stenen	Stenen

Opgemerkt moet worden dat de classificaties in de rechter kolommen van de tabel niet helemaal in overeenstemming zijn met de meest recente NEN-EN-ISO 14688-1 normering voor grondbeschrijving, als opvolger van de NEN 5104 normering. De grootste wijzigingen in de nieuwe normering hebben betrekking op cohesieve grond, en zijn niet relevant voor de gepresenteerde analyses in de Rijntakken. Wel van belang is dat de ISO 14688-1 normering slechts 3 fracties kent voor zand, terwijl dat er in NEN 5104 nog 6 waren. Voor de uniformiteit van databases en eerdere bemonstering, wordt voor de nationale toepassing aanbevolen de fijnere verdeling toe te passen (klasse grenzen zijn ongewijzigd).

Een ander belangrijk onderscheid is dat in de ISO 14688-1 normering een monster als zand of grind wordt geclassificeerd als meer dan 50 % van het monster uit zand respectievelijk grind bestaat. Op basis van NEN 5104 werd een monster al als grind geclassificeerd bij meer dan 30 % grinddeeltjes. De naamgeving van de mengsels die het meest zijn waargenomen in de Rijntakken is gepresenteerd in Tabel 2-2. In boorprofielen komen ook andere grondsoorten voor, maar deze zijn niet in de tabel opgenomen.

Tabel 2-2 Meest voorkomende grondsoorten in de bemonstering van de toplaag van de Rijntakken (conform NEN-EN-ISO 14688-1, zie ook BRO (2021))

Waarde	Omschrijving
grind	Grove minerale grond, waarvan de grove fractie bestaat uit grind (2 mm < D < 63 mm) zonder waarneembare bijmenging.
zwakZandigGrind	Grove minerale grond, waarvan de grove fractie voor meer dan 50 % uit grind en voor 5 tot 20 % uit zand bestaat.
sterkZandigGrind	Grove minerale grond, waarvan de grove fractie voor meer dan 50 % uit grind en voor meer dan 20 % uit zand bestaat.
Zand	Grove minerale grond, waarvan de grove fractie uit zand bestaat, zonder waarneembare bijmenging.
zwakGrindigZand	Grove minerale grond, waarvan de grove fractie voor meer dan 50 % uit zand bestaat, en die verder uit fijn materiaal bestaat, dat zich gedraagt als silt.
sterkGrindigZand	Grove minerale grond, waarvan de grove fractie voor meer dan 50 % uit zand bestaat, en die voor meer dan 20 % uit grind bestaat.

Hieronder volgt een overzicht van gegevens (bronnen en analyses) gebruikt in deze studie:

**Gegevens 1951:**

- D50 waarden van Boven-Rijn, onderscheid links, midden en rechts; idem IJssel (ontbreekt Waal, Pann. Kan., en Nederrijn)

**Gegevens 1966:**

- Rapport Rijkwaterstaat (1966) Bodembemonstering rondom de Pannerdense Kop. Directie Bovenrivieren. Afdeling Studiedienst. Nota 67.14. Met 14 bijlagen
- Toepassing baggerbeugel en bodemmonsternemer RWS.
- Aanbeveling te monster om 200 à 250 m in plaats van 500 m voor toepassing in modelonderzoek.
- Percentielen D10, D50, D90 en Dm gepresenteerd in Ten Brinke (1997)

**Gegevens 1976:**

- Data in Ten Brinke (1997), percentielen D10, D50, D90 en Dm.

**Gegevens 1981:**

- Digitale gegevens afkomstig uit BfG database (oorsprong/levering van bestand niet bekend): Gegevens toplaag 0-10cm, Dm en groot aantal percentielen, km 764 – 865 (elke kilometer)

#### Gegevens 1992-2010:

- Duitse gegevens, zeefwaarden, verwerkt en aangeleverd via Roy Frings. Niederrhein km 640 - 867

#### Gegevens 1984:

- Data in Ten Brinke (1997), percentielen D10, D50, D90 en Dm.

#### Gegevens 1987 en 1993:

- Data van BfG (via Roy Frings), uit SedDB, verdeling op zeven voor Niederrhein km 840 t/m 865.4.

#### Gegevens 1995:

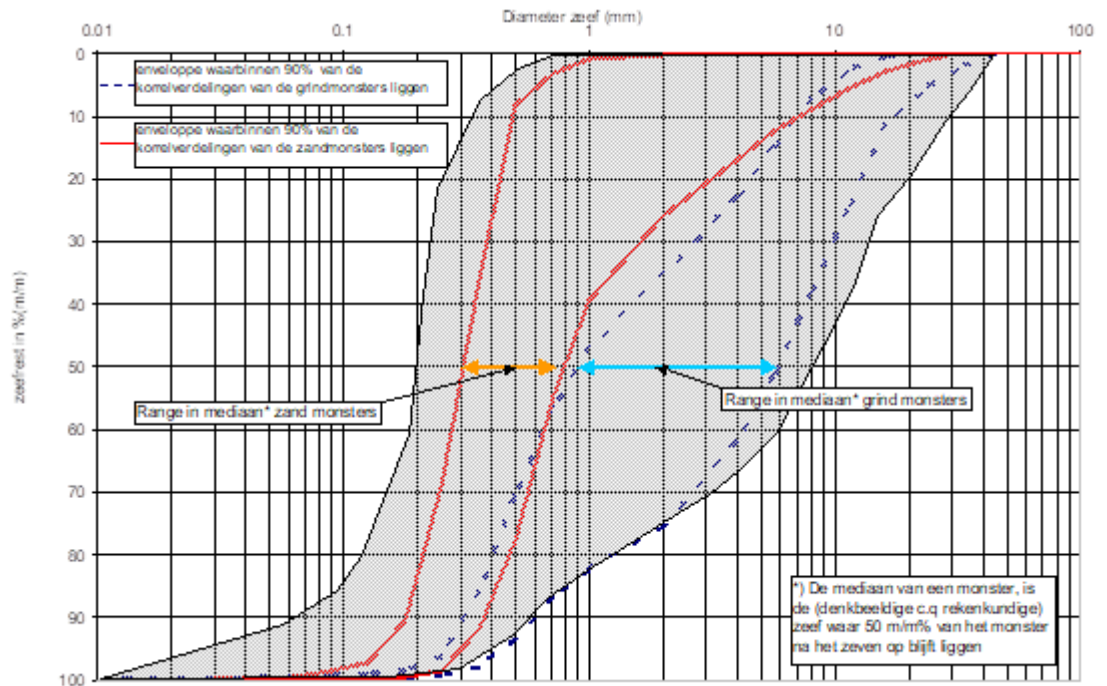
- Ten Brinke rapport (1997): zeefkrommes en percentielen D10, D50, D90 en Dm.

#### TNO/NITG data, 2000 en 2001:

- Gruijters, S.H.L.L., J.G. Veldkamp, J. Gunnink, J.H.A. Bosch (2001a) De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Pannerdensch Kop: Interpretatie van de meetresultaten. Eindrapport NITG 01-166-B, Nov. 2001.
- Gruijters, S.H.L.L., J.G. Veldkamp, J. Gunnink, J.H.A. Bosch (2001b) De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Bovenrijn / Niederrhein: Interpretatie van de meetresultaten. Eindrapport NITG 01-167-B, Nov. 2001.
- 102 vibro-core boringen, verdeeld over in totaal 16 dwarsraaien (NITG-TNO) op de PK, en 76 op de BR/NiedR; ca. 35 km seismische opnamen met de X-Star (NITG-TNO); ca. 35 km seismische opnamen met de Seistec Boomer (GeoMega); opnamen met een parametrisch echolood (INNOMAR, separaat gerapporteerd); opnamen grofheid rivierbedding (MEDUSA, separaat gerapporteerd); multibeam peiling (RWS). Van alle boringen zijn gemiddeld 4 monsters genomen die zijn aangeboden aan Fugro Ingenieursbureau voor de bepaling van de korrelgrootteverdeling.



Figuur 2-1 Overzicht onderzoekslocaties Pannerdensch Kop (verticaal gearceerd) en Bovenrijn Niederrhein (diagonaal gearceerd) in de TNO/NITG studies (Gruijters et al, 2001a, 2001b).



Figuur 2-2 Overzicht van de korrelgrootteverdelingen met classificatie zand en grind in het projectgebied van de Pannerdensch Kop. Weergegeven is de enveloppe waarbinnen per fractie 90% van alle gemeten waarden vallen. In grijs is het gehele bereik (zand en grind) van de monsters uit de Bovenrijn – Nederrijn weergegeven (Grujters et al, 2001a)

- Lithologie: De benaming 'actieve laag' is gekozen voor het sediment, dat gedurende het laatste decennium één of meerdere keren, vooral bij hogere afvoeren, verplaatst is. Het sediment, waaruit deze laag is opgebouwd, bestaat uit grind met wisselende bijmengingen van zand. Gemiddeld is de verhouding tussen de grind- en de zandfractie 50/50 in Bovenrijn en Waal en 75/25 in het Pannerdensch Kanaal.

#### Gegevens 2003/2004/2005:

- Data van BfG (via Roy Frings), uit SedDB, verdeling op zeven voor Nederrijn km 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, in 2005: 855, 855.5, 856, 862, 862.5, 863, 863.5, 864, 864.5

#### Gegevens 2008

- Boven-Rijn Km 855 – 867: percentielen, links, midden en rechts
- Bemonstering in relatie tot 'backscatter' onderzoek, Rijkswaterstaat en TU-Delft

#### Gegevens 1992-2010

- Duitse gegevens, zeefwaarden, verwerkt en aangeleverd via Roy Frings. Nederrijn km 640 - 867

#### Gegevens 2011

- Bemonstering met duikerklok Carl Straat op 20 april 2011. Zeefwaarden, verwerkt en aangeleverd via Roy Frings. Boven-Rijn km 860 (9 locaties in dwarsprofiel, 25 m afstand) en Waal km 880 (7 locaties in dwarsprofiel, orde 25 tot 50 m afstand)

#### Gegevens 2016 t/m 2022:

- Alle jaren, 2016, 2017, 2019 febr. (in plaats van 2018), 2019 sept., 2020, 2021, 2022

- Bemonstering gerelateerd aan de suppletieproeven Boven-Rijn (km 862-864, links van de rivieras). Monster op elke hele kilometterraai voor links en rechts, en tussenliggende halve kilometterraaien voor de as.
- Km 855 – 870: Percentielen, links, midden en rechts. Afstand tot as 70 m. Telkens 3 monsters in Waal (km 867.5-870) en 3 in Pannerdensch Kanaal (km 867.5-870).
- Verwerking van gegevens en analyse door Rijkswaterstaat (Arjan Sieben)

#### Gegevens 2017, 2018 en 2019:

- Bemonstering gerelateerd aan de pilot langsdammen, in de Waal bij Tiel.
- Van km 905 – 924, zowel links, as en rechts; in november 2017, april 2018 en mei 2019.

#### Gegevens 2019:

- Bemonstering ter plaatse van de suppletie in de Boven-Rijn in 2019.
- Bemonsterd door Martens en Van Oord, uitvoerder. Zowel monsters in de bak (18 april t/m 8 juli) als meerdere monsters van de bedding km 863.4 en 862.9 (op 9 mei, 12 juli, 17 juli).

#### Gegevens 2020:

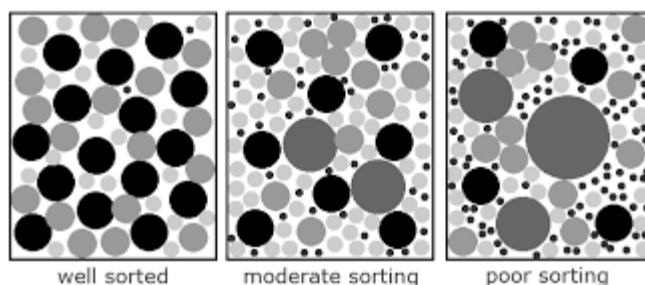
- Spreadsheet zeefanalyses (na herzeving), Boven-Rijn, Waal en Pannerdensch Kanaal
- Bemonsteringsatlas
- Foto's van monsters onder en boven water
- Logboek sedimentbemonstering (Excel file)
- Monsters links en rechts elke kilometer, en monster op de as elke halve kilometer
- Datum opname:
  - Boven-Rijn: 28 en 29 januari 2020;
  - Pannerdens Kanaal: 3 december 2019;
  - Waal: 4/12/2019 (km 940-952); 9/12 (km 930,5-939,5); 10/12 (km 916-930); 11/12 (km 907-916); 20/1/2020 (km 902,5-906,5), 22/1 (km 894-902), 23/1 (km 884,5-893,5), 24/1 (km 881-884), 27/1 (km 873-880,5) en 28/1/2020 (km 867-872,5).

#### Gegevens 2021:

- Aanvullende bemonstering, toetsing hypothesen gerelateerd aan voorliggend project
- Locaties in Boven-Rijn, Boven-Waal en Pannerdensch Kanaal
- Bemonstering met Hamon happer en van der Veen happer op dezelfde locaties.
- Zie paragraaf 2.6.

## 2.2 Statistische eigenschappen van sedimentmonsters

Figuur 2-3 toont verschillende typen mengsels die kunnen voortkomen in de rivierbedding. In principe is in grote delen van de bovenrivieren sprake van een slechte of matige sortering, met een mengsel van zand- en grindkorrels.



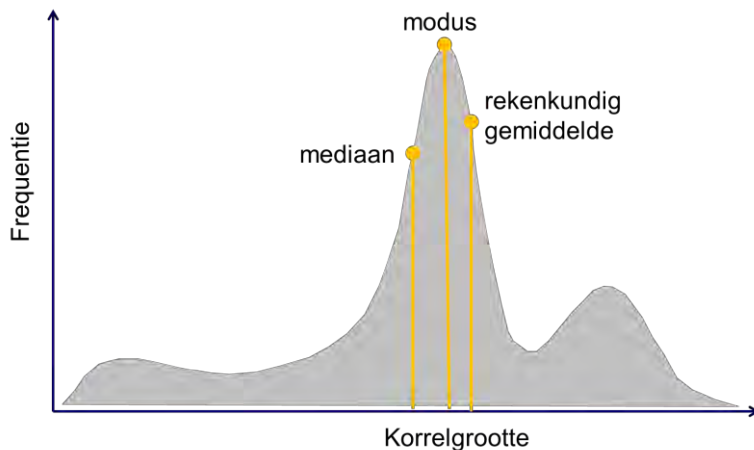
Figuur 2-3 Type zand-grind mengsels: goed-gesorteerd (links), matig gesorteerd (midden) en slecht gesorteerd (rechts)

De korreldiameter is een stochastische variabele. De statistische eigenschappen van het mengsel kunnen worden weergegeven door een kansverdeling. Deze wordt vaak afgeleid met behulp van een zeefanalyse, waarbij de zeefkromme op een log-normale of logaritmische grafiek wordt geplot, met op de horizontale as de diameter en de verticale as de frequentie, zie bijvoorbeeld Figuur 2-4. De kansverdeling kan op meerdere manieren worden bepaald, waarvan meest gebruikelijke:

- Mengsel zeven met een standaard zeven set, na drogen, en weging per gevangen zeeffractie: hier toegepast voor de Rijntakken. Dit geeft een verdeling van de massa (gewicht) van de korrels per fractie;
- Analyse met teltechniek, bijvoorbeeld door 'image-analysis' van foto opname, vooral geschikt voor grof sediment (i.v.m. resolutie van camera etc.). Opgemerkt moet worden dat het aantal korrels anders is dan het volume of de massa van de korrels: daarvoor moeten deze nog worden vermenigvuldigd met gewicht of volume per korrel;
- Analyse van verstrooiing van licht of intensiteit van licht op het mengsel, zoals laser-diffractie, wat een volume-verdeling oplevert. Hierbij kan ook de vorm van deeltjes worden meegenomen. De methode wordt vooral toegepast voor fijn sediment;
- Analyse door middel van meting van sedimentatiesnelheid in een waterkolom (valsnelheid), vaak toegepast voor slib (hydrometer).

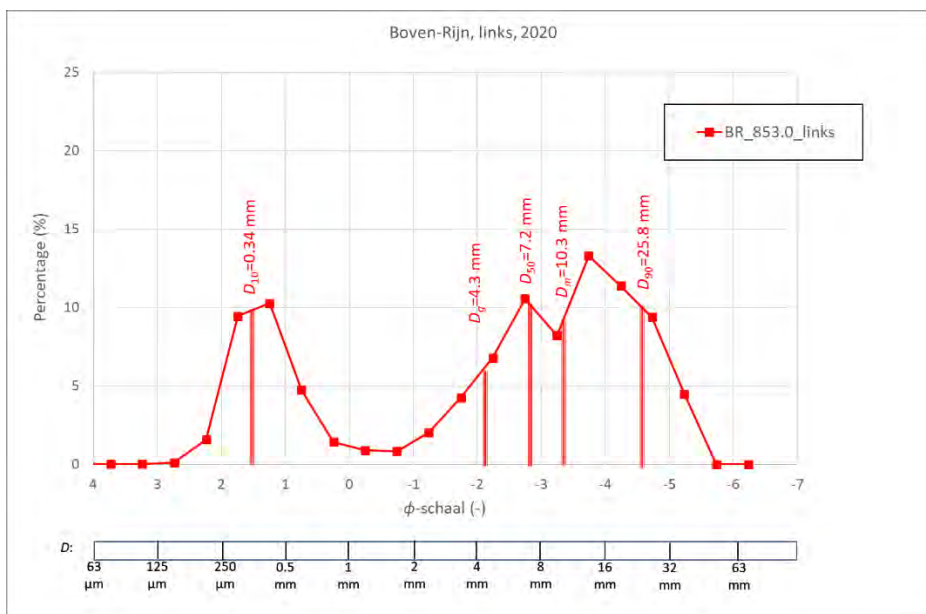
De eigenschappen van de kansverdeling zijn van belang voor het sedimenttransport en morfodynamiek. Het is gebruikelijk om een aantal relevante eigenschappen van de statistische verdeling af te leiden en te presenteren:

- Modus: De modus van het mengsel is de korrelgrootte met de hoogste frequentie, zie Figuur 2-4. Bij een symmetrische verdeling ligt de modus dicht bij het gemiddelde en de mediaan, bij een scheve verdeling niet. Een unimodale (kans)verdeling is een kansverdeling die slechts één modus heeft, oftewel de kansdichtheid heeft slechts één globaal maximum. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een normale verdeling. In de Rijntakken is echter, evenals veel andere rivieren, sprake van twee maxima, en wordt daarom bimodaal genoemd, zie Figuur 2-5. Als beide maxima niet even groot zijn is strikt genomen geen sprake van een bimodale verdeling, maar in de praktijk is het gebruikelijk ook de lokale maxima als modi te beschouwen.
- Gemiddelde ( $D_m$ ): diverse varianten van het "gemiddelde" worden gebruikt voor gesorteerde deeltjes, waarbij onderscheid kan worden gemaakt in diverse fysische eigenschappen (bijvoorbeeld volume versus massa) en interpolatie van de verdelingsfunctie. Meestal bepaalt het doel van de middeling welke als de meest geschikte methode kan worden beschouwd: massa is bijvoorbeeld relevanter voor sedimentatiesnelheid dan volume of oppervlak van de korrels. In deze paragraaf worden de verschillende middelingen en de mediaan van het mengsel gepresenteerd.
- Mediaan: De mediaan is de korreldiameter waarbij 50% van het gewicht van het mengsel grover is (of fijner), zie Figuur 2-4, ook wel  $D_{50}$  genoemd. De mediaan is minder geschikt voor bimodale verdelingen omdat de waarde vaak valt tussen de twee modi, en daarbij erg gevoelig is voor kleine verschuivingen in de verdeling (Sambrook Smith et al., 1997). De 50% waarde valt namelijk in het vlakke deel van de cumulatieve kansverdeling zoals getoond in Figuur 2-6.
- Percentielen: voor de spreiding in de verdeling worden vaak de percentielen gebruikt, die het de diameter aanduiden waaronder een specifiek gewichtspercentage fijner is. Bijvoorbeeld het 90<sup>e</sup>-percentiel ( $D_{90}$ ) is de diameter waaronder 90% van de korrelgrootteverdeling (aan gewicht) een kleinere diameter dan deze waarde heeft. De mediaan is het 50<sup>e</sup> percentiel.

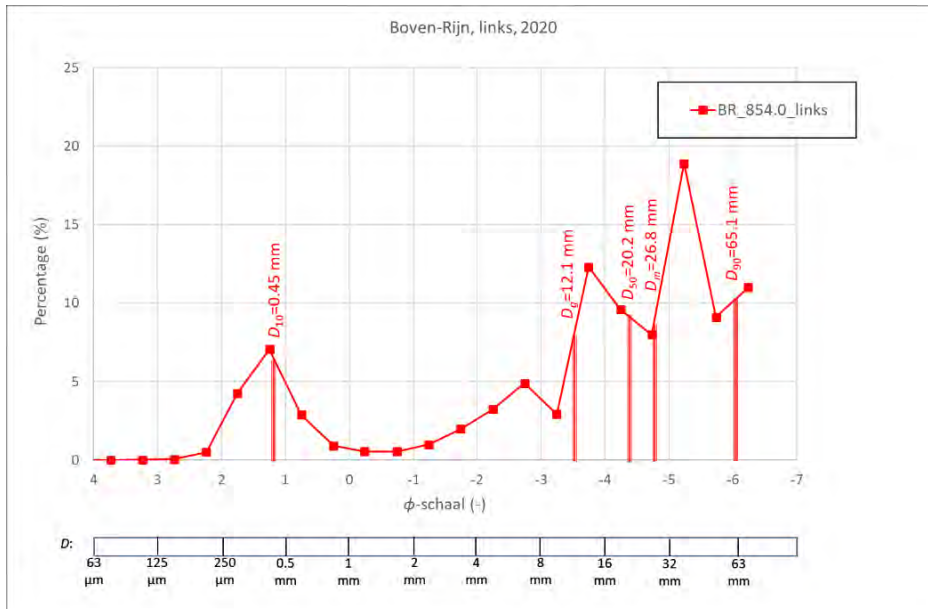


Figuur 2-4 Definitie van een willekeurige korrelgrootteverdeling van een sedimentsortering met verschillende waarden voor mediaan, gemiddelde en modus.

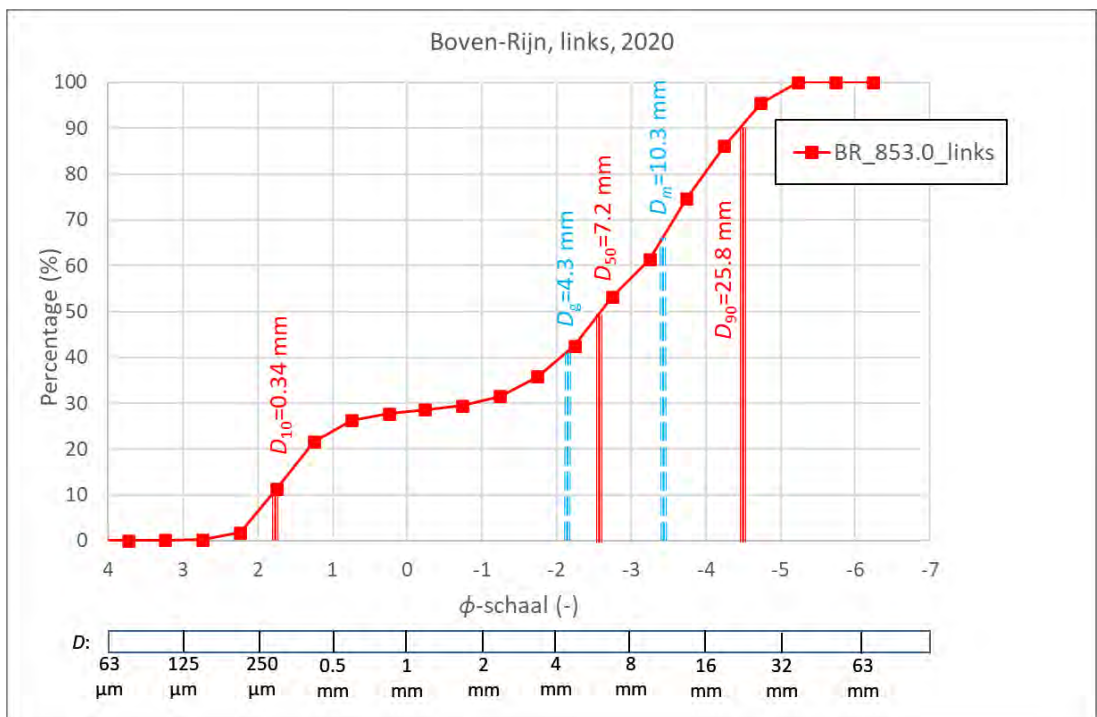
In Figuur 2-5 worden twee monsters getoond vanuit de Boven-Rijn bemonstering van 2020. De monsters illustreren dat het mengsel bimodaal is, met een *zandmodus* rond de 0,5 mm en een *grindmodus* rond 16 mm. De modi variëren sterk tussen de verschillende monsters. De twee monsters in Figuur 2-5 zijn de opeenvolgende bemonstering op 1 km afstand. Dit blijkt ook goed uit de waarden van de percentielen en gemiddelden die in de figuren zijn weergegeven. Figuur 2-6 toont de bijbehorende cumulatieve verdeling voor km 853. De bimodale verdeling leidt tot een 'plateau' in de kromme ter hoogte van het 30% percentage. De verdelingen boven (grind) en onder (zand) dit plateau volgen bij benadering een lognormale functie. De zand en grind-fractie kunnen dus wellicht door twee afzonderlijke lognormale verdelingen worden gepresenteerd.







Figuur 2-5 Twee voorbeelden van bimodale korrelverdeling in de Bovenrijn, links van de as, op 1 km afstand. In de figuur zijn de bijbehorende waarden voor karakteristieke gemiddelde en percentielen aangegeven. De 'markers' in de grafiek komen overeen met de gemiddelde  $D_i$  voor elke zeef ( $D_i = \sqrt{D_{i,fin} \cdot D_{i,anf}}$ )



Figuur 2-6 Cumulatieve verdeling van een sedimentmonster op de Boven-Rijn km 853 (meting 2020)

In bovengenoemde voorbeelden van verdelingsfuncties zijn de frequenties bepaald op basis van gewicht van materiaal op de zeef. Het is ook mogelijk de verdeling te baseren op 'aantal korrels' op een zeef, of 'volume' op de zeef, of 'oppervlakte' van korrels (bijvoorbeeld op basis van een foto).

## Gemiddelde van een mengsel

Er zijn meerdere mogelijkheden om het karakteristieke gemiddelde van het mengsel aan te duiden. Vaak wordt het rekenkundig gemiddelde  $D_m$  gebruikt, welke als volgt wordt bepaald met de sommatie van verschillende fracties (per zeef):

$$D_m = \frac{\sum_1^n D_i p_i}{\sum_1^n p_i} \text{ met } D_i = \sqrt{D_{i,\text{fijn}} \cdot D_{i,\text{grof}}}$$

Waarin  $p_i$  = de fractie (percentage) van massa binnen een bepaalde grootteklasse, en  $D_i$  is de bijbehorende gemiddelde diameter van die klasse, bepaald uit de ondergrens  $D_{i,\text{fijn}}$  en bovengrens  $D_{i,\text{grof}}$ . In deze berekening tellen alle sedimentfracties even sterk door, wat over het algemeen leidt tot een relatief hoge waarde (het grove sediment tikt zwaar door), terwijl dat voor het gedrag van mobiliteit van het sediment niet altijd terecht is.

Een andere mogelijkheid is het gebruik van de geometrische diameter  $D_g$  die gebaseerd wordt op de  $\phi$ -schaal (phi-schaal). Deze middeling gaat uit van een lognormale verdeling van de sedimentverdeling in een slecht gesorteerd mengsel, zoals vaak waargenomen in de praktijk. De grovere fracties dragen daarbij minder sterk bij. Bij de  $\phi$ -schaal (Krumbein, 1934), geldt:

$$\phi = \log_2(D) \quad \text{of} \quad D = 2^{-\phi}$$
$$D_g = 2^{\phi_m} \quad \text{met} \quad \phi_m = \frac{\sum_1^n \phi_i p_i}{\sum_1^n p_i} \quad \text{met} \quad \phi_i = \sqrt{\phi_{i,\text{fijn}} \cdot \phi_{i,\text{grof}}}$$

$\phi_m$  = rekenkundig gemiddelde van het mengsel in  $\phi$ -schaal.

In de beschrijving van mengsels worden soms ook alternatieve middelingen toegepast. De meest voorkomende middelingen zijn de Brouckere en Sauter middelingen. De Brouckere middeling kan worden beschouwd als een *volume* middeling (uitgaande van hogere machten van de diameter), gedefinieerd als:

$$D[4,3] = \frac{\sum_1^n D_i^4 p_i}{\sum_1^n D_i^3}$$

De Brouckere middeling is representatief voor de grootte (volume) van korrels, maar daardoor wel zeer gevoelig voor de aanwezigheid van grove delen in het mengsel. In het voorbeeld in Figuur 2-5 levert dit bijvoorbeeld voor km 853 een waarde  $D[4,3] = 23,6$  mm en voor km 852 zelfs een waarde  $D[4,3] = 90,7$  mm (vergelijk met  $D_m = 10,3$  en  $26,8$  mm respectievelijk).

De Sauter middeling kan worden beschouwd als een *oppervlakte* middeling (met hogere machten, maar lager dan Brouckere) gedefinieerd als:

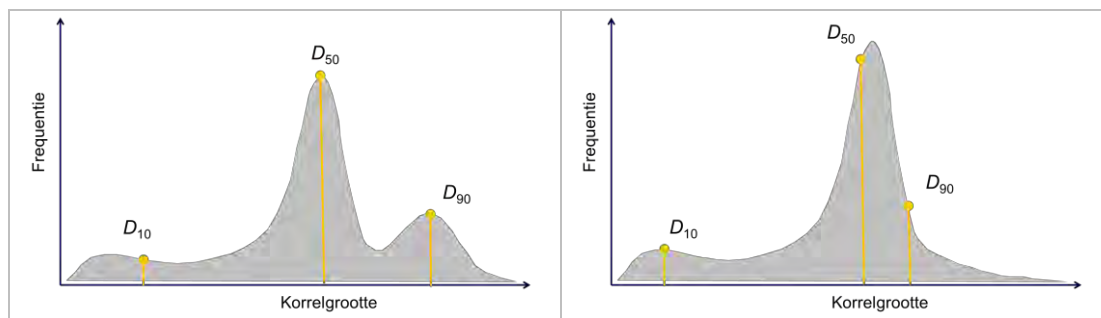
$$D[3,2] = \frac{\sum_1^n D_i^3 p_i}{\sum_1^n D_i^2}$$

De Sauter middeling biedt inzicht in de de oppervlakte van de korrels en is daarvoor bijvoorbeeld relevant voor chemische reacties of transport van verontreinigingen aan korrels. Ook deze variant is erg gevoelig voor de bijdrage van grote korrels. In het voorbeeld in Figuur 2-5 levert dit bijvoorbeeld voor km 853 een waarde  $D[3,2] = 46,3$  mm en voor km 852 zelfs een waarde  $D[3,2] = 122,7$  mm (vergelijk met  $D_m = 10,3$  en  $26,8$  mm respectievelijk), en dus nog groter dan de waarden voor  $D[4,3]$ .

Voor het bimodale sediment in de Rijntakken, vooral de grovere delen, wordt aanbevolen de geometrische gemiddelde waarde  $D_g$  toe te passen (in plaats van  $D_{50}$  of  $D_m$ ). Het gemiddelde biedt namelijk onvoldoende informatie over de verdeling van het mengsel vanwege het bimodale karakter en de forse spreiding.

### Spreiding

Met de combinatie de percentielen  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  en  $D_{90}$  (of bijvoorbeeld  $D_{16}$  en  $D_{84}$ ) is het mogelijk inzicht te krijgen in verschuivingen in de gemiddelde korrelgrootte en de extremen ervan (bijvoorbeeld een overmaat aan grof of fijn sediment). Dit is bijvoorbeeld geïllustreerd in Figuur 2-7, hoe door verwijdering van de grove fractie de waarde van  $D_{90}$  richting  $D_{50}$  opschuift.



Figuur 2-7 Voorbeeld van verandering in percentielen door afname van fractie grof sediment in mengsel

De standaardafwijking van het mengsel, of een geometrische standaardafwijking is gedefinieerd als:

$$\sigma_g = \frac{1}{2} \left( \frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right)$$

Of alternatief:

$$\sigma_g = 2^{\sigma_m} \quad \text{met} \quad \sigma_m = \sum_{i=1}^N (\phi_{mi} - \phi_m)^2 p_i$$

Met (zie ook hiervoor bij berekening van  $D_g$ )  $\phi_i$  = midden van sediment klasse  $i$ ,  $\phi_m$  = rekenkundig gemiddelde  $\phi$ -waarde.

## 2.3 Statistiek van ruimtelijke variaties

Voor ruimtelijke interpolatie van data (in langs en dwarsrichting) en in de tijd wordt vaak gekozen voor toepassing van een lopend gemiddelde van de diameters, bijvoorbeeld van  $D_{50}$  per monster.

Verondersteld wordt dat daarmee een gemiddelde trend kan worden afgeleid op een schaal die een orde groter is dan de resolutie van de metingen. Hierbij wordt echter voorbijgegaan aan de oorzaken en fysische duiding van de spreiding in de ruimte en tijd rond dit 'lopende gemiddelde'. Er is bijvoorbeeld voor modellen en voor beheer van de bedding (bijvoorbeeld suppleties) een behoefte aan een interpolatiemethode die rekening houdt met de statistische eigenschappen en fysische afhankelijkheden in de samenstelling. Dat kan echter wel betekenen dat de resolutie (locatie en timing) van de metingen moet worden aangepast, dus anders dan toegepast in de historische metingen.

In praktijk zijn er 2 situaties waarvoor methoden kunnen worden gekozen:

- 1 De analyse van de historische gegevens voor grootschalige trends en voor modelinvoer. Deze historische gegevens hebben een ruimtelijke resolutie van 1 km tot 500 m (ruimtelijk vaste intervallen). De methode van interpolatie en analyse moet worden gekozen op basis van deze karakteristieken.
- 2 De toekomstige bemonsteringen en gegevensanalyse, waarbij nog kan worden gekozen voor een andere resolutie en frequentie dan in het verleden. De methode van interpolatie en analyse kan nog bepalend zijn voor de manier van meten.

Een geschikte methode voor de ruimtelijke en temporele middelingen vraagt nog verder onderzoek. Belangrijk is dat de methode voorziet in de behoefte om de nauwkeurigheid ervan te kwantificeren, en rekening houdt met ruimtelijke correlaties.

Overwogen kan worden om gebruik te maken van geostatistische modellen die de relaties tussen onderlinge punten beschrijven. Door morfologie en sedimenttransport zijn monsters binnen zekere afstand aan elkaar gecorreleerd. Deze correlatie kan worden gebruikt om de monsters te interpoleren. In deze studie zijn deze methoden niet verder uitgewerkt. Een voorbeeld is het werk van Gruijters et al. (2001a), waarbij de methode met een semi-variogram model is toegepast, gevolgd door een ruimte interpolatie met Kriging. Meer geavanceerde statistische methoden kunnen hier verder worden onderzocht: een belangrijke ontwikkeling is bijvoorbeeld de toepassing van Bayesiaanse statistiek, waarbij gebruik wordt gemaakt van Gaussian Process Regression models (GPR, waaronder ook Kriging valt). Met deze methode worden ook de onzekerheden gekwantificeerd. De GPR methoden zijn op dit moment erg in beeld voor machine-learning. De methode met Bayesiaanse statistiek wordt verder op dit moment bij Deltares toegepast voor de geologische interpolaties van boringen, en het is mogelijk de toepassing van die kennis verder te verkennen voor de bodemsamenstelling gegevens.

Gruijters et al. (2001a) onderzochten in hoeverre ruimtelijke interpolatie van  $D_{50}$  waarden van monsters mogelijk is. Hoe groot is de fout als de  $D_{50}$  op een willekeurige locatie geschat wordt op basis van de  $D_{50}$  van omliggende meetpunten, ten opzichte van een  $D_{50}$  geschat uit een middeling van de korrelgrootteverdeling van die meetpunten? De analyse toont dat voor de grove monsters, met  $0,5\text{mm} < D_{50} < 2\text{ mm}$  de verschillen kunnen oplopen tot 150%. De grootste afwijkingen treden op als er wordt geïnterpoleerd tussen verschillende grondsoorten (vooral in de dieper lagen). Geconcludeerd wordt dat ruimtelijke interpolatie van  $D_{50}$  niet een betrouwbaar resultaat oplevert. Voorgesteld wordt om interpolatie toe te passen op de cumulatieve korrelgrootteverdelingen per zee fractie. De reden om de cumulatieve verdeling te gebruiken in plaats van de kansverdeling van afzonderlijke fracties, is dat hier de onderlinge afhankelijkheid van fracties is meegenomen (een fractie op een fijnere zeef is afhankelijk van de fracties op de grovere zeven erboven). In lijn met de eerdergenoemde geostatistische aanpak, is het dus aan te bevelen om eerst de kansverdelingen ruimtelijk te interpoleren (bijv. met Kriging of Bayesiaanse methoden), en op basis daarvan de veranderingen in de tijd, de trends, af te leiden.

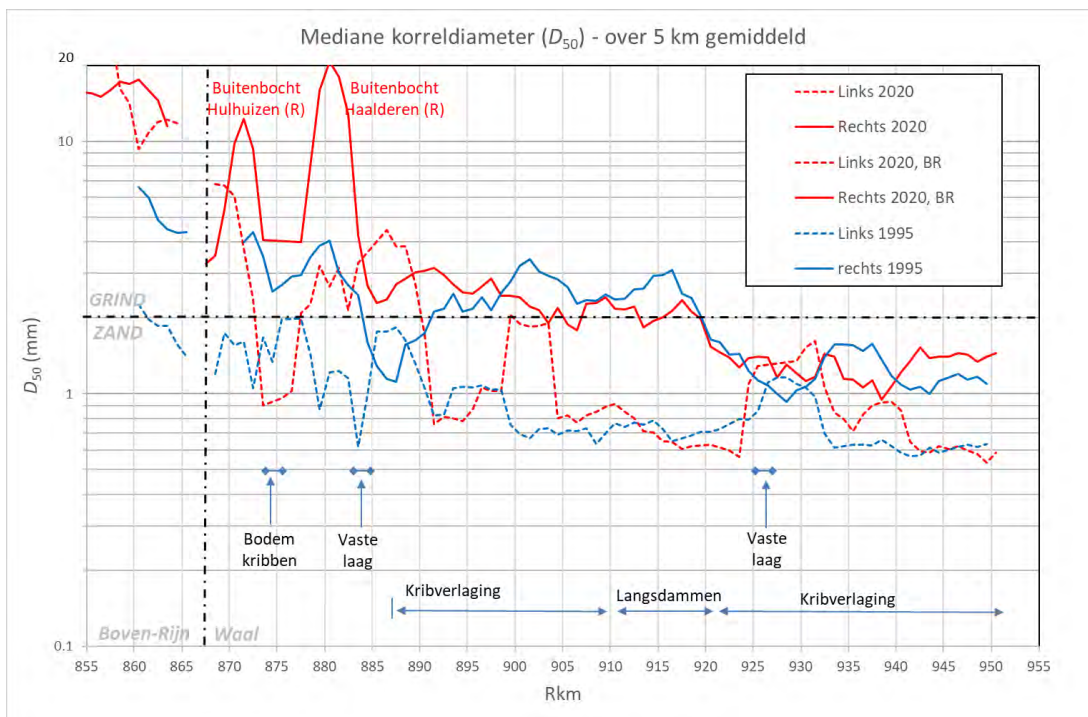
Een eerste aanzet in geostatistische analyse van de data is beschreven in hoofdstuk 4.

## 2.4 Gemeten bodemsamenstelling

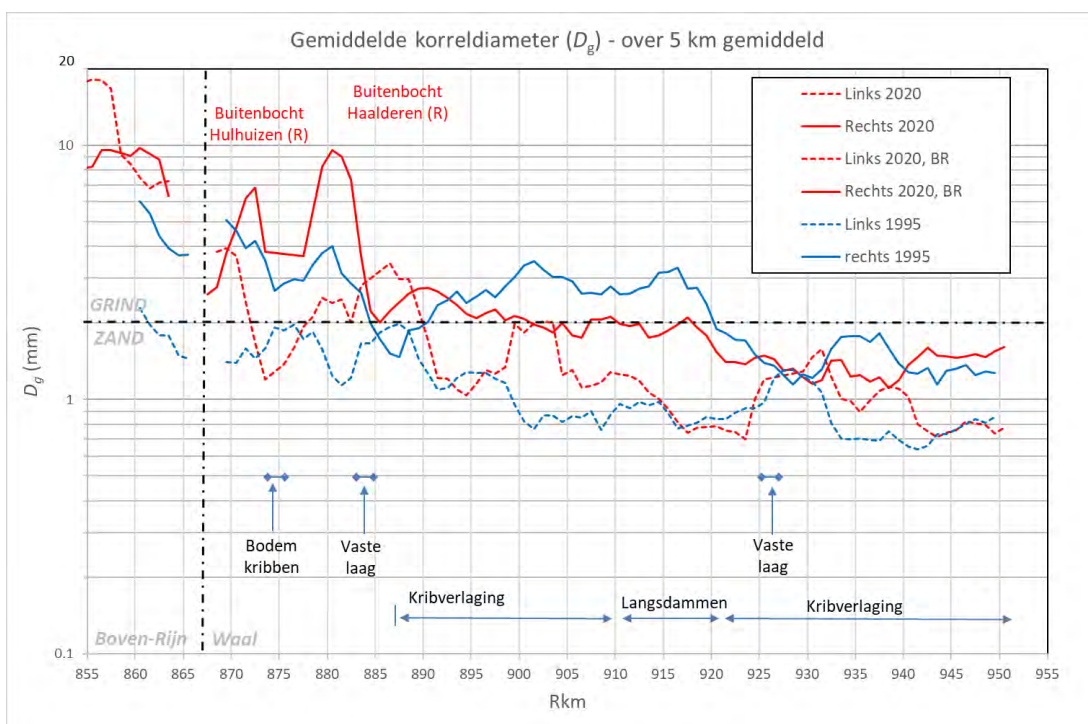
Is er sprake van trends? In de studie van onder andere Ylla Arbos et al. (2020) worden de mediane diameters van de verschillende jaren ruimtelijk geïnterpoleerd en gepresenteerd. Daarvoor is een middeling over 5 km en over de breedte toegepast. In deze paragraaf presenteren we een vergelijkbare analyse, met middeling over 5 km, maar zonder te middelen over de breedte. Op het traject Boven-Waal hebben we gemiddeld over 2 km omdat hier sprake is van een aantal grote lokale variaties. Verder is aangenomen dat voor de niet gemeten grove grind fracties in 1995 een log-verdeling van 2 mm tot 32 mm van toepassing is (dit geeft voor de grofste klasse een gemiddelde diameter  $D_i$  van 8 mm op een  $\phi_{im}$  van -3, die is gebruikt voor berekening van de  $D_g$ ). Voor berekening van de percentielen, zowel  $D_{50}$  en  $D_{90}$  (niet voor  $D_{10}$ ) heeft deze keuze ook consequenties: voor een flink aantal monsters in de bovenrivieren is namelijk minder dan 50% van het mengsel door de grofste zeef van 2 mm doorgelaten (meer dan 50% is dus grover dan 2 mm). De bovengrens van het mengsel op de grofste zeef is niet bekend, dus deze moet worden gekozen op basis van expert judgement. De gemaakte keuze voor een bovengrens van 32 mm is gebaseerd op monsters van andere meetcampagnes. De resultaten voor de vergelijking tussen 1995 en 2020 gegevens zijn gepresenteerd in Figuur 2-8 voor  $D_{50}$  (links en rechts), Figuur 2-9 voor  $D_g$  (links en rechts), Figuur 2-10 voor  $D_g$  op de rivieras.

Observaties:

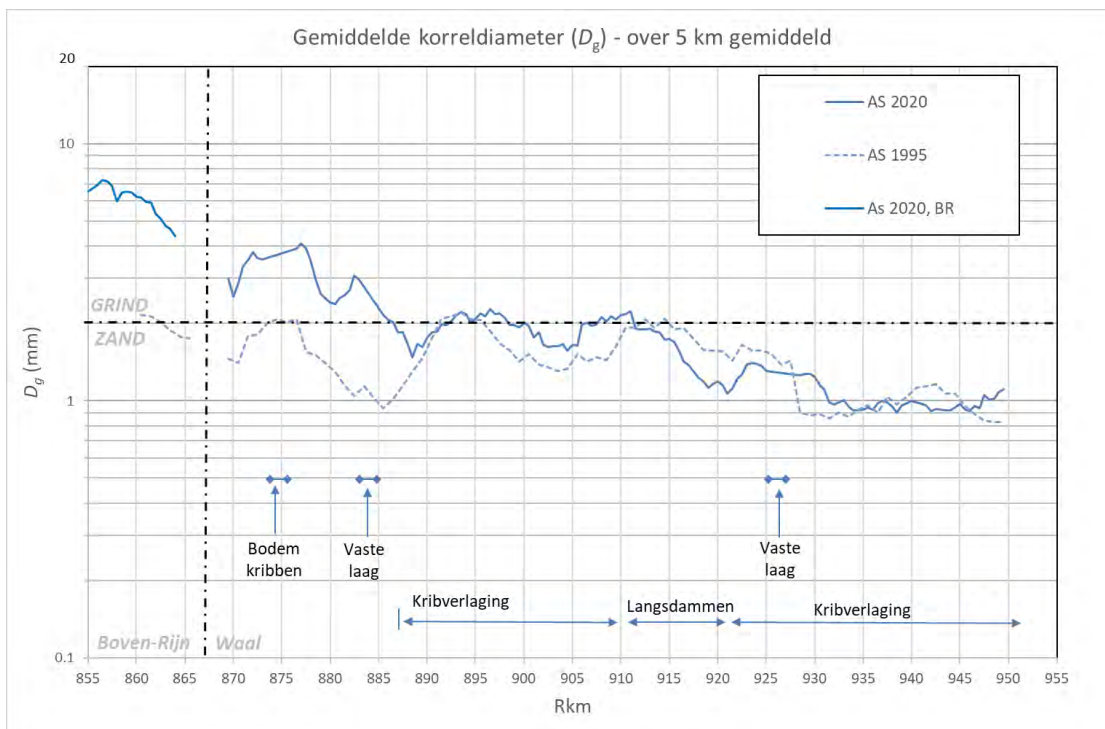
- De meetwaarden op de Boven-Rijn zijn in 2020 veel hoger dan in 1995, maar hier geldt dat monsters met relatief veel sediment groter dan 2 mm (grofste zeef) zijn afgekeurd.
- De buitenbochten in de Boven-Waal bij Hulhuizen en Haalderen tonen in 2020 een aanzienlijk grovere samenstelling dan in 1995. Maar ook hier geldt dat grove monsters in 1995 niet zijn beschouwd (of verder zijn door gezeefd), en dat het dus niet zeker is of er in 1995 ook niet sprake was van dergelijke grove mengsels in deze bochten.
- Voor de Waal geldt dat de linkerzijde aanzienlijk fijner is dan de rechterzijde. Hier speelt met grotere zekerheid een rol dat de (geladen) opvaart vooral plaats vindt aan de linkerzijde, en dat de (vaak ongeladen) afvaart vooral plaats vindt aan de rechterzijde. Zie ook paragraaf 3.4. Deze verschillen in samenstelling tussen links en rechts van de rivier zijn ook gevonden in dataset van 1995. Deze verschillen waren voor de de Midden-Waal (km 895 – 925) echter nog groter. In 1995 werd er grover sediment gevonden aan de rechterzijde, dan in 2020 (Figuur 2-9), terwijl juist voor delen van dit traject de linkerzijde in 1995 fijner was dan in 2020.
- Op de rivieras zijn met name de monsters bovenstrooms in 2020 veel grover dan in 1995, maar benedenstrooms van Nijmegen is dit onderscheid niet meer aanwezig.



Figuur 2-8 Mediaan van de bodemmonsters van 1995 en 2020, na middeling in langsrichting over 5 km, voor monsters zowel links en rechts van de rivieras. Op de Boven-Waal is gemiddeld over 2 km om de variaties in buitenbochten en bij de vaste lagen niet te veel weg te filteren.

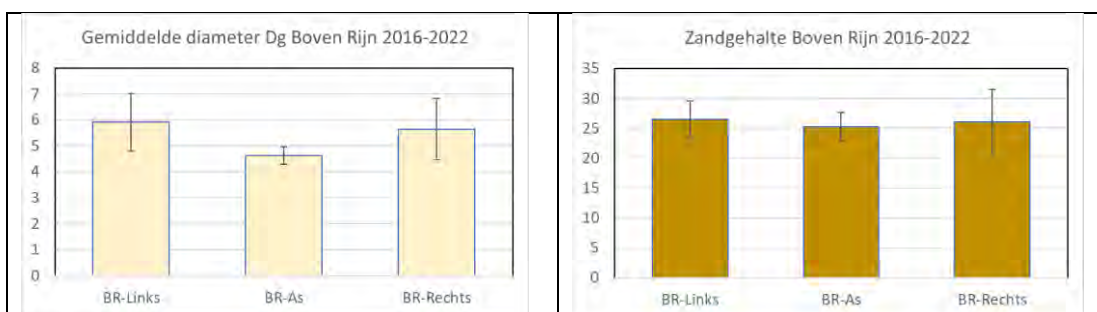


Figuur 2-9 Geometrisch gemiddelde diameter  $D_g$  van de bodemmonsters van 1995 en 2020, na middeling in langsrichting over 5 km, voor monsters zowel links en rechts van de rivieras. Op de Boven-Waal is gemiddeld over 2 km om de variaties in buitenbochten en bij de vaste lagen niet te veel weg te filteren.



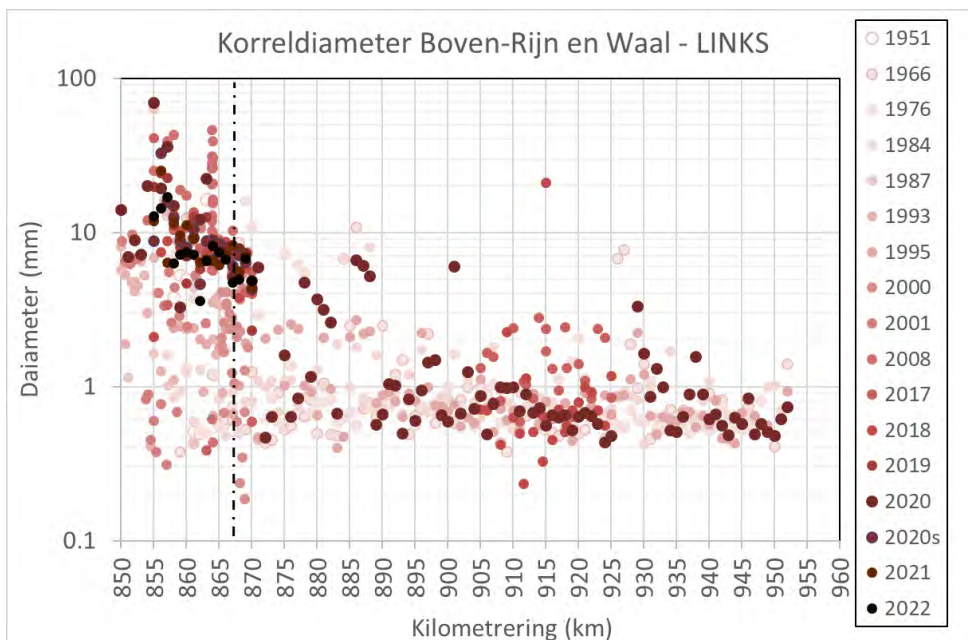
Figuur 2-10 Geometrisch gemiddelde diameter  $D_g$  van de bodemmonsters van 1995 en 2020, na middeling in langrichting over 5 km, voor monsters op de rivieras. Op de Boven-Waal is gemiddeld over 2 km om de variaties in buitenbochten en bij de vaste lagen niet te veel weg te filteren.

In de Boven-Rijn is vrijwel geen sprake van een onderscheid in grofheid van de linker en rechterzijde. Figuur 2-11 toont de ruimtelijk en tijdgemiddelde waarde voor de Boven-Rijn diameter en zandpercentage, waaruit blijkt dat de diameters relatief gelijk zijn, waarbij de rivieras de kleinste standaardafwijking heeft. De standaardafwijking van de zandpercentage is iets groter aan de rechterzijde. De reden hiervoor is onbekend, maar kan samenhangen met een iets andere morfodynamiek.

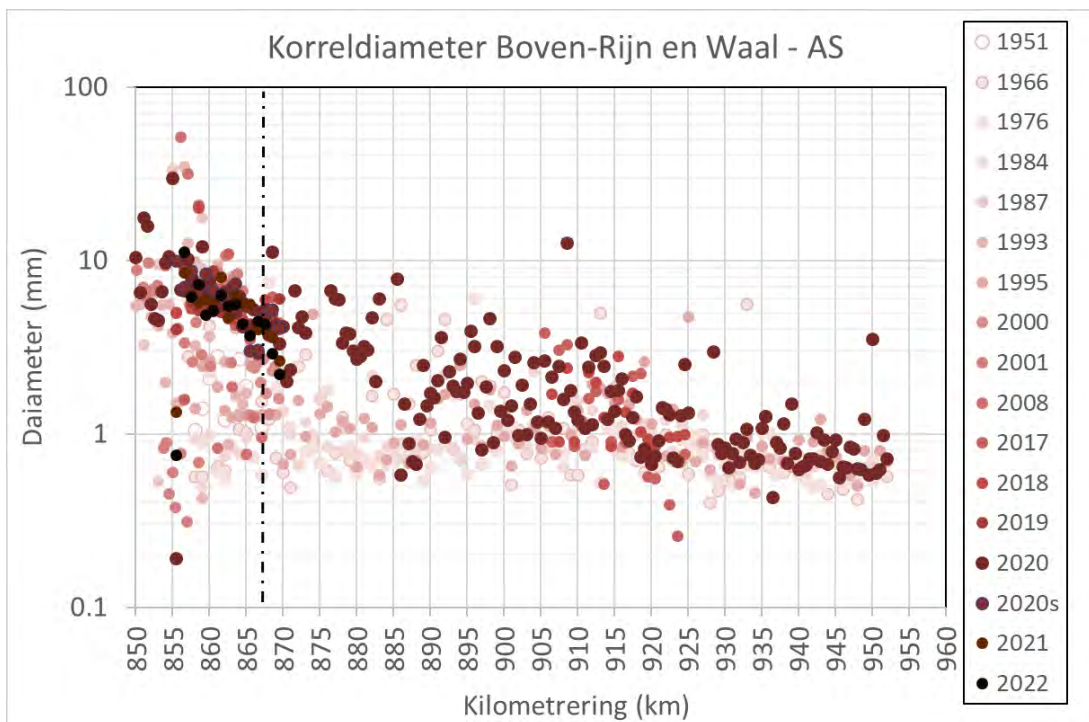


Figuur 2-11 Tijdgemiddelde en ruimtegemiddelde diameter en zandpercentage voor de Boven-Rijn, jaarlijkse monster van de suppletieproeven van 2016-2022, en monster van 2020 campagne. Traject km 855-867. Standaardafwijking is aangegeven met de 'error bars'.

Om een indruk te geven van de algehele variabiliteit en de effecten van middelingen zijn in onderstaande figuren alle gegevens van mediane korreldiameter voor de periode 1951-2022 geplott langs de Boven-Rijn en Waal. De spreiding in diameters is van dezelfde orde als de gemiddelde diameter langs de gehele rivier.

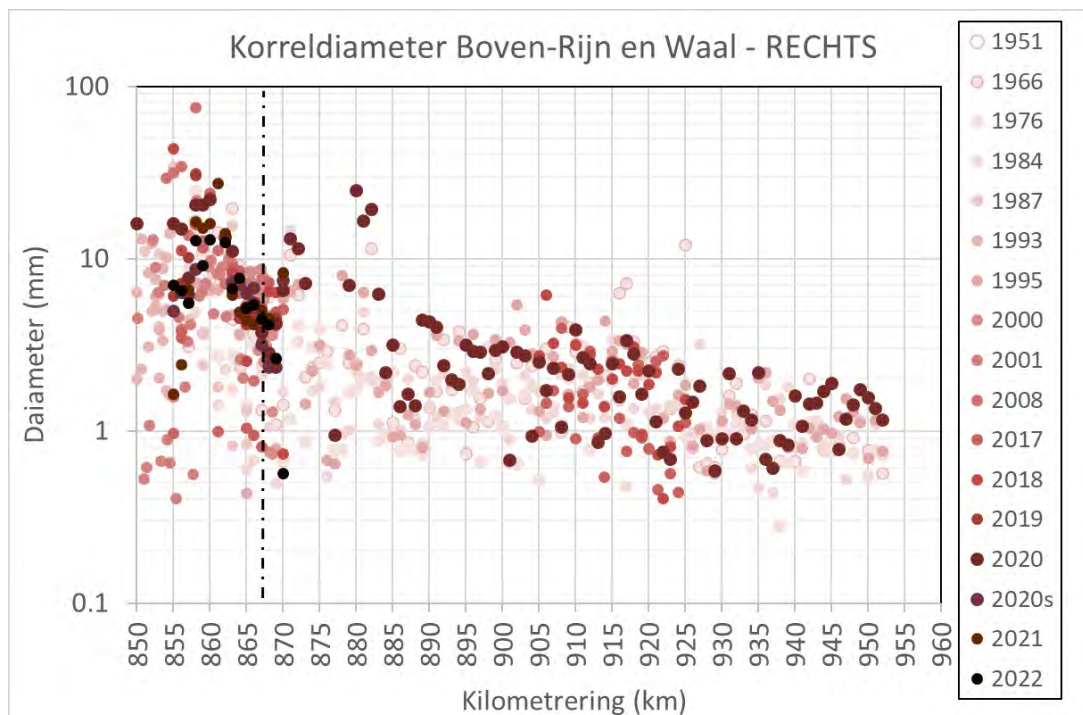


Figuur 2-12 Variabiliteit in mediane diameter D50 voor meerdere metingen linkerzijde van de Boven-Rijn en Waal, periode 1951-2022



Figuur 2-13 Variabiliteit in mediane diameter D50 voor meerdere metingen as van de Boven-Rijn en Waal, periode 1951-2022





Figuur 2-14 Variabiliteit in mediane diameter  $D_{50}$  voor meerdere metingen rechterzijde van de Boven-Rijn en Waal, periode 1951-2022

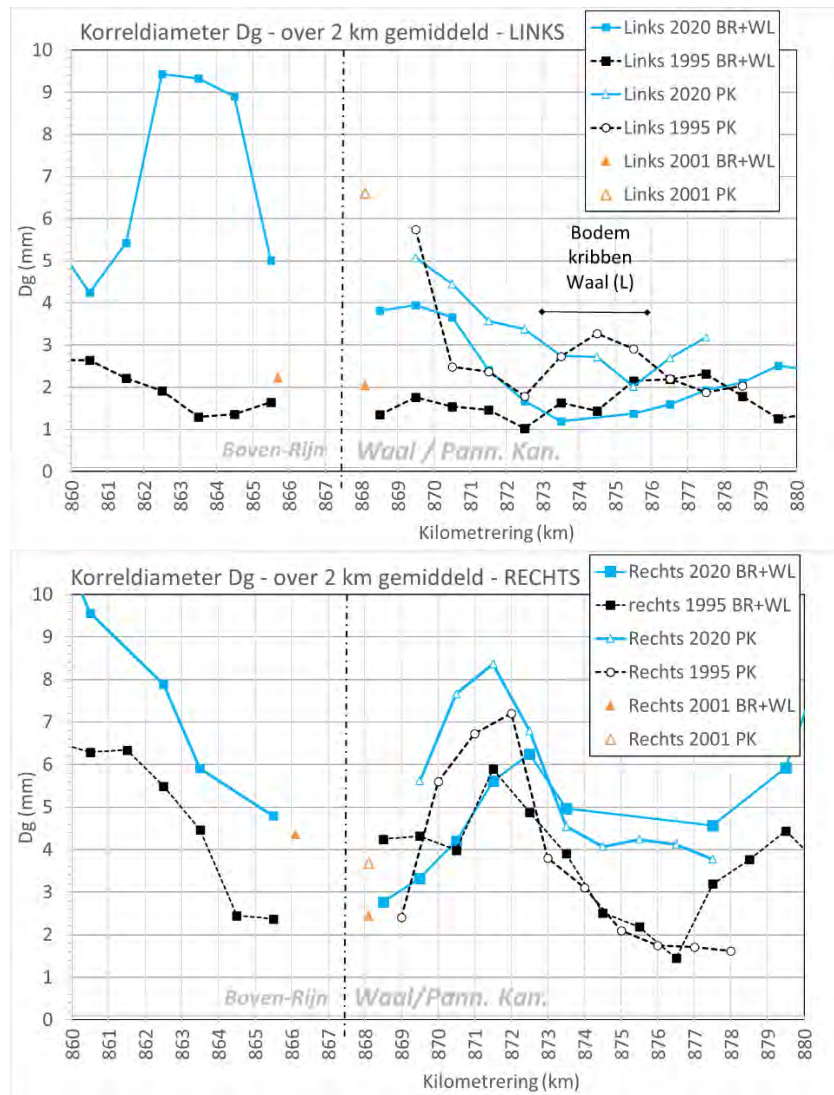
In deze figuren is eveneens onderscheid gemaakt tussen gegevens links van de rivieras, op de rivieras, en rechts van de rivieras. Het aantal bemonsteringen in de periode 2017 – 2022 is het grootst in de Boven-Rijn (in relatie tot de suppletiepilots in dit gebied). De 2020 data voor  $D_{50}$  vertoont op het eerste gezicht een toename ten opzichte van eerdere bemonstering tussen 1951-1995 voor de Boven-Rijn en voor het Waal traject tussen de Pannerdensch Kop en Nijmegen. Echter, in die periode is ook in 1966 een groot aantal monsters genomen met een vergelijkbare grove samenstelling als in 2020. De 2020 gegevens vallen dus nog binnen de bandbreedte van de grotere data set (voor  $D_{50}$ ), en het is dus niet eenduidig om vast te stellen dat er een continue trend is af te leiden. Wel volgt uit deze vergelijking dat vooral de  $D_{50}$  in de rivieras relatief grof is ten opzichte van de eerdere jaren. Wanneer ook andere diameters, zoals de gemiddelde diameter  $D_m$ , voor deze monsters worden vergeleken zijn vergelijkbare conclusies te trekken. Voor  $D_m$  en  $D_g$  is de toename minder prominent zichtbaar dan voor  $D_{50}$ .

In de bovengenoemde figuren is in de 1995 data, op basis van expert judgement, voor de niet gezeefde grofste fractie (>2 mm) een logaritmische verdeling met een bovengrens van 32 mm aangenomen (net als in Figuur 2-9). De figuren bevestigen dat over het algemeen de  $D_{50}$  waarden voor de verschillende jaren, en dus ook voor 2020, in dezelfde bandbreedte valt. Wel is opnieuw opvallend dat in de rivieras, in tegenstelling tot de linker- en rechterzijde, de 2020 data grover uitvalt dan de eerdere jaren voor de Boven-Rijn en Boven-Waal. In de Boven-Rijn lijken alle monsters van 2020 (dus zowel links, rechts en de rivieras) aan de bovenzijde van de bandbreedte van de data te vallen. Dat duidt op een duidelijk grovere bedding in de Boven-Rijn in 2020: data uit 2020 toont bijvoorbeeld een veel groter percentage grind. In paragraaf 3.6 wordt hier dieper op ingegaan.

Ook in deze figuren is duidelijk te zien dat er een groot verschil is in de linker (zand) en rechterzijde (grind & zand) op de Waal.

## 2.5 Sedimentverdeling op Pannerdensche Kop

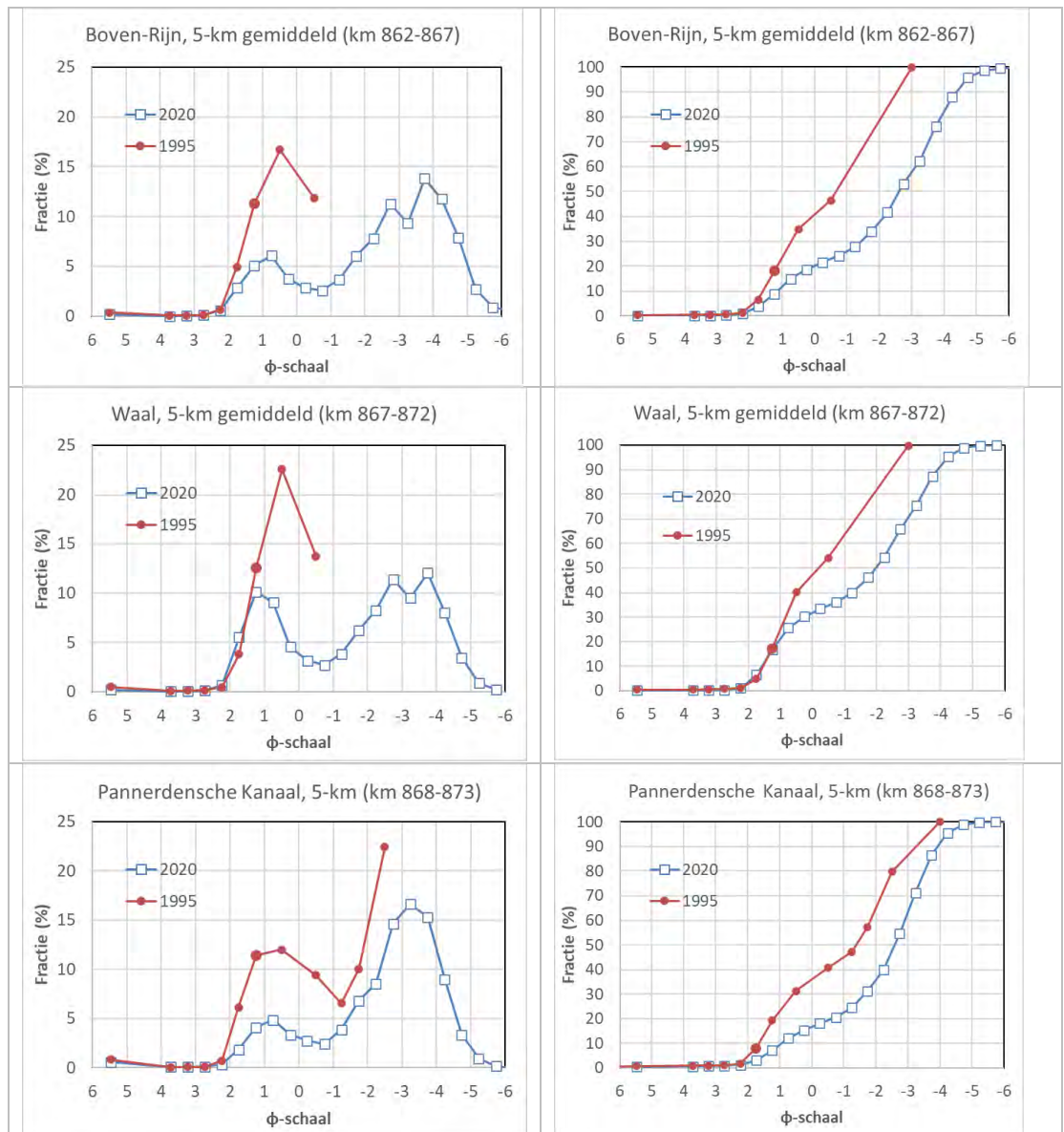
Op de riviersplitsing de Pannerdensche Kop is sprake van een sorteringseffect: de afstromende takken hebben niet dezelfde samenstelling als de Boven-Rijn. Over het algemeen geldt dat de bodemsamenstelling van het Pannerdensch Kanaal iets grover is dan de Waal. Dit is gevisualiseerd in Figuur 2-15, waarbij de gemiddelde diameter is getoond voor de takken rondom de splitsing. De gemiddelde diameter voor het Pannerdensch Kanaal is orde twee maal hoger in de eerste kilometers dan het verdere traject. Dit geldt voor zowel 1995 als voor 2020 data.



Figuur 2-15 Geometrische gemiddelde  $D_g$  voor de riviertakken rond de Pannerdensche Kop, met toepassing van een lopend gemiddelde van 2 km. Onderscheid is gemaakt in de monsters links (boven) en rechts (onder) voor 1995 (zwart gestreept) en 2020 (blauw getrokken).

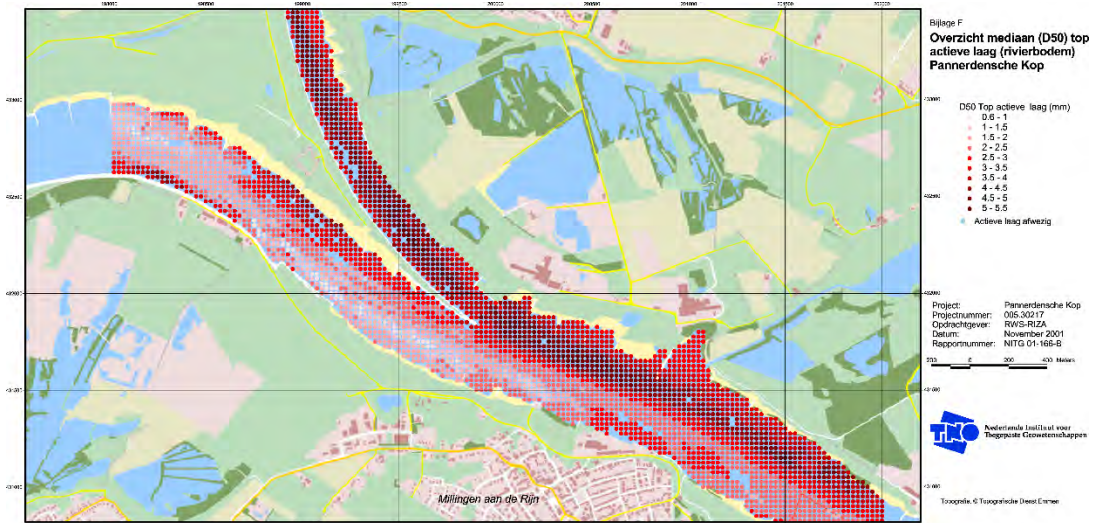
Het onderscheid in bodemsamenstelling is ook duidelijk zichtbaar in de kansverdelingen voor de verschillende sedimentmonsters in de drie takken. Door de kansverdelingen van de monsters te middelen over de eerste 5 km van de takken worden de ruimtelijke variaties iets uitgedempt. Het resultaat is geplot in Figuur 2-16, voor zowel 1995 als voor 2020 data. Overigens is dit een ruwe middeling, zonder rekening te houden met correlaties en andere statistische eigenschappen (zoals aanbevolen in paragraaf 2.2). De figuren tonen niet alleen een grotere piek in de grindfractie in het Pannerdens

Kanaal ten opzichte van de Waal, maar ook een absolute grotere piek in de grindfractie voor alle monsters in 2020 ten opzichte van 1995.



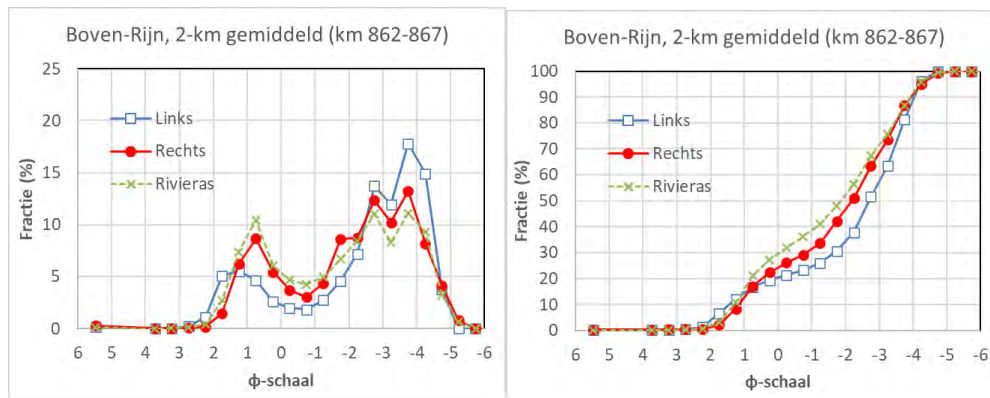
*Figuur 2-16 Over 5 km-gemiddelde kansverdelingen van sedimentmonsters rondom de Pannerdensch Kop. De negatieve  $\phi$  waarden zijn de grove fracties (rechts) en de positieve waarden de fijne fracties (links).*

Verondersteld wordt dat het aanbod van grover sediment naar het Pannerdensch Kanaal volgt uit een sorteringseffect direct bovenstroom van de splitsing, waarbij de rechterzijde (waarvan het Pannerdensch Kanaal aftakt) een iets grovere bedding heeft. Dit wordt onder andere beschreven en gemodelleerd op basis van boringen en seismiek door Gruijters et al. (2001a), zie Figuur 2-177.

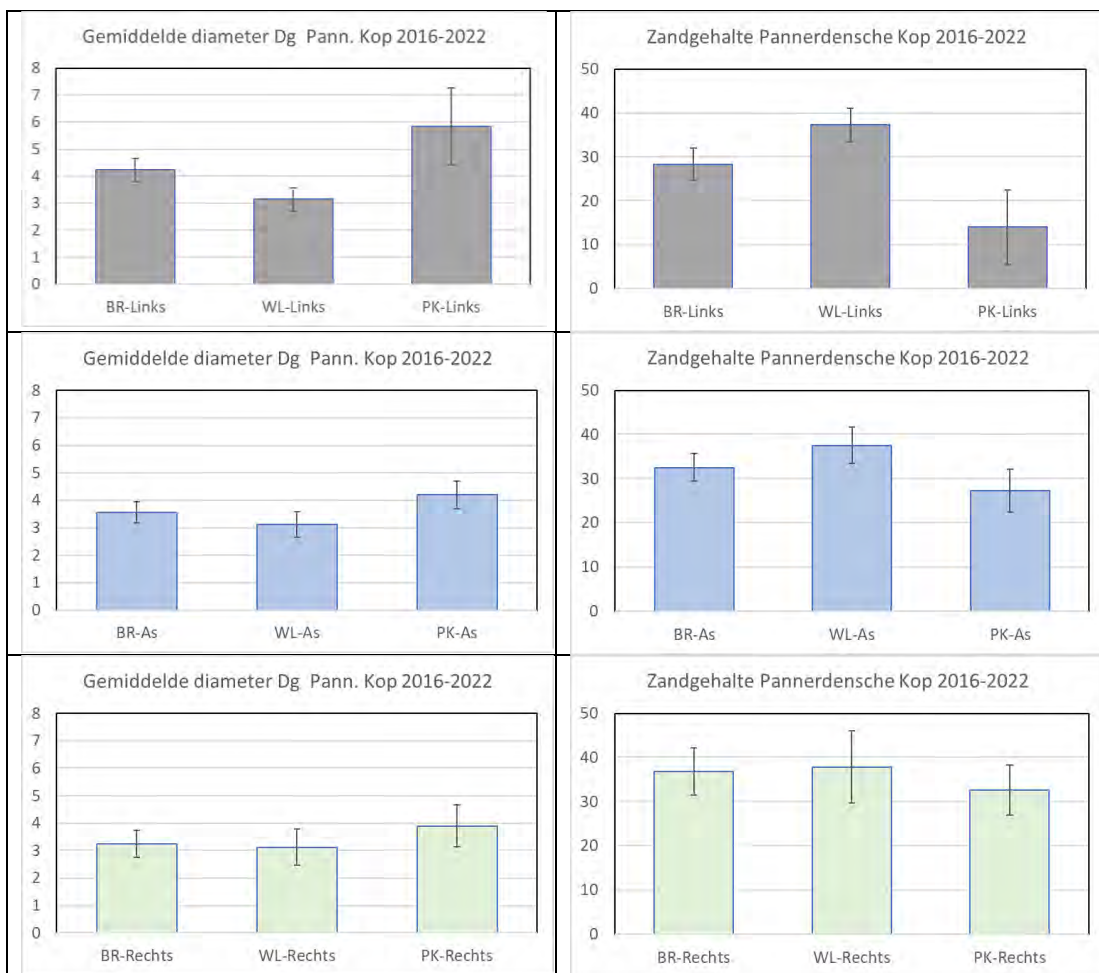


Figuur 2-17 Mediaan  $D_{50}$  van de actieve laag Pannerdenschekop berekend op basis van bemonstering in 2000 (bijlage f, Gruijters et al, 2001a)

Om na te gaan of de 2020-gegevens volstaan om deze hypothese te testen, zijn in onderstaande figuur de gemiddelde verdelingen van de laatste 2 km (2 monsters) voor links en rechterzijde en voor de as op de Boven-Rijn geplott. Deze gemiddelde verdeling is bepaald door voor iedere sedimentfractie/zeef het percentage van de 2 monsters te middelen (dus niet op basis van de cumulatieve verdeling zoals aanbevolen door Gruijters). Het resultaat biedt echter geen overtuigend verschil in dwars-sortering voor de splitsing. Vervolgens is voor alle jaarlijkse bemonsteringen in de periode 2016-2022 voor de suppletieproeven (circa 2 km bovenstrooms, 3 raaien, en 2 km benedenstrooms van de splitsing, 3 raaien) een tijdgemiddelde gemiddelde diameter en zandpercentage berekend. De locaties van de gebruikte monsters zijn weergegeven in Figuur 2-20. Voor deze berekening zijn de gemiddelden in  $\phi$ -schaal van elk monster genomen voor de tijdsmiddeling. Vervolgens zijn deze weer vertaald naar een tijdgemiddelde  $D_g$  (via  $D_g = 2^{-\phi}$ ). De resultaten zijn gepresenteerd in Figuur 2-19.



Figuur 2-18 Kansverdeling van sedimentmonsters over de laatste 2 km van de Boven-Rijn, 2020 bemonstering



Figuur 2-19 Berekende tijdgemiddelde diameter  $D_g$  en zandfractie (data suppletieproeven 2016-2020 en campagne 2020) voor de riviertrajecten met lengte circa 2 km rond de Pannerdensch Kop. Onderscheid is gemaakt in linkerzijde, rivieras, en rechterzijde van de rivier. Ook is de standaardafwijking van de waarden weergegeven (aangegeven als 'error bars').



*Figuur 2-20 Locaties van monsters voor suppletieproeven, gebruikt voor de tijdmiddeling van splitsingspuntsamenstelling. De monsters in de as zijn telkens versprongen ten opzichte van de monsters op de linker en rechterzijde van de as. De afstand in langsrichting bedraagt telkens 1 km, en de locaties zijn gelijk voor alle monster tussen 2016 en 2022.*

In zowel Figuur 2-18 als Figuur 2-19 kan niet worden afgelezen dat er een vergroving optreedt aan de rechterzijde in de Boven-Rijn, die zou bijdragen aan de relatieve grofheid van het Pannerdensch Kanaal. Op het eerste gezicht lijkt zelfs het omgekeerde beeld op te treden: de bodemsamenstelling is grover aan de linkerzijde in de Boven-Rijn. Echter, gezien het geringe aantal monsters en de grote variabiliteit is de afwijking niet voldoende om conclusies te trekken. De standaardafwijking per fractie bedraagt meer dan 20 à 40% van de gemiddelde waarde, en de ruimtelijke dekking is zeer beperkt. Een ruwe interpolatie zoals hier gepresenteerd volstaat dus niet voor dit doel. Het is goed mogelijk dat de betreffende (bocht-)sortering plaats vindt in een traject dat minder dan een kilometer lang is (de samenstelling lijkt in de meeste bochten na te ijlen op de diepte), en dus alleen met een hogere dichtheid van monsternamen kan worden gedetecteerd. Het beeld verandert overigens niet significant als monsters over 3 of 4 km worden gemiddeld.

Het beeld dat het eerste deel van het Pannerdensch Kanaal iets grover is dan de andere twee takken wordt wel bevestigd in de figuren. Figuur 2-19 toont dat de linkerzijde opvallend grover is dan de as en de rechterzijde. Hier speelt mogelijk een rol dat de drie gebruikte locaties (km 868, km 869, km 870) zijn gesitueerd in de buitenbocht. In Tabel 2-3 zijn de mediane diameters  $D_{50}$  voor de monsters rondom de splitsing gemiddeld in ruimte en tijd (dus ook over de breedte gemiddeld). Naast de mediaan van het totale mengsel zijn ook de gemiddelde medianen van de zandfractie (zeven met  $D < 2$  mm) en grindfractie ( $> 2$  mm) gepresenteerd. De standaarddeviaties van alle gemiddelde monsters (dus in tijd en ruimte) in de tabel tonen dat deze in de orde liggen van 50% van de mediaan. De resultaten van Gruijters et al (2001a) in deze tabel lijken op het eerste gezicht af te wijken van de meer recente data, maar vallen nog ruim binnen de berekende standaarddeviatie.

Tabel 2-3 Medianen  $D_{50}$  voor de Pannerdensch Kop. In het eerste deel van de tabel zijn de breedte- en tijdsgemiddelde data voor de monsters tot 2 km rond de splitsing (BR=Boven-Rijn, km 865-867; WL=Waal, km 868-870; PK=Pannerdensch Kanaal, km 868-870) uit de 2020 campagne en de bemonstering voor de suppletieproef gepresenteerd. In het tweede deel de waarden berekend door Gruijters et al. (2001a).

	Tak	$D_{50}$ totaal (mm)	Stdev. (mm)	$D_{50}$ zand fractie (mm)	Stdev. (mm)	$D_{50}$ grind fractie (mm)	Stdev. (mm)
Pann. Kop 2016-2022	BR	4.2	2.27	0.62	0.22	6.7	3.25
	WL	3.7	1.86	0.79	0.19	6.7	3.16
	PK	4.8	2.50	0.72	0.27	6.7	3.14
Gruijters et al. (2001a)	BR	2.5				7.0	
	WL	3.3				6.5	
	PK	6.8				8.7	

## 2.6 Proefbemonstering november 2021

In de week van 8 november 2021 zijn extra monsters genomen om inzicht te krijgen in een aantal onzekerheden die in de voorliggende studie (in dit rapport) zijn beschreven. Uit de recente, 2020, meetcampagne voor de Rijntakken zijn systematische afwijkingen afgeleid waarvan onduidelijk is of deze duiden op trends, of dat deze vallen in de onzekerheidsbanden van de gegevens.

Doelstellingen van de metingen zijn als volgt geformuleerd:

- Bepaal heterogeniteit van beddingmateriaal binnen de zone van een enkel x,y-meetpunt. Welke patronen en 'patchiness' bepalen deze heterogeniteit.
- Vaststellen of er systematische afwijkingen bestaan tussen de Hamon en Van de Veen samplers.
- Vaststellen of er sprake is van een invloed van voorgaande verloop van afvoeren (in 2020 is gemeten na een lange periode van droogte, met veel invloed van scheepvaart, terwijl we nu gaan meten na een periode met verhoudingsgewijs veel hogere afvoeren).
- Vaststellen of er een verschil is in de 2 sampling methoden wanneer sprake is van meer of minder homogeniteit.

De bemonstering heeft plaats gevonden op een beperkt aantal meetpunten rond het splitsingspunt Pannerdensch Kop, met zowel de Hamon sampler als met een Van Veen sampler. Een beschrijving van de twee samplers is gepresenteerd in paragraaf 3.2.1. De locaties zijn geselecteerd vanwege de relatief grove bedding (niet-uniform slecht gesorteerd sediment), de beschikbaarheid van (opvallende) zeefkrommes in de 2020 meetcampagne, en afstand tot eventuele werken (zoals vaste lagen).

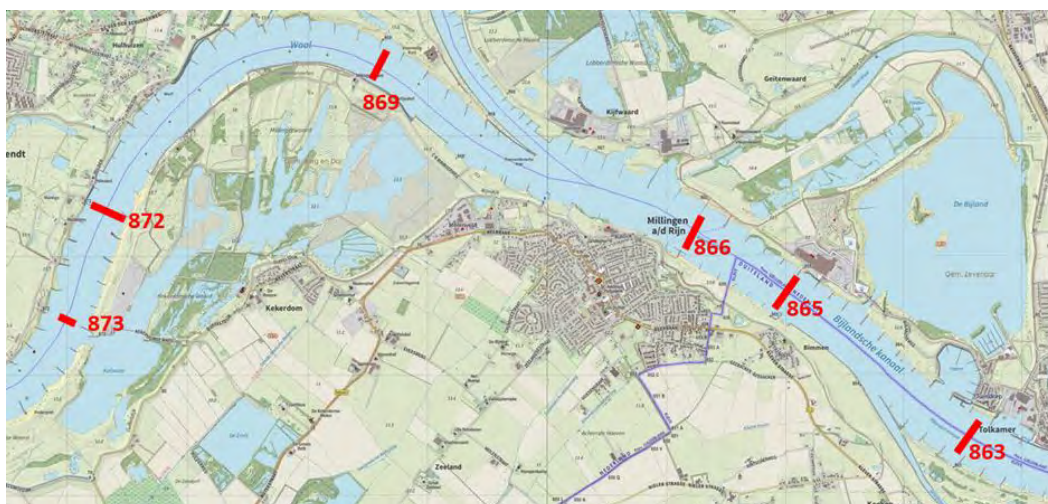
Tabel 2-4 Overzicht bodemonsters Boven-Rijn (BR), Waal (WL) en Pannerdensch Kanaal (PK) in November 2021. De x,y-coördinaten zijn een schatting.

Tak	Km-raai	Afstand (m)	Oever	x	y	Instrument	Beschrijving
BR	863.000	0	as	203572	429465	Hamon	Deze locatie ligt ongeveer 1 km benedenstrooms van de vaste laag, en midden in de zone van de eerdere pilot suppletie. De 2020 bemonstering geeft hier relatief grof sediment op de
BR	863.000	0	as	203572	429465	Veen	
BR	863.000	-81	links	203531	429395	Hamon	
BR	863.000	-81	links	203531	429395	Veen	
BR	863.000	-72	linksnoord	203536	429403	Hamon	

Tak	Km-raai	Af-stand (m)	Oever	x	y	Instrument	Beschrijving
BR	863.000	-72	linksnoord	203536	429403	Veen	suppletie zelf (links). De locatie lijkt geschikt om extra monsters voor effect van vaarsporen te detecteren. Er zijn daarom twee extra bemonsteringen toegevoegd.
BR	863.000	-92	linkszuid	203523	429387	Hamon	
BR	863.000	-92	linkszuid	203523	429387	Veen	
BR	863.000	91	rechts	203618	429544	Hamon	
BR	863.000	91	rechts	203618	429544	Veen	
BR	865.000	0	as	202001	430694	Hamon	De locatie ligt benedenstrooms van de suppletie, en toont een relatief gelijkmatig verdeelde verdeling over de breedte in 2020.
BR	865.000	0	as	202001	430694	Veen	
BR	865.000	-88	links	201948	430624	Hamon	
BR	865.000	-88	links	201948	430624	Veen	
BR	865.000	79	rechts	202048	430757	Hamon	
BR	865.000	79	rechts	202048	430757	Veen	
BR	866.000	0	as	201208	431187	Hamon	De locatie ligt benedenstrooms van de suppletie. Ook dit monster toont een relatief gelijkmatige verdeling over de breedte in 2020. De peilingen wekken een beeld dat hier aan de linkeroever mogelijk sprake is van een vaste laag, terwijl midden en rechts juist alluviaal zijn. Op deze locatie wordt extra bemonstering voorgesteld voor 'vaarsporen'.
BR	866.000	0	as	201208	431187	Veen	
BR	866.000	-56	links	201175	431140	Hamon	
BR	866.000	-56	links	201175	431140	Veen	
BR	866.000	95	rechts	201261	431266	Hamon	
BR	866.000	95	rechts	201261	431266	Veen	
BR	866.000	95	rechts	201261	431266	Hamon	
BR	866.000	105	rechts	201261	431266	Hamon	
BR	866.000	105	rechts	201261	431266	Veen	
BR	866.000	115	rechts	201296	431282	Hamon	
WL	869.000	0	as	198570	432581	Hamon	Dit ligt op voldoende afstand van de splitsing, en vlak voor de bocht. Geeft inzicht in de heterogeniteit van Boven-Waal o.i.v. de splitsing.
WL	869.000	-66	links	198536	432525	Hamon	
WL	869.000	-66	links	198536	432525	Veen	
WL	869.000	68	rechts	198606	432639	Hamon	
WL	869.000	68	rechts	198606	432639	Veen	
WL	869.000	0	as	198570	432581	Veen	
WL	872.000	-66	links	196362	431324	Hamon	De 2020 data toont sterke variatie in dwarsrichting, opgewekt door de voorgaande bocht. Test hier de dynamiek van de bocht.
WL	872.000	-66	links	196362	431324	Veen	
WL	872.000	60	rechts	196245	431383	Hamon	
WL	872.000	60	rechts	196245	431383	Veen	
PK	872.500	0	as	197095	435507	Hamon	Dit is een locatie met heterogeen sediment. Hier volstaat monster in rivieras. idem
PK	872.500	0	as	197095	435507	Veen	
PK	873.000	0	as	196697	435813	Hamon	
PK	873.000	0	as	196697	435813	Veen	
WL	873.000	0	as	195985	430458	Hamon	Op deze locatie zien we in de 2020 bodempeiling een aantal grote beddingvormen. Daarom zijn hier 3 monsters in de rivieras genomen, en wel met een onderlinge afstand van 30 tot 50 m. We noemen het 'trog' en 'top' maar weten niet of dat echt
WL	873.000	0	as	195985	430458	Veen	
WL	873.000	-75	links	196053	430427	Hamon	
WL	873.000	-75	links	196053	430427	Veen	
WL	873.000	-10	top	196028	430489	Hamon	
WL	873.000	-10	top	196028	430489	Veen	
WL	873.000	-10	trog	196006	430452	Hamon	



Tak	Km-raai	Afstand (m)	Oever	x	y	Instrument	Beschrijving
WL	873.000	-10	trog	196006	430452	Veen	de duintrog en top heeft bemonsterd.



Figuur 2-21 Geselecteerde locaties Boven-Rijn en Waal, bemonstering nov. 2011



Figuur 2-22 Geselecteerde locaties Pannerdensch Kanaal, bemonstering nov. 2011

De geselecteerde locaties zijn aangegeven in Figuur 2-21 en Figuur 2-22. De overwegingen bij deze locaties zijn als volgt:

- Boven-Rijn: Voor de Boven-Rijn houden we rekening met de vaste laag aangebracht aan de rechterzijde bij Spijk (ruwweg tussen km 858.3 – km 862), en de suppletielocatie bij Lobith aan de linkerzijde (tussen km 862 en 864). Op dit traject verwachten we invloeden van deze ingrepen op de bodemsamenstelling in 2020. Dit kan mogelijke verschillen tussen 2020 en de nieuwe campagne verstoren of juist interessante verschillen tonen. Er is geen rekening gehouden met onderhouds-baggerwerkzaamheden. RWS heeft echter aangegeven dat er in 2020 en 2021 maar één keer gebaggerd is op de Boven-Rijn, en dat bij de autosteiger bij Lobith (mondelijke communicatie RWS PPO, Henk Oskam),

die helemaal aan de rechteroever ligt bij km 862,5 en dus niet op een van de monsterlocaties valt.

- Duinen Waal: in de 2020 bodempeiling ontbreken grote duinen in de Boven-Rijn. Wellicht door grofheid (vooral grind) en lage afvoeren zijn deze daar niet gevormd, uitgedempt, en/of mogelijk platgevaren (enkele restanten met amplitude van 0,2 m zijn nog wel zichtbaar, o.a. bij Tolkamer). In de Waal komen in de 2020 peiling wel een aantal bodemvormen voor in een zone rond de rivieras ongeveer bij km 872.7 – 873, vlak voor het begin van het bodemkribben veld. Lengte (in stroomrichting) is orde 60 m (van top naar top). Omdat het aannemelijk is dat hier ook in 2021 duinen zouden optreden, is op deze locatie gericht een aantal monsters genomen met circa 30 á 50 m onderlinge afstand.
- Ribbels: op meerdere delen van de rivier vinden we in de 2020 peiling ribbels met een lengte van (top tot top) van ongeveer 7 m. De kammen in dwarsrichting zijn redelijk lang, maar strekken zich vaak niet over de hele dwarsdoorsnede uit. Het is dus goed om in een aantal dwarsdoorsneden opnieuw de links-, rechts-, en as-bemonstering volledig te herhalen. Dit is gebeurd op de Boven-Rijn en Waal.
- 'Vaarsporen' of langsribbels: langs alle beschouwde trajecten is sprake van langgerekte sporen met een hoogteverschil van circa 0,2 m (zie ook Sloff, 2022). Tussen de afwisselende hoge delen van de verschillende sporen zit een afstand van circa 10 a 20 m. De sporen zijn met hoge waarschijnlijkheid gerelateerd aan scheepvaart (niet aan baggerwerk). Zo is bijvoorbeeld bij Vluchthaven Lobith te zien hoe de sporen de haven indraaien, wat niet kan worden gerelateerd aan bijvoorbeeld secundaire stroomcellen e.d. maar wel aan invarende/uitvarende schepen. Onduidelijk is of de sporen ook terug te vinden zijn in de heterogeniteit van de bodemsamenstelling. Voor deze variatie is daarom bij een tweetal raaien een monsternamen herhaald op een afstand van 10 m links en 10 m rechts in dwarsrichting.

De metingen zijn uitgevoerd met het werkschip ir. F.W. Conrad van Rijkswaterstaat. Bij elke locatie is het schip gefixeerd met spudpalen, en zijn telkens twee monsters genomen, respectievelijk met de Hamon happer en met de Van Veen happer. Door de kraan zowel rechts, naar midden en links te draaien kunnen monsters op onderlinge afstand tot circa 10 m worden genomen zonder het schip te hoeven verplaatsen. Uit de omhooggehaalde hap-monsters wordt een deelmonster geschept en opgeslagen voor zeefanalyse. De rest wordt teruggegooid in de rivier. Ook zijn onderwateropnames gemaakt van de bedding, deze zijn in deze studie niet verder geanalyseerd.

De resultaten van de bemonstering zijn gepresenteerd in Bijlage B.3. De onderstaande tabel is een samenvatting van de bevindingen uit de bijlage.

Locatie	Doel	Beschrijving / conclusie
Km 873 Waal	Effect duinen in rivieras (onbekend of er ook duinen waren); verschil met 2020.	3 monsters op de as tonen $D_g$ tussen 1,15 mm en 1,38 mm (Hamon) en zand perc. van 52% tot 67%. Onvoldoende onderscheid om effect duinsortering aan te tonen. Monsters op as zijn aanzienlijk fijner dan in 2020 ( $D_g$ was 2,73 mm, zand 33%), maar voor linkeroever vergelijkbaar fijn als 2020 ( $D_g$ orde 1 mm).

Locatie	Doel	Beschrijving / conclusie
<b>Km 872 Waal</b>	Effect bochtsoortering, extreem verschil in 2020 duiden; verschil met 2020.	In de binnenbocht links meten we een $D_g$ van circa 2,5 mm (met 40% zand), terwijl in 2020 hier 0,6 mm werd gemeten (91% zand). In de buitenbocht meten we met Hamon een grof mengsel ( $D_g=4,1$ mm; 31% zand, Hamon), maar dat is veel fijner dan in 2020 ( $D_g=7,3$ mm, 8% zand). Echter, met de van Veen meten we $D_g=7,5$ mm (9% zand), wat dus weer lijkt op het 2020 monster. Van Veen moest meerdere keren worden herhaald omdat de happer niet gesloten naar boven kwam.
<b>Km 869 Waal</b>	Invloed van splitsingspunt, in bochtovergang; verschil met 2020.	We meten $D_g=2,3$ mm rechts (42% zand), 4,1 mm as (27% zand), en 4,2-4,9 mm links (30% zand). In alle gevallen zijn de resultaten redelijk vergelijkbaar met 2020 waarden ( $D_g=3-4,3$ mm, 28-37% zand).
<b>Km 866 Boven-Rijn</b>	Benedenstrooms van suppletie aan linkerzijde, en test van vaarsporen aan rechterzijde; verschil met 2020.	Links vinden we een relatief fijn zandiger mengsel ( $D_g=3$ à 3,8 mm; 35% zand) en fijner dan 2020 ( $D_g=4,47$ mm; 25% zand). Voor de as zijn resultaten vergelijkbaar met 'links', en met de meting in 2020 op de as. De 3 monsters rechts op geringe afstand tonen onderlinge forse verschillen: met van Veen tot factor 2 in $D_g$ en factor 4 in zandperc. ( $D_g=2,72 - 5,84$ ; zand 11,7 - 42,5%). Met Hamon is verschil iets minder sterk maar nog steeds significant ( $D_g=3,24 - 4,46$ mm; zand 20 - 36,6%). Het monster van 2020 valt binnen deze bandbreedte.
<b>Km 865 Boven-Rijn</b>	Benedenstrooms van suppleties die in 2016 en 2019 aan linkerzijde zijn gedaan (tot km 864); verschil met 2020.	Rechts vinden we sediment met $D_g=3,8-4,4$ mm (zand 26-29%) wat vergelijkbaar is met 2020. Op as vinden we $D_g=2,5-2,7$ mm (42% zand), wat een lagere $D_g$ is dan in 2020 (3,5 mm, 35% zand). Links vinden we een relatief grof mengsel ( $D_g=5,5$ mm, 28% zand) wat redelijk lijkt op het 2020 monster.
<b>Km 863 Boven-Rijn</b>	Ligt midden in de suppletiezone (tussen km 862-864), die aan de linkerzijde zijn uitgevoerd in 2016 en 2019. Effect vaarsporen; verschil met 2020.	Rechts vinden we relatief grove monsters ( $D_g=4,7-6,2$ mm, zand 15%) wat grover is dan in 2020 ( $D_g=3,3$ mm, 25% zand), ondanks de ondiepe binnenbocht: heeft mogelijk te maken met erosie op deze locatie (1,5 m erosie na 2019). Ook rivieras is grof ( $D_g=4,9-5,9$ mm; Zand 24-27%) maar ondanks gelijke $D_g$ heeft het 2020 monster minder zand (14%). Links vinden we iets fijner materiaal ( $D_g=3,5-4,4$ mm; zand 29-37%) maar aanzienlijk fijner dan 2020 monster ( $D_g=16$ mm, 7% zand). Ook de andere monsters op korte afstand van dit 'links' monster hebben vergelijkbare samenstelling (4 tot 5 mm, 30% zand). Onderscheid in vaarsporen is hier niet uit af te leiden.
<b>Km 872.5 Pann. Kanaal</b>	Verskil met 2020	Relatief grof sediment ( $D_g=4-5,6$ mm; 7-17% zand) en vergelijkbaar met 2020 monster ( $D_g=5,3$ mm; 12% zand).
<b>Km 873 Pann. Kanaal</b>	Verskil met 2020	Matig grof monster ( $D_g=3,2-3,4$ mm; zand 32%) en vergelijkbaar met 2020 monster ( $D_g=3$ mm; 32% zand)

In alle gevallen is sprake van een forse spreiding in de karakteristieke korreldiameters en percentages, zowel in de ruimte als in de tijd (vergelijking met 2020). Echter uitgaande van de eerder waargenomen spreiding van meerdere campagnes (zie paragraaf 2.4) zijn op een paar uitzonderingen na (met name km 872 Waal en km 863 Boven-Rijn) de nieuwe metingen vergelijkbaar met die van 2020.

# 3 Bronnen van variaties in de bodemsamenstelling

## 3.1 Inleiding

De gegevens in voorgaande hoofdstuk tonen dat bodemsamenstelling in de Rijntakken grote variabiliteit vertoont. Enerzijds zijn deze variaties in ruimte en tijd toe te schrijven aan natuurlijke en antropogene processen in de rivier, en anderzijds aan de bemonsteringsmethode en de analyses. In dit hoofdstuk beschrijven we een aantal belangrijke bronnen van variabiliteit die een rol spelen in de Rijntakken.

De variaties in bodemsamenstelling in ruimte en tijd kunnen niet los worden gezien van morfodynamiek en morfologische verschijnselen. Sediment sortering, morfologie, waterbeweging, en sedimenttransport zijn volledig met elkaar verbonden. Die relatie kan worden gebruikt om schalen van morfologische verschijnselen te koppelen aan de variaties in bodemsamenstelling. Zowel in diepte (gelaagdheid, variabele actieve laag dikte), in ruimte (duinen, bochtprofielen) en in tijd (hoogwater, laagwaters). Een goed inzicht in de variabiliteit van bodemligging (met hoge mate van detail) biedt dus een belangrijke eerste stap in het begrijpen van de variaties in bodemsamenstelling.

In dit hoofdstuk behandelen we een aantal belangrijke bronnen van onzekerheid in de gemeten bodemsamenstelling. We onderscheiden de volgende bronnen in dit hoofdstuk:

Bemonstering, bronnen van onzekerheid zijn:

- Eigenschappen van instrument, slaagkans/succes/acceptatie van monster;
- Methode van splitsen van monster;
- Zeefanalyse, o.a. aantal zeven en bovengrens van het grofste monster;
- Locatie en dichtheid/aantal van monsters.

Analyse, bronnen van onzekerheid zijn:

- Toepassing van ruimtelijke en temporele middelingen in de gegevens;
- Rol van uitschieters;
- Fouten in verwerking van de data naar percentielen/middelingen;
- Statistische modellen voor interpoleren van de gegevens (in ruimte en tijd).

Ruimtelijke en temporele variabiliteit in bodemsamenstelling door processen van uitzeeving en sortering worden veroorzaakt door:

- Erosie en sedimentatie processen;
- Hoogwater, laagwater dynamiek;
- Aanbod type sediment (van bovenstreams en van de zijden, bijvoorbeeld kribvakken en oevers);
- Rivierbochten (invloed spiraalstroom en dwarshelling van bochtprofiel);
- Scheepvaart (o.a. intensiteit en schaal, retourstroom en volgstroom, vaarsporen), zie bijv. Sloff (2022);
- Bagger en stort (bijv. ook invloed van terugstorten fijn sediment uit ondiepe binnenbocht op de grove bedding in buitenbochten);
- Invloed van ingrepen (Ruimte voor de Rivier maatregelen, suppleties);
- Variabiliteit beddingvormen (verticale sortering, onderscheid toppen en dalen);
- Aansnijden onderlagen met bijvoorbeeld relatief fijn sediment, of relatief grof (moeilijk erodeerbaar) materiaal;
- Winnowing, d.w.z. uitzeeving van fijne sediment uit een raamwerk van (afgepleisterd) grof materiaal;

- Afslijting van korrels (abrasion);
- Patches, oftewel een patroon van vlekken met variabele samenstelling onder invloed van ruimtelijke variaties in bodemschuifspanning, onder andere door variabiliteit in bodemligging (beddingvormen), en de invloed ervan op bodemtransport, etc.

## 3.2 Bemonstering

De methode van bemonsteren, de bewerking van de monsters speelt een rol bij de betrouwbaarheid van de monsters. In hoeverre is een bemonstering in staat om een statistisch representatief beeld voor een bedding te creëren?

Bemonstering van de bedding van de Rijntakken vindt plaats door op puntlocaties met een happer of een boor een hoeveelheid sediment naar boven te halen, en daarvan een zeefanalyse te maken. In het verleden zijn diverse technieken toegepast. Door verschillen in de methodiek van het bemonsteren en verwerken kunnen echter verschillen optreden in de resultaten van de zeefanalyse. Hier wordt verder op ingegaan in deze paragraaf.

### 3.2.1 Mechanische meetinstrumenten en methode

In de loop van de jaren zijn voor bemonsteringen verschillende instrumenten en methodes voor verwerking en analyse van monsters toegepast. In de beschouwde gegevens van de Rijntakken is gebruik gemaakt van de volgende instrumenten (Figuur 3-1):

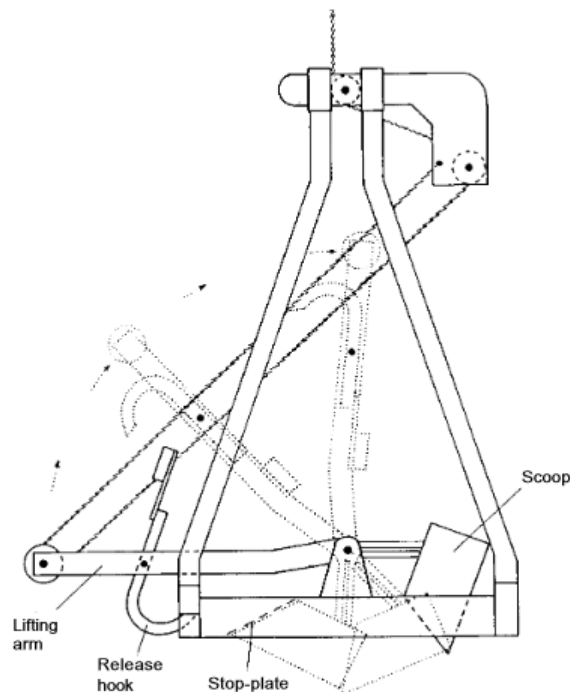
- Hamon bodemhapper: het instrument, dat is ontwikkeld door NITG voor onderzoek in havenmondingen in de jaren 70 van de vorige eeuw (Oele, 1978). De Hamon happer wordt ook vaak gebruikt voor bemonstering van benthos.
- Van Veen bodemhapper: een grijper van staal die in geopende toestand via een kabel (of touw) wordt neergelaten tot op de bodem. Wanneer de grijper vervolgens weer wordt opgehaald sluiten de grijpers zich en wordt een hap grond meegenomen.
- De baggerbeugel en bodemmonsternemers: dit zijn technieken die werden gebruikt in historische meetcampagnes, en een monster verzamelden door het instrument over de bodem te slepen.
- Boringen, bijvoorbeeld de Vibrocore (buis wordt de bodem ingetrild, tot circa 3 m). De methode biedt ongestoorde monsters en inzicht in de opbouw van gelaagdheid in de bedding.



Figuur 3-1 Links de Van Veen happer, midden de Hamon happer, rechts de Vibrocore

De bemonstering gebeurt met behulp van een schip met kraan. Voor de campagne in 1995 is een Van Veen happer gebruikt. De Hamon happer is bij de campagne van 2020 gebruikt.

De Hamon happer schept het materiaal van de toplaag van de rivierbodem (tot ongeveer 25 cm diepte, orde 40 liter) in een opvangreservoir (schip) alvorens het aan dek wordt gehaald. Bij het bemonsteren komt de top van de bedding eerst in de schep. Figuur 3-2 toont de werking van de Hamon happer. Bij het neerlaten van de Hamon happer, staat de schep en beugel in horizontale positie. Bij het ophalen wordt eerst de beugel opgetrokken waardoor de schep een hap sediment opneemt. De schep wordt afgesloten met een klep, zodat bij het ophalen geen sediment kan wegstromen.



Figuur 3-2 Werking van de Hamon happer (marbef.org)

Bij de Van Veen happer vullen de grijpers zich met sediment als deze sluit. Echter, een volledige sluiting van de grijpers kan niet worden gegarandeerd. De Van Veen happer heeft vooral moeite als er veel grof materiaal in het mengsel aanwezig is. De happer kan dan minder diep penetreren en kan leegstromen bij het ophalen als de bek niet volledig sluit. Dit leidt vaak tot meerdere pogingen totdat fijn genoeg materiaal wordt gevonden. De Hamon happer heeft minder last van deze beperkingen. De Van Veen monsters zullen daarom vaak een gemiddeld fijner mengsel opleveren dan de Hamon happer bij het bemonsteren in een sterk heterogeen riviertraject: de grove monsters van de Van Veen happer worden vaak afgekeurd wanneer bij het ophalen de bek niet is gesloten (visueel, uitstromend water), en alleen de fijnere monsters zullen succesvol zijn. Het uitspoelen van fijn materiaal, wat juist zou leiden tot een grover monster, wordt met deze procedure vermeden.

Voor de oudere bemonsteringen zijn de volgende instrumenten gebruikt:

- Baggerbeugel (gebruikt en beschreven in RWS, 1966) neemt een monster van circa 2 kg. Dit instrument bestaat uit een ring met een diameter van 17,5 cm. waaraan een flexibele zak is bevestigd die een diepte heeft van 20 cm. De ring is bevestigd aan een metalen buis van ca. 6 m lengte. Vanaf het achterschip wordt de ring de bodem in gedrukt terwijl er vanaf het voorschip d.m.v. een koord aan de ring wordt getrokken. Tijdens het ophalen van de "collectezak" wordt de metalen buis verticaal gehouden waardoor de flexibele zak wordt afgesloten en het monster dus niet kan uitspoelen. De diepte van de zak waarin het bodemmateriaal wordt verzameld, dient, zoals bij gebruik in de praktijk bleek, groter te zijn dan de nu gehanteerde 20 cm omdat deze diepte het uitspoelen niet volledig voorkomt bij een groot monster. Een diepte van 35 cm is daarom een betere maat.

Bij waterdiepten > 6 m. kan de baggerbeugel, t.g.v. te grote stroomsnelheden, niet meer worden gebruikt.

- Bodemonsternemer RWS (gebruik is beschreven in Rijkswaterstaat 1966) neemt een monster van circa  $\frac{3}{4}$  kilo. Dit apparaat bestaat uit een stalen mantel van 40 cm lengte die een inwendige diameter heeft van 8 cm. Aan de kop van de mantel loopt deze diameter uit tot 12,5 cm. Aan het eind van de mantel is een beugel met klemschroef bevestigd waaronder een jampot, waarin het bodemmateriaal zich verzamelt, wordt vastgeklemd. Het apparaat wordt aan een touw over de bodem getrokken en kan bij iedere waterdiepte worden gebruikt uitgezonderd op plaatsen waar de bodem hard en vlak is. Door de bevestiging van de pot aan het eind van de mantel hoeft tijdens het ophalen van het apparaat uitspoelen van het monster niet gevreesd te worden.



Figuur 3-3 Voorbeelden van een baggerbeugel

Andere veel voorkomende bodemhappers die gebruikt worden in de praktijk zijn, maar over het algemeen niet voor de historische metingen in de Rijntakken gebruikt in dit rapport (zover bekend):

- Ekman(-Birge) happer: De Ekman-grab (of bios-happer) bestaat uit een vierkante metalen bak van 15 x 15 x 21 cm, met boven en onder kleppen (Figuur 3-5). De bovenste kleppen sluiten de bak door hun eigen gewicht af, maar gaan tijdens het laten zakken door de waterstroming door de bak open staan. Het sluitmechanisme wordt geactiveerd middels een vallood. Door middel van een veermechanisme worden de onderste kleppen gesloten. De genomen monsters zijn redelijk ongestoord. Voor harde bodems is het apparaat ongeschikt. De Ekman-grab kan gemakkelijk met de hand worden bediend
- Boxcorer (Lengkeek et al, 2008): dit type happer bestaat uit een 'Box', die de bodem in wordt gedrukt door een relatief zwaar gewicht. De Boxcorer is omringd door een stelling om de box die ervoor zorgt dat de Boxcorer altijd recht op de bodem staat. Wanneer de Boxcorer op de bodem staat wordt er een schuif onder de Box geschoven en zo wordt het ingesloten sediment gevangen. Vanwege het grote gewicht en de stelling die ervoor zorgt dat de Boxcorer recht staat, bemonstert de Boxcorer relatief nauwkeurig. In de wetenschappelijke literatuur wordt de effectiviteit van de Boxcorer minder in twijfel getrokken. De boxcorer functioneert minder goed in stromend water en de bediening is relatief duur, en is daarom minder geschikt voor de bemonstering in de Rijntakken.

Een meer uitgebreid overzicht van happers en boormethoden is beschreven in Rijkswaterstaat (1989).

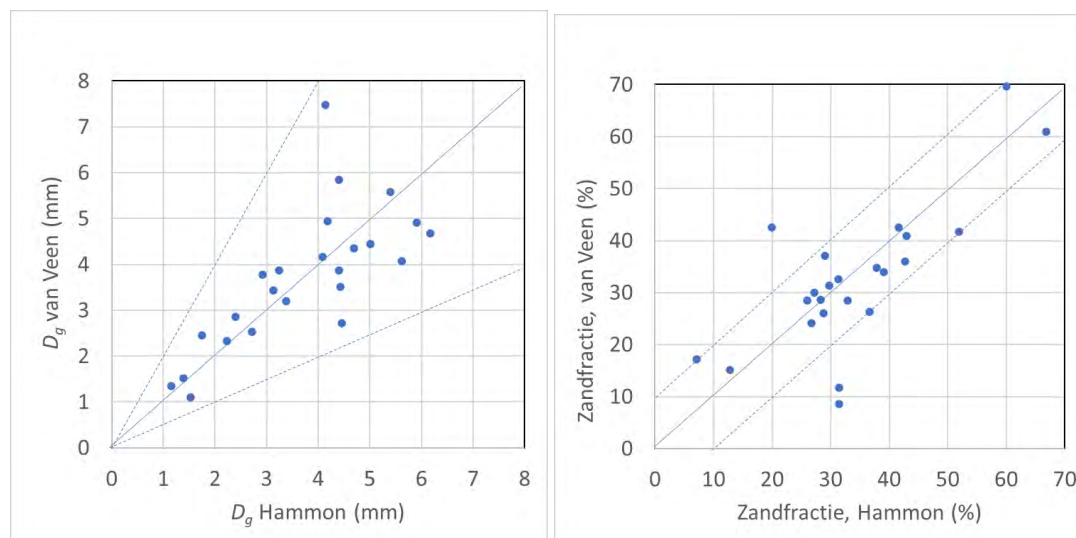


### 3.2.2 Onzekerheden ten aanzien van de bemonsteringsmethode met bodemhappers

Door allerlei variaties in de wijze waarop de happers het mengsel opscheppen en ophalen, kunnen er verschillen optreden in gemeten samenstelling. De grootte van deze verschillen is lastig te bepalen op basis van veldmetingen, omdat andere effecten meespelen. Zo is het niet mogelijk een monster met een ander instrument te herhalen op exact dezelfde plek en tijdstip. Desondanks zijn in deze paragraaf een aantal observaties besproken die enig inzicht geven.

Bij de extra bemonstering in november 2021 (paragraaf 2.6) in Waal, Pannerdensch Kanaal en Boven-Rijn, zijn op iedere meetlocatie telkens opeenvolgend een monster met de van Veen happer en een monster met de Hamon happer genomen. Bij het bemonsteren is er specifiek op gelet dat de van Veen happer gesloten was bij het ophalen: in een aantal gevallen moest de bemonstering meerdere keren worden herhaald omdat door stenen of grind de happer niet voldoende sloot. De Hamon happer heeft dat probleem niet. Omdat de happers aan een kabel zijn neergelaten zijn, ondanks de vaste positie van het schip, de twee happers door stroming niet op exact hetzelfde punt op de bodem beland. De uitkomsten van de zeefanalyses zijn in Appendix B.3 gepresenteerd. In Figuur 3-4 zijn de gemiddelde diameters en zandpercentages voor de Hamon en de van Veen monsters met elkaar vergeleken. Daaruit volgt:

- De afwijking nemen toe voor toenemende korreldiameter, of afnemende zandpercentage.
- De samenstelling van Veen monsters is niet consequent grover (zoals soms wordt beweerd) maar kan zowel grover als fijner uitvallen. De variaties liggen binnen een bandbreedte van tweemaal de geometrisch gemiddelde diameter  $D_g$ .
- De afwijking in zandpercentages ligt grotendeels binnen een zone van orde 10%. In 3 situaties (van de 24 van Veen monsters) is sprake van een grotere afwijking, zowel hogere als lagere percentage (orde 20%).



Figuur 3-4 Vergelijking uitkomsten van 48 monsters met de Hamon en de van Veen happer op dezelfde locaties in Boven-Rijn, Waal en Pannerdensch Kanaal. Links: vergelijking gemiddelde diameter  $D_g$ , waarbij de schuine buitenste lijnen een factor 2 aangeven; Rechts: vergelijking van zandpercentage, waarbij de schuine lijnen een bandbreedte van 10% aangeven.

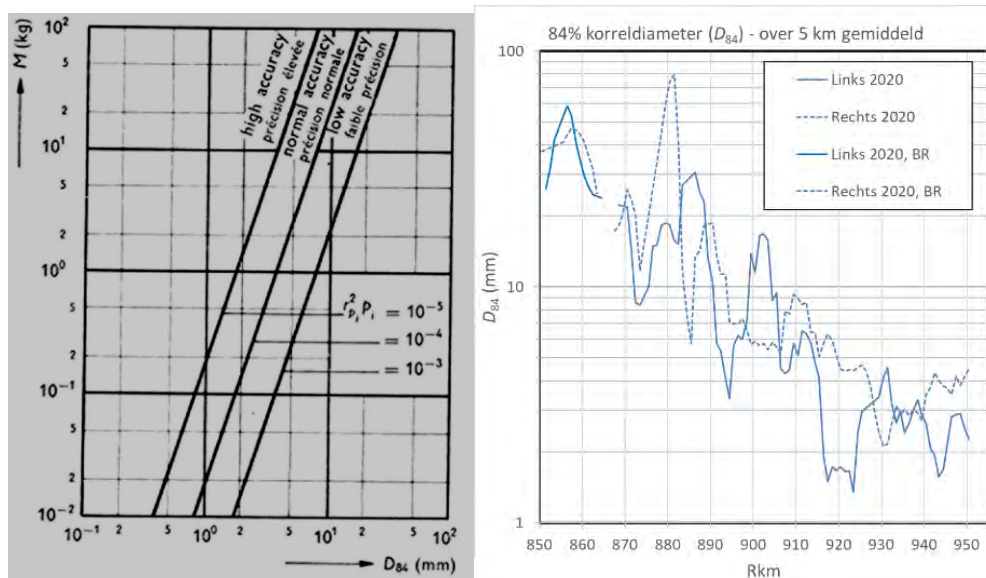
In een test van (kleine) happers vergelijken Lengkeek et al. (2008, 2010) de Van Veen, Birge Ekman en een duiker handschap (soort 'snoepschap'). De eerder genoemde beperkingen van de happers in grindbeddingen (niet sluiten van happer) werden in deze studie bevestigd. De happers functioneren ook slecht op taluds of een met vegetatie begroeide bedding.



Figuur 3-5 Drie sediment monster methoden onderzocht door Lengkeek et al (2008, 2010), links Van Veen happer, midden Birge-Ekman happer, rechts duiker met bodemschep

### 3.2.3 Onzekerheden met betrekking tot volume van monster

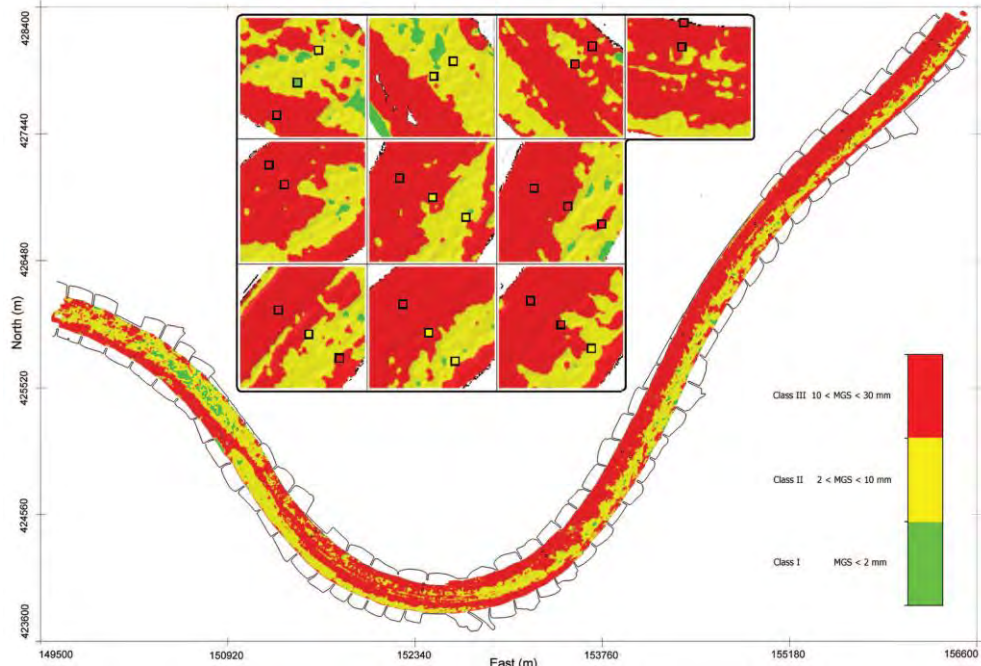
Het is van belang in alle gevallen dat het monster voldoende volume (of oppervlak) heeft om een statistisch representatieve korrelverdeling te kunnen bepalen. Hoe grover het mengsel, hoe groter het monster moet zijn. In de meetcampagnes in de Rijntakken in de afgelopen 30 jaar zijn grote monsters genomen, maar op het meetschip is daarvan slechts een deelmonster opgeslagen voor de zeefanalyse (zie ook volgende paragraaf). De Vries (1970) geeft een schatting op basis van statistische eigenschappen van een lognormale kansverdeling, waarbij de benodigde massa wordt gerelateerd aan de  $D_{84}$  (groeve staart van de verdeling), zie Figuur 3-6 (links). Op basis van de waargenomen  $D_{84}$ , zie Figuur 3-6 (rechts), volgt hier ruwweg uit dat op de Boven-Rijn ( $D_{84}$  ruwweg 40 mm) monsters van meer dan 100 kg noodzakelijk zijn (meer dan 60 liter). De beschikbare bodemhappers zijn niet in staat zulke grote monsters te nemen. Petrie (1998) bevestigt, na analyse van literatuur, dat door de keuze van een grove bovengrenswaarde van het mengsel (zoals  $D_{84}$ ) de aanbevolen volumes excessief groot kunnen worden. Uit Petrie (1998) volgt dat er voor grove mengsels geen goede generieke richtlijn bestaat voor monstergrootte en de betrouwbaarheidsintervallen die daarmee samenhangen. De verwachting is dat voor de gegradeerde monsters vooral het aandeel van de grofste fracties onbetrouwbaar zal zijn.



Figuur 3-6 Links: Ontwerpcurve voor massa van sedimentmonster als functie van  $D_{84}$  volgens de Vries (1970); rechts: verloop van  $D_{84}$  in de Boven-Rijn en Waal voor de 2020 bemonstering

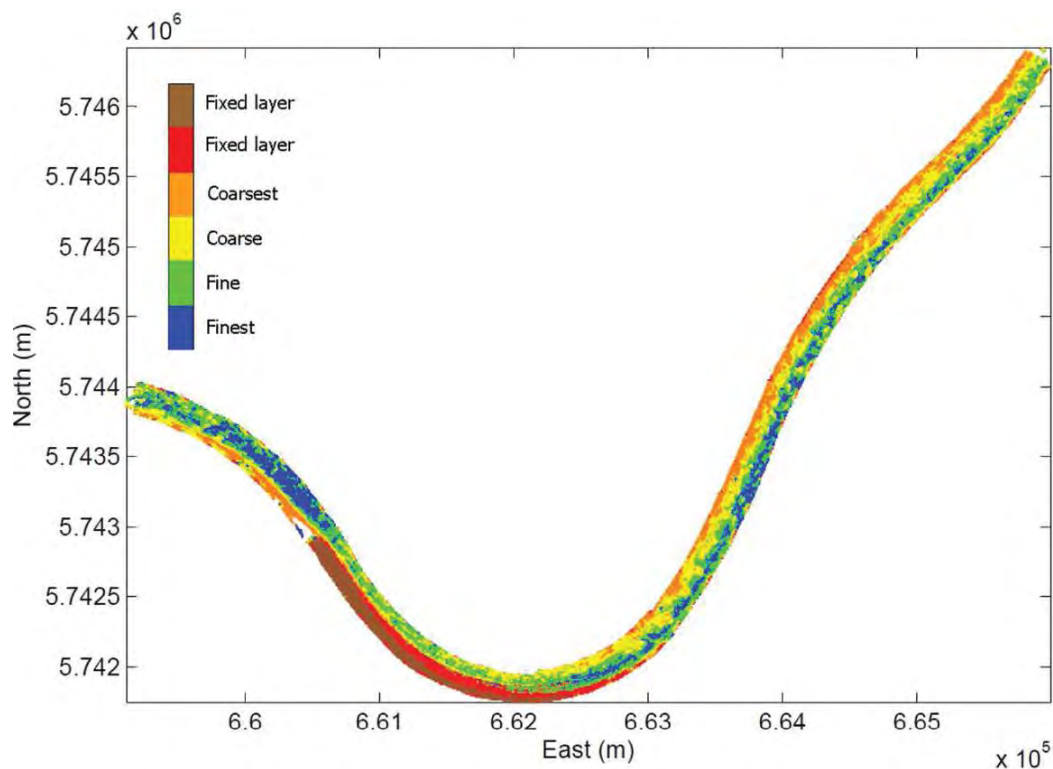
Rond 2010 zijn pogingen gedaan om met behulp van de 'backscatter' van de multibeam echopeilingen een ruimtelijke verdeling van sediment aan het oppervlak van de bedding te meten. In het kader van een KPP-projecten bij Deltares is met de TU-Delft (Mirjam Snellen) de door hen uitgewerkte methode toegepast voor de Rijntakken.

Vanwege de variabiliteit van de bodem (ribbels, duinen) en de beperkt diepte (geringe footprint) is gebruik gemaakt van gecombineerde verwerking van dieptemeting en backscatter. Figuur 3-7 toont het resultaat voor de pilot bij de bocht van Sint Andries, zoals gepresenteerd door Amiri-Simkooei et al. (2009). Het resultaat toont dat een correlatie van 0.75 is bereikt tussen de akoestisch bepaalde korreldiameter en de mediane diameter van de monsters.



*Figuur 3-7 Akoestische classificatie van Waal traject km km 920–930 bepaald vanuit backscatter van de multibeam echosounder. De afzonderlijke punten geven de resultaten van afzonderlijke genomen bodemmonsters (voor validatie).*

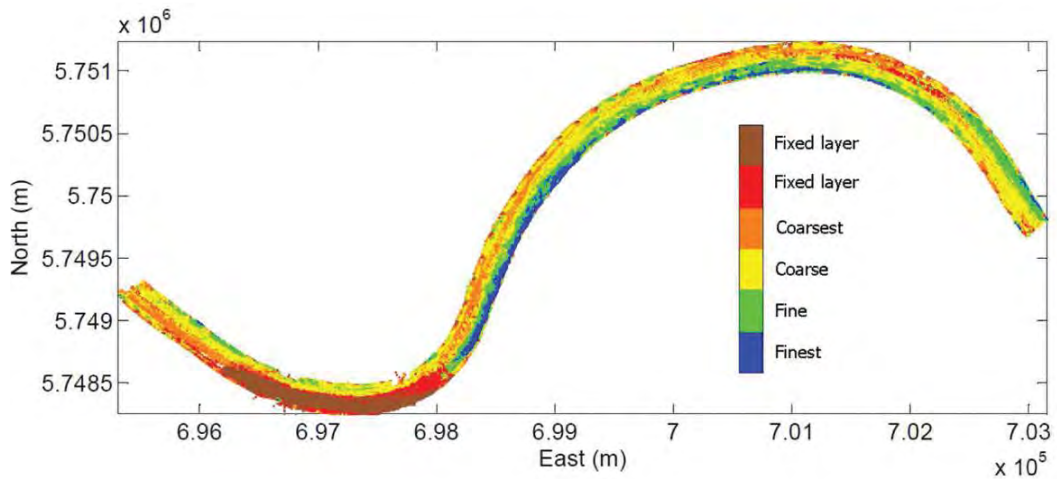
Een verdere uitbreiding van de methode is gepresenteerd in Eleftherakis et al. (2012). Deze uitbreiding heeft geleid tot een nog betere duiding van klassen, en bijvoorbeeld de detectie van de ‘vaste laag’ bij Sint Andries, zoals is getoond in Figuur 3-8.



*Figuur 3-8 Classificatie van bodemsamenstelling met behulp van backscatter en dieptepeiling uit multibeam peilingen voor de bocht bij Sint Andries (Eleftherakis et al., 2012).*

In deze weergave in Figuur 3-8 is nog duidelijker te zien dat voor het traject bovenstrooms van de scherpe bocht de linkerzijde van de rivier aanzienlijk fijner is dan de rechterzijde, onafhankelijk van de aanwezigheid van bochten. In de binnenbocht naast de vaste laag is sprake van een fijner mengsel, maar nog wel grover dan de linkerzijde bovenstrooms en de rechterzijde benedenstrooms. Opvallend is de dwarsverdeling direct achter de vaste laag: de erosiekuil benedenstrooms is erg grof, en strekt zich uit over een forse lengte langs de linkeroever. De rechterzijde (sedimentatiezone) is aanzienlijk fijner. Zowel in topografie als in samenstelling treedt hier een asymmetrische response op door de vaste laag.

Eenzelfde gedrag is ook gevonden ter plaatse van de bochten bij Nijmegen. Ook hier is sprake van een fijnere samenstelling in de linkerzijde, maar kan een bochteffect niet worden uitgesloten (fijnere sediment in binnenbocht door bochtsortering, zie paragraaf 3.4). Daarnaast wordt in deze bochten zowel links als rechts gevaren door scheepvaart. Benedenstrooms van de vaste laag is ook hier sprake van een grove bedding in het verlengde van de vaste laag, en een fijnere bedding in het verlengde van de binnenbocht.



Figuur 3-9 Klassificatie van bodemsamenstelling met behulp van backscatter en dieptepeiling uit multibeam peilingen voor de bocht bij Sint Andries (Eleftherakis et al., 2012).

### 3.2.4 Scheiden en verwerking van de monsters in het lab

Afhankelijk van de opdracht en de aard van het materiaal wordt vooraf bepaald welke methode of combinatie van methoden wordt gebruikt (BRO, 2021). Bij alle methoden, laserdiffractie uitgezonderd, wordt bij voorkeur het materiaal na de voorbehandeling nat gezeefd over de 63 $\mu$ m-zeef. Hiermee worden de korrels kleiner dan 63  $\mu$ m, gewoonlijk aangeduid als fijne fractie, gescheiden van de korrels groter dan 63  $\mu$ m, gewoonlijk aangeduid als de grove fractie. Wanneer er geen fijne fractie in het materiaal aanwezig is (minder dan 5 %) wordt deze stap overgeslagen. Normaliter wordt de grove fractie verder onderverdeeld wanneer het aandeel groter is dan 10 %. Dit gebeurt door het droge materiaal te zeven.

De fijne fractie wordt normaliter ook verder onderverdeeld wanneer het aandeel groter is dan 10 %. De verdeling van de fijne fractie wordt bepaald op basis van de bezinksnelheid van de korrels en die wordt bepaald met behulp van een pipet, een hydrometer of door middel van röntgenstraling. De klassegrenzen bij deze methoden zijn minder nauwkeurig dan bij zeping.

Wanneer laserdiffractie wordt toegepast, wordt het materiaal na de voorbehandeling nat gezeefd over de 2mm-zeef. De verdeling van de korrels kleiner dan 2 mm wordt bepaald door middel van laserdiffractie en die van de korrels groter dan 2 mm door middel van droge zeping. Laserdiffractie is een optische meetmethode waarbij het lichtpatroon dat ontstaat door de verstrooiing en buiging van het licht door de deeltjes in het materiaal (0 tot 2 mm) wordt gemeten. Met behulp van een optisch model wordt het gemeten patroon omgerekend naar de korrelgrootteverdeling.

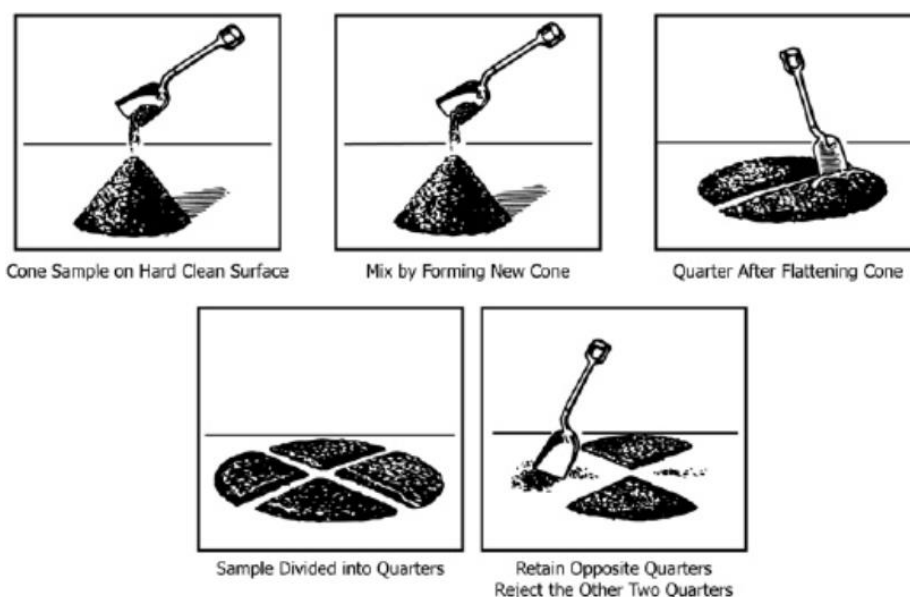
De afspraak is dat botresten, ijzerconcreties en niet-stenig antropogeen materiaal voorafgaand aan de bepaling worden verwijderd.

Als een monster in een aantal gelijkwaardige delen gescheiden moet worden, kan gebruik worden gemaakt van een scheid-apparaat, bijvoorbeeld zoals dat ontwikkeld is door het Waterloopkundig Laboratorium met enkele verbeteringen (nota 58.7 van de Afdeling Studiedienst, Klassificatie en beschrijving instrumenten), zie Figuur 3-10. Deze apparaten worden ook genoemd in de internationale richtlijnen, bijvoorbeeld ASTM C702/C702M-11 (Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size). Over het algemeen worden deze toegepast in het laboratorium waar de monsters worden verwerkt.



Figuur 3-10 Splitsen van monsters: het mengsel wordt aan de bovenzijde ingestort, waarna het via de verdeler (middendeel) wordt gesplitst in twee delen in de twee bakken aan de onderzijde.

Scheiden van monsters kan volgens de ASTM C702/C702M-11 richtlijn ook worden gedaan op de wijze zoals geschetst in Figuur 3-11. Door het monster eerst op een hoopje te scheppen (zorg voor goede menging), daarna af te platten, en vervolgens in 4 gelijke delen te splitsen, waarvan 2 overliggende kwartielen worden bewaard, wordt eveneens een relatief gelijkwaardige scheiding gerealiseerd. Een dergelijke aanpak kan dus eventueel aan boord worden toegepast.



Figuur 3-11 Handmatig splitsen van sedimentmonsters op een harde schone ondergrond

Bij het nemen van monsters met de Hamon happer (onder andere tijdens de 2020 en 2021 bemonstering) wordt de bak in een krat geleegd, en wordt het sediment met één beweging gladgestreken in de krat. Vervolgens wordt een deelmonster genomen door een emmertje vol te scheppen van de bovenzijde van de inhoud van de krat, in plaats van één van bovengenoemde methoden, zie Figuur 3-12. Daarbij wordt opgemerkt dat het materiaal dat het eerst in de happer kwam (dus de toplaag van de bedding) het laatst in de krat zal komen, wat kan inhouden dat het monster mogelijk niet volledig is gemengd. In dat geval is het mogelijk dat met deze pragmatische aanpak niet wordt gegarandeerd dat het deelmonster een goede weergave is van het totale monster. Het is niet bekend of dit nader is getest. Ook bij de Van Veen happer is het gebruikelijk een deelmonster te nemen, waarbij eveneens met een schepje min of meer willekeurig materiaal uit het monster wordt geschept.



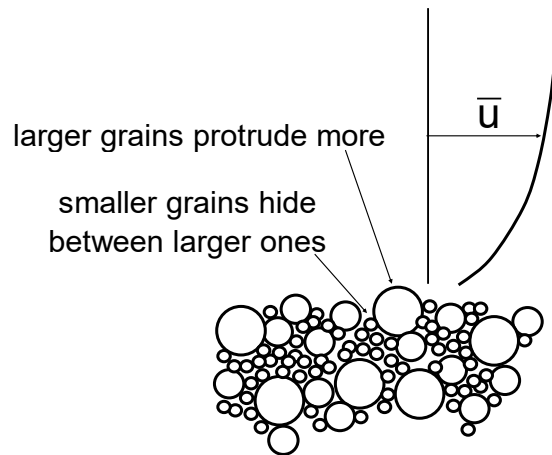
Figuur 3-12 Deelmonster van een Hamon bodemmonster, Boven-Rijn

### 3.3 Uitzeving en sortering

Er is een groot aantal processen en condities die bijdragen aan de verdeling van de zand en grindkorrels in de rivierbedding. Onder invloed van stroming en turbulentie zullen korrels worden verplaatst en getransporteerd. Selectief transport van deeltjes kan ervoor zorgen dat fijn materiaal wordt weggespoeld, en een grove grindbodem resteert. Vervolgens zal het fijne materiaal weer kunnen worden afgezet op locaties met minder energieke condities, waardoor daar plaatselijk een zandbodem (zonder grind) ontstaat. Dergelijke sorteringprocessen treden continu op in de rivieren.

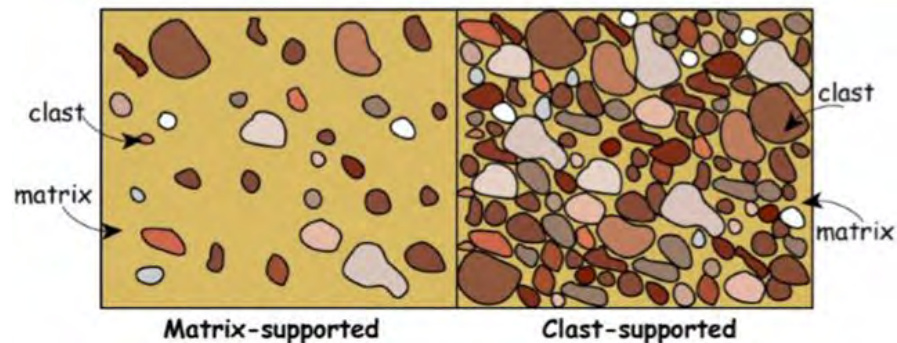
Over het algemeen geldt voor gegradeerde sedimentmengsels dat er meerdere effecten optreden die het begin van beweging en vervolgens het transport beïnvloeden:

- 1 Het effect van massa: de grote korrels hebben een grotere massa, en daardoor is een grotere kracht nodig om deze in beweging te krijgen en in beweging te houden. Dit leidt tot selectief transport.
- 2 Het effect van hiding en exposure: de grote korrels hebben een groter oppervlak en steken meer uit in de stroming (exposure), en ondervinden daardoor een grotere kracht dan de fijnere korrels, die zich als het ware achter/tussen de grote korrels 'verstoppen' (hiding), zie Figuur 3-13.



Figuur 3-13 Effect van hiding en exposure (Parker, 2004)

- 3 Het effect van de matrix en porositeit van het mengsel: kleinere korrels vullen de poriën tussen de grotere korrels en zorgen dat drukfluctuaties en stromingen minder sterk in de bedding doordringen. Bij een toenemend gehalte van zand (>30%) tussen het grind, zal het zand het poriën volume van het grind overschrijden. De bedding gaat dan over van een 'clast-supported' (raamwerk van grind en stenen) naar een 'matrix-supported' bedding (Frings et al, 2012, Wilcock, 1998), zie Figuur 3-14.



Figuur 3-14 Onderscheid in matrix ondersteund (zand als matrix) en clast ondersteund sediment (raamwerk van grind en stenen) (geocaching.com)

- 4 Ruwheid, van korrels en beddingvormen, dragen bij aan de schuifspanningen en turbulente fluctuaties in stroming in de grenslaag aan de bodem waar het sediment mee in transport raakt. Kleinere zandkorrels leiden over het algemeen tot geringere stroomkracht op de bodem, een "gladde" bodem, en daardoor lagere mobiliteit van het beddingmateriaal. Dit leidt tot een terugkoppeling tussen samenstelling van het oppervlak en de stroming, en de veranderingen in ruimte en tijd.
- 5 Afslijting van korrels ('abrasion') zorgt voor een toename van fijn sediment (en afname grofheid van mengsel) in stroomafwaartse richting door de continue interacties tussen de korrels. Het effect speelt alleen een rol wanneer veranderingen over grote afstanden worden beschouwd (honderden kilometers).

In de praktijk treden de eerste twee effecten (massa effecten en hiding en exposure) gelijktijdig op, maar zal het effect van massa netto iets meer bijdragen dan het hiding effect (Egiazaroff, 1965). Een belangrijke consequentie is wel dat een hoeveelheid zand in het mengsel zorgt dat grind makkelijker wordt getransporteerd dan zonder dit zand. Voor het laatste speelt ook het derde en vierde effect een belangrijke rol: de structuur van de bedding kan een rol spelen hoe het zand-grind mengsel wordt getransporteerd, en daarmee ook de gevoeligheid voor veranderingen in zandgehalte.



De verschillende effecten werken gezamenlijk en versterken of verzwakken elkaar, waardoor het lastig is om te voorspellen welke evenwichtstoestand de rivier zal ontwikkelen. Frings et al. (2011) tonen dat op grote schaal het proces van stroomafwaartse verfijning ('downstream fining') door een combinatie van meerdere processen kan ontstaan, waarbij selectief zwevend transport (meer dan bodemtransport) en duinsortering een grote rol spelen. Daarnaast benoemen Frings et al. (2011) het belang van de riviersplitsingen op het ontstaan van de stroomafwaartse verfijning.

Veel theorie voor voorspellen van bodemsamenstelling en evenwichtscondities is gebaseerd op constante hydraulische condities. In de Rijntakken is sprake van variaties in afvoer gedurende een jaar, d.w.z. laagwaters en hoogwaters. De variaties in hydraulische condities leiden tot:

- toenemende en afnemende sedimenttransportcondities;
- situaties met overgangen van bodemtransport naar zwevend transport (suspensie van zand bij hoge afvoer) of immobiele sedimentfracties (immobiel grind bij lage afvoer);
- groei en verval van bodemvormen (duinen en ribbels), en de daarmee samenhangende verticale sortering van sedimentfracties;
- toenemende invloed door retourstroming en schroefstraal van scheepvaart bij afnemende waterdiepte. Als functie van kielspeling, boegvorm, en vaarsnelheid kan elke passage ertoe bijdragen dat het sediment eerder en in grotere volumes wordt getransporteerd onder de boeg en achter het schip; en dat het opwervelen en afzinken van sedimentfracties leidt tot uitzeving.
- variatie in laterale bronnen van sediment, met name de uitwisseling van fijner sediment uit de kribvakken en uit eroderende oevers. Bij lage afvoeren kan wellicht erosie door scheepsgolven dominant zijn, terwijl bij hoge afvoeren juist aanbod en sedimentatie dominant kan zijn in deze zones.

In specifieke situaties met een groot gehalte grind (en stenen) zou afpleistering kunnen optreden waarbij fijn sediment uit en van onder de toplaag wordt uitgespoeld zonder dat het grove sediment in beweging komt. Het uitspoelen van het fijne sediment door de poriën van het grove materiaal wordt ook wel 'winnowing' genoemd. Winnowing treedt eerder op in een grove laag met relatief uniforme sediment door de grote porositeit (Kalf, 2013). Wanneer de toplaag een bredere sortering van fracties bevat, zal de porositeit minder zijn, en daardoor minder doorlatend zijn voor het onderliggende (fijne) zand. Het proces speelt bijvoorbeeld een rol bij het ontwerp van bestortingen voor bodembeschermingen. Het zal echter minder belangrijk zijn voor de bodem in de Rijntakken. Lokaal zou winnowing bij stabiele afpleistering kunnen optreden, maar dergelijke afpleisteringen lijken niet veel voor te komen in de rivier of wellicht alleen tijdelijk en plaatselijk tijdens lage afvoeren (bij hoge afvoeren breken deze dan weer op).

Dat vergroving niet zal leiden tot een stabiele pleisterlaag hangt wellicht samen met de samenstelling en de dynamiek. Over het algemeen geldt dat het getransporteerde sediment in een situatie met morfologisch evenwicht van een grindrivier iets fijner is dan het materiaal in de bedding. Bijvoorbeeld in schaalmodellen met recirculatie van sediment, zoals het voorbeeld in Figuur 1-1 (Sloff et al., 2003), wordt een fijner mengsel rondgepompt dan het bodemmateriaal. Het getransporteerde materiaal is fijner dan het oppervlak van de bedding omdat het grovere sediment iets minder makkelijk wordt getransporteerd dan het fijnere sediment. In de evenwichtstoestand zal de bedding zich ontwikkeld hebben in een conditie waarbij het grovere sediment oververtegenwoordigd zal zijn in het oppervlak, zodat het transport van het grove deel een vergelijkbaar transport oplevert als het fijne deel (op basis van beschikbaarheid voor transport). Dit proces kan leiden tot een vorm van 'mobiele afpleistering' waarbij het transport van de fracties precies is afgestemd op het aanbod, en dus geen morfologische veranderingen meer vertoont (Parker en Klingeman, 1982).

Het hoeft dus niet noodzakelijk te leiden tot een volledige afpleistering (waarbij alleen het grofste sediment beschikbaar blijft). Daarbij speelt ook het aanbod van zand uit bovenstroomse trajecten een rol. De bemonsteringen in de Rijntakken geven aan dat vrijwel alle monsters een gehalte fijn materiaal bevatten (bijv. meer dan 15% zand), en dus eerder duiden op een 'mobiele afpleistering'.

Wilcock (1993), Wilcock (1998), Sambrook Smith (1996) en Sambrook Smith et al. (1997) en diverse andere auteurs beschrijven de details en karakteristieken van sedimenttransport en rivierbedding met bimodaal sediment. Er zijn wat interessante waarnemingen in deze studies: onder andere Iseya en Ikeda (1987) en Wilcock (1993) vinden dat bij een zand percentage groter dan 30% de morfologie zich ontwikkelt als een zandrivier met zelfde helling als wanneer er geen grind zou zijn (een lagere helling dan de bedding met een hoog gehalte aan grind). Dit gedrag is gerelateerd aan de overgang van klast-ondersteund naar matrix-ondersteunde structuur van de bedding zoals getoond in Figuur 3-14. Bij een toename van zand in een grindbedding gaat deze over naar de andere toestand, waarbij vervolgens het grind als het ware meebeweegt met het zand. De hoeveelheid grind is te gering voor hiding van zandkorrels, maar de grindkorrels aan het oppervlak worden wel 'exposed' omdat de lagere ruwheid van het zand zorgt voor hogere stroomkracht op de grindkorrels dan een bedding die volledig uit grind bestaat. Deze verandering in gedrag komt dus voort uit een combinatie van effecten van lagere ruwheid, exposure van grindkorrels, en ook van botsingen van grind op zand. De overgang waar gedrag van grind- naar zandbed overgaat, in termen van hydraulische ruwheid en transport, zal in praktijk zo tussen de 20-40% zand liggen. Hier wordt ook op ingegaan in paragraaf 3.4 in relatie met de grind-zand transitie in de Rijn waarbij deze overgang in toestand een belangrijke rol speelt.

### 3.4 Variabiliteit in ruimte (horizontaal)

Variaties (in horizontale richting) in bodemsamenstelling treden op met verschillende ruimteschalen. Zoals al eerder bleek uit de analyses van de bodembemonsteringen in paragraaf 2.4 en paragraaf 2.5 zijn zowel langs de rivier als in dwarsrichting grote verschillen waargenomen in de samenstelling.

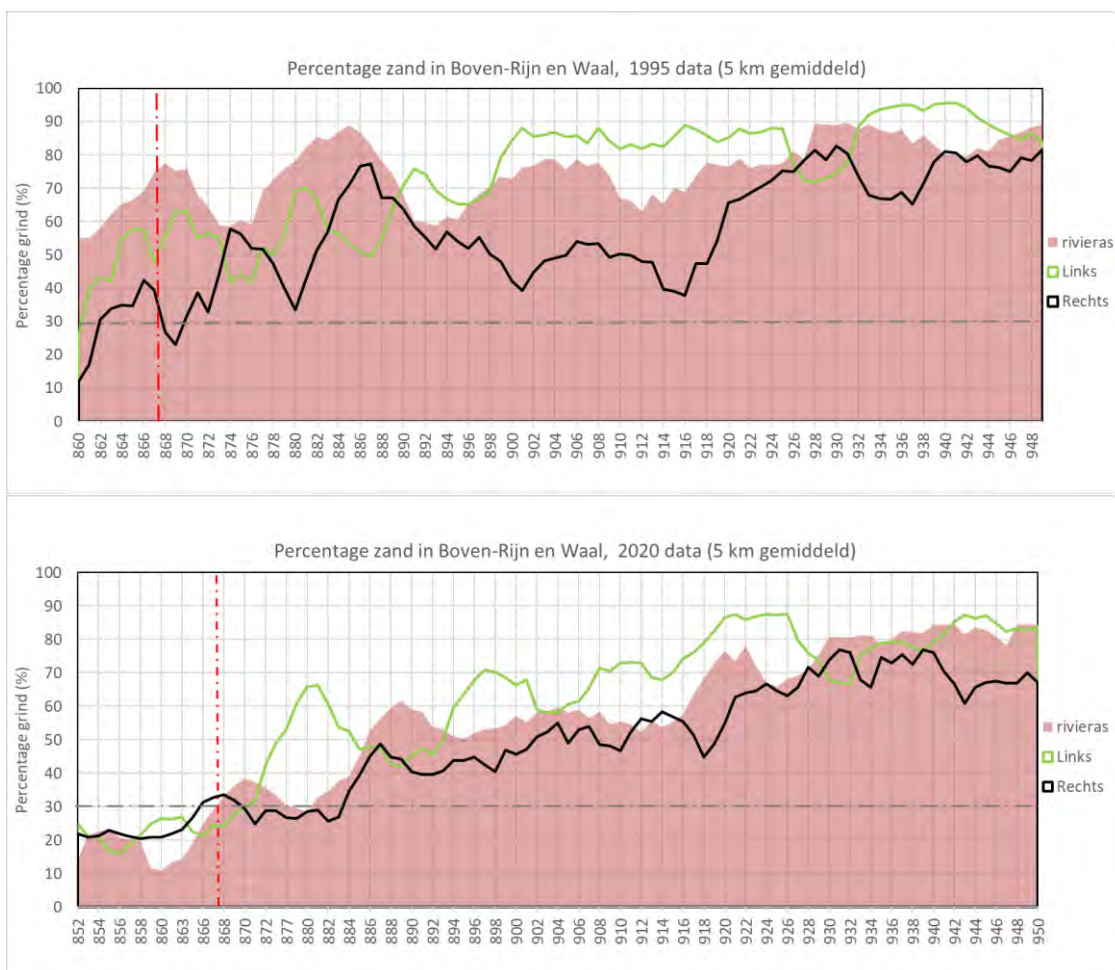
#### *Stroomafwaartse verfijning*

- Over grote lengte van de riviertakken is sprake van een stroomafwaartse verfijning (downstream fining). Frings et al. (2011) onderzochten diverse mogelijke oorzaken, en constateerden dat in de Rijntakken selectief transport van zwevend sediment en duinsortering een grote rol spelen. Daarnaast zijn geometrie (verbreding) en riviersplitsingen belangrijk. Processen zoals het afslijten en uiteenvallen van grove korrels speelt op de schaal van de Rijntakken geen rol. Gezamenlijk met de stroomafwaartse verfijning ontwikkelt zich een stroomafwaartse afname van bodemhelling.

#### *Grind-zand transitie (GZT)*

- Op het traject van ruwweg km 820 t/m km 900 is sprake van een geleidelijk grind-zand overgang. Dergelijke transitie zijn kenmerkend voor rivieren met bimodaal sediment (zoals de Rijn). In sommige rivieren is de overgang vrij scherp, maar in de Rijntakken is deze transitie meer geleidelijk. Figuur 3-15 toont het percentage grind in de bodemmonsters van 1995 en van 2020, waarbij het mengsel verloopt van grind met wat zand in de Boven-Rijn naar zand met wat grind in de Midden-Waal en Beneden-Waal. Volgens de normeringen voor grondsoorten is een gehalte van meer dan 50% grind (NEN ISO-14688) of meer dan 30% grind (NEN 5104) nodig om het mengsel als grind te classificeren.

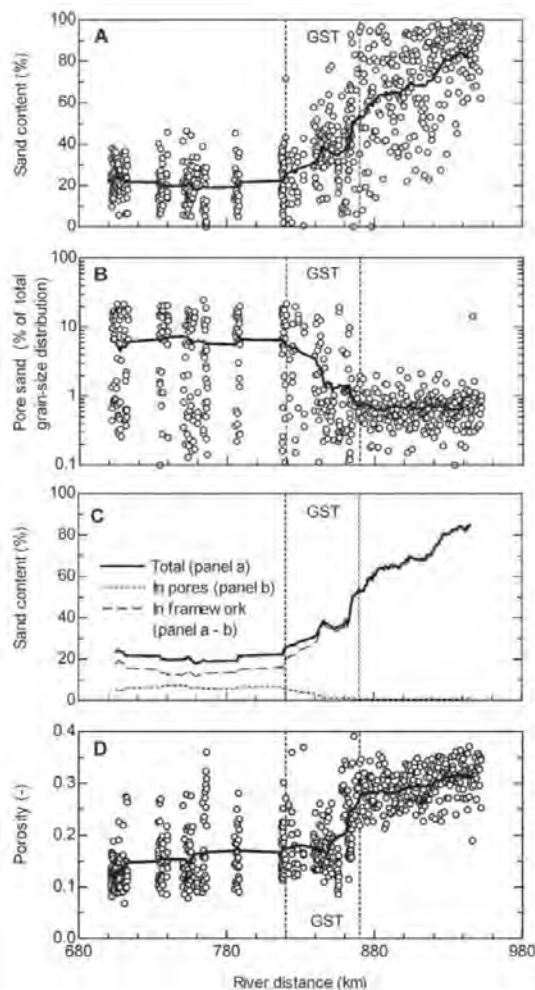
Daarnaast is eerder aangegeven (einde van paragraaf 3.3) dat voor zandpercentages van meer dan circa 30% sprake is van een overgang naar gedrag dat specifiek is voor een zandbedding. Vanwege de verschillen in linkerzijde, rivieras en rechterzijde in ruimte en tijd is het op basis van Figuur 3-15 niet eenduidig vast te stellen vanaf welk punt sprake is van een zandbedding of een grindbedding volgens bovenstaande definities. Wel kan worden verondersteld dat vrijwel voor de hele Waal sprake is van een zandbedding als we uitgaan van een percentage zand hoger dan 30%. Als we uitgaan van 50% grind (NEN ISO-14688), dan kan de bedding bovenstrooms van Nijmegen als grindbedding worden beschouwd. Het laatste is slechts een definitie-kwestie, terwijl het eerste de overgang van een clast- naar een matrix-ondersteunde bedding aangeeft.



*Figuur 3-15 Percentage zand langs de Boven-Rijn en Waal voor de 1995 en 2020 bemonstering, waarbij een lopend gemiddelde van 5 km is toegepast. De 30% grens is aangegeven met de horizontale streeplijn. De verticale lijn is de locatie van de Pannerdensch Kop.*

- De bovengenoemde overgang van grind- naar zandbedding, oftewel de grind-zand transitie GZT, vindt niet plaats over een korte afstand, maar is verspreid over een lengte van circa 50 km (km 820 – 890). In de overgang neemt de bodemhelling af van 20 cm/km naar 11 cm/km, en de mediane korreldiameter neemt af van 12 tot 1.5 mm (Frings, 2012).
- Diverse studies, bijvoorbeeld Frings (2011), Dingle et al. (2021), Blom et al. (2017), en Venditti et al. (2015) beschrijven hoe verschillende processen kunnen bijdragen aan de vorming van de grind-zand transitie. Verondersteld wordt dat de GZT optreedt waar de rivier de capaciteit verliest om het grind te transporteren, in combinatie met een geringere bodemhelling op het zandtraject na de GZT.

In andere studies wordt verder vastgesteld dat de overgang plaatsvindt waar het gedrag van sedimenttransport omslaat van grindbedding naar zandbedding. Deze overgang treedt op waar het zandgehalte groter wordt dan 20-40%. Bij hogere gehalten zand verdwijnt het hiding effect van het grind omdat zand uitbundig aanwezig is op het oppervlak (Iseya en Ikeda, 1987, Sambrook Smith et al., 1997), zie ook paragraaf 3.3. Frings (2011) en Frings et al. (2012) stellen dat dit omslagpunt de overgang van klast-ondersteunde bedding naar matrix-ondersteunde bedding representeert (Figuur 3-14), en dat dit gepaard gaat met een overgang in porositeit. Porositeit schattingen met een theoretisch porositeitsmodel, geverifieerd met monsternamen in een duikerklok, toont hoe de verandering in porositeit inderdaad samenvalt met de GZT, zoals getoond in Figuur 3-16. Frings (2011) geeft verder aan dat de GZT in de Rijn minder abrupt is dan in andere rivieren als gevolg van het effect bochtsortering met mobiele afpleistering (en dus vorming klast ondersteund raamwerk) in buitenbochten en matrix-supported bedding in de binnenbochten. Zo volgt uit Figuur 3-15 dat dit leidt tot afwisselende grindpercentages tussen linker- en rechterzijde van de rivier, met zandgehalten afwisselend boven en onder de 30% over het GZT traject (zie ook Figuur 3-15). Ook het optreden van patches kan bijdragen aan deze geleidelijke GZT door de invloed op de gemiddelde mobiliteit van de bedding. Frings (2011) vindt op basis van analyse van boringen in de GZT, dat duinsortering mogelijk geen rol speelt bij toename van sedimentmobiliteit. Tenslotte kan de invloed van tektoniek niet uit worden gesloten in de Rijntakken-GZT, omdat deze samenvalt met een geologisch grens (breuklijnen), en de GZT al minstens 500 jaar op dezelfde plek ligt (Frings, 2011).



Figuur 3-16 Eigenschappen van de grind-zand transitie in de Nederrijn, Boven-Rijn en Waal met A: zandgehalte, B: zandgehalte in poriën, C: vergelijking van de zandgehalten, D: porositeit, op basis van gegevens van 15 dwarsprofielen

- Blom et al. (2017) simuleren een GZT met behulp van een simpel analytisch model met constante afvoer, en gebaseerd op selectief transport van een zand en een grind fractie. Het resultaat simuleert dat de GZT zich kan stabiliseren onder invloed van bodemdaling, stijging van de erosiebasis, of groei van een delta. De modeluitkomsten leunen sterk op de link tussen de verschillen in evenwichtsbodemhelling van het grinddeel en van het zanddeel, en de invloed hiervan op het sedimenttransport en op de vorming van de GZT.

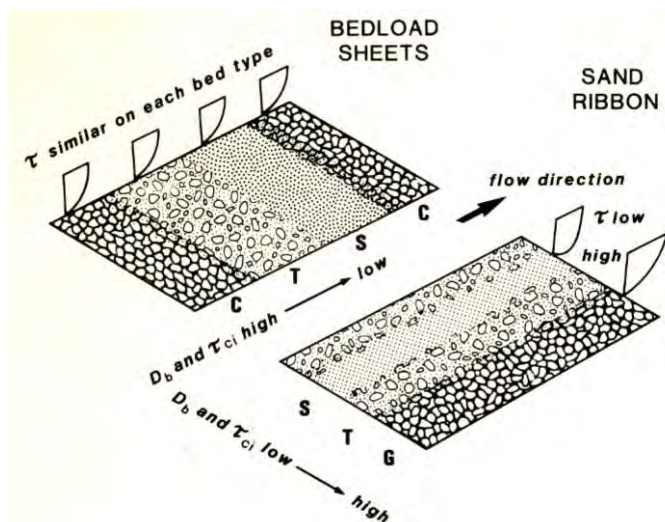
### Patches

- “Textural patches” (engels) of faciës, zijn zeer lokale variaties in bodemsamenstelling, waarbij de bodem een ruimtelijk patroon van afwisselende fijnere en grovere vlakken vertoont met schalen kleiner dan de breedte van de rivier tot bijvoorbeeld orde van grootte van de waterdiepte (Nelson et al., 2014). Een voorbeeld van een dergelijke variabiliteit is getoond in Figuur 3-17 voor opnames in de duikerklok op km 860 in de Boven-Rijn. Meer opnames op deze locatie zijn gepresenteerd in Bijlage B.2. De opnames tonen dat er geen relatie is met een bochteffect of het beeld van een fijnere linker- en grovere rechterzijde door scheepvaart.



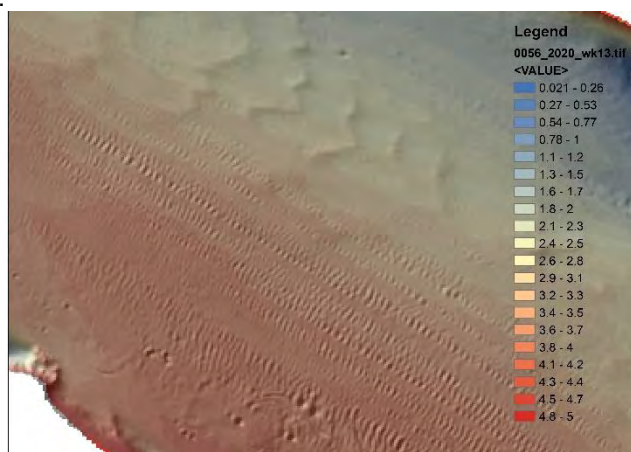
Figuur 3-17 Variabiliteit in bodemsamenstelling in raai km 860 (Boven-Rijn) op 20 april 2011. Foto boven: op 50 m rechts van as; Foto onder: op 25 m links van as (waarnemingen met duikerklok)

- In het algemeen kunnen de patches door verschillende oorzaken ontstaan. Ze kunnen bijvoorbeeld geforceerd zijn (bijv. door kribben) en daardoor vaak redelijk stabiel blijven, ondanks aanzienlijk sediment transport. Maar de patches kunnen ook schijnbaar willekeurig op de bodem ontwikkelen door 'natuurlijke' sorteringsprocessen. Het ontstaan van patches is een complex samenspel tussen stroming, bodemtopografie, ruwheid (met name van de korrels), en samenstelling van de actieve laag. De door topografie (bodempligging) of ruwheid geforceerde stroombeelden leiden tot variaties in bodemschuifspanning, die zich vervolgens vertalen in variaties in bodemtransport, en daarmee leiden tot selectief transport en aanpassing van bodemsamenstelling, en vice versa. Bimodaliteit van het bodemsediment zal ontwikkeling van patches versterken (Laronne et al., 2001). De (berekende) grootte van sedimenttransport over een bodem met patches zal groter zijn dan een bodem die bestaat uit het ruimtelijke gemiddelde mengsel van de patches (Parker, 1992). Inzicht in de patronen kan daarom belangrijk zijn voor de gedetailleerde rekenmodellen.



Figuur 3-18 'Bed-load sheets' en zandribbels, met C=congested (verstopt), G=gravel (grind), T=transitional (overgang), en S=smooth/sandy (glad/zanderig) met  $\tau_{ci}$  de kritische schuifspanning voor begin van beweging, figuur Ferguson et al. (1987)

- Het ontstaan van patches heeft belangrijke consequenties voor het transport. In het voorbeeld van Figuur 3-18 (niet specifiek voor de Rijn) is volgens Ferguson et al (1987) en andere onderzoekers sprake van een belangrijk verschil in de wijze waarop sediment wordt getransporteerd. In de situatie met zandribbels zal bijvoorbeeld de stroming zich kunnen aanpassen aan de ruwheid en dus afwijken voor zandbanen en grindbanen, terwijl bij de bed-load sheets deze te kort zijn, en daardoor zorgen voor een gelijke schuifspanning door de stroming op alle vlakken. Een ruimtelijke middeling van bodemsamenstelling en uitwerking ervan op de stroming en sedimenttransport is op deze schaal dus niet eenduidig te bepalen, vooral ook omdat het onbekend is of dergelijke patronen en in welke vorm op de bodem optreden. Een illustratie van variabiliteit in bodemligging die mogelijk gepaard gaat met bovengenoemde variabiliteit in bodemsamenstelling is gepresenteerd in Figuur 3-19. Ribbels en duinen suggereren dat transport van zand optreedt langs deze banen. Echter, scheepvaartinvloeden zijn hier niet uitgesloten.



Figuur 3-19 Voorbeeld van een multi-beam opname van de bodemligging in de Boven-Rijn in 2021 met afwisselende sporen van kleinere duintjes en vlak bed, en een veld met grotere duinen aan de bovenzijde (stroming is van rechts naar links).

- Figuur 3-20 toont een voorbeeld van sorteringsprocessen in een kribvak bij Dodewaard in de Midden-Waal. In dit kribvak is een regelmatig patroon van zand en grind patches ontstaan met dimensies van enkele decimeters.



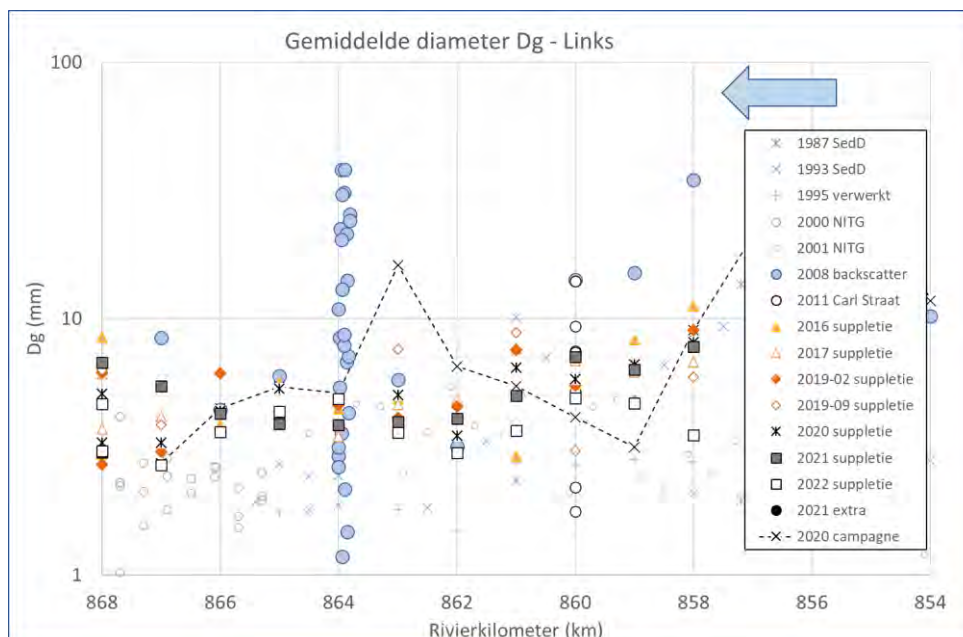
*Figuur 3-20 Kleinschalige patches van grind en zand in kribvak in Midden-Waal (Dodewaard)*

Een mooi voorbeeld van ruimtelijk variabiliteit op een kleine schaal is waargenomen in de Boven-Rijn. Net bovenstrooms van km-raai 864, aan de linkerzijde, stroomt de Griethauser Altrhein de rivier in. Deze geul is actief tijdens hoogwaters, en leidt tot forse fluctuaties in bodemligging in de rivier. Deze dynamiek leidt mogelijk tot sterke variaties in bodemsamenstelling op deze locatie. Op deze locatie zijn in 2008 in een zone van circa 60 x 200 m, 25 monsters genomen en gezeefd, zie Figuur 3-21. De meting is uitgevoerd als validatie van multibeam backscatter analyses (Amiri-Simkooei, 2007). De resulterende gemiddelde diameters  $D_g$  uit de zeefanalyse zijn in Figuur 3-22 geplott samen met gegevens van andere jaren. De monsters langs de “oever” (160 m links van de as) zijn zandiger en hebben een lagere  $D_g$ , de monsters in de rivier zijn daarentegen veel grover dan het normale mengsel. De waargenomen variaties (1 mm tot 40 mm) liggen dus ver buiten de bandbreedte die kan worden afgeleid van de ‘reguliere’ bemonstering in de rivier. De locatie valt in het suppletietraject.



*Figuur 3-21 Locaties van monsternamen back-scatter onderzoek 2008 bij de monding van de Griethauser Altrhein*





Figuur 3-22 Gemeten gemiddelde diameters in de Boven-Rijn voor meerdere jaren, met opvallend grote spreiding op bij km 864 in de 2008 bemonstering. De verticale schaal is logaritmisch.

### Beddingvormen en sortering

- Beddingvormen, zoals duinen en ribbels, gaan samen met variaties in samenstelling. Door verticale sorteringsprocessen zijn in duinen de duintroggen iets grover dan de duinkammen. De variaties kunnen worden beschouwd als een categorie van de bovengenoemde 'textural patches'. Tezamen met hun variabiliteit in verplaatsingssnelheid en amplitude een complexe gelaagdheid in de ondergrond. Voorbeelden hiervan uit de literatuur zijn weergegeven in Figuur 3-26.
- In binnenbochten in de Boven-Waal zijn beddingvormen groter dan in buitenbochten, wat duidt op een onderdrukking van het effect van diepte (normaal schalen beddingvormen op diepte). In de scherpe bochten in de Boven-Waal zal sortering van sediment in de binnenbocht daar leiden tot hogere transporten, en daarmee leiden tot deze grotere beddingvormen, zo blijkt uit de analyses van Sieben (2004). Daarentegen, als sprake is van meer uniform sediment, bijvoorbeeld de Beneden-Waal, zal juist een schaling op basis van diepte dominant zijn: de grootste duinen ontwikkelen zich dan in de diepere buitenbochten. Ook hier blijkt een complexe interactie tussen bodemsamenstelling, beddingvormen en sedimenttransport in de bovenrivieren op te treden.
- De 'geforceerde' beddingvormen, zoals de kribvlammen (geforceerd door de relatieve verwijding bij kribvakken), zullen ook mogelijke sorteringsprocessen optreden. In principe geldt dit ook voor de grotere geforceerde banken, zoals de point bar in rivierbochten (zie hieronder).

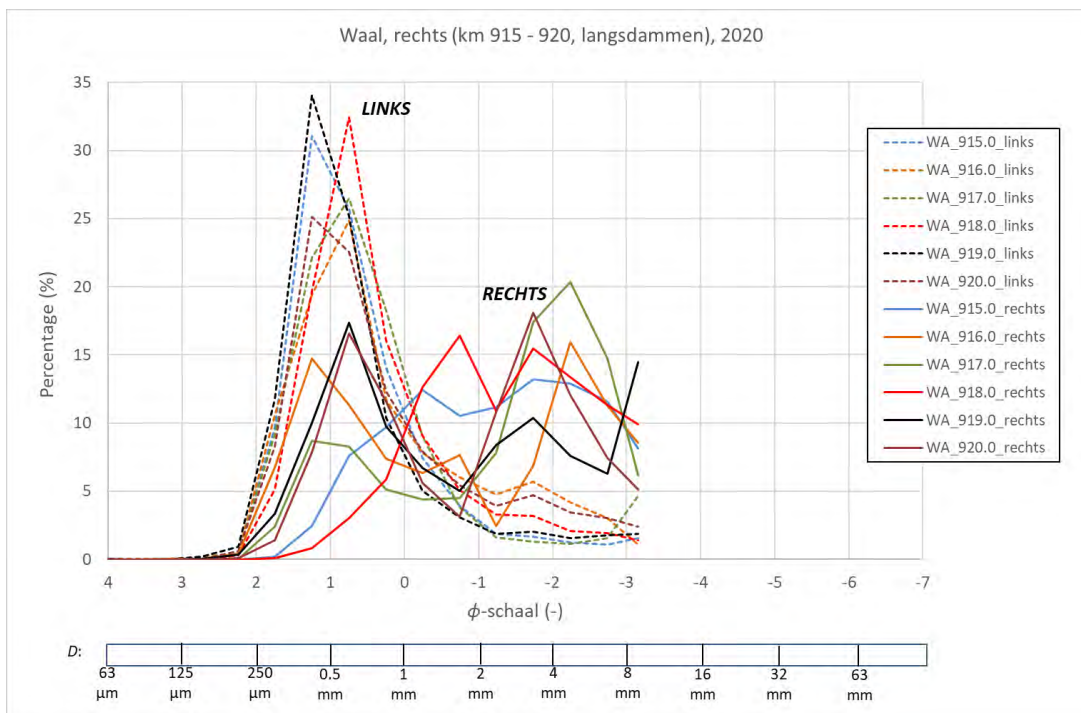
### Bochtsoortering

- Onder invloed van spiraalstroming en hellingsgeffecten (zwaartekracht) op sedimenttransport, ontwikkelt zich in bochten een profiel met diepe buitenbocht met hoge stroomsnelheden en ondiepe binnenbocht met lagere stroomsnelheden. De zwaartekracht langs een helling varieert proportioneel met de diameter tot de macht 3 (korrelmassa), maar de sleepkracht van de stroming varieert met de diameter tot de macht 2 (korreloppervlak).

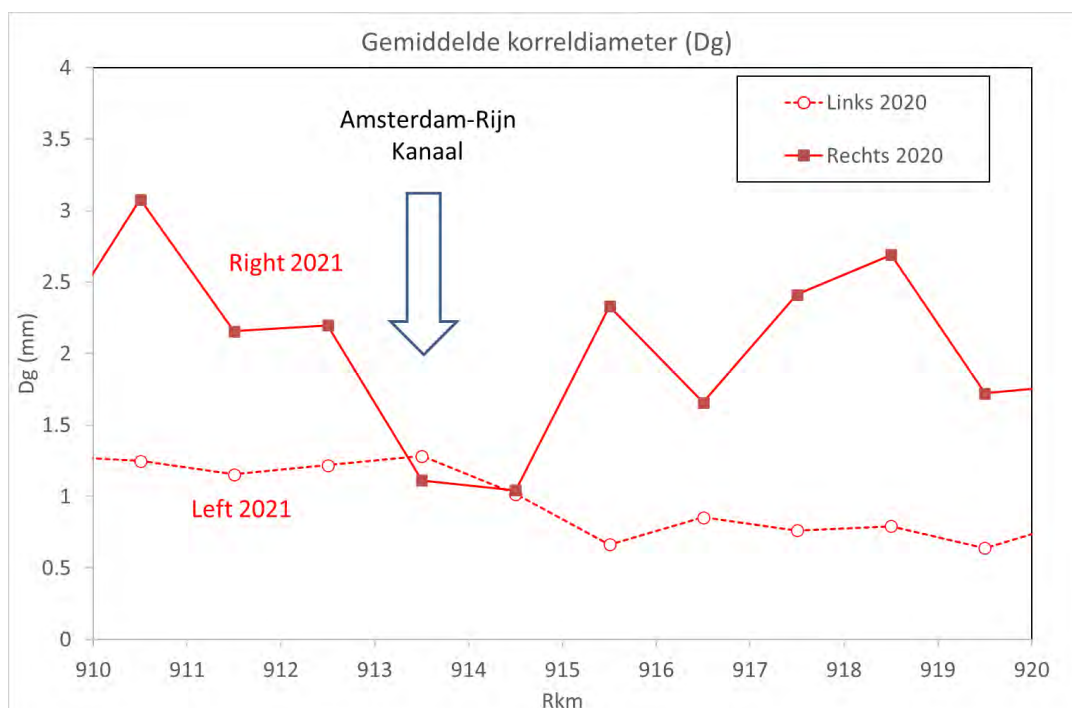
Grotere korrels in transport zullen dus een sterkere helling afwaarts krijgen dan de fijne korrels. Buitenbochten zijn daardoor overwegend grover (met mobiele afpleistering in scherpe bochten de Boven Waal) en binnenbochten overwegend fijner. Ook in flauwe bochten, zoals in de Boven-Rijn vlak voor de Pannerdensche kop zijn deze sorteringseffecten zichtbaar, zie Figuur 2-17.

### *Scheepvaarteffecten*

- Scheepvaartinvloed zorgt voor variaties op diverse schalen. De individuele sporen van schepen zijn waarneembaar in de morfologie, en worden veroorzaakt door zijwaartse verspreiding van opgewerveld sediment door retrourstroom onder het schip, en doorvolgstroom en schroefstraal achter het schip. Het is aannemelijk dat zowel tijdens het ontstaan van de sporen, als onder de invloed van deze vormen op stroming, sorteringsprocessen kunnen optreden. De schaal van dwarsvariaties (door de langgerekte sporen) ligt in de orde van 5 á 10 m.
- Op grotere schaal is er een duidelijk onderscheid tussen de linkerhelft, met (geladen) opvaart met een relatief fijne samenstelling, en de rechterhelft met (ongeladen) afvaart met een relatief grove samenstelling. De schaal van deze dwarsinvloed ligt op ongeveer een halve rivierbreedte.
- Ter illustratie van het voorgaande punt, zijn in Figuur 3-23 de gemeten korrelverdelingen getoond voor de monsters links en rechts tussen km 910 – 920 van de 2020 meting. Dit is het traject van de langsdammen. Uit de statistische verdeling voor de monsters blijkt dat aan de linkerzijde sprake is van unimodaal sediment, zand met een modus rond de 0.5 mm, zie Figuur 3-23. In die zijde ontbreekt het grind vrijwel volledig. Voor de rechterzijde is echter sprake van forse variaties, met een relatief flinke bijdrage van de grovere fracties. Rechts is duidelijk meer grind aanwezig aan de oppervlakte dan links. Dit substantiële verschil tussen linker en rechterzijde van de rivier op dit traject kan niet worden gerelateerd aan voeding van zand uit kribvakken aan de linkeroever zoals gesuggereerd in ten Brinke (1997). Deze oever bestaat nu volledig uit langsdam en kan dus geen zand meer voeden. Figuur 3-24 toont het verloop van de gemiddelde diameter links en rechts, en de ligging van de langsdammen. In deze situatie bestaat de hele linkeroever vanaf km 910 tot km 918 uit gestrekte oevers zonder kribben. Dit versterkt de vermoedens dat het verfijnen van de toplaag een directe relatie heeft met de stroming onder het schip en de schroefstraal, en niet indirect door fijn materiaal uit de kribvakken. De hypothese zou kunnen zijn dat door het opwoelen van sediment door de schroefstraal en retourstroom van schepen er een verticaal sorteringsproces optreedt waarbij in de 'omgewoelde bedding' het grovere sediment wordt afgedekt door fijner materiaal. Hier zou bijvoorbeeld onderscheid in effect van zwaartekracht (c.q. valsnelheid) op de verschillende klassen van opgewerveld sediment een rol kunnen spelen.



Figuur 3-23 Korrelverdeling op het traject van de Midden-Waal ter hoogte van de langsdammen, met onderscheid in monsters links en rechts





*Figuur 3-24 Verloop van gemiddelde diameter links (Zuid) van de as, en rechts (Noord) van de rivieras, gemeten in 2020 ter hoogte van het traject met langsdammen en monding Amsterdam-Rijn-kanaal; kaartje met ligging van de langsdammen en locaties waartussen kribben in 2016 zijn vervangen door langsdammen.*

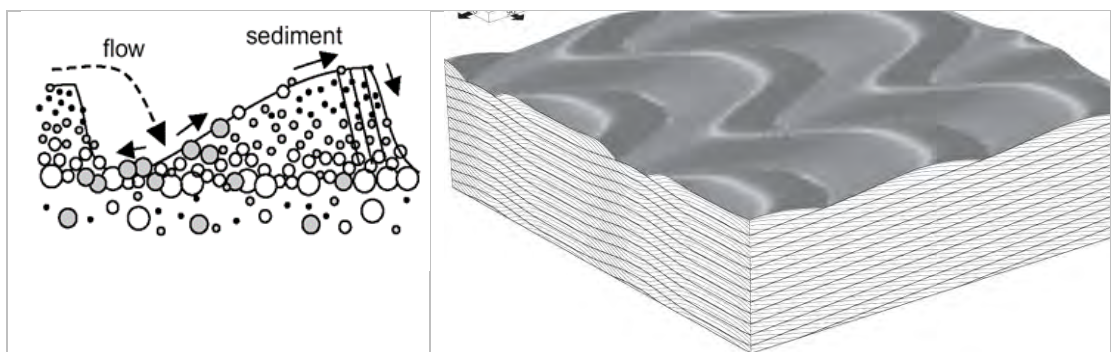
### 3.5 Variabiliteit in diepte

De 'actieve laag' vormt de natuurlijke barrière tussen het snelstromende rivierwater en de diepere ondergrond. Tevens voorkomt c.q. bemoeilijkt de aanwezigheid daarvan dieper gaande erosie. Gruijter et al. (2001a, 2001b) tonen op basis van boringen dat het onderliggende materiaal van wisselende samenstelling is, en op sommige locaties uit fijn sediment bestaat. In de meeste gevallen is er nog sprake van een deklaag van circa 1,5 m, maar er zijn ook locaties met fijn zand onder een dunnere deklaag. Figuur 3-25 presenteert enkele voorbeelden van de boorkernen van Gruijters (2001a) die dit beeld vertonen. De bemonsteringen van de rivierbedding met happers vinden over het algemeen plaats in het bovenste deel van de actieve laag, dus 0,1 à 0,2 m dikte. Het algemene beeld voor de bovenrivieren is echter dat sedimentuitwisseling plaats vindt over een diepte van meer dan een meter bij hoogwaters. Hierbij spelen beddingvormen een belangrijke rol.

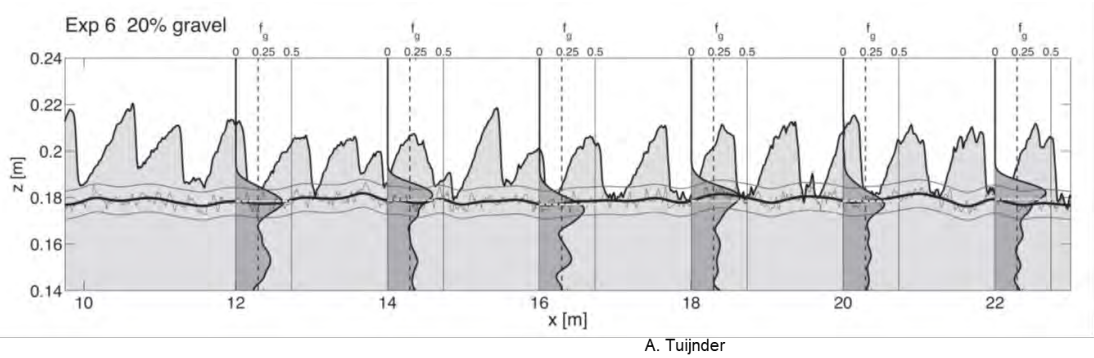


Figuur 3-25 Boringen van de rivierbedding in Pannerdensch Kanaal (links en midden) en Boven-Rijn (rechts) met grofkorrelige actieve laag op een minder grof substratum (afstand op verticale as in centimeters) (Grujters et al, 2001a). Actieve laag in Pannerdensch Kanaal is gesteld op orde 50 cm, en in Boven-Rijn orde 1 m.

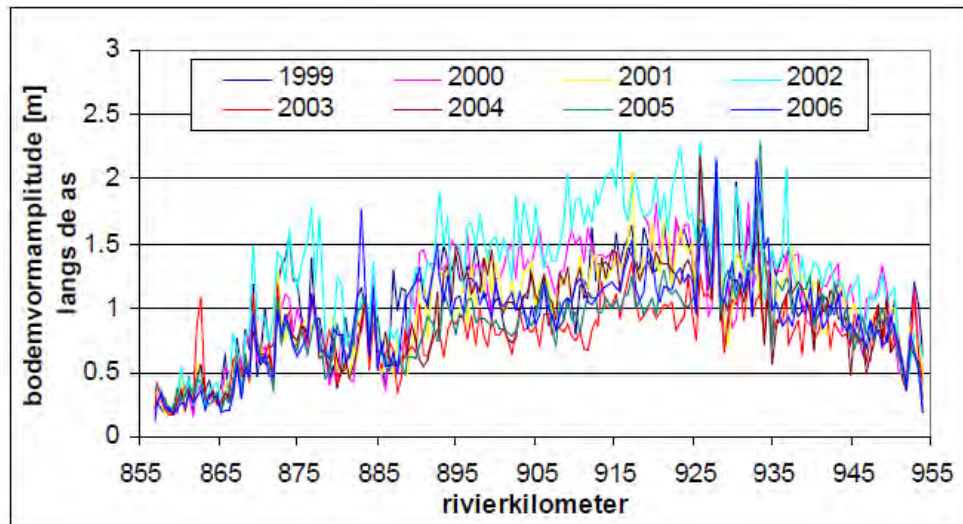
In een duinenveld in een bodem met zand-grind fracties zal het grovere materiaal zich verzamelen in een laag aan de basis van de duinen, op de diepte van de trogen. Daar deze sortingsprocessen, in combinatie met de migratie van de ribbels en duinen leidt dit tot een driedimensionaal patroon van gelaagdheid in de bedding. Dit is geïllustreerd met Figuur 3-26 en Figuur 3-27 afkomstig uit onderzoek naar gedrag van deze migrerende beddingvormen in situaties met niet-uniform sediment.



Figuur 3-26 Voorbeelden van horizontale en verticale variatie in bodemsamenstelling en gelaagdheid onder invloed van ribbels en duinen (links: Blom, 2003; rechts: Rubin en Carter, 2006)

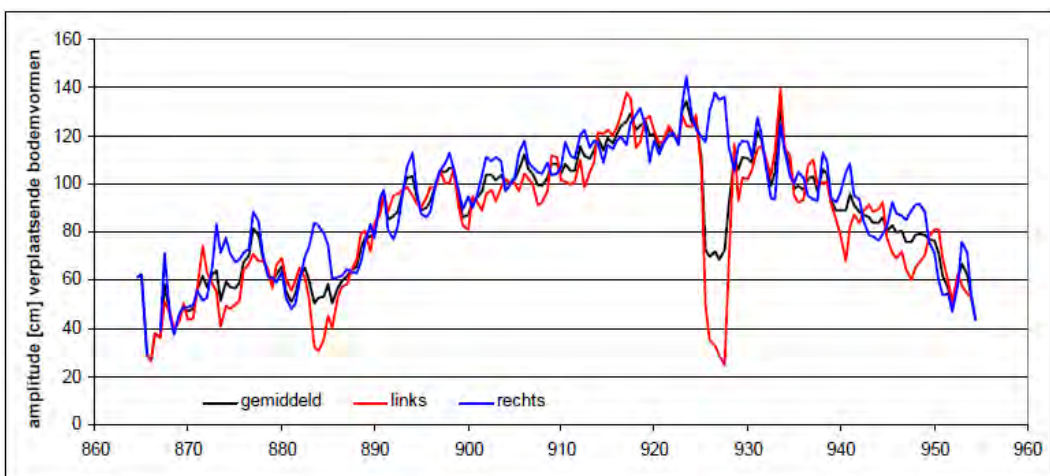


Figuur 3-27 Gelaagdheid en ontwikkeling van een grove (semi-vaste) laag onder een duinenveld in een gootexperiment beschreven door Tuijnder (2000).

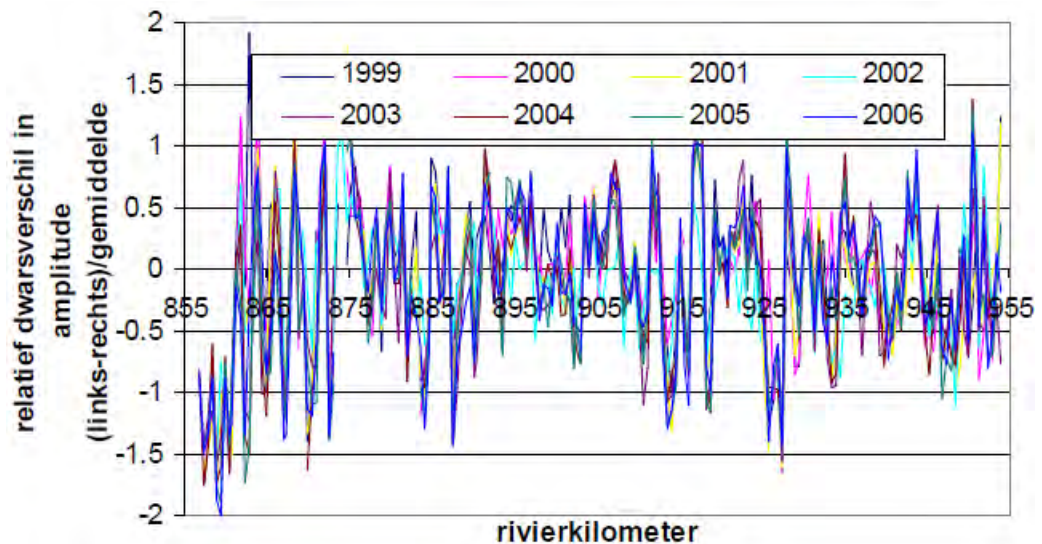


Figuur 3-28 Verloop van duinhoogtes langs de Boven-Rijn en Waal voor periode 1999-2006, Sieben (2008)

Onderzoek door Sieben (2008) toont dat het verloop van duinhoogtes langs de Boven-Rijn en Waal een geleidelijk verloop heeft, zoals getoond in Figuur 3-28. De gemiddelde vorm van dit verloop langs de rivier blijft enigszins gelijk, maar varieert tussen de jaren vermoedelijk door het afvoerverloop. Tot aan km 930 is er sprake van een toename van mobiliteit door meer zand en minder grind. Na km 930 is weer sprake van een afname door toename normaalbreedte en afname schuifspanningen.



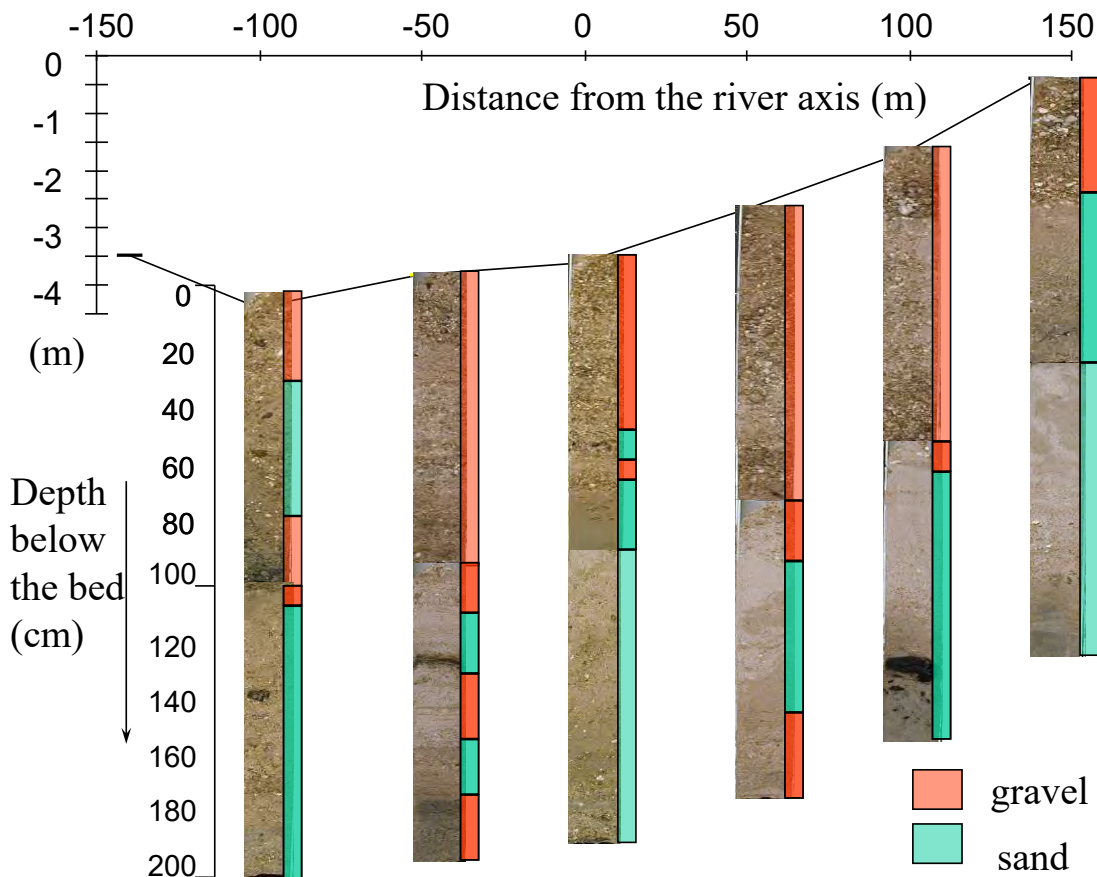
Figuur 3-29 Verloop van duinhoogte links en rechts van de rivieras, door Sieben en Van Loo (2014),



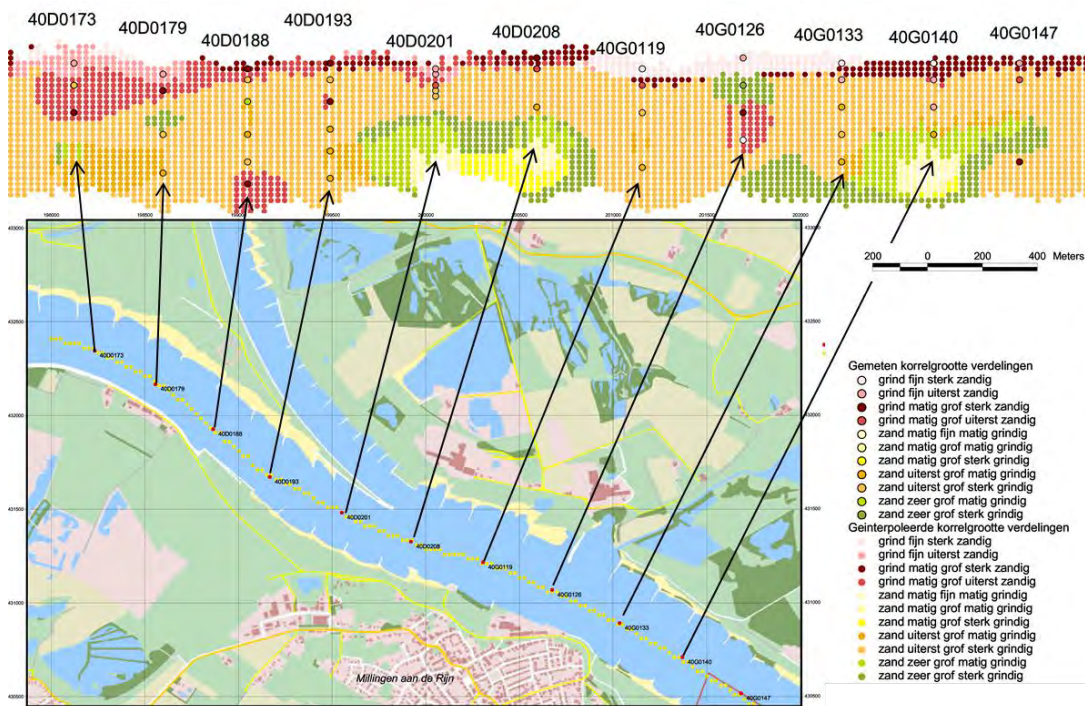
Figuur 3-30 Verschil in amplitude van duinen links en rechts (Sieben, 2008)

In Figuur 3-29 en Figuur 3-30 is door Sieben gekeken naar het verschil in duinhoogte tussen de linker en rechterzijde van de rivier ten opzichte van de as. Dit is relevant vanwege het eerder genoemde verschil in bodemsamenstelling (paragraaf 3.4). De verschillen in duinhoogten links en rechts zijn consistent tussen de verschillende jaren, en zijn naar verwachting sterk gerelateerd aan de geometrie. Scheepvaartinvloeden zijn niet uit te sluiten, maar omdat er geen sprake is van een dominante trend (links of rechts) die kan worden gerelateerd aan geladen opvaart versus ongeladen afvaart, is het wellicht minder aannemelijk hier een link te leggen. Dit geldt ook voor de lengte van de bodemvormen. Dit duidt aan dat de significante verschillen in bodemsamenstelling van de toplaag tussen links en rechts geen belangrijke invloed hebben op de duinhoogte en duinlengte. Andersom is het daardoor minder aannemelijk dat duinsortingsprocessen een rol spelen bij het onderscheid tussen links en rechts (en dus andere sortingsprocessen een rol spelen). Mogelijk is de scheepvaartinvloed op samenstelling beperkt tot de eerste 10 à 20 cm van de bedding die ook wordt bemonsterd, terwijl de dimensies van beddingvormen worden bepaald door het mengsel over grotere diepte 0.5 à 1 m, waarbij de diepte-gemiddelde samenstelling voor beide zijden van de rivier vergelijkbaar is. Verder onderzoek is noodzakelijk.

De volgende figuren geven een overzicht van de waargenomen variabiliteit in de bodemsamenstelling in diepere lagen in de bovenrivieren. Belangrijk is dat er sprake is van een relatief fijn materiaal in de onderlagen ('vaste laag' van TNO-NITG). Het fijnere materiaal wordt aangesneden door de actieve laag wanneer de bodem erodeert (de actieve laag 'zakt' in de onderlagen). Dit fijnere materiaal komt dan beschikbaar voor transport. In de Boven-Rijn zijn recentelijk erosiekuilen ontstaan op plaatsen waar fijnzandige onderlagen aanwezig zijn. Vermoedelijk hebben hier door lokale ingrepen de erosieprocessen de grovere actieve laag doorbroken waardoor het fijne zand kon wegspoelen.

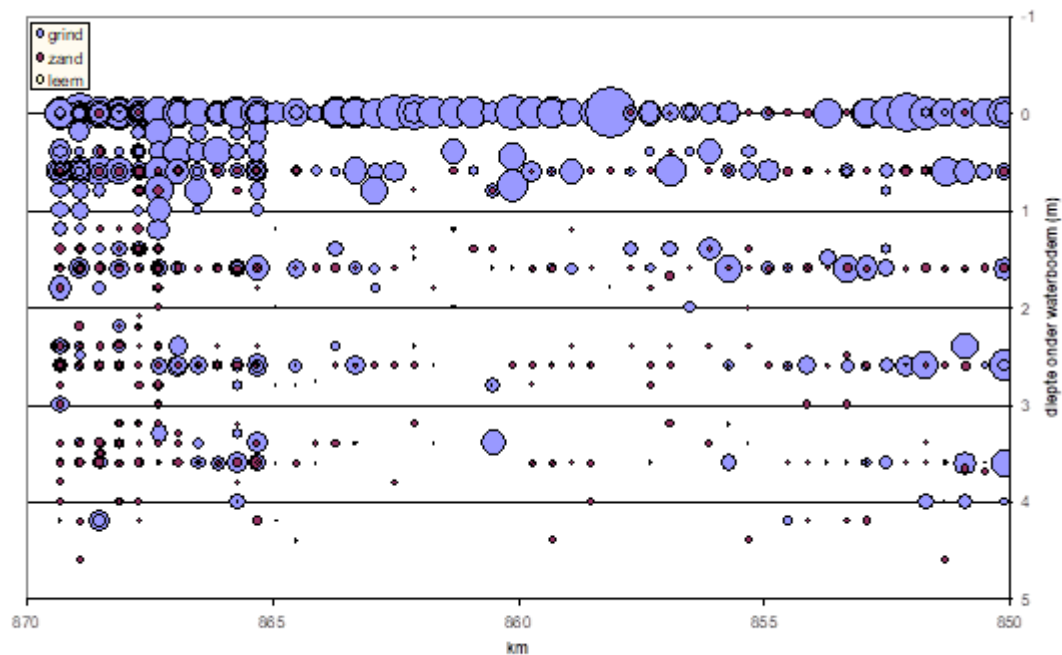


Figuur 3-31 Bodemsamenstelling uit boringen, Boven Rijn dwarsraai km 866.5, verwerkt uit data van Gruijters et al. (2001a) en Dinoloket.nl

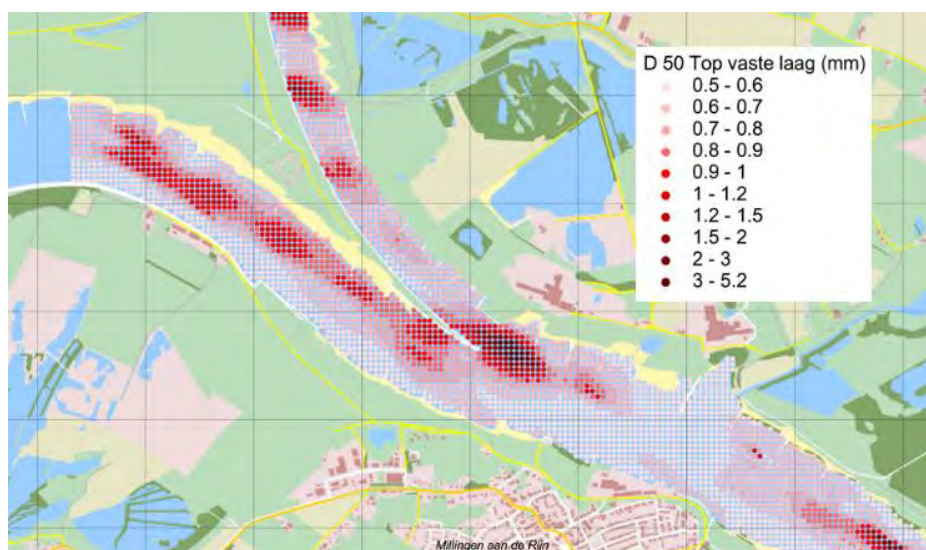


Figuur 3-32 Samenstelling ondergrond Boven-Rijn en Waal op basis van meetgegevens uit 2000 door Gruijters et al., 2001a



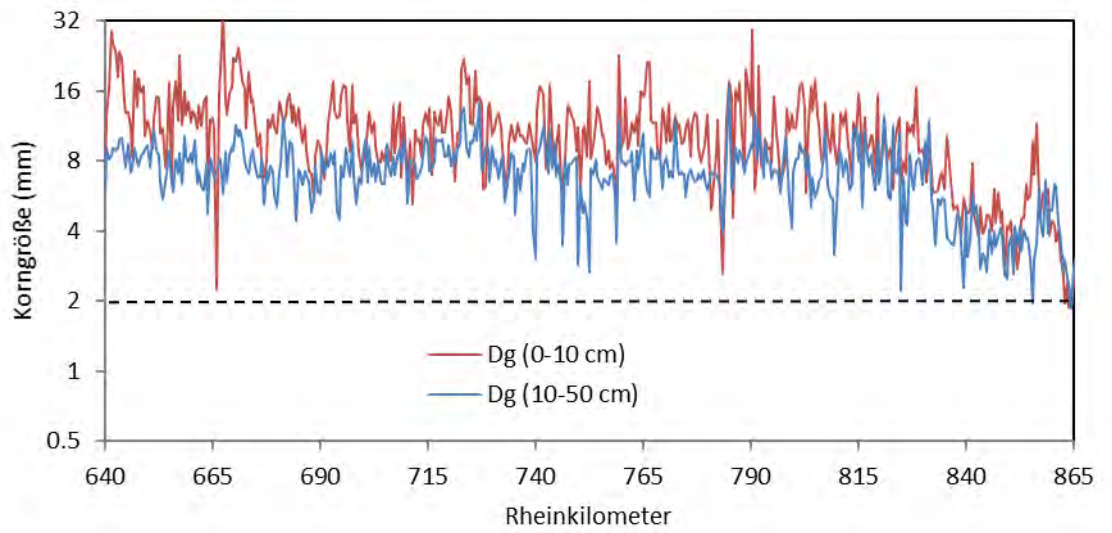


Figuur 3-33 Weergave van de D50 van het totale monster als functie van de diepte onder de waterbodembodem en de kilometring. De grootte van de weergegeven cirkels is een maat voor de grootte van de D50. (Monsters die op één dwarsraai op dezelfde diepte ten opzichte van de waterbodembodem zijn genomen vallen op elkaar).  
Bron: Gruijters et al., 2001a.

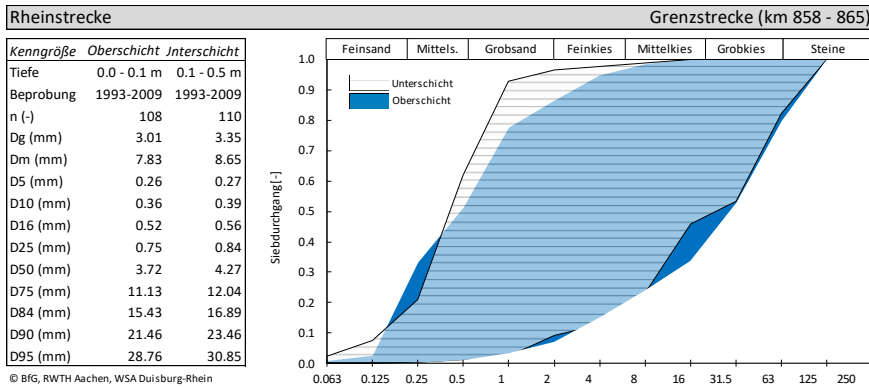
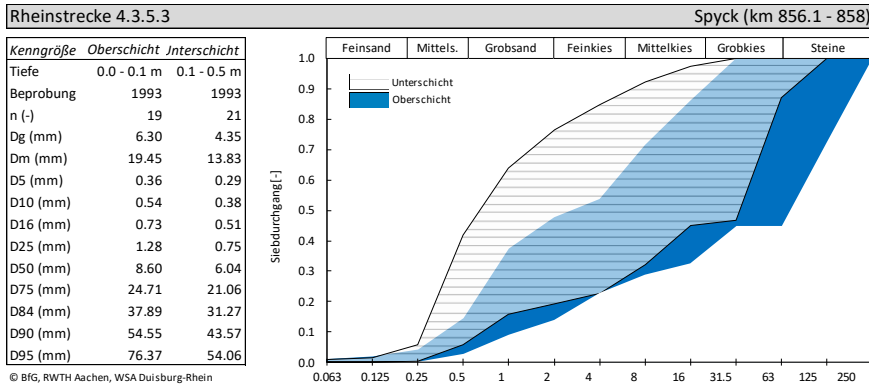
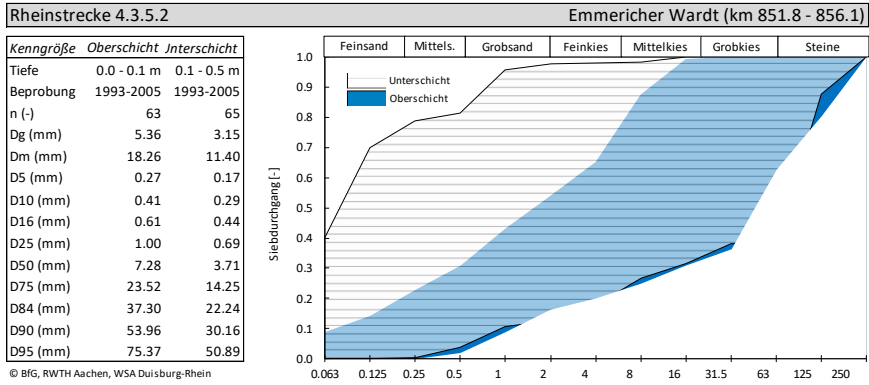


Figuur 3-34 Samenstelling van de top van de vaste laag, de top van het substraat direct onder de actieve laag

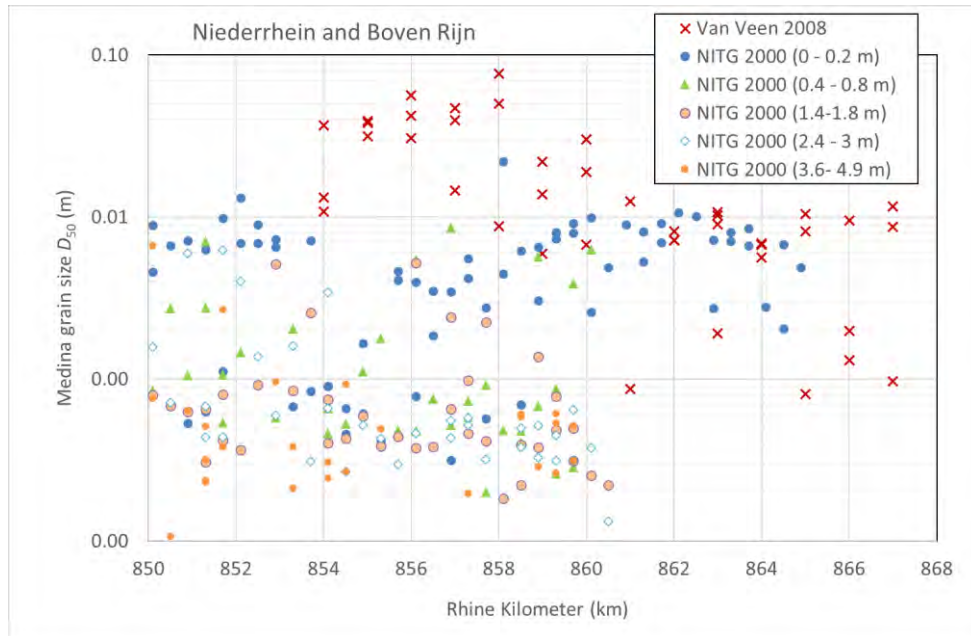
Ook in de gegevens van de Nederrijn kan duidelijk een fijne onderlaag worden onderscheiden zoals volgt uit de analyses van Frings (2012). Onderstaande figuren tonen de observaties van deze verschillen.



Figuur 3-35 Verskil in gemeten korrelgrootte van toplaag en de onderlagen in de Duitse Rijn (Frings, 2012)



**Figuur 3-36** Verschil in samenstelling toplaag en onderlagen op 3 trajecten Niederrhein en Boven-Rijn, bron: Frings, 2012,



Figuur 3-37 Overzicht van  $D_{50}$  waarden voor verschillende lagen, boringen TNO-NITG 2000.

Ook Arjan Sieben (presentatie IRM workshop, 2020) signaleert dat de overgang van compacte oude rivierafzetting in ondergrond, naar jonge fijne rivierafzetting ter hoogte van Lobith (zoals volgt uit Grijters et al, 2001a) ertoe leidt dat een relatief gladde bodemligging overgaat in een bodem met diverse erosiekuilen nabij Lobith.

Mogelijk spelen hoogwaters en laagwaterperiodes, maar ook scheepvaartdiepte (kielspelling), een rol bij de ontwikkeling van de waargenomen lithologische gelaagdheid,.

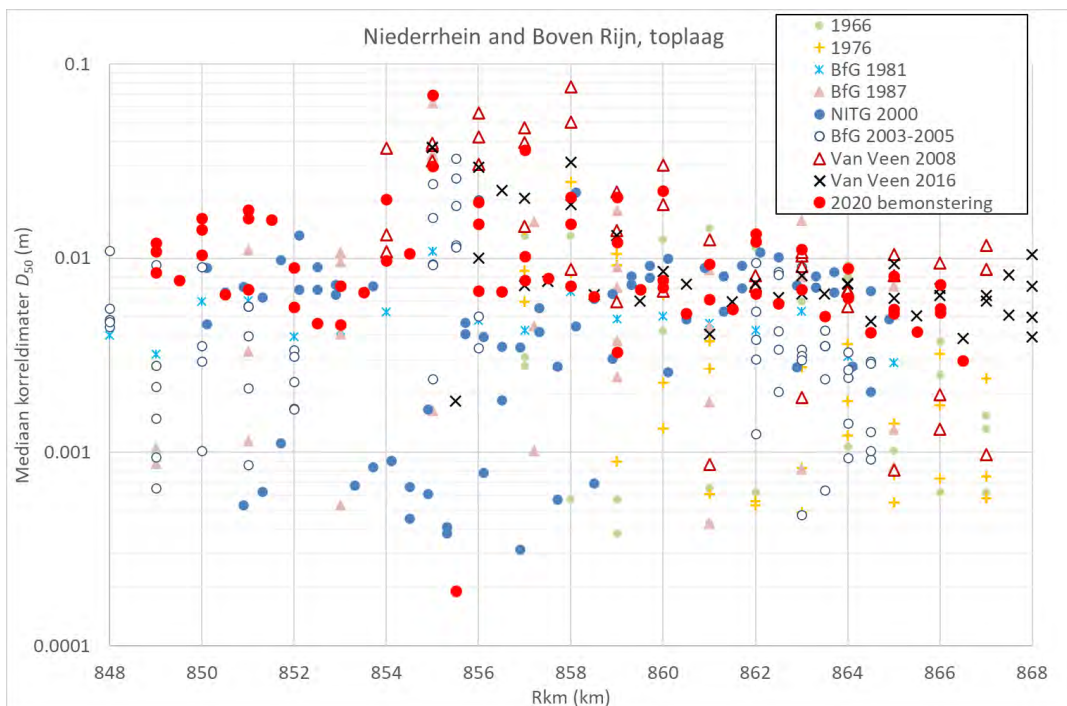
### 3.6 Variabiliteit in tijd

Temporele variaties zijn grotendeels het gevolg van verschuivingen in de fractie zand en fractie grind. Deze variaties zijn substantieel en op verschillende ruimtelijke schalen.

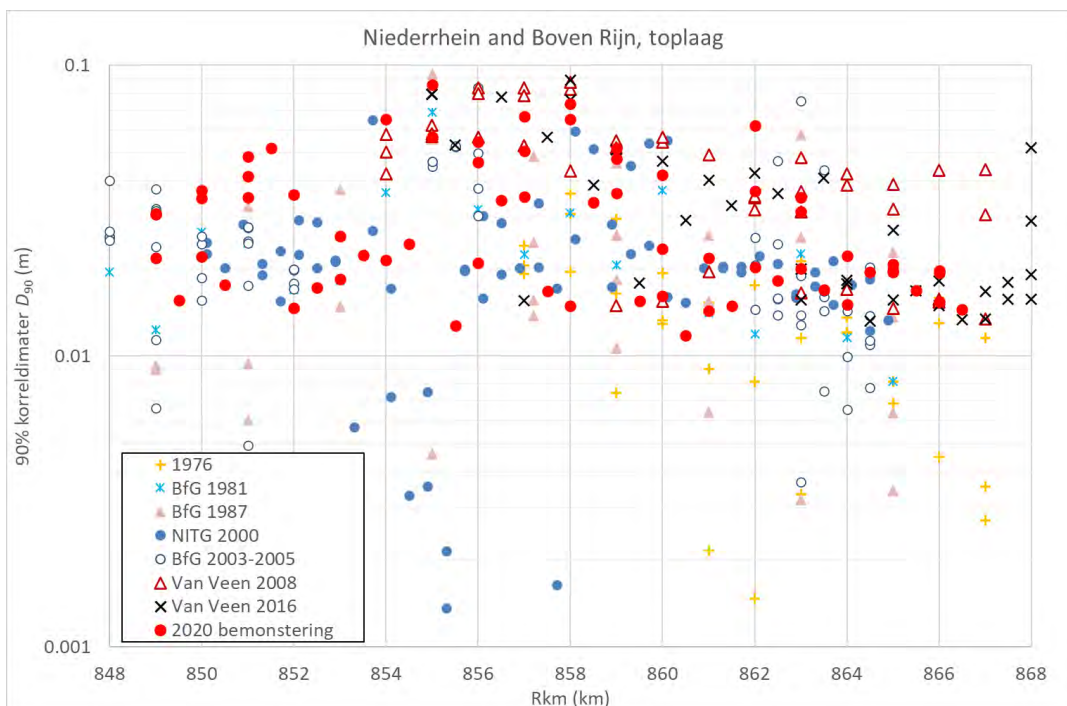
Frings et al. (2009) leiden op basis van een groot aantal boringen in de huidige en historische locaties van de thalweg van de Waal af, dat de bodemsamenstelling van de riviervak in de afgelopen 90 jaar over de hele lengte grover is geworden. De vergroving kan worden toegeschreven aan de antropogene invloeden die hebben gezorgd voor een toename van schuifspanning, met name de normalisatie.

Grootschalige veranderingen zijn ook beschreven door Ylla-Arbois et al. (2021).

Figuur 3-38 en Figuur 3-39 tonen een overzicht van een groot aantal monsters in de Boven-Rijn voor de periode 1966 – 2020. Het betreft alleen monsters van de toplaag van de bedding (tot 1 a 2 dm diepte). Er is geen onderscheid gemaakt in de monsters links, rechts of op de rivieras. In deze figuren lijken zich twee trajecten te onderscheiden. Een grover traject tussen km 850 en 860 en een iets fijner traject benedenstrooms van km 860.



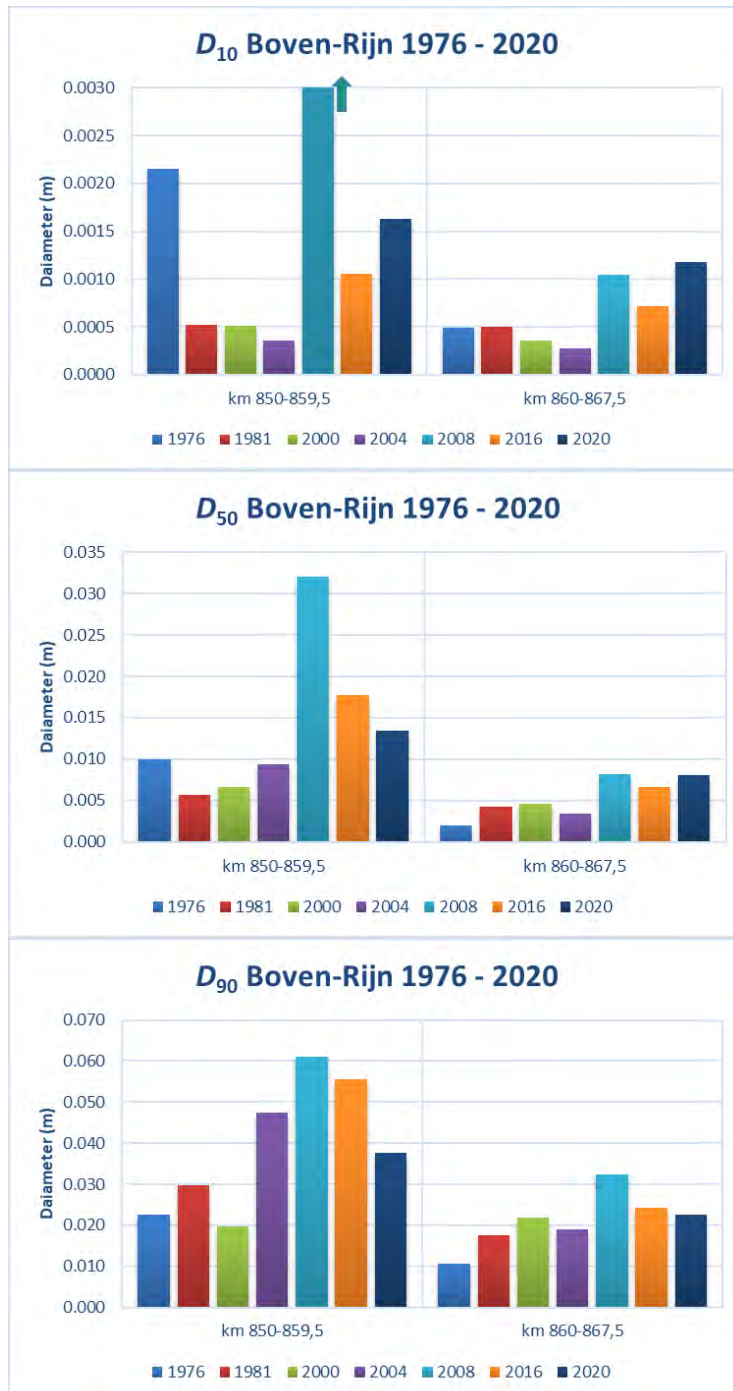
Figuur 3-38 Variabiliteit in de mediane diameter  $D_{50}$  voor de Nederhein en Boven-Rijn, monsters zowel op de rivieras, en links en rechts van de as



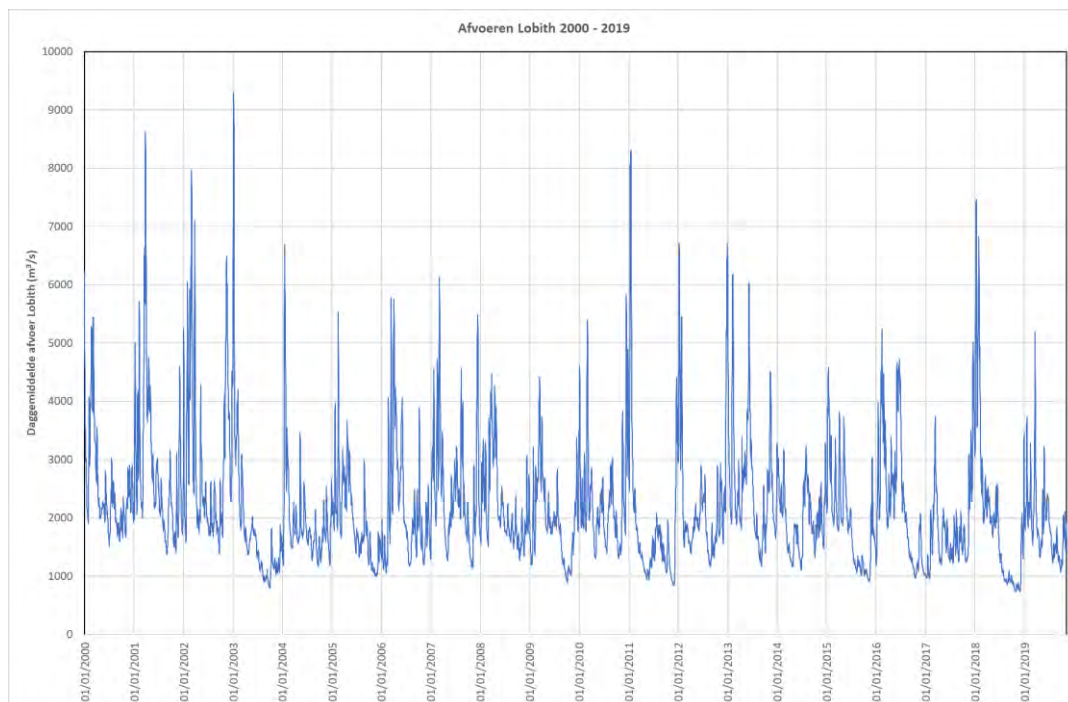
Figuur 3-39 Variabiliteit in de 90%-percentiel  $D_{90}$  voor de Nederhein en Boven-Rijn, voor alle beschikbare monsters, monsters zowel op de rivieras, en links en rechts van de as

Om een goed beeld te krijgen van de trends zijn de data voor de verschillende jaren voor de betreffende trajecten gemiddeld en gepresenteerd in Figuur 3-40. Onderstaande vergelijking is slechts ter indicatie, omdat deze statistisch niet helemaal correct is. De populatie (aantal monsters) varieert namelijk over de jaren. Uit de figuren blijkt dat de opeenvolgende jaren niet een continue stijgende trend vertonen, maar dat er sprake is van fluctuaties, met name voor het eerste traject.

Dit suggereert dat er sprake is van lopende golven, of van jaarlijkse variaties die samenhangen met afvoerloop. Wel lijkt er voor zowel het bovenstroomse als het benedenstroomse traject een redelijk consistent beeld van vergroving te zijn opgetreden na 2000. Vooral in het benedenstroomse traject gaat dit samen met vooral een toename van de fijnere percentielen ( $D_{10}$ ). Dat duidt op een afname van het zandgehalte (het 10% percentiel wordt grover, wat duidt op een geringer gehalte fijn sediment).



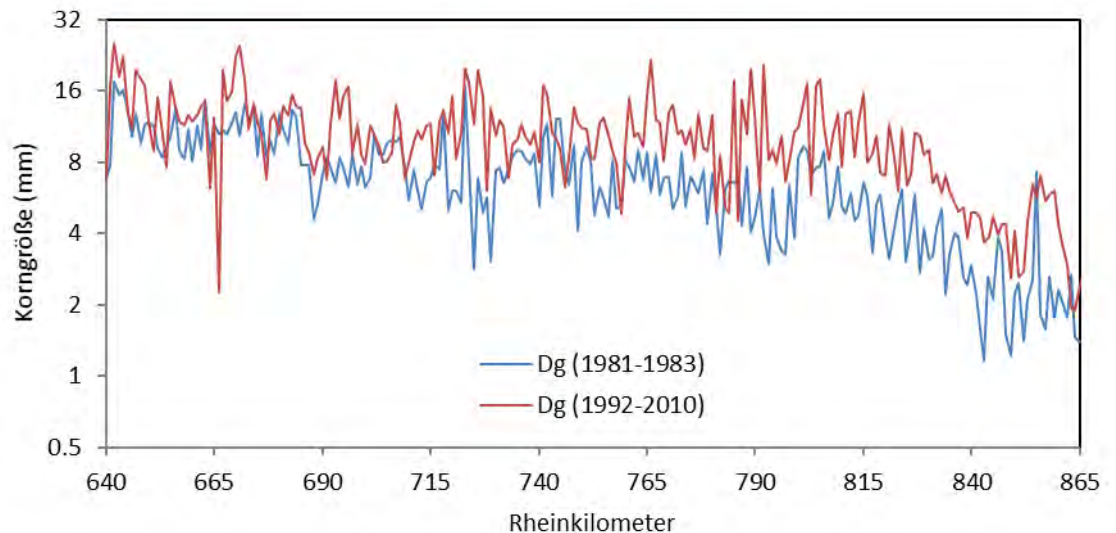
Figuur 3-40 Korreldiameters per traject op de Nederhein/Boven-Rijn na middeling van alle monsters voor specifieke jaren.



Figuur 3-41 Afvoerverloop Lobith 2000-2019

Het effect van afvoeren is onduidelijk. In de periode 2000 tot 2004 zijn relatief hoge afvoeren tijdens het hoogwaterseizoen opgetreden en zijn waterstanden hoog gebleven in de zomerperiode. Vanaf de zomer van 2003 zien we consistent lagere hoogwaters en lagere laagwaters. Tussen 2011 en 2014 is het dan weer wat natter, maar in 2014-2017 is het weer aan de lage kant. Is het toeval dat de grove monsters juist samenvallen met de periodes met relatief lage hoogwaters en lage laagwaters? Zouden er effecten van bovenstrooms in kunnen lopen?

In de gegevens gemiddeld over een reeks van jaren uit Duitsland zien we in de Niederrhein een trend van vergroving tussen de periodes in de jaren 80 tot de eeuwwisseling. Er zijn diverse verklaringen voor deze vergroving mogelijk, maar vrijwel alle zijn direct of indirect gerelateerd aan menselijke ingrepen in het riviersysteem (inclusief de gereduceerde sedimenttoevoer uit het stroomgebied, de bodemdaling door tektoniek en mijnen, de erosie veroorzaakt door versmalling van de rivier voor ijs en bevaarbaarheid, etc). Ook wordt een bijdrage van suppleties van grof sediment en invloed daarvan op de bedding aan dit beeld niet uitgesloten (zoals in onderstaande blok van Frings (2020) wordt uitgelegd).



Figuur 3-42 Vergroving van de bedding waargenomen in de Duitse Rijn in 2 decennia

Bron Frings, 2020:

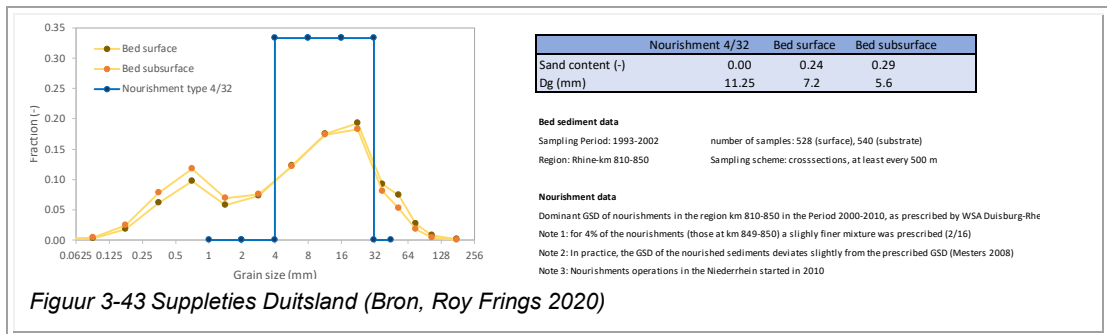
Vanaf het jaar 2000 vinden er sedimentsuppleties [Duits: Geschiebezugaben] in de Niederrhein plaats, met als doel het sediment dat door erosie verloren gaat, aan te vullen. Er zijn verschillende suppletielocaties met twee zwaartepunten: km 734-768 en km 810-850. Dit laatste gebied ligt vlak bij de Nederlandse grens. Hier is tussen 2000 en 2010 1,39 miljoen ton grind gesuppleerd. Vrijwel overal is gebruikt gemaakt grind met een voorgeschreven korrelgrootteband van 4-32 mm.

In het bestand van Frings (2020) wordt de korrelgrootteverdeling van dit materiaal vergeleken met de korrelgrootteverdeling van het beddingmateriaal van de Niederrhein. Daaruit blijkt dat de zandfractie in het suppletiemateriaal ontbreekt, terwijl de lokale bedding 24 % (toplaag) tot 29% (ondergrond) zand bevat. Als gevolg daarvan is de gemiddelde korrelgrootte (Dg) van het suppletiemateriaal groter dan die van het beddingmateriaal. De grindfractie van het suppletiemateriaal komt wel in grote lijnen overeen met de bedding.

Er wordt hier benadrukt, dat de bovengenoemde sedimentsuppleties slechts een klein deel vertegenwoordigen van het sediment dat de rivierbeheerder in de rivier inbrengt. Ten behoeve van beddingstabilisatie [Sohlstabilisierung] wordt veel meer sediment ingebracht (in de periode 1991-2010 in totaal 6.42 Mton). Dit materiaal is grover dan het suppletiemateriaal (*maar omdat het om vastlegging van de bodem gaat met immobiel sediment, stenen, draagt dit materiaal niet bij aan het transport en de ontwikkeling van sorteringsgolven*). Goed om te weten is, dat het zwaartepunt van de stabilisatiemaatregelen in het riviertraject van km 830 tot aan de Nederlandse grens lag. Grote delen van het traject zijn gestabiliseerd.

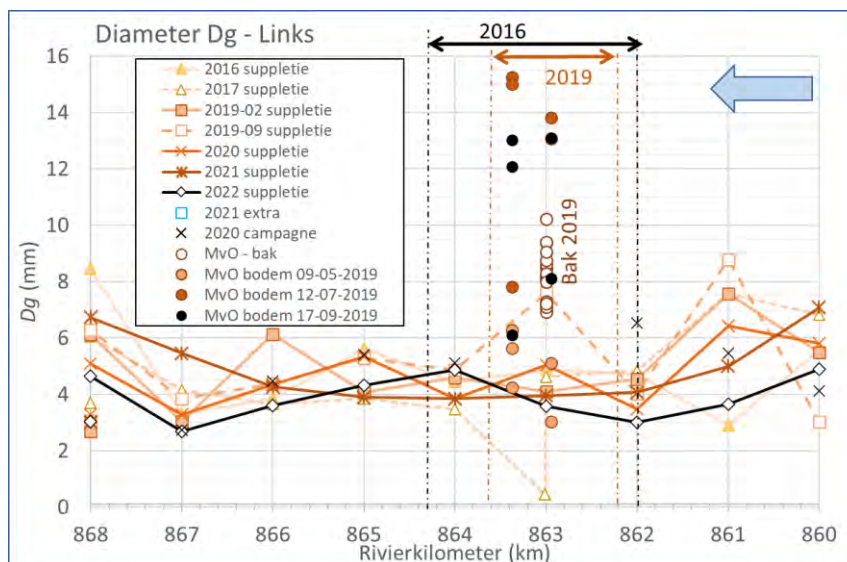
De netto toename van gebiedsvreemd (*mobiel*) materiaal dat grover is dan de lokale bodem, kan niet anders dan tot een temporele vergroving van de bedding leiden. Recente data over de verandering van de beddingsamenstelling zijn er niet. Wel is op basis van duizenden korrelgroottemetingen aangetoond dat de Niederrheinbedding grover is geworden tussen de meetcampagnes van 1981-1983 en 1992-2010. Zie: Frings, 2014: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.007>





In het tijdsafhankelijke gedrag speelt ook een rol dat verandering in bodemsamenstelling zich als sorteringgolven stroomafwaarts verplaatst met een snelheid die vergelijkbaar is met die van (grootschalige) bodemgolven. Het is daarom logisch dat verondersteld wordt dat het grover worden van de Boven-Rijn volgt op het grover worden van de Niederrhein. Uit waarnemingen van suppleties in de Niederrhein is afgeleid dat de sorteringgolven zich op het traject verplaatsen met een snelheid van circa 1,5 km/jaar (pers.comm. D. Abel, WSV). Dit is niet de snelheid van de sedimentkorrels of het tracer-materiaal (die is veel groter), maar de verplaatsing van de sorteringsgolf in het geheel. Bij het verplaatsen treedt slechts geringe spreiding in dwarsrichting op. Dit is bijvoorbeeld waargenomen tijdens de suppletieproeven aan de linkeroever van de rivier bij Lobith in 2016 en 2019. Met behulp van tracers is gemeten hoe het materiaal zich verplaatst door de rivier.

Tijdens de proefsuppleties in de Boven-Rijn zijn frequent monsters genomen op hele kilometerraaien, en zijn monsters genomen van het gesuppleerde sediment. Uit de bemonstering van de 2019 suppletie bleek het gestorte materiaal aanzienlijk grover te zijn dan het omringende (oorspronkelijke) sediment, zie Figuur 3-44. Echter, zoals blijkt uit de meting van 2020 (één jaar later), is de samenstelling op de suppletielocatie (km 862.2-863.4) weer gelijk aan het omringende traject, en is op het benedenstrooms traject geen sprake van een grove sedimentsoortering. Verondersteld wordt dat op de suppletie een actieve laag is gevormd waarbij grof sediment door verticale sortering naar diepere delen van de actieve laag is verplaatst.



**Figuur 3-44** Overzicht van gemiddelde diameter  $D_g$  ter plaatse en benedenstrooms van de suppletielocaties. Monsters MvO (Martens en van Oord) zijn genomen op de suppletielocatie tijdens de suppleties. Monsters "bak" zijn genomen van materiaal voor de suppletie.

### 3.7 Variabiliteit overzicht

De onderstaande tabel vat de verschillende bronnen van variaties in bodemsamenstelling samen. Ook zijn daar de ruimteschalen bij gegeven.

Proces	Eigenschap	Schaal
Bodemvormen (duinen)	Grote duinen groeien met hoogwater, en nemen af of verdwijnen bij laagwater. Duinen schalen met waterdiepte in zandbedding, en met schuifspanning in gegradeerde bedding. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Horizontaal: Fijn op kam, grof in dal</li> <li>• Verticaal: grof zakt naar trogniveau, actieve laag wordt gevormd</li> </ul>	Orde 50 m (in langsrichting), orde 0.5 à 1 m (in verticaal)
Ribbels	Kleinschalige bodemvormen gesuperponeerd op de grotere duinen. Sorteringseffect onbekend. Draagt bij aan actieve laag.	Orde 5 m (in langsrichting), orde 0,1 m (in verticaal)
Patches	Afwisselende vlekken (in bovenaanzicht) van fijn en grof sediment door verschillende oorzaken	Orde 5 à 10 m (in alle richtingen)
Scheepvaart	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vaarsporen door retourstroom en schroefstraal, onbekend sorteringseffect</li> <li>• Fijner sediment aan zijde met (geladen) opvaart en grof aan zijde met afvaart</li> </ul>	Vaarsporen: orde 10 m (in dwarsrichting); Links/rechts: orde 100 m (in dwarsrichting)
Bochten		Orde 100 m (in dwarsrichting), 5 km (in langsrichting)
Aanzanding/erosie bij maatregelen		Orde 100 m – 1 km
Grind-zand transitie		50 km
Stroomafwaartse verfijning		100 km
Substraat		1 m (in vertical richting)
Vergroving riviertak		100 km

# 4 Statistical analysis of grain size samples from the river Waal

## 4.1 Introduction

Although visual comparison and interpretation of the data sets, as shown in the previous chapters, tell us a lot about the genesis of bed material in the Rhine branches, the large range of uncertainty requests for a statistical approach for further assessment. In this chapter we analyze and discuss such approaches, by applying them to some specific research questions.

The samples that have been collected from the Rhine branches, for instance in 1995 and 2020, have been retrieved for the purpose of analyzing their sieving curves, and eventually draw insights about the grain size distribution of the sediments in the river. The results and conclusions retrieved from such an analysis are intended to be employed in the modelling of the sediment-transport processes of the river, as well as for the further comprehension of the morphological processes. Additionally, the data is intended to inform plans for upcoming site investigations in the Rhine branches. Naturally, statistical analysis poses as an attractive means for drawing conclusions regarding existing assumptions and conventions based on the grain size data. Moreover, statistical inference can be used in identifying patterns and advising towards a data-informed site investigation plan.

After the survey of 2020, a comparison with 1995 data seemed to reveal a pattern of coarsening along the Boven Rijn and Waal River. However, as shown earlier in this report, these statements are not based on sound statistical tests, and require more careful consideration. The other observation is the difference in grain-size composition between the left and right side of the river.

The following chapter presents a proof-of-concept analysis of the grain size data. Specifically, it focuses on the following research questions:

- Q1. Is there a difference in the grain size data collected between 1995 and 2020?
- Q2. Is there a difference between the grain size data collected at the right and left sides of the river?
- Q3. What patterns can be identified and how can they contribute to more informed decision-making for site investigation plans?

After demonstrating the adopted plan of approach, this chapter presents the results of the data analysis and indicates the relevant conclusions. Lastly, it suggests further steps that can strengthen the inferential and predictive power of the statistical framework.

## 4.2 Plan of approach

The research questions can be grouped in two different categories. The first one takes the form of hypothesis testing, while the second one is a problem of parameter determination.

### 4.2.1 Hypothesis testing

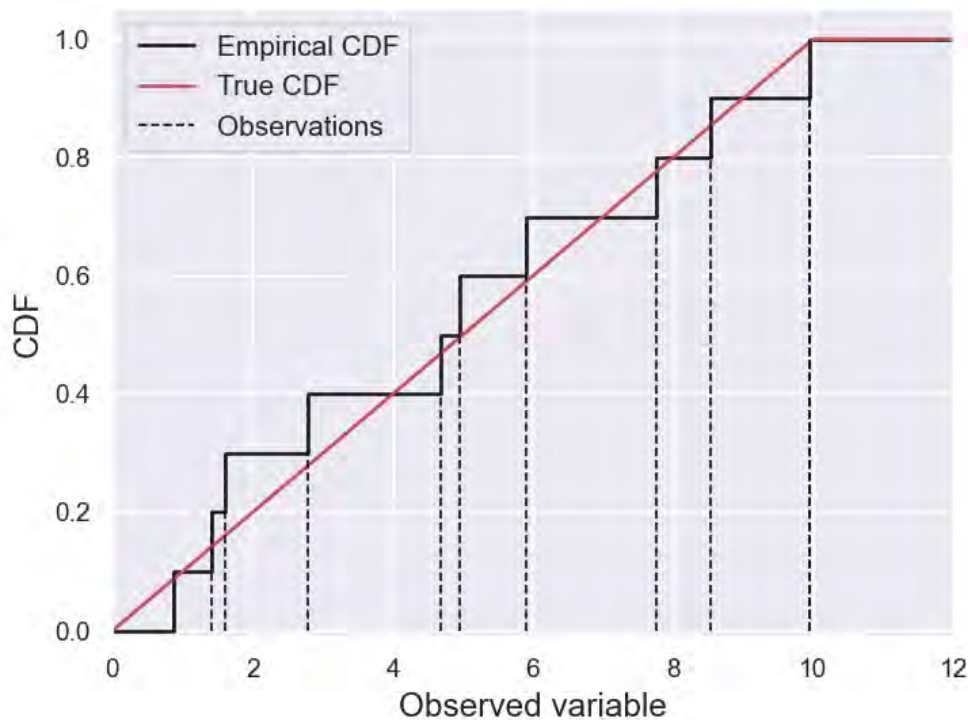
Research questions Q1 and Q2 take a closed form and they are intended to challenge an existing assumption. The concept of hypothesis testing proves as a valuable tool in testing this assumption.

The basis for hypothesis testing is the formulation of the null hypothesis  $H_o$ , which represents the current assumption (“status quo”) for the underlying population that generated the data. Then, hypothesis testing tools can be employed towards rejecting or failing to reject the  $H_o$ , given the information granted by the data. Naturally, the conclusion regarding the rejection of the status quo is always given with regards to a level of statistical significance. This level is selected by the researchers prior to analyzing the data. This study assumes a significance level of 5% (= 100% – 95%, which 95% being the desired confidence level) as sufficient for drawing conclusions.

The grain size data is given in the form of sieving curves, which can be challenging to compare between times and locations. However, the engineering knowledge of the problem suggests that the comparison can be performed on a proxy variable, the geometric average of the sieving curve ( $D_g$ ), which takes the form of a single value per sieving curve sample. Thus, a sample of  $D_g$  is derived per time and location, which can be utilized in hypothesis testing.

Both Q1 and Q2 involve the comparison of  $D_g$  samples retrieved at different times and/or locations. Since only two times (1995 and 2020) and two locations (left and right side) are examined, the  $D_g$  values can be lumped in two samples per question. For example, the sample of 1995 for Q1 includes  $D_g$  of both the left and right sides of the river, while the sample of the left side of the river for Q2 is composed of samples from both 1995 and 2020. The Kolmogorov-Smirnov hypothesis test poses as an ideal approach to these questions.

The Kolmogorov-Smirnov test designs a hypothesis test based on the empirical Cumulative Density Functions (CDFs) of the samples (Figuur 4-1). By default, it assumes as  $H_o$  that both samples originate from the same distribution. Thus, rejecting the  $H_o$  provides confidence that the samples are in fact from a different distribution. By extension, rejecting would mean that there is in fact difference between samples of different times and locations. This chapter is not designated to elaborate further on the operations of the Kolmogorov-Smirnov test, the underlying theory and construction of the relevant statistic. For that, the reader is referred to Wasserman (2004). Ultimately, the test provides a  $p$ -value which represents the probability of retrieving the data given  $H_o$  is true. In case the  $p$ -value is lower than the significance level,  $H_o$  can be confidently rejected. In this analysis, the Kolmogorov-Smirnov test is implemented with the statistical suite of the Python package *scipy* (Virtanen et al., 2020).



Figuur 4-1 Example of the empirical CDF for an observed variable  $X \sim \text{Unif}(0, 10)$ . The sample has 10 observations. The empirical CDF is compared to the true CDF (which is unknown in most practical applications).

#### 4.2.2 Parameter estimation

Statistical inference for parameter estimation aims to determine the parameters ( $\theta$ ) of a statistical model that describes the data. Naturally, since the data is not a complete representation of the underlying population, parameter estimation induces uncertainty, which leads to the derivation of  $\theta$  on a probabilistic level. This uncertainty propagates further into the models, affecting predictions. However, an estimate of  $\theta$  is typically used in prediction, at least on a first level. In this study, the best estimate of  $\theta$ , which is the value of  $\theta$  that best describes the model (i.e. achieves the greatest likelihood), is used for that purpose.

The first step for parameter determination is the orchestration of the statistical model. Since the data with observations  $y_i, i = 1, 2, \dots, n$  takes the form of sieving curves, special attention should be provided. The sieving curve provides the percentage of the total mass of the dry sample that is withheld at every sieve diameter ( $m$  in number,  $m > 1$ ). So, every observation  $i$  is of the form  $y_i = [y_i^1, y_i^2, \dots, y_i^m]^T$ . The following points are highlighted:

- 1 A sieving curve is a sample of a continuous variable between 0 and 1. In this case, the variable is percentage withheld per sieve diameter.
- 2 The sieving curve is a sample of a multivariate distribution. The distribution has one dimension per sieving curve.
- 3 The sum of the observations per sample, and therefore the variables of the distribution, are strictly confined to unity. This property makes the variables highly correlated.

According to the points above, the Dirichlet distribution is selected to model the sieving curves. The Dirichlet distribution is a multivariate distribution, whose variables take values between 0 and 1 and always sum to 1 (Thomas P. Minka, 2003). Equation (2.1) presents the statistical model, which is parametrized by the parameter vector  $\theta$ , of size  $m$ .

$$y \sim \text{Dirichlet}(\theta), \text{ with } \theta = [\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^m]^T \quad (2.1)$$

The next step in parameter estimation is conditioning the statistical model to the data and deriving  $\theta$ . This study chooses to achieve that using the Maximum Likelihood Estimation (MLE) method (Wasserman, 2004). However, this is no trivial task, because the Dirichlet distribution is described by many and highly correlated parameters. Eventually, the utilization of the MLE was achieved by employing an MLE Python package augmented by the optimizers of the Python package TensorFlow (Google research, 2015). The package combining MLE with TensorFlow was written by one of the researchers and is open to access at: [github.com/amavrits/MLE\\_TensorFlow](https://github.com/amavrits/MLE_TensorFlow).

At this point, an important topic arises; the fit of the Dirichlet distribution might not be directly attainable, since the sample includes various patterns of sieving curves. To that end, a “divide and conquer” strategy is adopted. The sample is clustered by patterns of sieving curves and the statistical model is fit per cluster. This is achieved by using K-means clustering on the sieving curve data (Murphy, 2012).

#### 4.2.3 Model selection criterion

Since a clustering step is added to the fitting of the sieving curve data, overfitting becomes a threat to the predictive integrity of the model. As a result, clustering and fitting a model is evaluated using a robust metric. Ultimately, the best-scoring model is selected for the prediction.

This analysis adopts the Bayesian Information Criterion (BIC) (Murphy, 2012). According to Equation (2.2), the BIC promotes models achieve high loglikelihood scores ( $L$ ) and penalizes models that use a high number of variables (i.e. degrees of freedom), which often poses as a dominant cause for overfitting. In this context, different models occur when the K-means clustering is performed for different numbers of clusters. A greater number of clusters ( $K$ ) means that a model utilizes more variables. Eventually, the best-scoring model is the one of lowest BIC.

$$BIC = \ln(n) * K * (m - 1) - 2 * L \quad (2.2)$$

### 4.3 Analysis results

This section provides the results of the analysis described in section 4.2 and elaborates on the outcomes.

#### 4.3.1 Hypothesis testing for Q1 and Q2

As presented in Tabel 4-1, the Kolmogorov-Smirnov test returns  $p$ -values lower than 5% for both Q1 and Q2. This means that in both research questions, the null hypothesis can be rejected with sufficient confidence. As a result, it can be confidently stated that:

- 1 To the extent  $D_g$  is a representative proxy of the grain size distribution, the data can support that the samples of 1995 originate from a different distribution than the samples of 2020.
- 2 To the extent  $D_g$  is a representative proxy of the grain size distribution, the data can support that the samples collected at the left side of the Waal originate from a different distribution than the samples collected from the right side.

It should be mentioned that an additional property of the sample that enhances the statistical testing is that sieving samples were collected at the same locations in 1995 and 2020.

Tabel 4-1 Results of Kolmogorov-Smirnov hypothesis testing per research question.

Research question	p-value	Result for $H_0$
Q1	$5e^{-16}$	Rejected
Q2	$5e^{-5}$	Rejected

### 4.3.2 Parameter estimation for Q1 and Q2

Even though it is not directly connected to the analytical scope of this study, a parameter estimation step is performed for  $D_g$  as extension of research questions Q1 and Q2. Hopefully, this short addition can serve further research on the topic.

The statistical model is selected to be a lognormal distribution. Through MLE, the model is fit to the data in two different cases: first by distinguishing between times and secondly by distinguishing between locations. Figure 4-2 and Figure 4-3 illustrate the histogram of the data per case, along with the model fit associated with MLE best estimate. Moreover, it presents the model fits that are evaluated during a bootstrapping analysis, which aims to assess the uncertainty of the estimated model parameters.

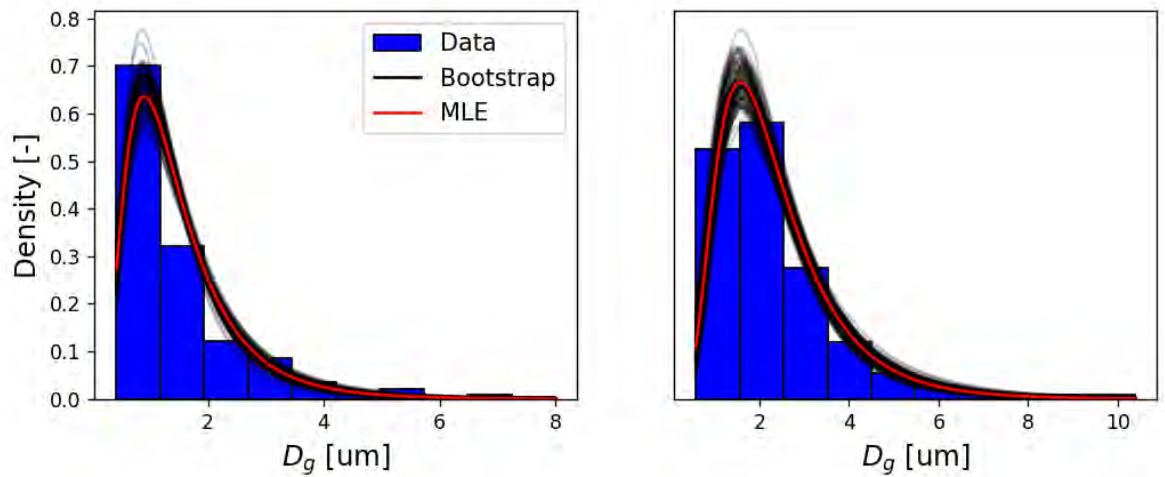


Figure 4-2 Histogram of  $D_g$  data, best estimate and bootstrap of the distribution fit for the temporal analysis.

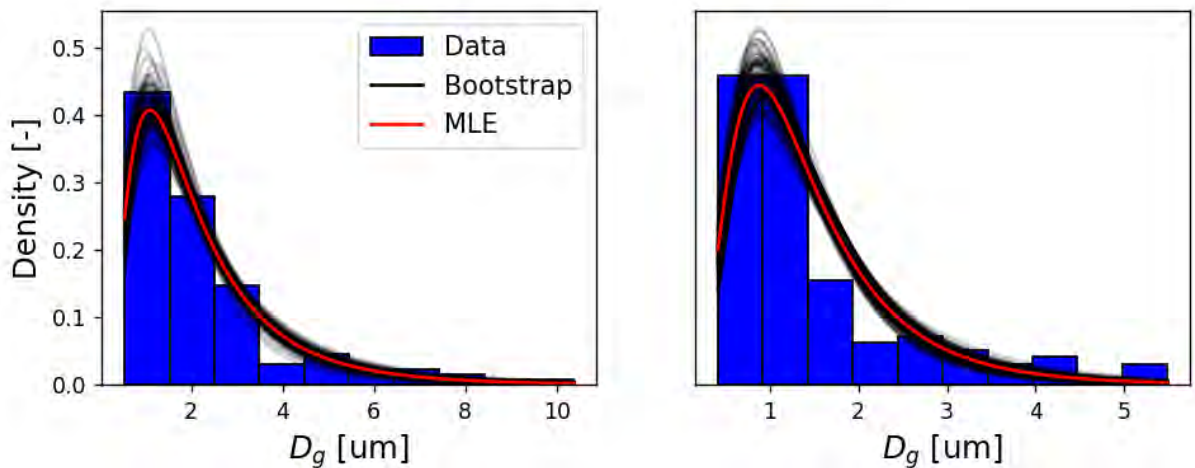
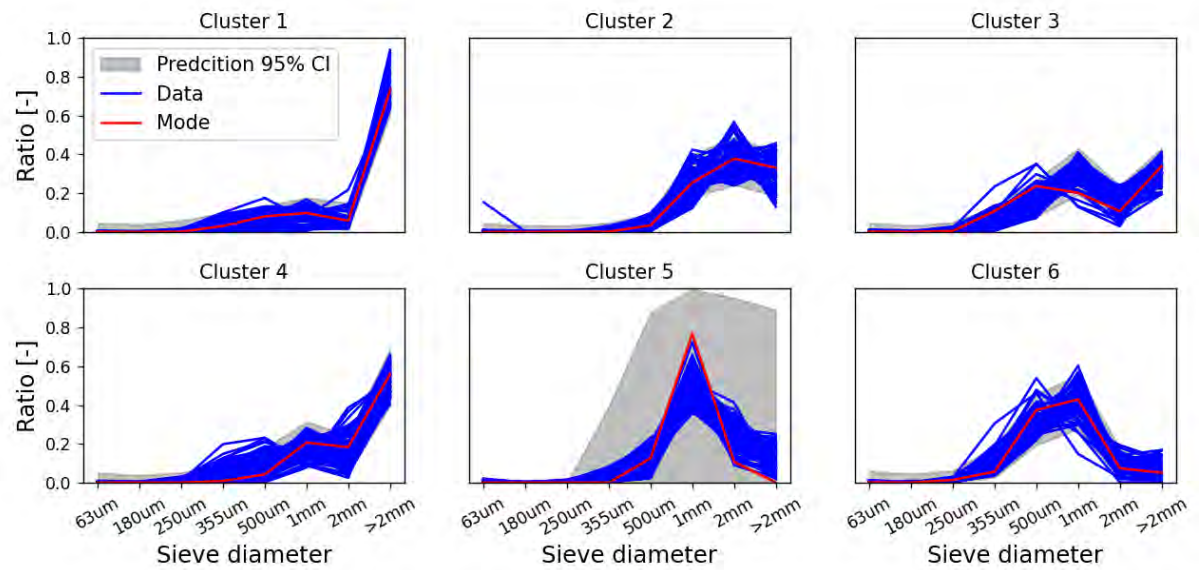


Figure 4-3 Histogram of  $D_g$  data, best estimate and bootstrap of the distribution fit for the spatial analysis.

### 4.3.3 Parameter estimation for sieving curves

As explained in section 4.2.2, prior to fitting the model, the sieving curve data is clustered. Following the model evaluation scheme suggested in 4.2.3, the BIC indicates that using 6 clusters leads to the most accurate and robust model.



Figuur 4-4 Sieving curve data along with the best estimate model fit and the associated 95% predictive interval per cluster.

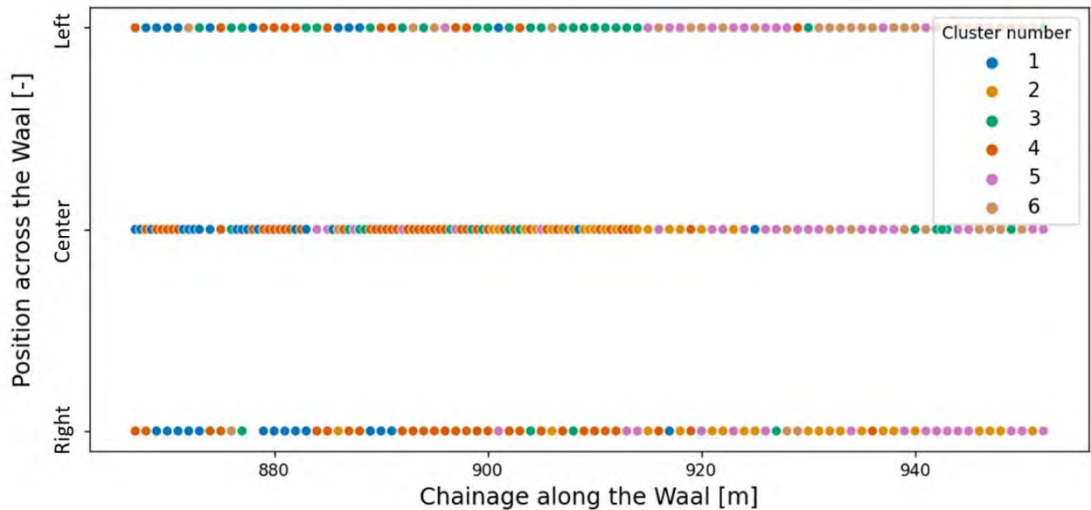
Figure 4-4 visualizes the sieving curve samples. Evidently, the K-means algorithm was successful in splitting the sample into clusters of similar behavior. For example, cluster 1 has significantly greater percentages of coarse gravel (> 2mm), cluster 2 has uniform percentages at the highest sieving curves, etc. Figure 4-4 also illustrates predictions that arise from the best fit of the model. The 95% prediction interval is presented by a bandwidth. The interval marks the region where new samples are expected, or where predictions of the model will lie. Remarkably, the majority of the samples are well enveloped by the interval. Moreover, the mode of the Dirichlet model is also demonstrated, representing the most likely shape of a sieving curve. Interestingly, the method was not able to attain a fit for cluster 5, leading to great predictive uncertainty. It is speculated that further clustering of this group could lead to an MLE fit. However, the cluster is still presented so that the reader can have a reference of how the statistical model look like when the parameter estimation step is unsuccessful.

It is also mentioned that the MLE fit of the Dirichlet distribution was expectedly unsuccessful when not preceded by a clustering step. Additionally, the sieving curves have also been generated in a cumulative format but are not presented in this report.

Lastly, the K-means clustering step leads to a map of cluster over the examined region of the Waal, as indicated by Figure 4-5. Some patterns can be instantly recognized. For example, the left side has more occurrences of cluster 3, while clusters 1 and 4 are dominant at the right side. Also, the center tends to have more mixing of clusters.

This sort of data can be used in training a spatial model. Such a model will be able to read the chainage along the river and the position across it and determine the probability of each location being part of a cluster. Then, the fit models for each cluster would be used in prediction of its sieving curve. Ultimately, the most interesting locations for site investigation are the ones with the greatest uncertainty and/or the most impactful sieving curve predictions.





Figuur 4-5 Mapping of K-means cluster over a region of the Waal.

## 4.4 Conclusions

This chapter has addressed three questions regarding the grain size data collected at a region of the Waal. After presenting the statistical frameworks deployed in the analysis, it has provided the analysis results and responded to the questions. In specific:

- Q1. Hypothesis testing suggested that there is a statistically significant difference between the samples of 1995 and 2020. This hints that a temporal phenomenon is present in the Waal that can alter the grain size distribution. This conclusion depends on the assumption that the  $D_g$  is a good representation of the grain size data.
- Q2. Hypothesis testing suggested that there is a statistically significant difference between the samples of the left and the right side of the Waal. This could be a result of a spatially varying phenomenon, such as river bending or ship traffic. The conclusion depends on the assumption that the  $D_g$  is a good representation of the grain size data.
- Q3. Clustering the sieving curve data with the K-means method has indicated that there are indeed different archetypes of sieving curve shapes present in the sample. Parameter estimation of a Dirichlet statistical model offers a structure for the different archetypes and enables their comparison. Moreover, it enables prediction of sieving curves per cluster. When combined to a spatial model that predicts the cluster of each location, the statistical model will be able to pinpoint locations of interest for site investigation.

In conclusion, this chapter renders statistical inference as a useful tool for gaining insights from the grain size data in the Waal. The conclusions drawn can be employed for further research, support modelling and enable data-informed decision-making for further site investigation.

## 4.5 Recommendations for further steps

This last section lists some steps for further development:

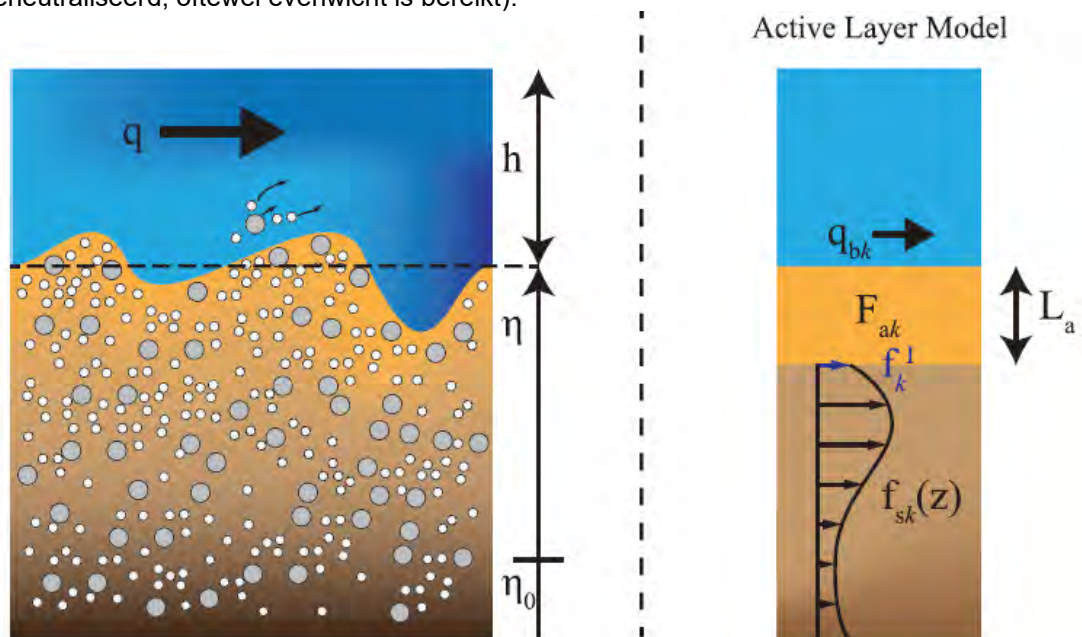
- 1 Research hypothesis testing for the entire sieving curve, which could replace the testing for just a proxy variable.
- 2 Build further the parameter estimation framework of Q3 with more statistically sound steps for data preparation, model selection, etc.

- 3 Implement the EM algorithm (Dempster et al., 1977) instead of a simple K-means clustering step prior to parameter estimation.
- 4 Research the implementation of a spatial model for cluster prediction.
- 5 Research the optimization of site investigation, upon completing step 4.
- 6 Reshape the solution by incorporating more engineering knowledge and experience on the problem.
- 7 Include more factors in the analysis, such as river bends.
- 8 Apply the BaySiC (Bayesian Site Characterization) framework for spatial and temporal analysis with high level models.

## 5 Toepassing in modellen

In de Rijntakken worden op dit moment twee typen morfologische modellen toegepast: 1) uniform sediment modellen, met name voor de benedenrivieren (Midden- en Beneden-Waal, Merwede, Nederrijn/Lek, Beneden-IJssel), en 2) gegradeerd sediment modellen voor de bovenrivieren. In gegradeerd-sediment modellen wordt gerekend met meerdere sedimentfracties en het actieve-laag concept van Hirano (1971). Voor iedere fractie wordt het de sedimenttransportcapaciteit berekend met een transportformule op basis van beschikbaarheid in de actieve, waarbij onderlinge interactie van fracties door hiding en exposure wordt meegenomen in de transportformule. Over het algemeen wordt niet of in beperkte mate rekening gehouden met de invloed van ruwheid door korrels, effect van patches, invloed van porositeit, variabele actieve laag dikte door beddingvormen, en heterogene ondergrond.

Over het algemeen geldt dat het actieve-laag concept van Hirano (1971) prima voldoet voor het simuleren van de sortingsprocessen en de morfologie in de gegradeerde trajecten. De korrelverdeling in de actieve laag (of menglaag) bepaalt de samenstelling van het sedimenttransport, en is dus essentieel voor zowel de morfologie als de veranderingen in samenstelling. Nadeel van het concept is de grote afhankelijkheid van de dikte van de laag. Hoe dikker de laag, hoe minder snel de menging en samenstelling veranderingen, en hoe groter de morfologische veranderingen (bij sedimenttransport gradiënten zal tegelijk een verandering in samenstelling en in bodemligging optreden, totdat de gradiënt als het ware is genutraliseerd, oftewel evenwicht is bereikt).



Figuur 5-1 Schets van het lagen concept van Hirano (Chavarrias, et al. ,2019), waarin  $\eta$  is de duingemiddelde bodemligging, en  $F_{ak}$  de duingemiddelde korrelverdeling,  $f_{sk}$  is de in diepte variërende korrelverdeling van het substraat,  $f_k^l$  is volumefractie op het grensvlak van substraat en actieve laag,  $L_a$  is de actieve-laag dikte

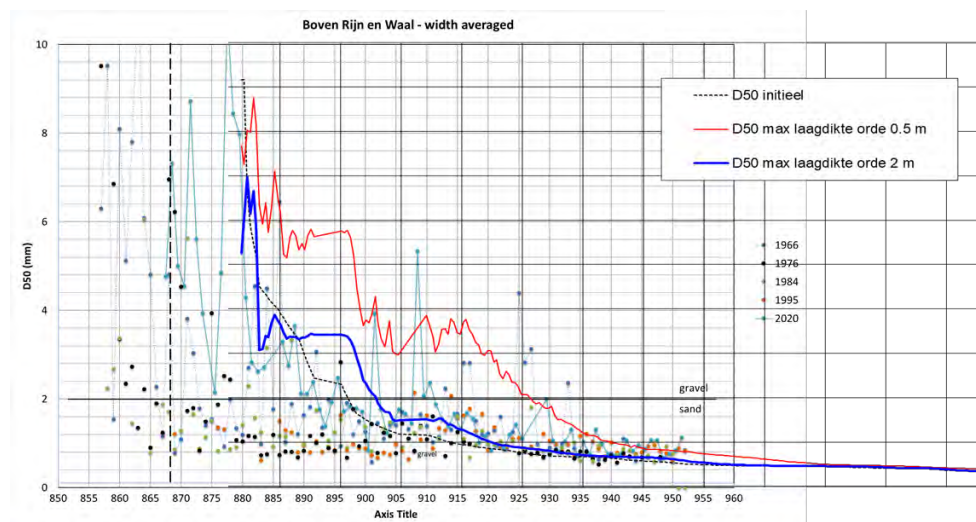
De beperkingen van het laagconcept in specifieke situaties, zoals “ill-posedness” of niet kunnen simuleren van ‘semi vaste lagen’, heeft ertoe geleid dat het Hirano concept verder is uitgebreid.

Voorbeelden hiervan zijn het SILKE concept (Chavarrias et al., 2019) en het HANNEKE concept (Chavarrias et al., 2020), die recent zijn ontwikkeld en toepasbaar in de Nederlandse rivieren. Op basis van de eigenschappen van de bedding zoals beschreven in voorgaande hoofdstukken zijn een aantal relevante eisen te stellen aan de modellen:

- Essentieel is het om voor de trajecten met bimodale korrelverdeling te rekenen met niet-uniform sediment (gegradeerd-sediment) met meerdere fracties. In ieder geval is het nodig om onderscheid maken in de twee fracties zand en grind, op basis van de waargenomen modes van de korrelverdelingen (de modes in de bimodale verdeling).
- Voor afzonderlijke zand- en grindfractie kan in principe een eigen mediane diameter en percentielen worden bepaald omdat deze afzonderlijke fracties log-normaal zijn verdeeld. Hiervoor bij voorkeur de de  $\phi$ -schaal gebruiken.
- De in paragraaf 3.3 beschreven structuur van de bedding, met onderscheid in klast- en matrix-ondersteunde bedding, vraagt om een zorgvuldige toepassing van de transportmodellen met hiding en exposure. Waar de bedding overgaat van klast- naar matrix-ondersteund, d.w.z. waar zandfractie hoger is dan orde 30%, zal het hiding effect voor het zand moeten verdwijnen maar voor grind zal exposure toenemen. Dit zal dan ook zijn weg moeten vinden naar bodemruwheden en schuifspanning. In de meeste trajecten is sprake van een zandfractie groter dan 30%.
- De dikte van de actieve laag wordt verondersteld te schalen met de duinhoogte (of met  $D_{90}$  als er geen duinen zijn). Echter, er zijn geen betrouwbare duinhoogtevoorspellers die voldoen voor zowel de gegradeerde trajecten als de zandtrajecten in de Rijntakken. Dit leidt ertoe dat meestal wordt gerekend met een vaste laagdikte, terwijl hier een variatie op basis van afvoer meer toepasselijk zou zijn.
- Het effect van verticale sortering en insnijding in onderlagen is mogelijk nog onvoldoende gerepresenteerd in de modellen.
- Mogelijke kan een grote invloed van scheepvaart tijdens lage rivierafvoeren gevolgen hebben voor de manier waarop sedimenttransport en bodemsamenstelling tijdens die periodes wordt gesimuleerd.

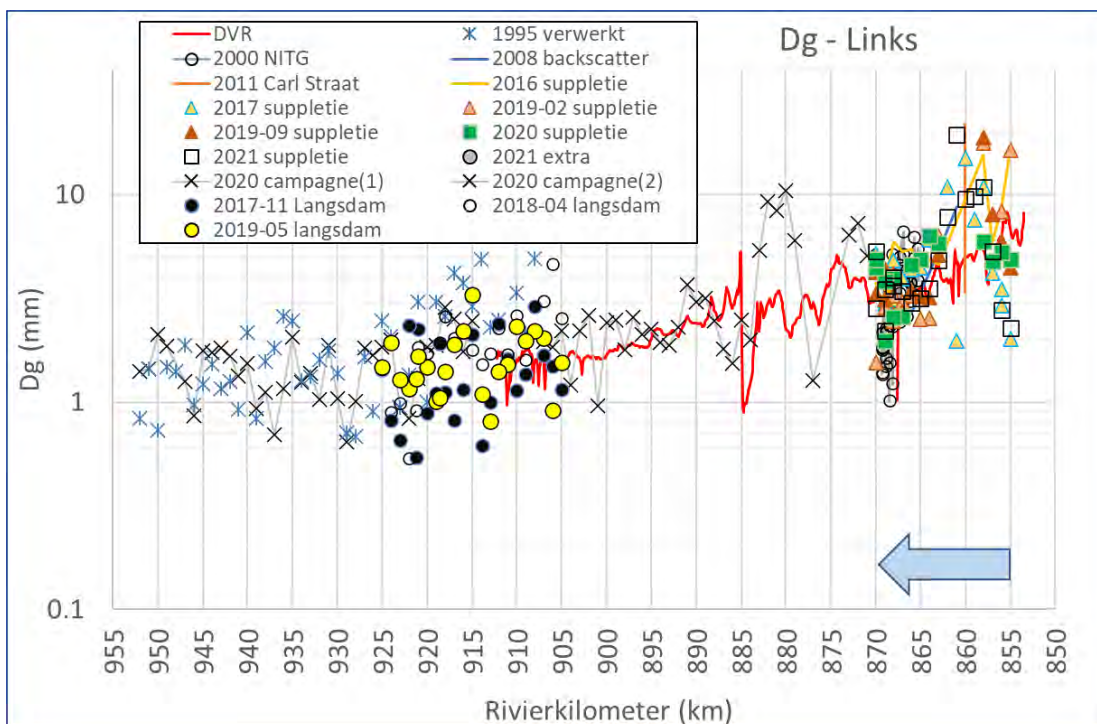
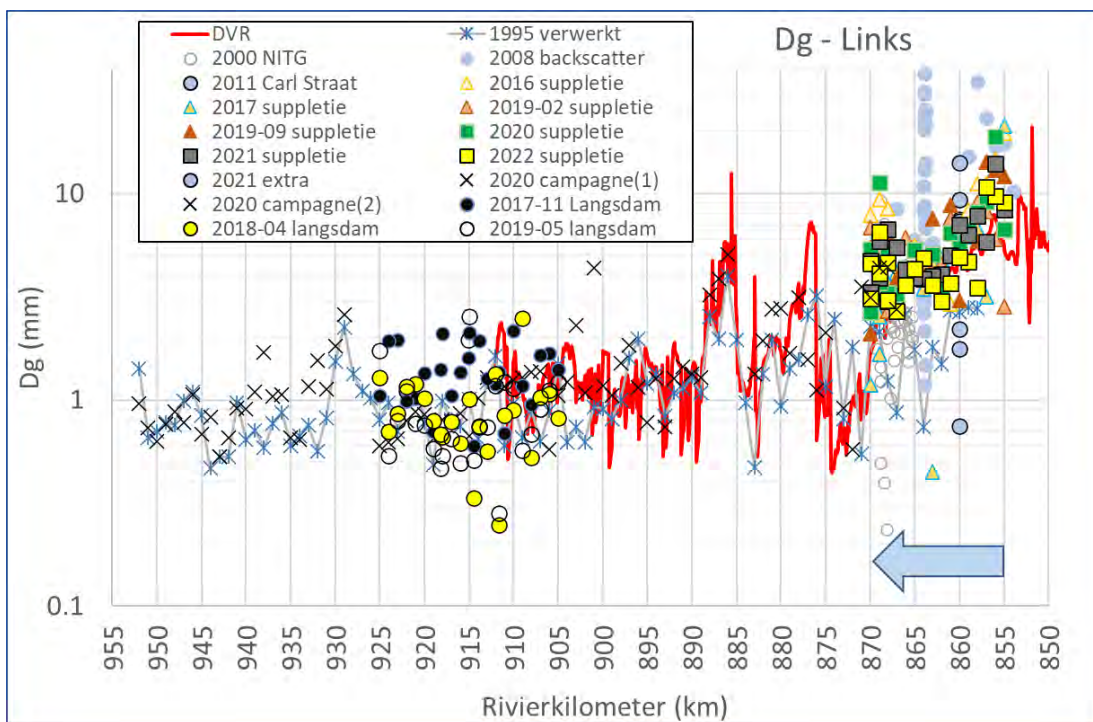
De volgende typen modellen zijn op dit moment beschikbaar voor morfologische berekeningen voor de Rijntakken. Het betreft de schematisaties met gegradeerd sediment.

- Eindimensionale modellen, SOBEK Rijntakken model:



Figuur 5-2 Verloop van D50 berekend met het 1D morfologische model voor de Rijntakken

- Tweedimensionale modellen: DVR schematisatie:



Figuur 5-3 Gemiddelde diameter berekend met Delft3D voor de DVR schematisatie voor de langdraai links en rechterzijde van de rivier. Rode lijnen zijn de berekende diameter na inspelen (stroming is van rechts naar links in de figuur).

## 6 Aanbevelingen voor monitoren en analyseren van bodemsamenstelling

### 6.1 Discussie

De bemonsteringen zijn belangrijk voor het rivierbeheer voor het ontwikkelen van betrouwbare morfologische modellen, en voor het signaleren van grootschalige trends. Ook voor toekomstig sedimentbeheer, zoals voor suppletie strategieën, of voor specifieke uitvoeringsprojecten zal een bemonstering noodzakelijk zijn om risico's van bijvoorbeeld ongewenste erosie te vermijden.

De bemonstering zou idealiter een volledig beeld moeten geven van de ruimtelijke en temporele variabiliteit van de samenstelling van de actieve laag. Gezien de in hoofdstuk 3 beschreven dynamiek van deze actieve laag is het met huidige bemonsteringstechnieken niet haalbaar dit met een resolutie die past bij schalen van enkel meters in het vlak (en met voldoende diepte) frequent uit te voeren. Het is daarom belangrijk om met een beperkt aantal monsters en zo groot mogelijke informatiedichtheid te realiseren die past bij het beoogde gebruik.

Op basis van de ervaringen in deze studie zijn er nog wel wat mogelijkheden voor verdere ontwikkeling en onderzoek, met aanvullende bemonsteringen en studies:

- Een statistische methode waarbij een ruimtelijk verspreid aantal bemonsteringen kan worden geïnterpoleerd naar een betrouwbare volledig dekkende bodemsamenstelling. Dit is nog niet beschikbaar. Datzelfde geldt voor een statistische methode om de tijdsafhankelijke ontwikkeling te bepalen, waarbij trends en jaarlijkse variabiliteit kan worden onderscheiden. Aanbevelingen voor verdere ontwikkeling zijn gepresenteerd in paragraaf 4.5.
- Er is onvoldoende begrip van de verticale structuur van de actieve laag in de rivier, en de invloed ervan op transporten (en morfodynamiek), en verticale sorteringsprocessen. Het is onduidelijk of een monster van 10 cm op een actieve laagdikte van 50 cm of 1 m wel voldoende diep is voor de karakterisering van de hele actieve laag. In de modellen is de laagdikte en de samenstelling over die volledige dikte, en daarmee samenhangende mengsnelheid (sorteringsdynamiek), een cruciale parameter voor gedrag van het model.
- Het effect van scheepvaart op sedimentsoortering is zichtbaar op grote schaal, maar de processen op kleinere schaal die dit veroorzaken zijn nog onvoldoende onderzocht (zie bijvoorbeeld Sloff, 2022).

Op basis van de kennis en ervaringen gepresenteerd in dit rapport worden in de volgende paragraaf voorstellen gegeven voor de bemonstering voor zowel rivierbeheer, voor uitvoeringsprojecten, en voor onderzoek.

### 6.2 Bemonstering

We onderscheiden periodieke bemonsteringen voor rivierbeheer, projectgerelateerde bemonsteringen, en bemonsteringen voor nader onderzoek en begrip.

Voor een zinvolle, haalbare en bruikbare strategie voor *bemonsteringen ten behoeve van rivierbeheer* stellen wij het volgende voor:

- Herhaal de grote campagnes iedere 5 à 10 jaar, equivalent aan updates van modelschematisaties (iedere 5 à 10 jaar), en tijdschalen morfologie voor ontwikkelingen met 1D lengteschalen (orde 10 km is orde 10 jaar).
- Doe de campagne bij voorkeur in het voorjaar (bijvoorbeeld april) waarbij de actieve laag nog niet te veel is beïnvloed door scheepvaart (die beter past bij de in voorgaande hoogwaterperiode opgetreden verhoogde sedimenttransporten).
- Zorg bij herhaalde campagnes dat op (min of meer) dezelfde locaties wordt bemonsterd voor consistentie en vergelijkbaarheid in de meetlocaties. Vooralsnog is dat op hele kilometerraaien, op de rivieras, en op vaste afstanden links en rechts van de as.
- Voorgaande campagnes zijn uitgevoerd op de kilometerraaien. Het bemonsteren van de rivieras op elke halve kilometer lijkt vooralsnog geen meerwaarde te bieden in het beoordelen van de gemiddelde samenstelling, ten opzichte van bemonstering per kilometer. Dit is wel zinvol als deze resolutie van ½ km ook voor de linker en rechterzijde wordt toegepast.
- Selecteer in ieder tak (op trajectbasis) een aantal relevante locaties waar ruimtelijke variabiliteit groot kan zijn, en neem op die locaties niet 1 monster, maar neem 3 of meer monsters op korte afstand voor een hogere betrouwbaarheid (effect van “patchiness”). We stellen de volgende locaties voor:
  - Beperkt aantal geselecteerde locaties met grote duinen (waar deze elk jaar terugkeren): neem zowel monsters op top van duin als in de trog, bij voorkeur deze vooraf opzoeken met dieptepeiling.
  - Locaties met typische vaarsporen of ‘patches’: neem de monsters door de kraan te roteren, naar midscheep, en naar linker- en rechterzijde van schip (zoals meting Nov. 2021, zie paragraaf 2.6). De afstanden zijn dan ongeveer gelijk aan breedte van vaarsporen.
  - Enkele locaties in scherpe buitenbochten, met name Hulhuizen en Haalderen (zonder vaste lagen) in de Waal, en bochten in Pannerdensch Kanaal en IJssel. Hier geldt dat sprake kan zijn van mobiele afpleistering, maar hier is ook aan te bevelen enkele monsters op korte afstand te nemen.
  - Op een aantal extra dwarsraaien met onderlinge afstand van 0.5 km of minder, juist bovenstrooms en benedenstrooms van de Pannerdensch Kop. Idem bij IJsselkop. Dit is relevant voor het vroegtijdig signaleren van eventuele veranderingen in de verdeling van samenstelling op de splitsingen, en de gevolgen ervan voor de stabiliteit van de splitsingen.
  - Pas bij voorkeur voor de Hamon happer toe.
- Maak een protocol of leidraad voor de uitvoering van bemonstering en de verwerking van de monsters. Leg de procedures, zoals in 2020 toegepast door CIV vast, en gebruik deze bijvoorbeeld bij toekomstige campagnes. Zorg daarbij ook voor een GPS coördinaat van een vast punt op schip, en een inschatting van de oriëntatie van de monsternamen ten opzichte van dat punt. Ook datum en tijdstip zijn belangrijk, bijvoorbeeld in relatie met scheepvaart en/of opgetreden rivierafvoer/stroomsnelheden.

Voor specifieke *project gerelateerde bemonstering* is het zinvol aansluiting te zoeken met bovengenoemde periodieke bemonstering door in ieder geval een monster te nemen op de nabijgelegen standaard raaien die periodiek zijn bemonsterd. Daarnaast zullen hier aanvullende monsters en boringen worden genomen met een ruimtelijke resolutie die afhankelijk is van de verwachte effecten. Bijvoorbeeld wanneer een suppletie wordt gepland bij een reeds eroderende locatie met mogelijke fijnzandige onderlagen afgedekt door een mobiele pleisterlaag: in die situatie is het zinvol een aantal boringen uit te voeren om de structuur van lagen vast te stellen. Ondiepe boringen (orde 1 à 2 m zullen vaak volstaan). Daarmee kan het risico van eventuele doorbraak en ontstaan van erosiekuilen worden ingeschat. Het is belangrijk dat voor projecten vóór en na de uitvoering van het project bemonsteringen worden uitgevoerd voor effectbepaling. Voor bemonstering zoveel mogelijk gebruik maken van de Hamon happer (met name op de gegradeerde trajecten).

Inzet van bovengenoemde protocol kan zorgen voor consistentie met andere metingen. Bijvoorbeeld: bij de suppletieproef op de Boven-Rijn zijn bemonsteringen uitgevoerd door de aannemer lastig te vergelijken met de monsterring van Rijkswaterstaat door een afwijkende methode).

In het belang van kennisontwikkeling is het aan te bevelen aanvullende doelgerichte *bemonsteringen voor onderzoek* te doen op specifieke locaties. Voorstellen zijn:

- Ontwikkeling van actieve laag onder invloed van scheepvaart, en onderscheid linker en rechterzijde op de Midden-Waal. Hier is inzicht in de verticale opbouw van de actieve laag door middel van een aantal boringen gewenst. Bij voorkeur meerdere boringen op een dwarsraai met niet al te grote onderlinge afstanden (of groepjes boringen).
- Een hoogfrequente meting van samenstelling op de Boven-Rijn (bijv. Lobith), waarbij de actieve laag 1 of meerdere malen per week wordt bemonsterd gedurende een jaar. De variabiliteit in tijd van de (top van de) actieve laag wordt daarmee vastgesteld. Dit is weer van belang voor de duiding van de periodieke metingen.
- Bemonsteringen ter plaatse van zich ontwikkelende erosiekuilen: hierbij is bijvoorbeeld belangrijk om te zien of er door aanvoer van grof mobiel materiaal een afremming van de erosie kan ontstaan. Dit is bijvoorbeeld aantoonbaar door de bemonstering enkele malen te herhalen over een beperkte periode van hoge afvoer.
- Andere doelen, bijvoorbeeld invloed van beddingvormen op samenstelling, invloed van opsplitsen van monsters (verschillen meerdere monsters uit 1 bak, en zijn deelmonsters groot genoeg?), monitoren invloed van suppleties (ook de pilots in kribvakken, bijvoorbeeld met inzet van tracer), enzovoort, zijn nog nader uit te werken.

### 6.3 Methode voor verwerking meetdata

In principe is aan te bevelen de zeefset (zie Tabel 2-1) zoals toegepast in de 2020 campagne (herhaalde zieving met grovere zeven toegevoegd) te gebruiken voor toekomstige metingen (ook voor projecten en onderzoek).

Zorg voor goede geüniformeerde digitale opslag van zeefdata (spreadsheets, database), op centrale opslag.

Analyse en nabewerking van de zeefdata is afhankelijk van het beoogde doel van de gegevens. Rekenmodellen worden bijvoorbeeld gevoed met een ruimtelijk gemiddelde samenstelling (uitmiddelen van de kleinschalige 'subgrid' variabiliteit die zijn opgetreden door processen die het model niet beschouwt). Er is nog een belangrijke stap voorwaarts te maken in de inzet van geostatistische modellen en interpolatietechnieken. Paragraaf 4.5 geeft handreikingen. Inmiddels zijn er ontwikkelingen op het gebied van machine-learning die (in combinatie met geostatistische modellen) kunnen worden ingezet om de meetdata te verwerken.



## 7 Conclusies

De bemonsteringen die door Rijkswaterstaat periodiek worden uitgevoerd op de Rijntakken geven een beeld van de samenstelling van de toplaag van de bedding, oftewel een deel van de *actieve laag* die een rol speelt bij het sedimenttransport en de morfodynamiek. Waarneming van grootschalige afwijkingen in gemiddelde diameters van de 2020 bemonstering ten opzichte van oudere metingen voor de eeuwwisseling, zou kunnen duiden op een systeemwijziging. Deze wijziging zou grote consequenties kunnen hebben voor de morfologie, voor de morfologische voorspellingen en voor het beheer van de rivieren. In dit onderzoek is uitgezocht welke onzekerheden en variabiliteit van invloed zijn, en wat dit kan betekenen voor de interpretatie van de 2020 gegevens. Vervolgens is uitgezocht wat dit betekent voor toekomstige meetcampagnes.

De conclusies zijn, per onderzoeksvraag:

- a. Welke statistiek/ methodiek is er nodig om een juiste vergelijking te maken tussen de dataset van 2020 en 1995, en mogelijk ouder?
  - Het sediment in de bovenrivieren is bimodaal, met sterke scheiding tussen de zandfractie en de grindfractie. Voor dit type sediment valt de mediane diameter  $D_{50}$  tussen de twee modes, en is daardoor te gevoelig om het mengsel te karakteriseren. Toepassing van een geometrisch gemiddelde diameter  $D_g$  is voor dit materiaal een betere keus, bij voorkeur in combinatie met een kwantificering van het percentage zand ( $D_r < 2$  mm).
  - De resolutie van de bemonstering, elke kilometer of elke halve kilometer, is te grof om alle kleinschalige ruimtelijke variabiliteit te kwantificeren. Er blijft daardoor sprake van een mate van toevaligheid in de gemeten samenstelling van de monsters.
  - Voor ruimtelijke middeling is een interpolatiemethode nodig die rekening houdt met weging op afstand van verschillende monsters, en die rekening houdt met stroomafwaartse beïnvloeding/correlatie tussen monsters. Geostatistische technieken zijn hiervoor nog onvoldoende ingezet en uitgewerkt. De hypothese testen gepresenteerd in dit onderzoek bieden een statistische methode om verschillen in de datasets aan te tonen.
- b. Hoe verhouden zich met name 2020 en 1995 data op riviertrajectniveau, indien mogelijk. Er wordt hiervoor gebruik gemaakt van de verwerkte gegevens van alle riviertakken en van projectanalyses van de monsters voor Boven-Rijn (o.a. suppletie proef) en Waal (o.a. langsdammen), en verwerking van gegevens door Claudia Ylla Arbos (TU-Delft);
  - Ondanks alle onzekerheden in de beschikbare gegevens van oudere bemonsteringen voor de eeuwwisseling, toont de 2020 data set een vergroving op de Boven-Rijn ten opzichte van de oude data sets. Voor de Waal is dit echter niet aantoonbaar binnen de bandbreedte van metingen. Vooral wanneer onderscheid wordt gemaakt tussen links, midden en rechts, is de 2020 data op de Waal consistent met eerdere data, bijvoorbeeld 1995.
  - Variaties komen vooral voort uit de verschuiving in de verhouding tussen zandfractie en grindfractie. Deze verschuivingen fluctueren erg sterk tussen de jaren en in de ruimte, met name in de Boven-Rijn.
  - De gegevens van Pannerdensch Kanaal/Nederrijn en IJssel zijn niet onderzocht.
- c. Wat zijn mogelijke oorzaken van waargenomen trends (zover die waarneembaar zijn) en wat zijn de mogelijke gevolgen voor het bodembeleid van Rijkswaterstaat.
  - Verondersteld kan worden dat de veranderingen in de bodemsamenstelling in de afgelopen eeuw het gevolg zijn van menselijke ingrepen in het riviersysteem, zoals de normalisaties. Hoewel er diverse hypothesen zijn over vergroving van

- de Boven-Rijn, is het aannemelijk dat het een cumulatief effect is van de ingrepen zowel boven- als benedenstrooms.
- In de Rijntakken is over het algemeen nog steeds sprake van een relatief groot aandeel van zand, waardoor in veel gevallen de rivier zich als zandrivier zal gedragen. Een afname van het zandgehalte, zoals waargenomen in de Boven-Rijn, draagt bij aan de erosie van de benedenstroomse trajecten. Op lange termijn zal de vergroving mogelijk ook doorontwikkelen naar de Waal en Nederrijn/IJssel. Of dit gebeurt en over welke periode is onduidelijk. Om die reden is het belangrijk dat toekomstige ingrepen flexibel en adaptief zijn (bijvoorbeeld, suppletie van fijner zand uit Merwedese in de Boven-Waal aanvullen met een geleidelijk in tijd toenemende grindfractie, die afwisselend als laagjes tussen de zandsuppleties wordt gestort).
- d. Wat kan worden geadviseerd over het toepassingsbereik van de verschillende parameters? Bijvoorbeeld wanneer en waarom gebruik je een  $D_g$  in plaats van een  $D_{50}$ ? Wat is beter, duidelijker voor welke toepassing?
- Toepassing van  $D_{50}$  wordt afgeraden voor bimodale mengsels. De waarde van  $D_g$  is een betere keus, maar voor een goed inzicht is het beter uit te gaan van de volledige korrelverdelingen (met opsplitsing van de zand en de grindfractie), of een combinatie van meerdere percentielen voor de afzonderlijke fracties.
  - Sedimenttransport en morfologie berekeningen op de trajecten met bimodale mengsels zijn alleen zinvol als er gerekend wordt met meerdere fracties.
- e. Wat kan worden geadviseerd over analyse methodieken in relatie tot de toepassing? Mag je bijv. drie korrelgroottes (links, as, rechts) middelen om te komen tot een representatieve korrelgrootte per kilometer? Over welke afstand in de lengterichting kun je korrelgroottes het beste middelen in welke situatie?
- Het gebruik of doel van de resultaten van de analyses bepalen de methode. Bij voorkeur wordt gewerkt met (geo)statistische methoden die rekening houden met de onzekerheden van de data, bijvoorbeeld bij het testen van hypothesen. De analyses in deze studie op basis van een  $D_g$  en een zandpercentage bieden belangrijke inzichten over gemiddelden en standaardafwijking (bandbreedte), maar bieden nog geen volledig beeld van de statistiek van de zeefkrommes zelf.
  - Een middeling over meerdere jaren, en over grote afstanden, kan alleen relevant zijn om grootschalige trends te signaleren. Dit soort systeemwijzigingen kan invloed hebben op de plannen voor sedimentbeheer.
- f. Welke mogelijke invloeden spelen een rol bij de variabiliteit in ruimte en tijd, die relevant zijn voor de interpretatie van de gegevens (bijvoorbeeld sorteringseffecten hoogwater, scheepvaart, beddingvormen, etc.)?
- Hoofdstuk 3 van dit rapport geeft een uitvoerig overzicht van bronnen van variabiliteit in bodemsamenstelling. Voor het uitsluiten van onzekerheden bij monsternamen, zou voor consistentie en betrouwbaarheid het gebruik van de Hamon happer als standaardinstrument kunnen worden voorgeschreven. Daarnaast komt variabiliteit in tijd en ruimte voort uit diverse sedimenttransport, sorterings- en morfologische processen. Deels zijn deze variaties toe te schrijven aan externe forcering, zoals scheepvaart of hoogwaters, en deels aan interne processen, zoals beddingvormen of patches. Niet alle processen zijn goed te beschrijven met bestaande modellen.
  - De linkerkant van de rivier vertoont in de meeste monsters een fijnere samenstelling links dan rechts, met name in de Midden-Waal. Voor de hand ligt een directe link met scheepvaart. De 2020 gegevens tonen dat ter hoogte van de langsdammen de linkerkant een toplaag van volledig uit zand bestaat, terwijl aan de rechterkant sprake is van een zand-grind mengsel. De eerder gesuggereerde aanvoer van fijn materiaal uit kribvakken is hier niet van toepassing.
- g. Hoe verhoudt de nieuwe data zich tot de huidige modelschematisatie, en wat wordt op basis daarvan aanbevolen? Is er een actualisatie nodig?

- De gemeten bodemsamenstelling wordt in de modellen ingevoerd, maar vervolgens wordt de bodemsamenstelling ingespeeld (terwijl bodem wordt vastgehouden). Uit de modellen met niet-uniform sediment volgt dan een bodemsamenstelling die voor de meest relevante trajecten al redelijk overeenstemt met de recent gemeten bodemsamenstelling. Desondanks is het niet de verandering in initiële samenstelling die er veel toe doet, maar de gekozen sedimenttransportmodellen en hun instellingen. Voor de bestaande modellen heeft een goede kalibratie voor gegradeerd sediment niet plaatsgevonden. De actualisatie is noodzakelijk gezien het belang van gegradeerd sediment voor de effectbepaling en optimalisatie van suppleties en de morfologische stabiliteit van de riviersplitsingen.
- h. Wat zijn consequenties voor lopende adviezen ten aanzien van maatregelen zoals suppleties
- Voor de analyse van bodemsamenstelling voor specifieke projecten zijn aanbevelingen geformuleerd in hoofdstuk 6. Voor deze projecten zijn eventuele risico's voor aansnijden van fijnzandige lagen of sterke heterogeniteit een reden om naast hap-monsters ook een aantal boringen te maken.
  - Bij de pilotsuppleties op de Boven-Rijn is geconstateerd dat de toplaag van de relatief grove suppletie (ver buiten de bandbreedte van gemeten diameters van de bedding) zich snel aanpast aan de oorspronkelijke riviersamenstelling, en dat er geen zichtbare sortering golf stroomafwaarts is opgetreden (althans, niet zichtbaar in de bemonsterde toplaag). De eisen aan de samenstelling van het suppletiemateriaal hoeven daardoor mogelijk minder strikt te worden opgelegd.

## 8 Referenties

- Amiri-Simkooei, A., M. Snellen, D. Simons (2009) Riverbed sediment classification using multi-beam echo-sounder backscatter data. *J. Acoust. Soc. Am.* 126(4), October 2009.
- Blom, A. (2003) A vertical sorting model for rivers with non-uniform sediment and dunes. PhD thesis, University of Twente, the Netherlands.
- Blom, A., Chavarrias, V., Ferguson, R. I., & Viparelli, E. (2017) Advance, retreat, and halt of abrupt gravel-sand transitions in alluvial rivers. *Geophysical Research Letters*, 44, 9751–9760. <https://doi.org/10.1002/2017GL074231>
- BRO (2021) Basisregistratie Ondergrond Catalogus Booronderzoek. Geotechnische boormonsterbeschrijving en boormonsteranalyse. Geonovum Informatiemodel. Vastgestelde versie 25 maart 2020. Programmabureau BRO. <https://docs.geostandaarden.nl/bro/BHR-GT/>
- Chavarrias, V., Arkesteijn, L., & Blom, A. (2019). A well-posed alternative to the Hirano active layer model for rivers with mixed-size sediment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124, 2491–2520. <https://doi.org/10.1029/2019JF005081>
- Chavarrias, V., W. Ottevanger and E. Mosselman (2020) Morphodynamic modelling over alluvial and non-alluvial layers. Literature review, update to Tuijnder concept. Tech. Rep. 11205235-016-ZWS-0006\_v0.1, Deltares, Delft, the Netherlands
- Dempster, A. P., Laird, N. M., & Rubin, D. B. (1977). Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 39(1), 1–38. <http://www.jstor.org/stable/2984875>
- Dingle, E.H., K.M. Kusack, J.G. Venditti (2021) The gravel-sand transition and grain size gap in river bed sediments. *Earth-Science Reviews* 222 (2021) 103838. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103838>
- Eleftherakis, D., A. Amiri-Simkooei, M. Snellen, D. Simons (2012) Improving riverbed sediment classification using backscatter and depth residual features of multi-beam echo-sounder systems. *J. Acoust. Soc. Am.* 131 (5), May 2012.
- Elliot, J.M., C.M. Drake (1981) A comparative study of seven grabs used for sampling benthic macroinvertebrates in rivers. *Freshwater Biology*, Vol. 11(2), 99-120. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1981.tb01247.x>
- Ferguson, R., Prestegard, K.L. and Ashworth, P.J. (1989) Influence of sand on hydraulics and gravel transport in a braided gravel bed river. *Water Resources Research*, 25, 635-43.
- Frings, R.M., B.M. Berbee, G. Erkens, M.G. Kleinhans en M.J. P. Gouw (2009) Human-induced changes in bed shear stress and bed grain size in the River Waal (The Netherlands) during the past 900 years. *Earth Surf. Process. Landforms* 34, 503–514. DOI: 10.1002/esp.1746
- Frings, R.M. (2011) Sedimentary characteristics of the gravel-sand transition in the River Rhine. *J. Sedimentary Research*, Vol. 81, p.52-63. DOI: 10.2110/jsr.2011.2

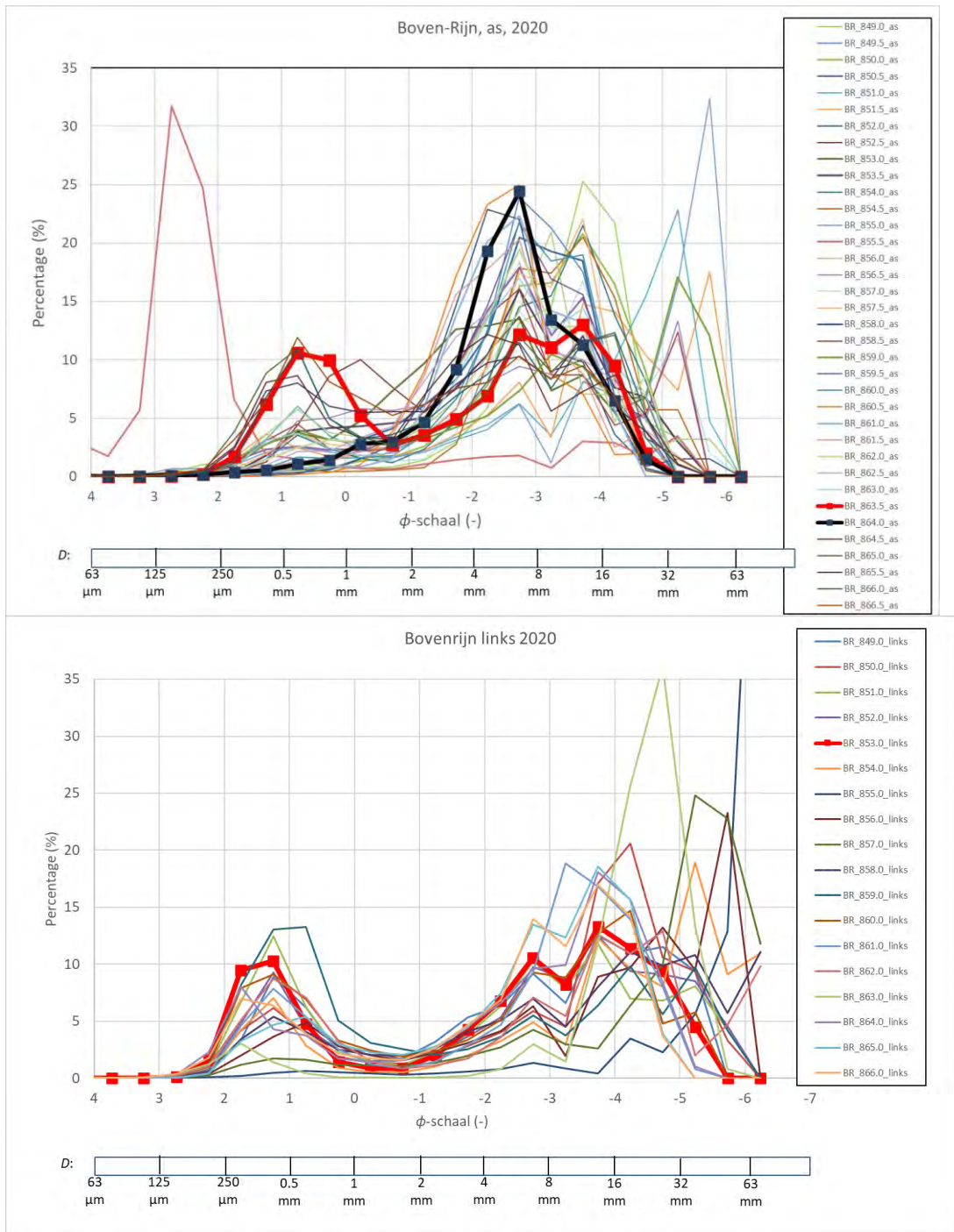
- Frings, R.M., W.Ottevanger, en K. (C.J.) Sloff (2011) Downstream fining processes in sandy lowland rivers. *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 49, No.2, p.178-193.
- Frings, R.M., F. Kirsch, H. Schüttrumpf, S. Vollmer (2012) The transition between gravel-bed rivers and sand-bed rivers. In: Murillo (ed.) *Proc. River Flow 2012, Costa Rica*. P. 629-634.
- Frings, R.M. (2012) Kornverteilungen der Niederrheinsohle. Auswertung der Daten aufgenommen in der SedDB (Sedimentdatenbank der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Stand 29.09.2011). MS Excel Spreadsheet.
- Google research. (2015). *TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems*.
- Grujters, S.H.L.L., J.G. Veldkamp, J. Gunnink, J.H.A. Bosch (2001a) De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Pannerdensch Kop: Interpretatie van de meetresultaten. Eindrapport NITG 01-166-B, Nov. 2001.
- Grujters, S.H.L.L., J.G. Veldkamp, J. Gunnink, J.H.A. Bosch (2001b) De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Bovenrijn / Niederrhein: Interpretatie van de meetresultaten. Eindrapport NITG 01-167-B, Nov. 2001.
- Hirano, M. (1971). River bed degradation with armoring. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 195, 55–65. [https://doi.org/10.2208/jscej1969.1971.195\\_55](https://doi.org/10.2208/jscej1969.1971.195_55)
- Iseya, F. en H. Ikeda (1987) Pulsations in Bedload Transport Rates Induced by a Longitudinal Sediment Sorting: A Flume Study using Sand and Gravel Mixtures, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 69:1, 15-27, DOI:10.1080/04353676.1987.11880193
- Krumbein, W.C. (1934) Size frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 4: 65-77
- Laronne, J.B., C. Garcia, I. Reid (2001) Mobility of patch sediment in gravel bed streams: patch character and its implications for bedload. pp 249-289 in M. Paul Mosley (editor), *Gravel-Bed Rivers V*, New Zealand Hydrological Society Inc., Wellington, New Zealand. ISBN 0-473-07486-9. 2001.
- Lengkeek, W., S. Bouma, B. van der Wal (2008) Onderzoek naar de effectiviteit van bodemhapper. De Van Veen happer, de Birge-Ekman happer en een duiker met bodemschep. Rapport Bureau Waardenburg, Nr. 08-225. 12 dec. 2008.
- Lengkeek, W., S. Bouma, B. van der Wal (2010) De effectiviteit van bodemhappers. *H20 / No.10*, 2010, p.30-32.
- Minka, Thomas P. (2012) Estimating a Dirichlet distribution. <https://tminka.github.io/papers/dirichlet/minka-dirichlet.pdf>
- Murphy, K. P. (2012). *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. MIT press.
- Nelson, P., D. Bellugi, W. Dietrich (2014) Delineation of river bed-surface patches by clustering high-resolution spatial grain size data. *Geomorphology* 205 (2014) 102–119. doi:10.1016/j.geomorph.2012.06.008
- Oele, E. (1978) Sand and gravel from shallow seas. *Geologie en Mijnbouw*, Vol. 57(1), p.45-54.
- Parker, G. (1992) Some random notes on grain sorting. In: Vischer, D., editor, *Proceedings of the international grain sorting seminar, October 1991, Ascona, Switzerland*, p. 19-76.

- Parker, G. (2004) 1D sediment transport morphodynamics with applications to rivers and turbidity currents. Ebook, Nov. 2004.
- Petrie, J. (1998) The Accuracy of River Bed Sediment Samples. MSc thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA. Dec 1998.
- Petrie, J. en P. Diplas (2000) Statistical approach to sediment sampling accuracy. *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 2., Febr. p.597-605.
- Rijkswaterstaat (1966) Bodembemonstering rondom de Pannerdense Kop. Directie Bovenrivieren. Afdeling Studiedienst. Nota 67.14. Met 14 bijlagen.
- Rijkswaterstaat (1989) Algemene richtlijnen voor bemonstering van de Waterbodem. Project Goede Meet Praktijk. Nota 89.056. RIZA, Dir. Zuid-Holland, Dir. Zeeland, Dienst Getijdewateren.
- Rubin, D.M. en C.L. Carter (2006) Cross-Bedding, Bedforms, and Paleocurrents. *Concepts in Sedimentology and Paleontology*, No. 1, 2nd Edition. SEPM • society for sedimentary geology.
- Sambrook Smith, G.H. (1996) Bimodal fluvial bed sediments: origin, spatial extent and processes. *Progress in Physical Geography*, Vol. 20, No. 4, p.402-417. <https://doi.org/10.1177/030913339602000402>.
- Sambrook Smith, G.H., A.P. Nicholas, R.I. Ferguson (1997) Measuring and defining bimodal sediments: Problems and implications. *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 5, p.1179-1185, May 1997.
- Sieben, J. (2004) Ruimtelijke variaties in duinhoogte. Werkdocument 2004.166x. Rijkswaterstaat RIZA. 1 november 2004.
- Sieben, J. (2008) Taal van de bodem: parameters voor morfodynamiek in rivieren. Waterdienst rapport nr WD 2008-049.
- Sieben, A. en G. van der Loo (2014) Inschatting representatief minimum uit actuele bodemligging, methodiek en toepassing Rijntakken. Notitie Waterdienst & CIV, 19 mei 2014.
- Sloff, C.J. (2022) Verkenning invloed scheepvaart op morfologie en impact daarvan op modeltoepassingen. Deltares Rapport 11206792-013. KPP Rivierkunde. April 2022.
- Sloff, C.J., M. Bernabè and Dr. T. Baur (2003) On the stability of the Pannerdense Kop river bifurcation. 3rd IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Barcelona, 2003. Proceedings RCEM 2003, p.1001-1011
- Sambrook Smith, G.H., A.P. Nicholas, R.I. Ferguson (1997) Measuring and defining bimodal sediments: Problems and implications. *Water Resources Research*, vol. 33, No. 5, pages 1179-1185, May 1997.
- Ten Brinke, W.B.M. (1997) De bodemsamenstelling van Waal en IJssel in de jaren 1966, 1976, 1984 en 1995. Rijkswaterstaat RIZA rapport 97.009. Februari 1997.
- Tuijnder, A. (2010). Sand in short supply: Modelling of bedforms, roughness and sediment transport in rivers under supply-limited conditions. Proefschrift. University of Twente.
- Venditti, J. G., N. Domarad, M. Church, and C. D. Rennie (2015) The gravel-sand transition: Sediment dynamics in a diffuse extension, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 120, 943–963, doi:10.1002/2014JF003328.

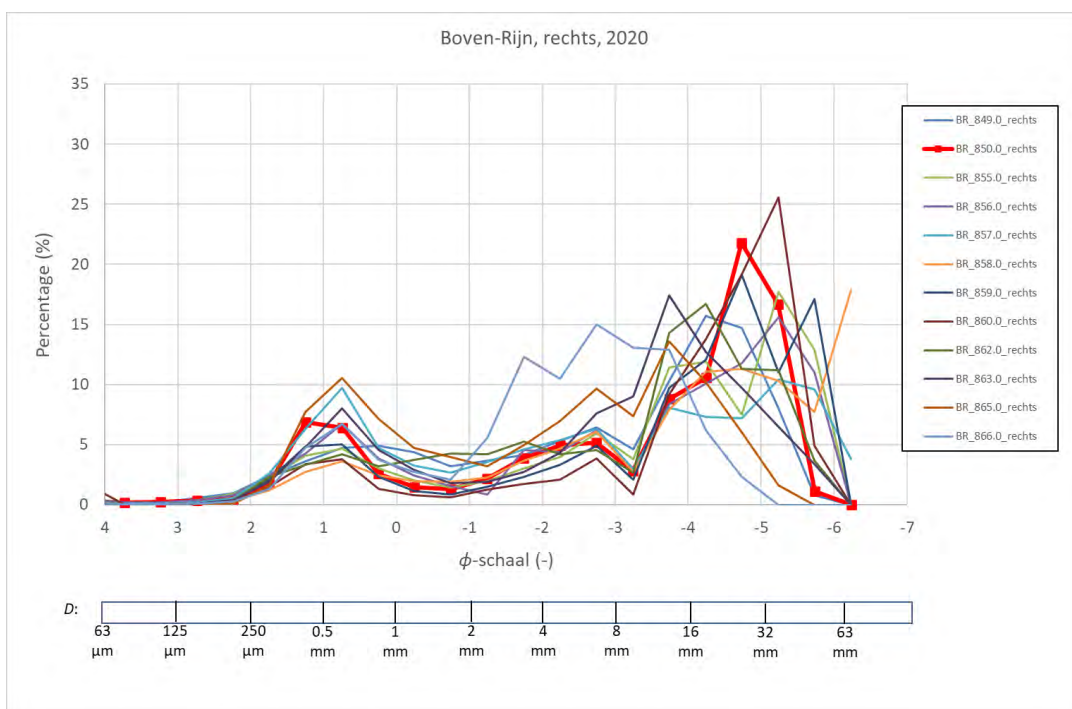
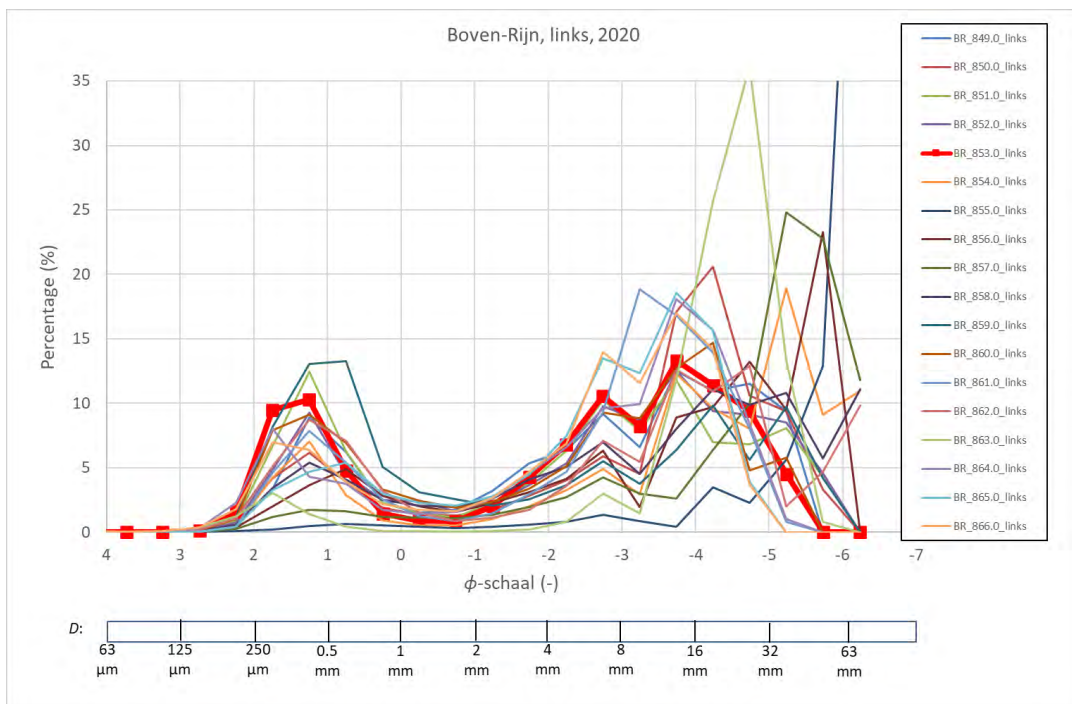
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., ... Vázquez-Baeza, Y. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17(3), 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Vries, M. de (1970) On the Accuracy of Bed-Material Sampling, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.8, Issue 4, p. 523-533, DOI: 10.1080/00221687009500329
- Wasserman, L. (2004). *All of Statistics*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21736-9>
- Wilcock, P.R. (1998) Two-Fraction Model of Initial Sediment Motion in Gravel-Bed Rivers. *SCIENCE*, VOL. 280, 17 APRIL 1998, p.410-412. DOI: 10.1126/science.280.5362.410.
- Ylla Arbós, C., Blom, A., Viparelli, E., Reneerkens, M., Frings, R. M., & Schielen, R. M. J. (2021). River response to anthropogenic modification: Channel steepening and gravel front fading in an incising river. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091338. <https://doi.org/10.1029/2020GL091338>

# A Verdelingen

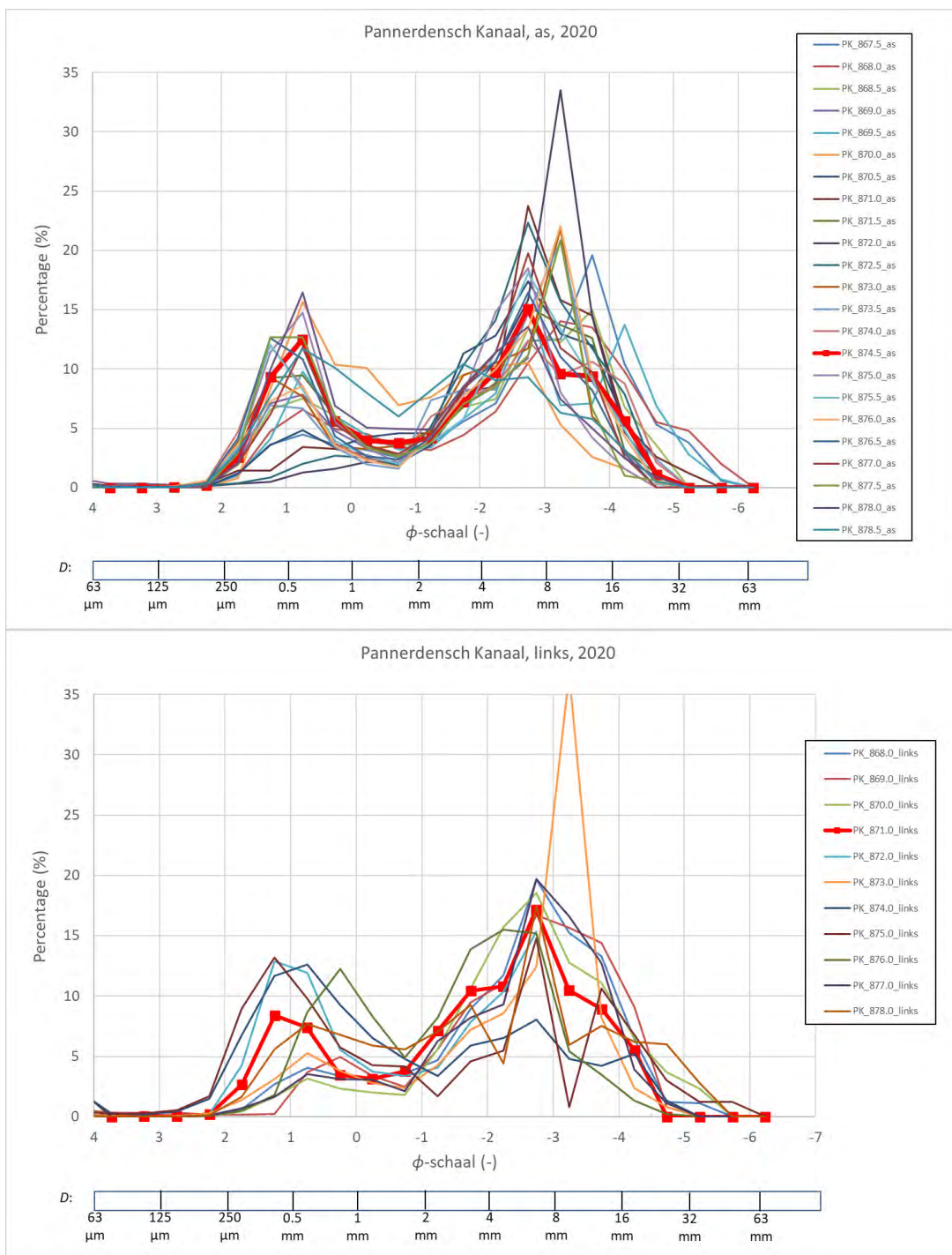
## A.1 Boven-Rijn

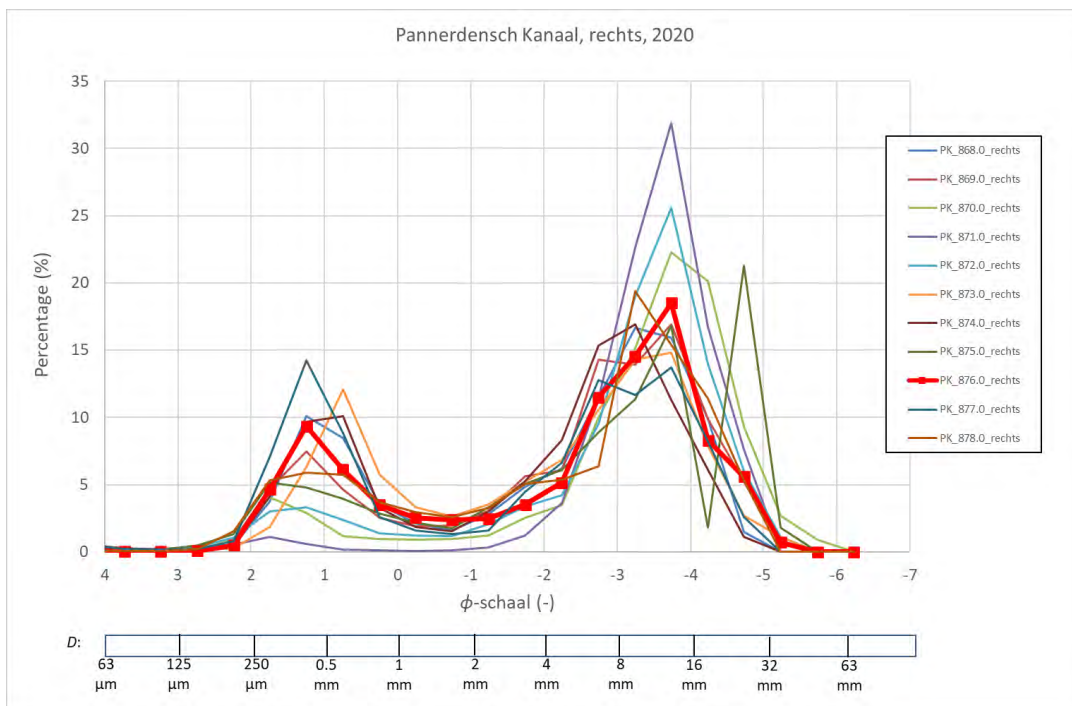




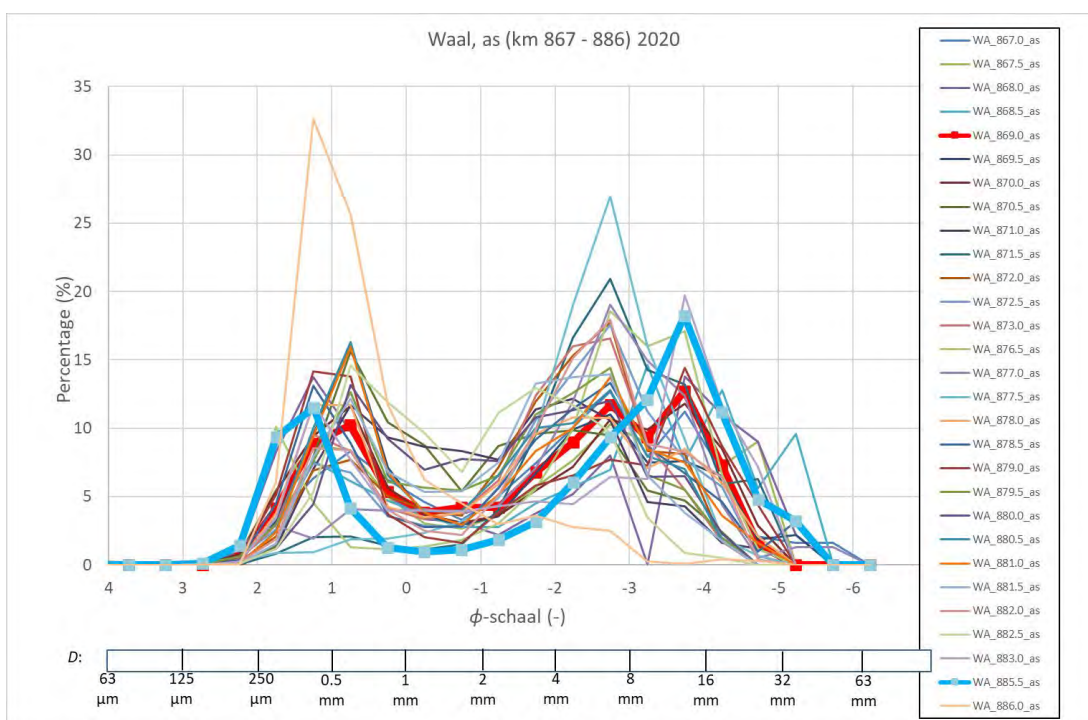


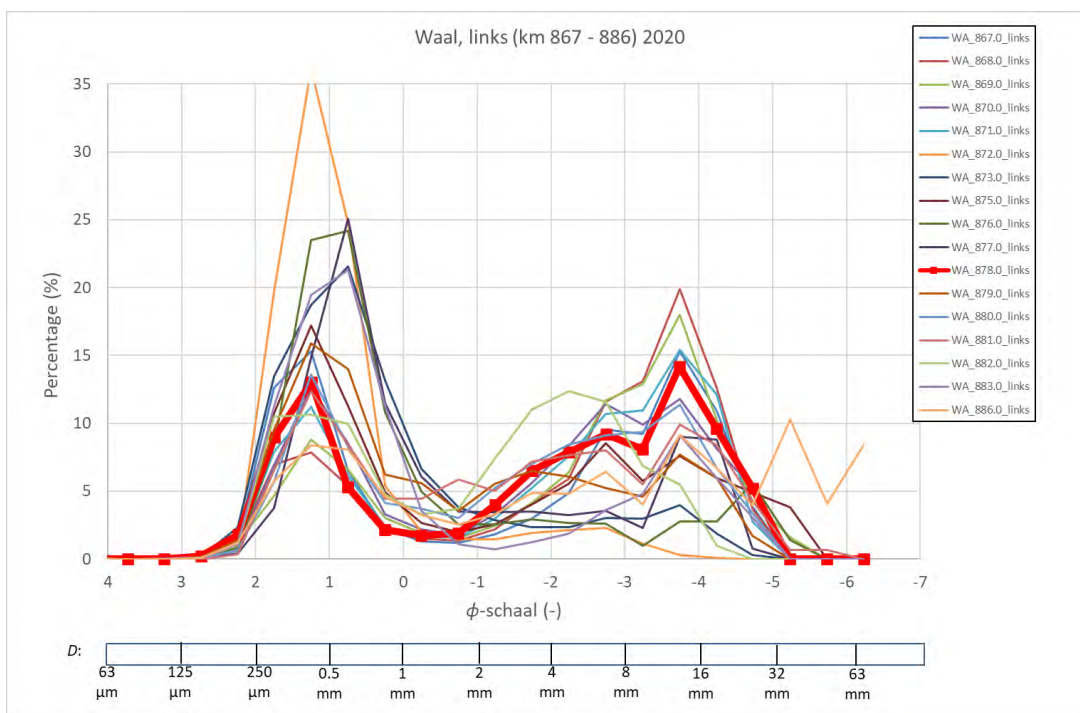
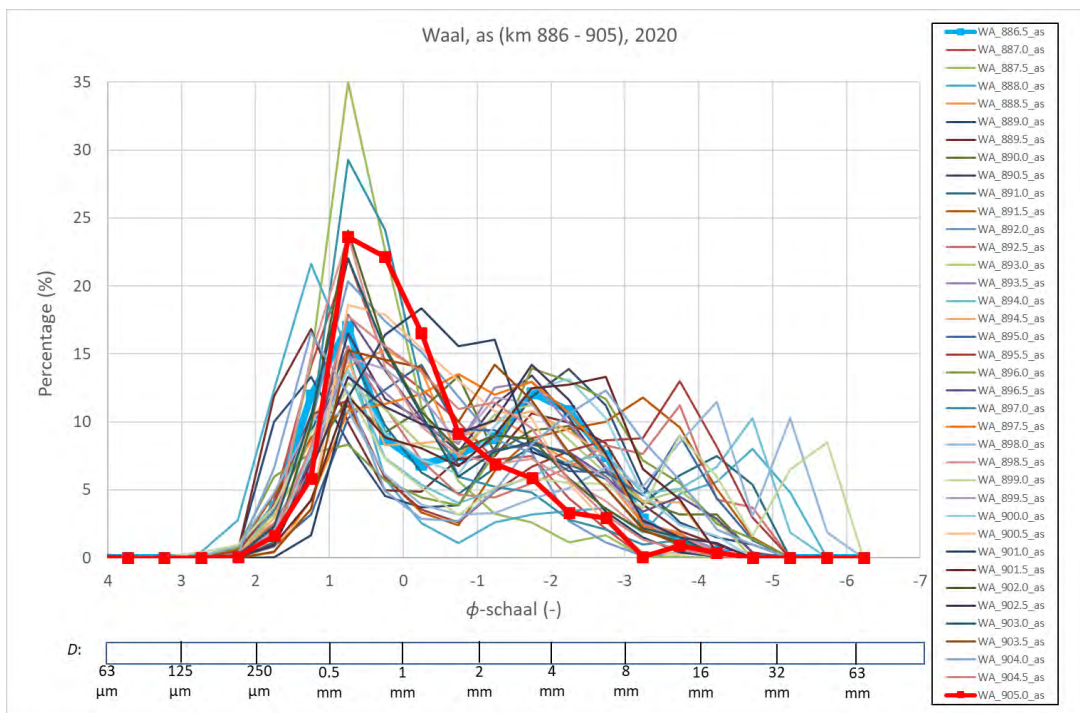
## A.2 Pannerdensch Kanaal

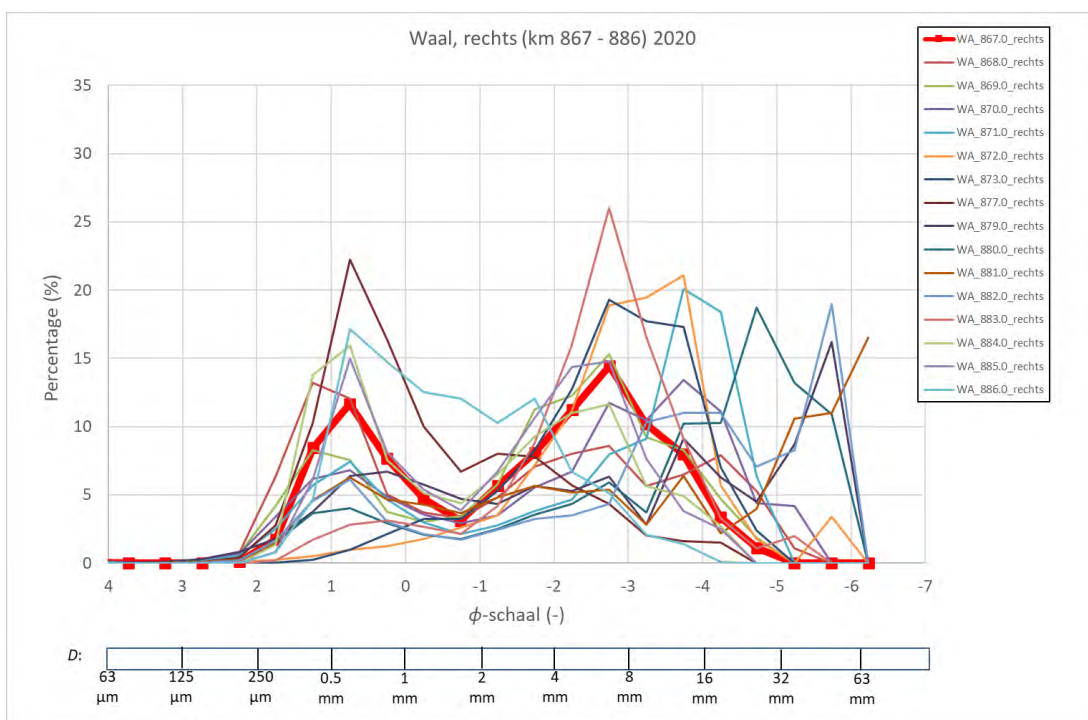
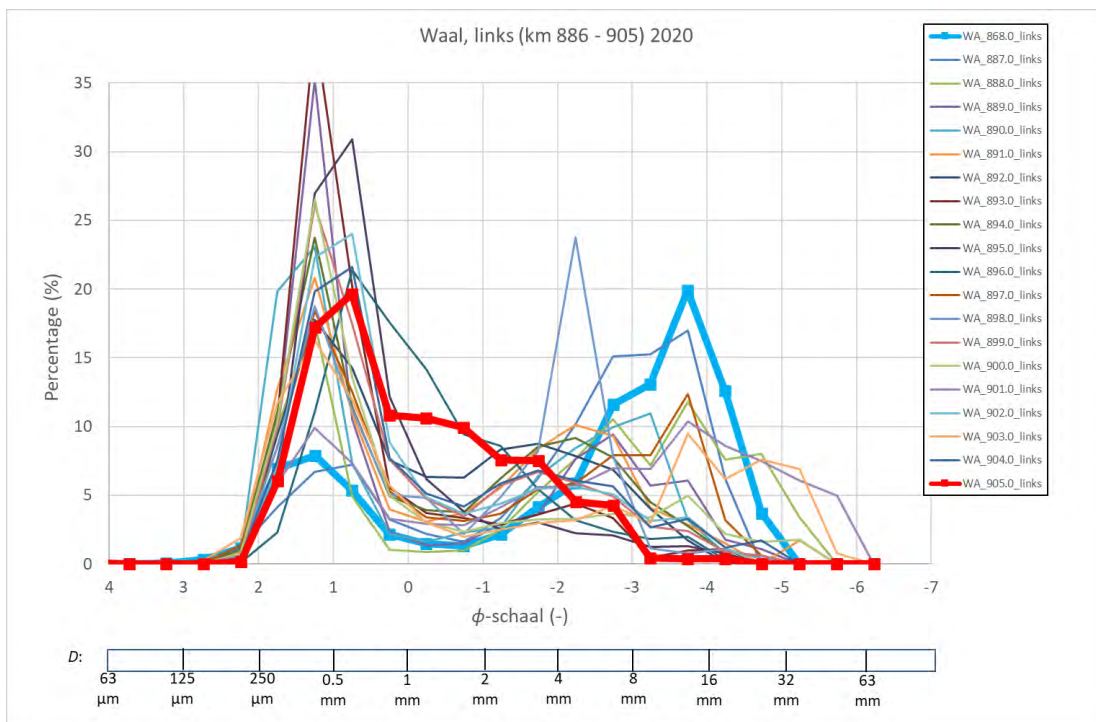


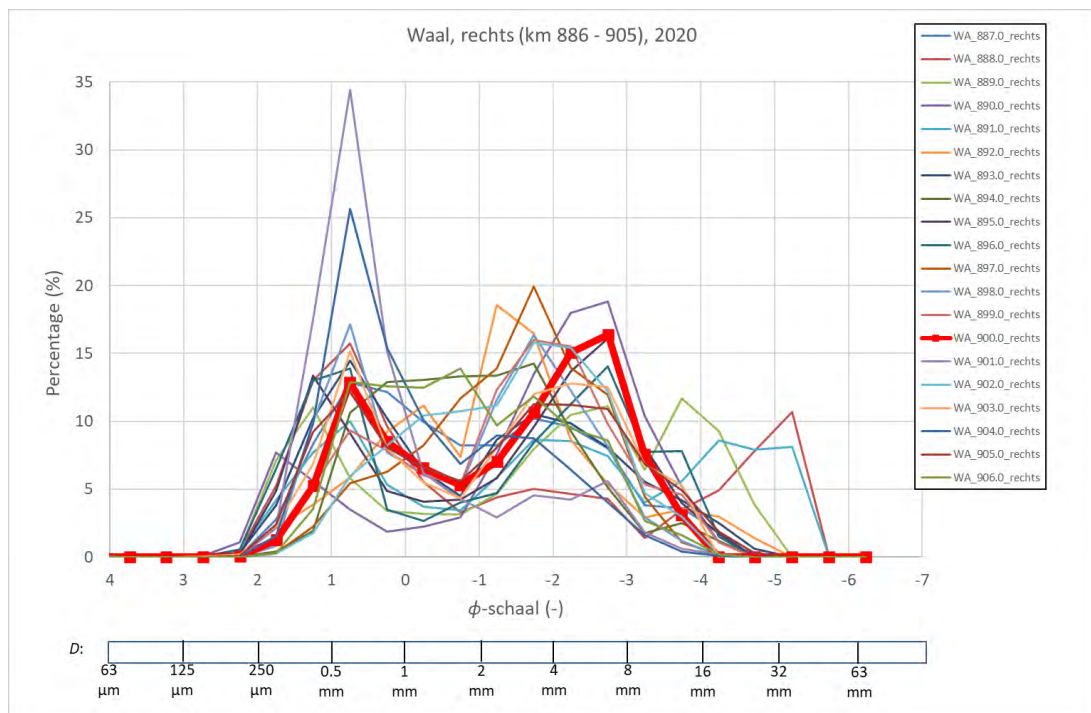


### A.3 Waal







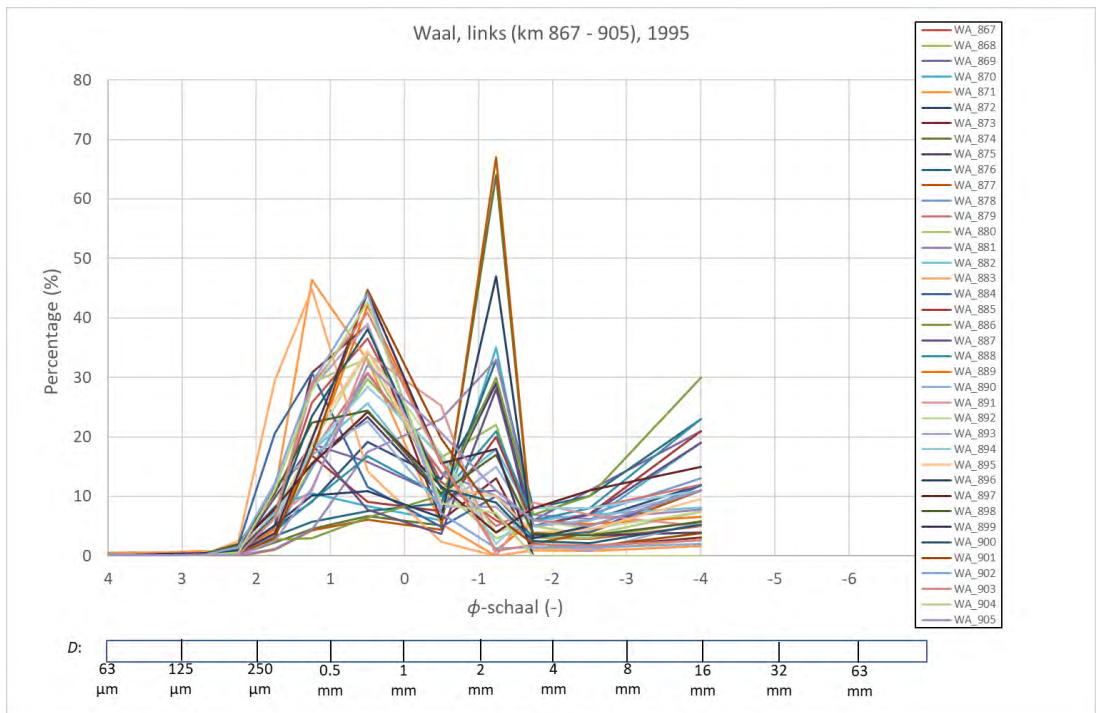
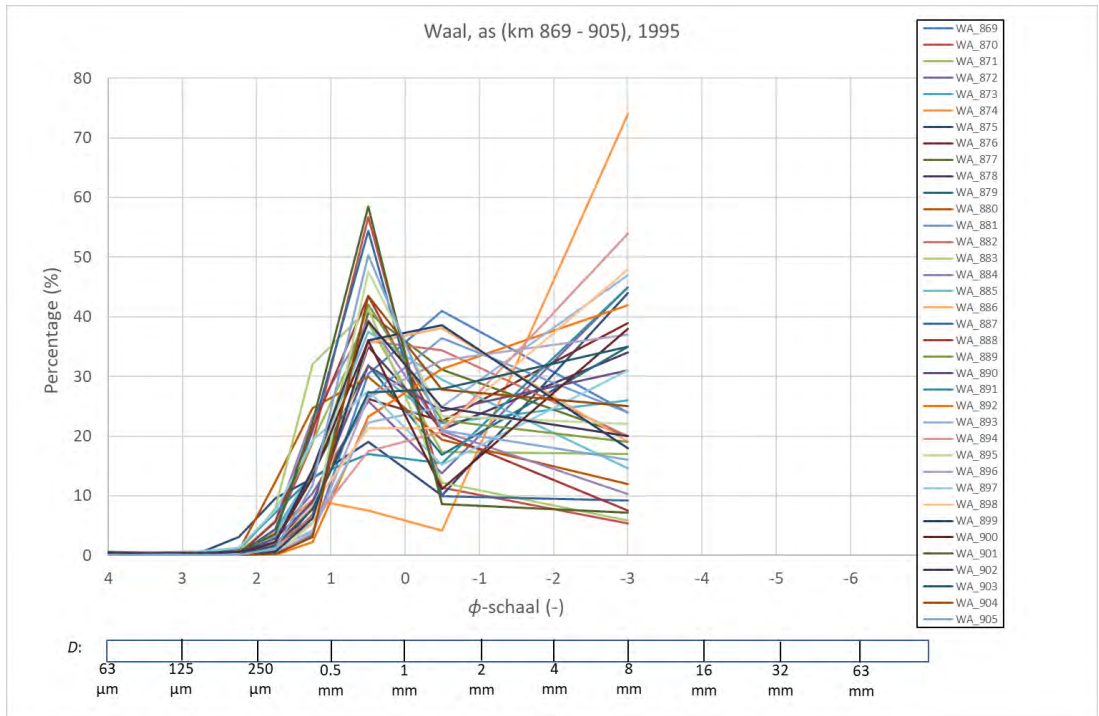


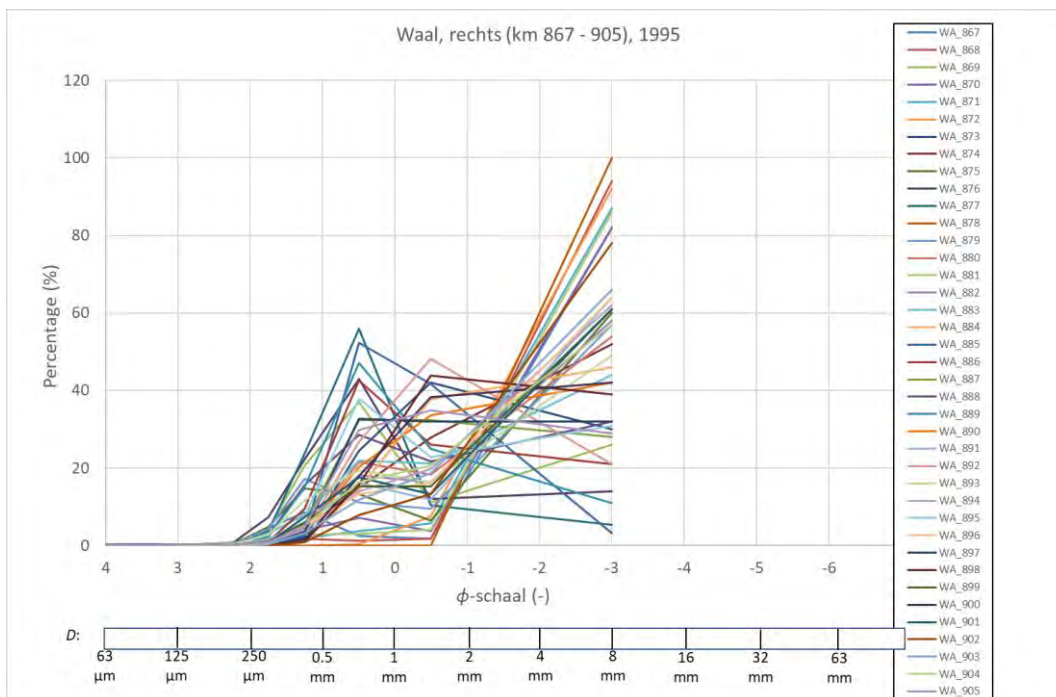
## A.4 Waal 1995

Bij de zeefanalyse zijn niet alle zeven goed gebruikt:

- Rechteroever: maximale zeef is 2 mm (voor de figuur is aangenomen dat  $D_i$  voor de grootste klasse,  $D > 2$  mm een waarde heeft van 8 mm, dus  $\phi_{im} = -3$ , met aanname dat deze fractie een bovengrens heeft van 32 mm)
- Rivieras: idem
- Linkeroever: maximale zeef is 8 mm (voor de figuur is aangenomen dat  $D_i$  voor de grootste klasse,  $D > 8$  mm een waarde heeft van 16 mm, dus  $\phi_{im} = -4$ , met aanname dat deze fractie een bovengrens heeft van 32 mm)

Voor het mengsel dat is gezeefd voor de linkeroever met zeven tot 8 mm, is in bijna de helft van de monsters opvallende piek zichtbaar voor de sedimentfractie  $D_i = 2,4$  mm ( $\phi_{im} = -1,24$ ,  $2\text{ mm} < D < 2,8$  mm). Deze piek is vooral zichtbaar op de Boven-Waal, en neemt af stroomafwaarts. Ook op de Boven-Rijn vertonen vrijwel alle monsters deze piek: op km 858, 860, en 861 bedraagt deze fractie vrijwel 80% van het mengsel, waarbij vervolgens van het restant circa 10%  $> 8$  mm, en de overige 10% verdeeld over de andere zeven). Op km 866 is 94% op de zeef van 2,4 mm terechtgekomen, terwijl het restant vrijwel volledig grover is dan 8 mm.

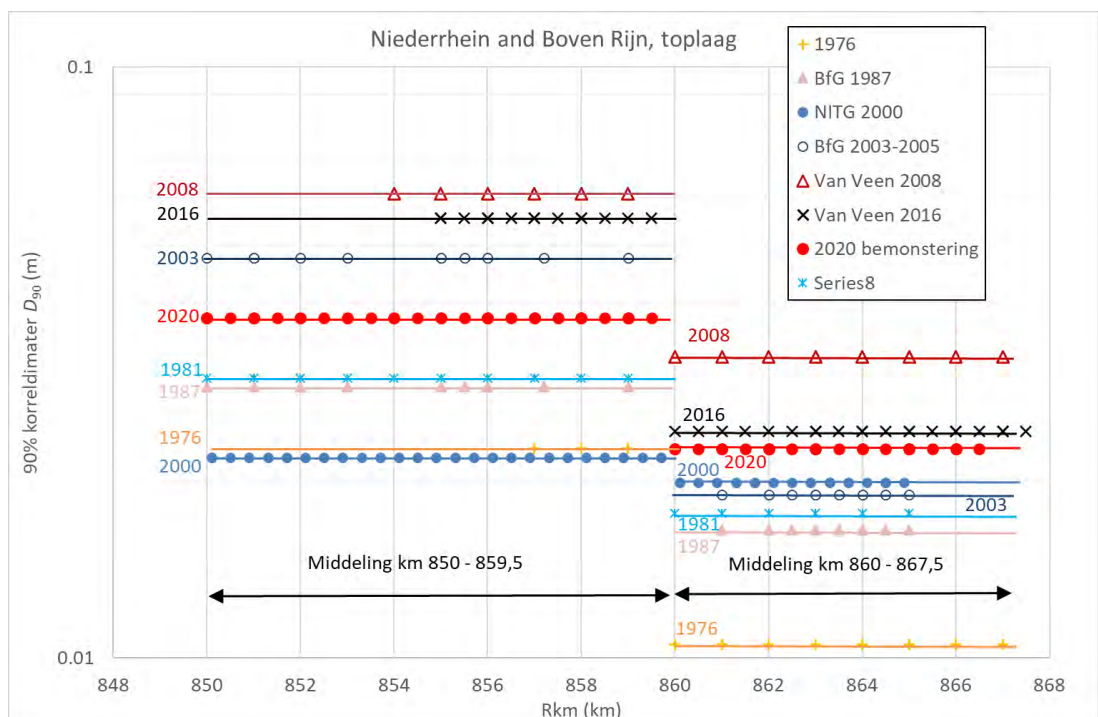
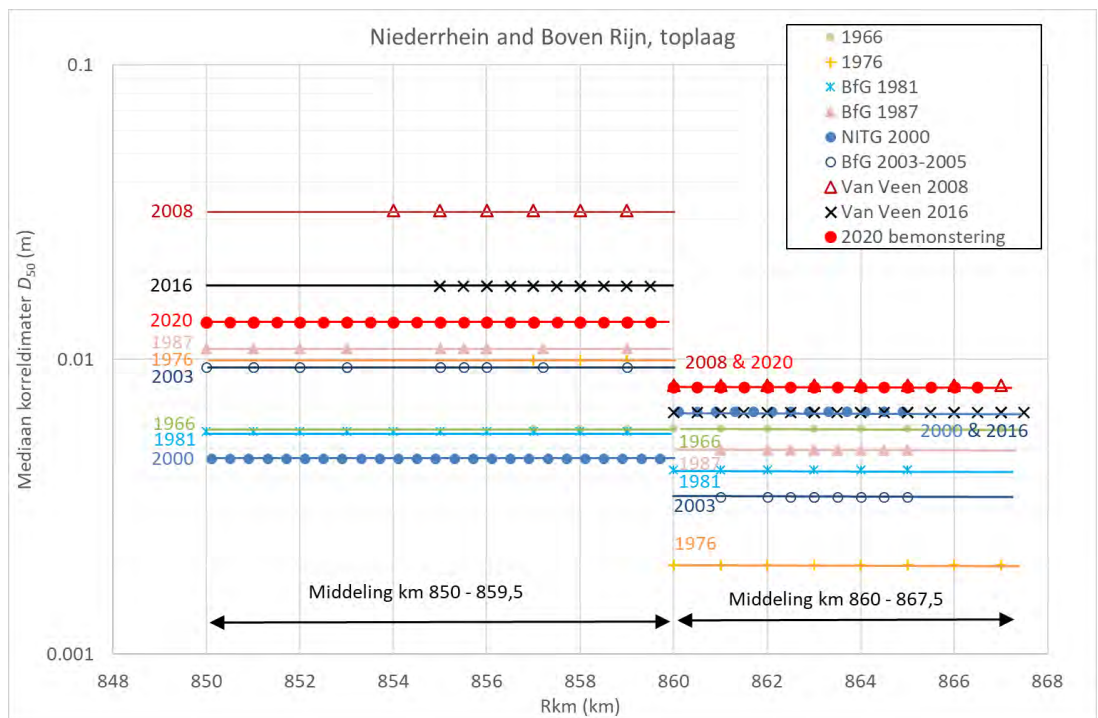






# B Data

## B.1 Gegevens Boven-Rijn

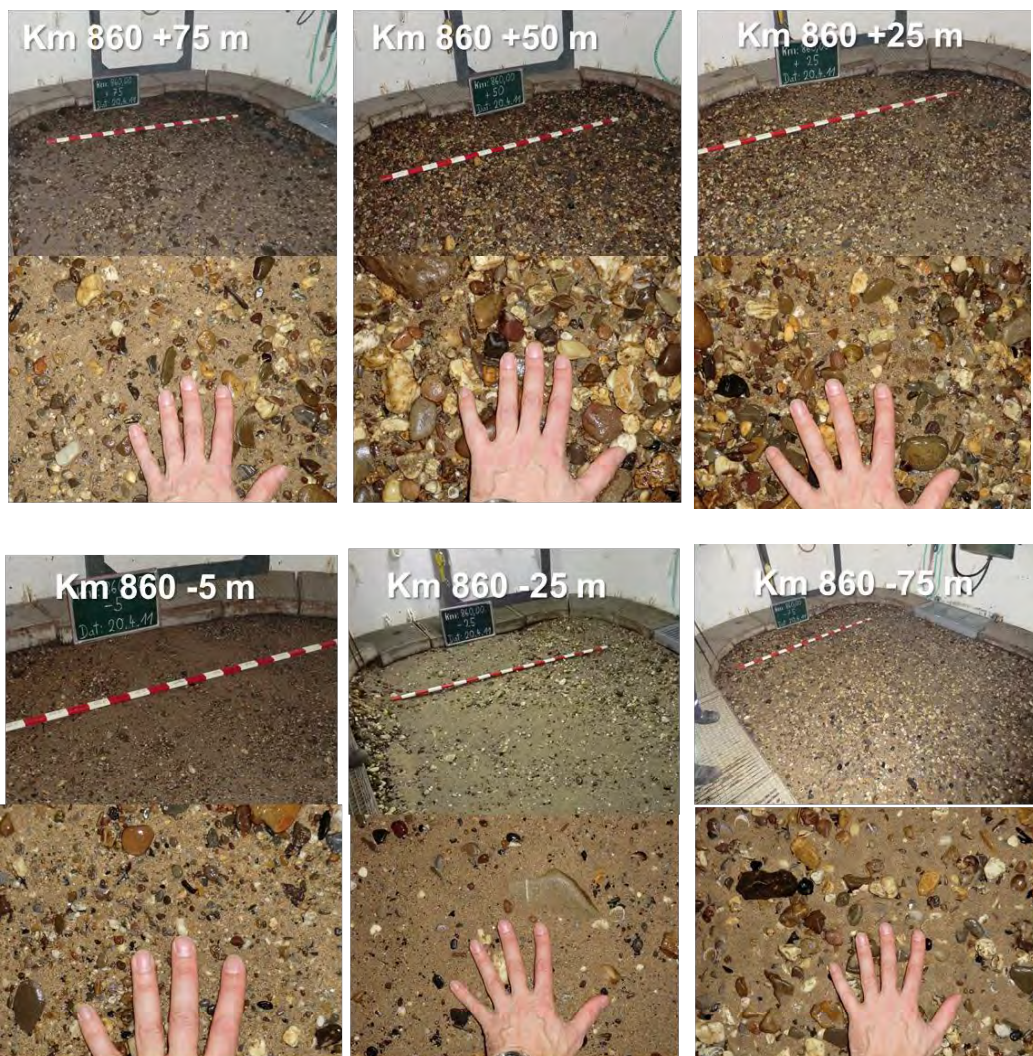


## B.2 Gegevens duikerklok 2011

Gegevens duikerklok 2011



Figuur 8-1 Locaties van bemonstering met duikerklok in 2011



Figuur 8-2 Opnames van bodemmateriaal op de raai km 860, Boven-Rijn (met afstand tot rivieras aangegeven)



Figuur 8-3 Opnames van bodemmateriaal op de raai km 870, Waal (met afstand tot rivieras aangegeven)



*Figuur 8-4* Opnames voor porositeit onderzoek van Roy Frings op km 860

## B.3 Gegevens en resultaten proefbemonstering november 2021

### B.3.1 Tabellen

De volgende tabellen tonen de gemiddelde diameter Dg en het zandpercentage afgeleid uit de zeefkrommes voor de extra bemonstering in november 2021. In de tabel zijn ook de resultaten opgenomen van bemonstering in de 2020 campagne, en de bemonstering voor de suppletieproeven in de Boven-Rijn voor de periode 2016-2022.

Tak	km	Afst (m)	Oev	2021-extra Ham-on Dg (mm)	2021-extra Veen Dg (mm)	2020-campagn Dg (mm)	2016 Dg (mm)	2017 Dg (mm)	2019-02 Dg (mm)	2019-09 Dg (mm)	2020 Dg (mm)	2021 Dg (mm)	2022 Dg (mm)
BR	863.0	0	As	5.91	4.91	5.86							
BR	863.0	-81	links	4.43	3.51	16.15	4.87	4.63	4.11	7.58	5.04	3.96	3.59
BR	863.0	-72	links	4.69	4.35	16.15	4.87	4.63	4.11	7.58	5.04	3.96	3.59
BR	863.0	-92	links	5.00	4.45	16.15	4.87	4.63	4.11	7.58	5.04	3.96	3.59
BR	863.0	91	rechts	6.18	4.67	3.25	4.61	5.78	6.28	5.11	5.84	4.80	5.54
BR	865.0		as	2.71	2.53	3.54							
BR	865.0		as	5.40	5.58	5.41	5.61	3.85	4.07	5.28	5.34	3.89	4.33
BR	865.0	0	as	4.40	3.87	3.71	4.25	1.01	2.52	3.22	4.85	3.15	3.66
BR	866.0	-88	links	3.12	3.44	3.86							
BR	866.0	79	rechts	2.93	3.78	4.47	3.86	3.66	6.13	4.37	4.35	4.27	3.61
BR	866.0		as	4.40	5.84	4.20	5.46	1.41	3.26	3.41	4.56	2.99	3.61
BR	866.0	0	as	3.24	3.87	4.20	5.46	1.41	3.26	3.41	4.56	2.99	3.61
BR	866.0	-56	links	4.46	2.72	4.20	5.46	1.41	3.26	3.41	4.56	2.99	3.61
BR	869.0	95	rechts	4.08	4.16	3.03							
BR	869.0	105	rechts	4.18	4.94	4.33	3.31	0.24	0.32	0.37	0.34	0.35	3.45
BR	869.0	115	rechts	2.23	2.33	3.10	3.31	0.27	0.25	0.28	0.21	0.21	3.35
BR	872.0		as	2.40	2.86	0.58							
WL	872.0	0	as	4.14	7.48	7.28							
WL	872.5	-66	links	5.62	4.07	2.62							
WL	873.0	68	rechts	3.39	3.21	2.62							
WL	873.0	-66	links	1.75	2.45	2.73							
WL	873.0	60	rechts	1.52	1.10	0.91							
WL	873.0	0	as	1.15	1.34	2.73							
WL	873.0	-75	links	1.38	1.51	2.73							
WL	863.5	-10	as	-	-	1.72	4.91	3.31	3.66	3.94	5.01	4.55	4.13
WL	864.5	-10	as	-	-	1.71	3.41	3.75	3.41	3.19	4.23	4.21	3.35
PK	865.5	0	as	-	-	3.36	3.60	2.66	3.76	3.14	2.68	4.05	3.21
PK	866.5	0	as	-	-	2.62	3.31	2.23	2.95	3.09	2.77	3.06	3.36

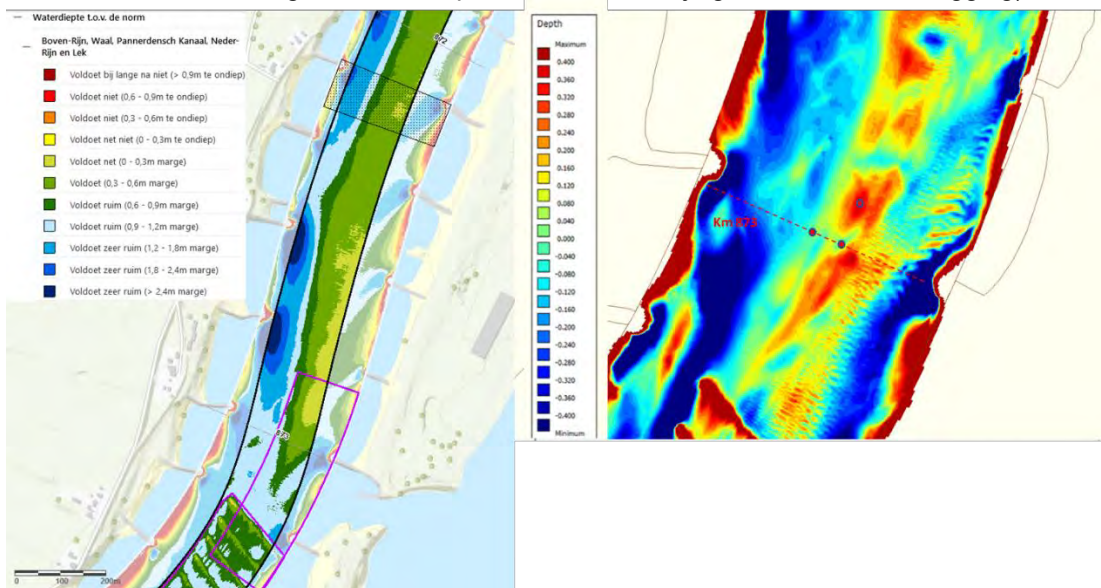
Tak	km	Afst (m)	Oev	2021-extra Ham-on Zand (%)	2021-extra Veen Zand (%)	2020-cam-pagn Zand (%)	2016 Zand (%)	2017 Zand (%)	2019-02 Zand (%)	2019-09 Zand (%)	2020 Zand (%)	2021 Zand (%)	2022 Zand (%)
BR	863.0	0	As	26.7	24.2	14.1							
BR	863.0	-81	links	29.0	37.1	6.8	24.6	27.0	32.1	19.1	30.1	33.1	39.0
BR	863.0	-72	links	29.8	31.3	6.8	24.6	27.0	32.1	19.1	30.1	33.1	39.0
BR	863.0	-92	links	27.2	30.0	6.8	24.6	27.0	32.1	19.1	30.1	33.1	39.0
BR	863.0	91	rechts	12.8	15.1	24.6	22.6	18.1	15.1	20.1	15.3	17.0	12.0
BR	865.0		as	41.6	42.5	35.3							
BR	865.0		as	28.8	26.1	21.3	24.2	30.0	28.1	21.1	23.1	28.1	29.0
BR	865.0	0	as	26.0	28.4	36.4	23.4	68.0	46.1	38.1	18.0	35.1	32.0
BR	866.0	-88	links	37.8	34.8	31.5							
BR	866.0	79	rechts	39.1	34.0	25.3	30.1	32.1	19.1	26.1	27.1	29.1	35.0
BR	866.0		as	31.5	11.7	22.0	9.5	58.0	33.0	33.0	26.0	39.0	34.0
BR	866.0	0	as	36.6	26.3	22.0	9.5	58.0	33.0	33.0	26.0	39.0	34.0
BR	866.0	-56	links	20.0	42.5	22.0	9.5	58.0	33.0	33.0	26.0	39.0	34.0
BR	869.0	95	rechts	28.3	28.6	37.4							
BR	869.0	105	rechts	32.9	28.5	28.2	34.2	38.0	39.1	30.1	35.1	34.0	0.0
BR	869.0	115	rechts	43.0	41.0	31.2	34.2	36.1	36.0	32.1	47.0	41.1	0.0
BR	872.0		as	42.7	35.9	90.6							
WL	872.0	0	as	31.5	8.6	7.7							
WL	872.5	-66	links	7.1	17.1	42.7							
WL	873.0	68	rechts	31.3	32.6	42.7							
WL	873.0	-66	links	51.9	41.7	32.8							
WL	873.0	60	rechts	60.0	69.7	80.2							
WL	873.0	0	as	66.8	61.0	32.8							
WL	873.0	-75	links	62.9	60.4	32.8							
WL	863.5	-10	as	-	-	36.9	30.7	35.1	31.1	31.2	30.0	33.7	36.0
WL	864.5	-10	as	-	-	31.4	27.9	30.1	35.0	38.1	28.0	31.0	35.0
PK	865.5	0	as	-	-	35.3	31.3	41.1	30.0	36.0	41.0	29.0	34.0
PK	866.5	0	as	-	-	42.7	34.2	46.0	38.0	38.0	42.0	37.0	31.0



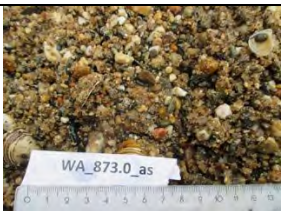

### B.3.2 Bemonstering Waal



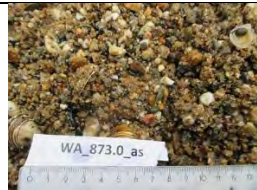




**Km 873** is geselecteerd vanwege mogelijke aanwezigheid van grote duinen in de rivieras. Afstand tussen monsters is afgestemd op aanwezigheid van duintop en duintrog in de 2020 peilingen. Deze duinen lijken ‘weg te lopen’ vanuit het binnenbochtprofiel van de voorgaande rivierbocht. Vanwege het ontbreken van een actuele peiling tijdens de meting kunnen we slechts veronderstellen/aannemen dat tijdens de 2021 bemonstering ook duinen aanwezig waren, maar op welk deel van de duinen de monsters zijn genomen is onbekend gebleven.






KM 873 (Links: Waterdiepte kaarten Rijntakken RWS ON, GeoWeb; Rechts: Bodemtopografie november 2020: beddingvormen ten opzichte van ruimtelijk gemiddelde bodemligging)








Waal Km 873 as	Geschat: Long. 5.982188° Lat. 51.8611697°	Geschat X 195985.0 Y 430457.7
9:22 Hamon happer	9:35 van Veen happer	2020 Hamon
		
		
Dg = 1.75 mm D10 = 0.31 D16 = 0.36 D50 = 1.54 D84 = 9.19 D90 = 11.2 Zand = 51.9 %	Dg = 2.45 mm D10 = 0.34 D16 = 0.40 D50 = 2.89 D84 = 12.3 D90 = 15.1 Zand = 41.7 %	Dg = 2.73 mm D10 = 0.45 D16 = 0.57 D50 = 3.85 D84 = 8.02 D90 = 10.1 Zand = 32.8 %
Het Hamon monster is veel fijner dan het van Veen monster door geringere bijdrage van de grofste grind fracties. De beide monsters zijn vervolgens weer fijner dan het monster in 2020, vooral door een groter zandaandeel.		

Waal Km 873 as – Top van duin	Geschat: Long. 5.982431° Lat. 51.861261°	Geschat X 196001.7 Y 430468.0
9:47 van Veen happer	10:01 Hamon happer	2020 Hamon
		
		
Dg = 1.34 mm D10 = 0.31 D16 = 0.36 D50 = 0.83 D84 = 6.97 D90 = 9.29 Zand = 61.0 %	Dg = 1.15 mm D10 = 0.31 D16 = 0.36 D50 = 0.68 D84 = 5.96 D90 = 8.31 Zand = 66.8 %	Dg = 2.73 mm D10 = 0.45 D16 = 0.57 D50 = 3.85 D84 = 8.02 D90 = 10.1 Zand = 32.8 %
De Hamon en van Veen monsters zijn relatief fijn, en vrijwel gelijkwaardig. Beide monsters zijn aanzienlijk fijner dan het 2020 monster, vooral door aanzienlijk groter zandpercentage.		

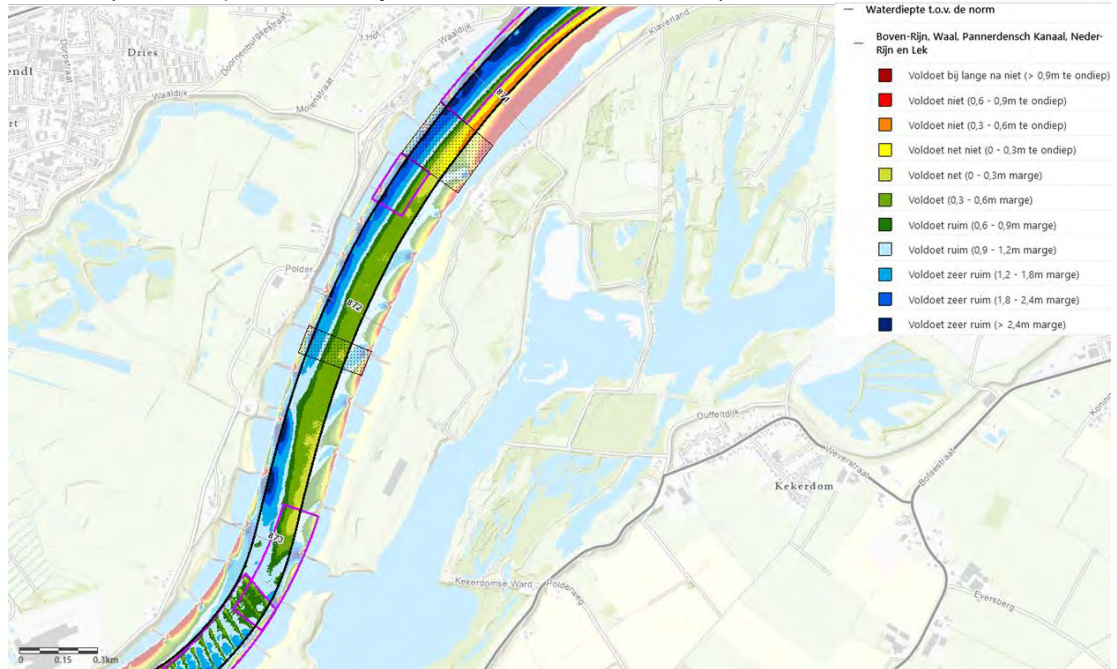




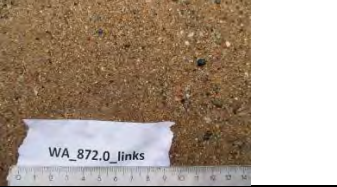


Waal Km 873 as – Trog van duin	Geschat: Long. 5.982577° Lat. 51.861507°	Geschat X 196011.5 Y 430495.5
10:13 Hamon happer	10:29 van Veen happer	2020 Hamon
		
		
Dg = 1.38 mm D10 = 0.34 D16 = 0.39 D50 = 1.05 D84 = 5.67 D90 = 7.90 Zand = 62.9 %	Dg = 1.51 mm D10 = 0.39 D16 = 0.45 D50 = 1.38 D84 = 5.36 D90 = 7.18 Zand = 60.45 %	Dg = 2.73 mm D10 = 0.45 D16 = 0.57 D50 = 3.85 D84 = 8.02 D90 = 10.1 Zand = 32.8 %
De Hamon en van Veen monsters zijn relatief fijn, en vrijwel gelijkwaardig. Beide monsters zijn aanzienlijk fijner dan het 2020 monster, vooral door aanzienlijk groter zandpercentage. De samenstelling van de monsters op deze locatie zijn relatief gelijk aan de monsters op het nabijgelegen punt "Waal Km 873 as – Top van duin". Het monster is wel iets fijner dan het punt Waal Km 873 as. De verschillen zijn onvoldoende om iets te kunnen concluderen over duinsortering (ook omdat geen actuele bodempeiling beschikbaar was).		






Waal Km 873 Links	Geschat: Long. 5.983061° Lat. 51.860719°	Geschat X 196045.5 Y 430408.0
11:05 van Veen happer	11:20 Hamon happer	2020 Hamon
		
		
Dg = 1.10 mm D10 = 0.30 D16 = 0.33 D50 = 0.51 D84 = 9.13 D90 = 12.3 Zand = 69.7 %	Dg = 1.52 mm D10 = 0.31 D16 = 0.36 D50 = 0.70 D84 = 10.7 D90 = 13.4 Zand = 60.0 %	Dg = 0.91 mm D10 = 0.30 D16 = 0.35 D50 = 0.64 D84 = 3.23 D90 = 7.27 Zand = 80.2 %
Zowel de Hamon als van Veen monsters vertonen een (relatief fijne) vergelijkbare samenstelling. De ligging aan het eind van de point bar van de voorgaande bocht kan dit verklaren. Het monster in 2020 toont zelfs een nog iets fijnere samenstelling (meer zand)		

**Km 872** is geselecteerd vanwege de aanwezigheid van bochtsoortering. In de 2020 meting was hier sprake van een opvallend groot verschil tussen samenstelling links en rechts. Dit wordt toegeschreven aan de ligging in de rivierbocht (zie onderstaande dieptekaart), maar het is onduidelijk of de extremiteit van de waarden slechts een momentopname betreft van een sterk veranderlijk actieve laag.

KM 872 (Waterdiepte kaarten Rijntakken RWS ON, GeoWeb)



Waal Km 872 Links	Geschat: Long. 5.987861° Lat. 51.869139°	Geschat X 196368.4 Y 431347.5
11:33 Hamon happer	11:50 van Veen happer	2020 Hamon
		
		
Dg = 2.40 mm D10 = 0.37 D16 = 0.43 D50 = 3.17 D84 = 11.2 D90 = 14.3 Zand = 42.7 %	Dg = 2.86 mm D10 = 0.40 D16 = 0.49 D50 = 3.98 D84 = 11.2 D90 = 14.2 Zand = 35.9 %	Dg = 0.58 mm D10 = 0.29 D16 = 0.33 D50 = 0.47 D84 = 0.82 D90 = 1.73 Zand = 90.6 %
De Hamon en van Veen monsters zijn gelijkwaardig, maar aanzienlijk grover (4x) dan het zeer fijne monster uit 2020. Dit roept vragen op over de representativiteit van de monsters voor de (tijd-)gemiddelde samenstelling op deze locatie.		

Waal Km 872 Rechts	Geschat: Long. 5.9860729° Lat. 51.8694643°	Geschat X 196245.0 Y 431382.7
12:03 van Veen happer	12:25 Hamon happer	2020 Hamon
		
		
Dg = 7.48 mm D10 = 2.22 D16 = 3.26 D50 = 9.26 D84 = 17.0 D90 = 20.0 Zand = 8.6 %	Dg = 4.14 mm D10 = 0.60 D16 = 0.78 D50 = 5.86 D84 = 15.0 D90 = 18.2 Zand = 31.5 %	Dg = 7.28 mm D10 = 2.48 D16 = 3.54 D50 = 8.21 D84 = 14.7 D90 = 16.9 Zand = 7.7 %
<p>Het Hamon monster is aanzienlijk fijner (en zandiger) dan het van Veen monster. Opvallend is dat het nieuwe van Veen monster min of meer even grof is als het monster in 2020. De oorzaak moet worden gezocht in sterke ruimtelijke variabiliteit in de bodemligging op deze locatie tijdens de 2021 bemonstering. Bij het nemen van de van Veen monsters moest meerdere keren worden gesampled vanwege onvolledige sluiting van de happer bij het ophalen van het monster.</p>		

**Km 869** is geselecteerd omdat dit punt op voldoende afstand ligt van de splitsing, en vlak voor de bocht. De monsters bieden inzicht in de heterogeniteit van Boven-Waal nabij het splitsingspunt, en in een bochtovergang (dus zonder specifieke bochtsoortering).

KM 869 (Waterdiepte kaarten Rijntakken RWS ON, GeoWeb)



Waal Km 869 Rechts	Geschat: Long. 6.0205112° Lat. 51.8805732°	Geschat X 198606.0 Y 432638.7
Hamon happer	Van Veen happer	2020 Hamon
Dg = 2.23 mm D10 = 0.48 D16 = 0.58 D50 = 2.62 D84 = 6.95 D90 = 9.00 Zand = 43.0 %	Dg = 2.34 mm D10 = 0.48 D16 = 0.59 D50 = 2.87 D84 = 7.12 D90 = 8.80 Zand = 41.0 %	Dg = 3.10 mm D10 = 0.44 D16 = 0.57 D50 = 4.20 D84 = 10.8 D90 = 13.8 Zand = 31.2 %
Alle monsters vertonen ongeveer een gelijkwaardig beeld. De nieuwe monsters in 2021 zijn iets fijner (en iets zandiger) dan het monster in 2020.		

Waal Km 869 As	Geschat: Long. 6.0199811° Lat. 51.8800547°	Geschat X 198570.0 Y 432580.7
Hamon happer	Van Veen happer	2020 Hamon
Dg = 4.09 mm D10 = 0.42 D16 = 0.55 D50 = 6.65 D84 = 15.2 D90 = 17.9 Zand = 28.3 %	Dg = 4.16 mm D10 = 0.43 D16 = 0.56 D50 = 6.66 D84 = 16.4 D90 = 19.4 Zand = 25.6 %	Dg = 3.03 mm D10 = 0.43 D16 = 0.54 D50 = 4.25 D84 = 13.1 D90 = 15.5 Zand = 37.4 %
Beide 2021 monsters vertonen ongeveer een gelijkwaardig beeld, maar zijn iets grover dan de monsters rechts. De nieuwe monsters in 2021 zijn iets grover (en iets minder zandig) dan het monster in 2020. In 2020 was het monster op de as vrijwel gelijk aan het monster rechts.		

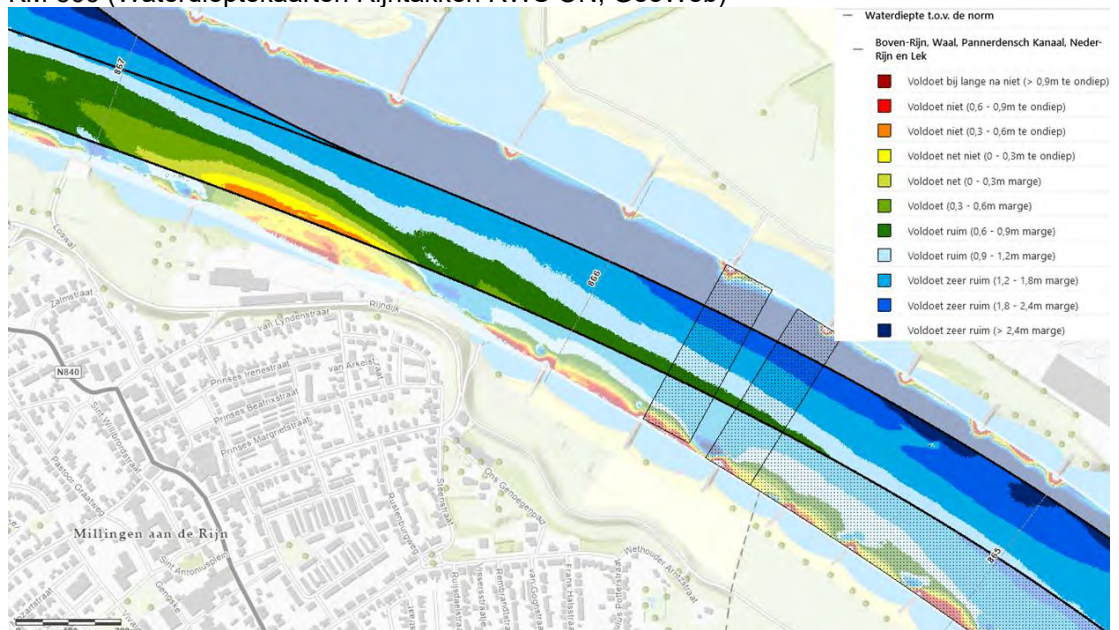
Waal Km 869 Links	Geschat: Long. 51.8800547° Lat. 51.8795541°	Geschat X 198536.0 Y 432524.7
Hamon happer	Van Veen happer	2020 Hamon
Dg = 4.18 mm D10 = 0.41 D16 = 0.50 D50 = 6.93 D84 = 19.2 D90 = 22.3 Zand = 32.9 %	Dg = 4.94 mm D10 = 0.51 D16 = 0.69 D50 = 7.77 D84 = 19.4 D90 = 21.5 Zand = 28.5 %	Dg = 4.33 mm D10 = 0.41 D16 = 0.53 D50 = 7.32 D84 = 16.1 D90 = 19.6 Zand = 28.2 %
Beide 2021 monsters vertonen ongeveer een gelijkwaardig beeld, en zijn vergelijkbaar met de as-monsters. Ook is de overeenstemming met het 2020 monster groot.		

Bemonstering Boven-Rijn

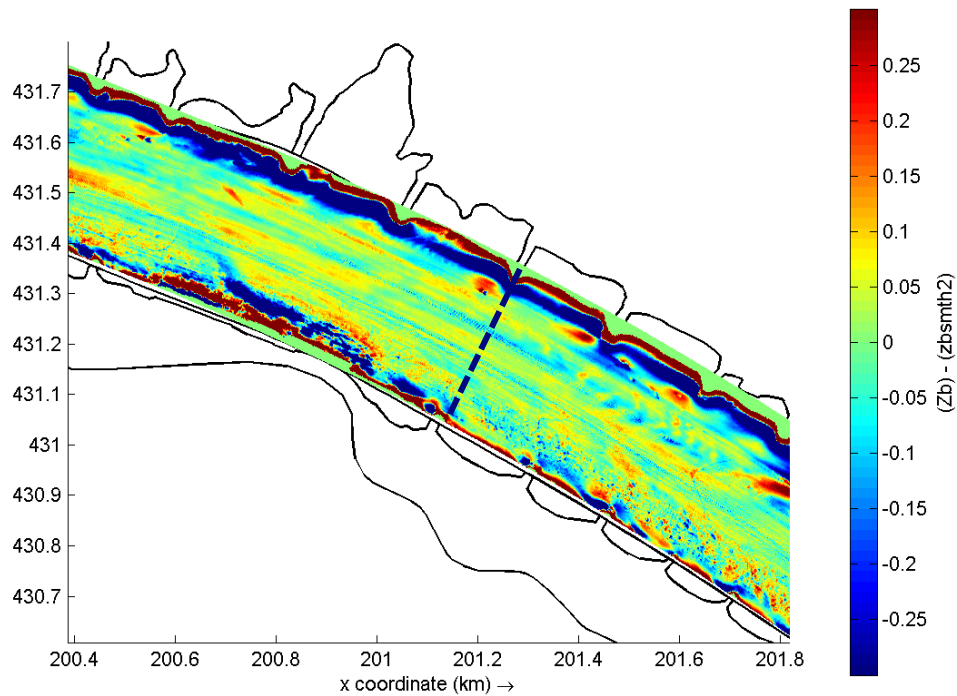








**Km 866** ligt benedenstrooms van de proefsuppleties in 2016 en 2019 (km 862-864 linker zijde), en een relatief recht deel van de rivier. In 2020 toont dit monster een relatief gelijkmatig verdeelde verdeling over de breedte, en is iets fijner dan KM 865. De peilingen wekken een beeld dat hier aan de linkeroever mogelijk sprake is van een vaste of afgepleisterde laag (zie figuur hieronder), terwijl midden en rechts juist sprake is van een alluviaal beeld met langgerekt sporen. De sporen zijn waarschijnlijk veroorzaakt door schepen, en leiden mogelijk ook tot variaties in samenstelling op de hoge en lage delen van deze sporen. Dit is getoetst door aan de rechterzijde een drietal monsters te nemen met geringe onderlinge afstanden in dwarsrichting (door de kraan naar links, midden en naar rechts te draaien bij een vaste positie van het schip).

KM 866 (Waterdiepte kaarten Rijntakken RWS ON, GeoWeb)








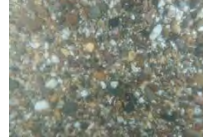


Onderstaande figuur toont verschil tussen bodempeiling 2020 en een ruimtelijk gemiddelde ('smoothened') bodemligging. De figuur toont beddingvormen en langgerekt (vaar-)sporen op de bemonsteringslocatie.











Boven-Rijn Km 866 Links	Geschat: Long. 6.057694° Lat. 51.866664°	Geschat X 201168.0 Y 431114.0
13:33 Hamon happer	13:48 van Veen happer	2020 Hamon
		
		
Code B866LH	Code B866LV	
Dg = 2.93 mm D10 = 0.40 D16 = 0.44 D50 = 5.51 D84 = 13.5 D90 = 15.4 Zand = 39.1 %	Dg = 3.78 mm D10 = 0.43 D16 = 0.54 D50 = 6.25 D84 = 15.2 D90 = 18.2 Zand = 34.0 %	Dg = 4.47 mm D10 = 0.37 D16 = 0.51 D50 = 7.31 D84 = 16.7 D90 = 19.3 Zand = 25.3 %
Het mengsel van de monsters in 2021 is relatief fijn, met een relatief hoog zandgehalte (30 à 40%). Het Hamon monster is iets grover dan van Veen. In 2020 werd hier een nog grover monster gevonden.		

Boven-Rijn Km 866 as	Geschat: Long. 6.0581041° Lat. 51.867313°	Geschat X 201208.0 Y 431186.7
Code B866V	Code B866H	
14:02 van Veen happer	14:12 Hamon happer	2020 Hamon
		
		
Dg = 3.44 mm D10 = 0.59 D16 = 0.73 D50 = 4.22 D84 = 13.2 D90 = 16.7 Zand = 34.8 %	Dg = 3.13 mm D10 = 0.57 D16 = 0.70 D50 = 3.87 D84 = 11.8 D90 = 14.6 Zand = 37.8 %	Dg = 3.86 mm D10 = 0.52 D16 = 0.63 D50 = 5.22 D84 = 16.7 D90 = 19.7 Zand = 31.5 %
De samenstelling van de monster is vergelijkbaar voor zowel Hamon als van Veen, als voor de 2020 en 2021 meting. Ook is het materiaal redelijk vergelijkbaar met de monsters in de rivieras in 2021.		

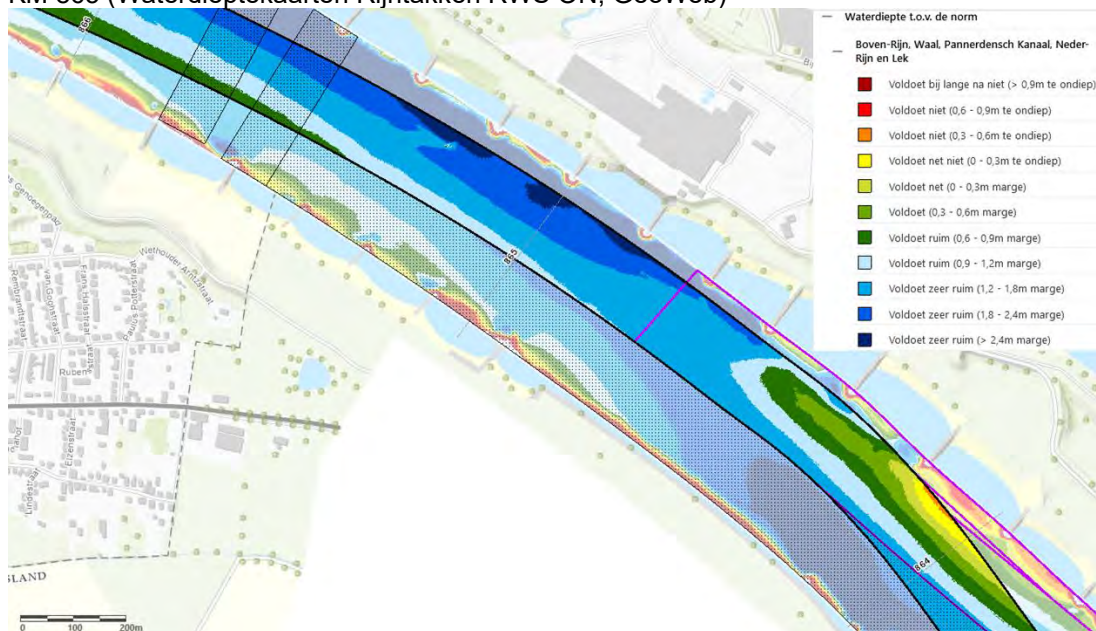
Boven-Rijn Km 866 Rechts	Geschat: Long. 6.058895° Lat. 51.868023°	Geschat X 201261.7 Y 431266.2	
14:26 van Veen happer	14:28 van Veen happer	14:41 van Veen happer	2020 Hamon
Code B866L2V (links-midden)	Code B866L1V (Links-1=Zuid)	Code B866RV (moet worden gecheckt) (Links-3=Noord)	
			
			
Code B866L2V: Dg = 3.87 mm D10 = 0.97 D16 = 1.25 D50 = 4.54 D84 = 10.1 D90 = 12.0 Zand = 26.3 %	Code B866L1V Dg = 5.84 mm D10 = 1.15 D16 = 2.81 D50 = 7.27 D84 = 13.7 D90 = 15.9 Zand = 11.7 %	Code B866RV: Dg = 2.72 mm D10 = 0.56 D16 = 0.65 D50 = 3.27 D84 = 9.63 D90 = 11.0 Zand = 42.5 %	Dg = 4.20 mm D10 = 0.59 D16 = 0.90 D50 = 5.52 D84 = 13.0 D90 = 15.4 Zand = 22.0 %
De drie van Veen monsters op relatief geringe afstand geven aanzienlijke verschillen (tot een factor 2 in gemiddelde diameters en factor 4 in zandpercentages). Deze verschillen zijn aanzienlijk groter dan gevonden met de Hamon. Bij het nemen van de van Veen monsters moest meerdere keren worden gesampled vanwege onvolledige sluiting van de happer bij het ophalen van het monster.			



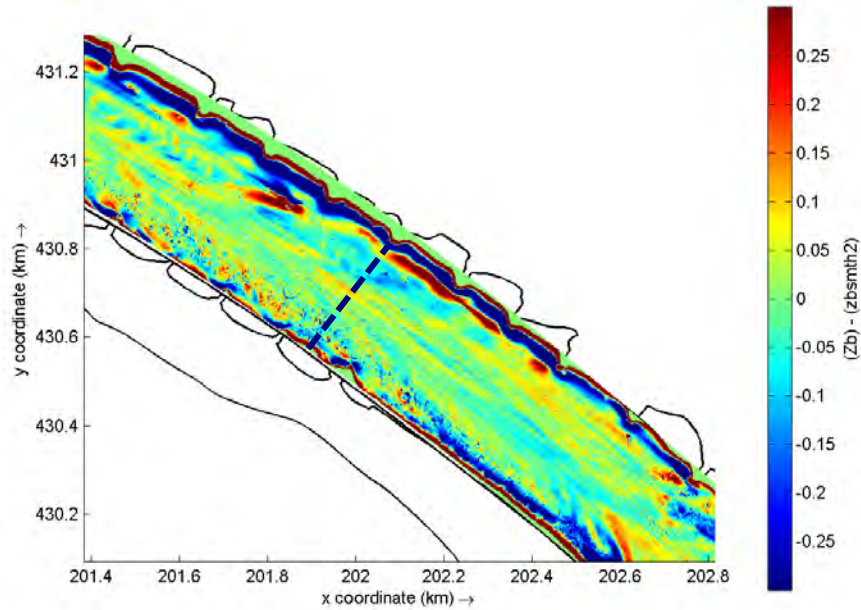
Boven-Rijn Km 866 Rechts	Geschat: Long. 6.058895° Lat. 51.868023°	Geschat X 201261.7 Y 431266.2	
14:53 Hamon	14:57 Hamon	15:03 Hamon	2020 Hamon
Code B866RH (moet worden gecheckt) (Links-1=Zuid)	Code B866MH (moet worden gecheckt) (Links-midden)	Code B866L3H (Links-3=Noord)	
			
			
Code B866RH: Dg = 4.40 mm D10 = 0.46 D16 = 0.60 D50 = 7.59 D84 = 17.4 D90 = 20.2 Zand = 31.5 %	Code B866MH Dg = 3.24 mm D10 = 0.75 D16 = 0.91 D50 = 3.95 D84 = 9.90 D90 = 11.9 Zand = 36.6 %	Code B866L3H Dg = 4.46 mm D10 = 1.03 D16 = 1.55 D50 = 5.85 D84 = 10.8 D90 = 12.8 Zand = 20.0 %	Dg = 4.20 mm D10 = 0.59 D16 = 0.90 D50 = 5.52 D84 = 13.0 D90 = 15.4 Zand = 22.0 %
De variaties in de samenstelling van onderlinge monsters is minder groot dan bij de van Veen bemonstering, en is vergelijkbaar met het monster uit 2020. De monster bevatten meer zand dan de van Veen monsters op dezelfde locatie.			







**Km 865** ligt benedenstrooms van de proefsuppleties in 2016 en 2019 (km 862-864, linkerzijde), en toont een relatief gelijkmatig verdeelde verdeling over de breedte in 2020.


KM 865 (Waterdiepte kaarten Rijntakken RWS ON, GeoWeb)




Onderstaande figuur toont verschil tussen bodempeiling 2020 en een ruimtelijk gemiddelde ('smoothened') bodemligging. De figuur toont beddingvormen en langgerekt (vaar-)sporen op de bemonsteringslocatie.



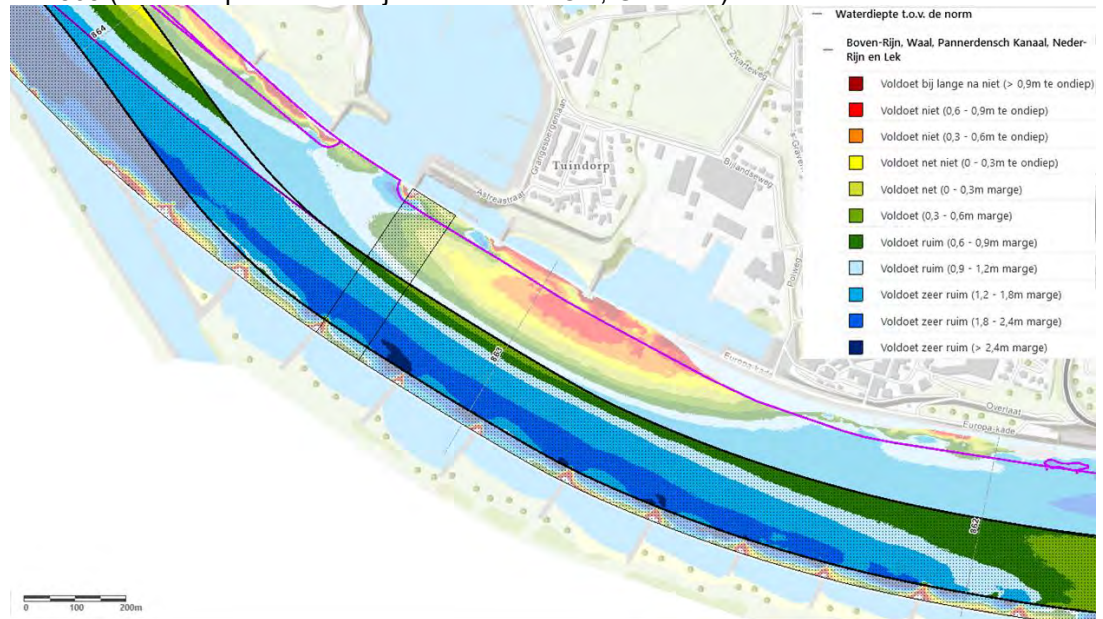
Boven-Rijn Km 865 rechts	Geschat: Long. 6.0702407° Lat. 51.863378°	Geschat X 202048.0 Y 430756.7
15:13 Hamon happer	15:27 van Veen happer	2020 Hamon
		
		
Dg = 4.40 mm D10 = 0.51 D16 = 0.69 D50 = 6.45 D84 = 15.6 D90 = 19.2 Zand = 26.0 %	Dg = 3.87 mm D10 = 0.45 D16 = 0.58 D50 = 6.17 D84 = 14.0 D90 = 16.6 Zand = 28.5 %	Dg = 3.71 mm D10 = 0.50 D16 = 0.61 D50 = 5.20 D84 = 17.0 D90 = 20.7 Zand = 36.4 %

Boven-Rijn Km 865 as	Geschat: Long. 6.0695498° Lat. 51.8628157°	Geschat X 202001.0 Y 430693.7
Hamon happer	van Veen happer	2020 Hamon
Code B865H	Code B865V	
Dg = 2.71 mm D10 = 0.45 D16 = 0.56 D50 = 3.18 D84 = 11.2 D90 = 15.2 Zand = 41.6 %	Dg = 2.53 mm D10 = 0.47 D16 = 0.58 D50 = 2.99 D84 = 9.60 D90 = 12.5 Zand = 42.5 %	Dg = 3.54 mm D10 = 0.44 D16 = 0.54 D50 = 5.45 D84 = 16.4 D90 = 19.4 Zand = 35.3 %
Sediment in 2021 is fijner en zandiger dan in 2020.		

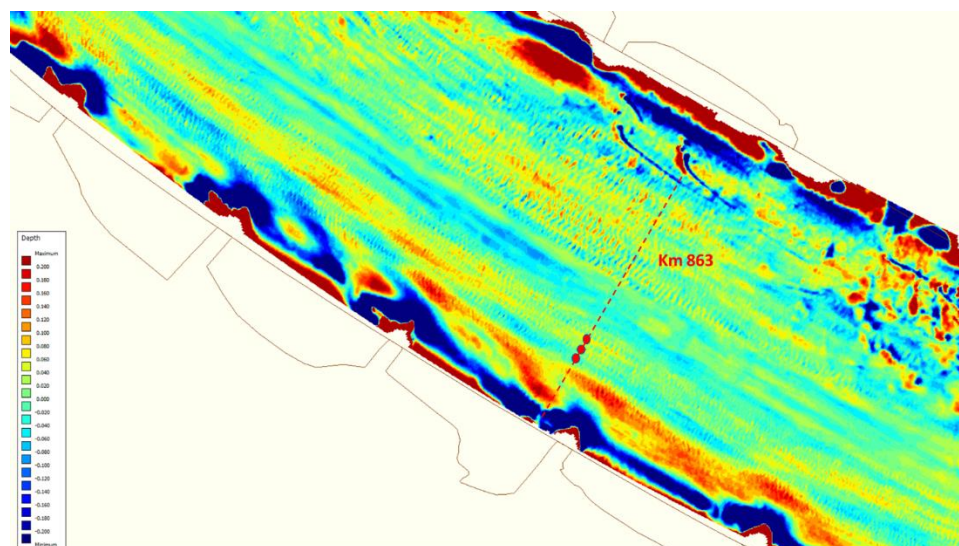
Boven-Rijn Km 865 links	Geschat: Long. 6.0687709° Lat. 51.862191°	Geschat X 201948.0 Y 430623.7
Hamon happer	van Veen happer	2020 Hamon
Code B865LH	Code B865LV	
Dg = 5.40 mm D10 = 0.55 D16 = 0.74 D50 = 9.95 D84 = 20.3 D90 = 22.0 Zand = 28.8 %	Dg = 5.59 mm D10 = 0.56 D16 = 0.75 D50 = 9.29 D84 = 20.8 D90 = 24.3 Zand = 26.1 %	Dg = 5.41 mm D10 = 0.55 D16 = 0.90 D50 = 8.10 D84 = 17.3 D90 = 19.6 Zand = 21.2 %
Alle drie de monsters zijn redelijk vergelijkbaar. De samenstelling van de linkerzijde (deze monsters) is grover dan in de rivieras en de rechterzijde.		



**Km 863** ligt ongeveer 1 km benedenstrooms van de vaste laag Spijk (rechteroever, tot km 861.7), en midden in de zone van de eerdere pilot suppleties van 2016 en 2019 (linkerzijde, km 862-864). Het is daarom aannemelijk dat de samenstelling hier is beïnvloed door deze ingrepen. De 2020 bemonstering geeft hier relatief grof sediment op de suppletie zelf (links). De mengsels zijn flink heterogeen. De locatie lijkt geschikt om extra monsters voor effect van vaarsporen te detecteren. Er zijn daarom twee extra bemonsteringen toegevoegd.



## KM 863 (Waterdiepte kaarten Rijntakken RWS ON, GeoWeb)






Onderstaande figuur toont verschil tussen bodempeiling 2020 en een ruimtelijk gemiddelde ('smoothened') bodemligging. De figuur toont beddingvormen en langgerekt (vaar-)sporen op de bemonsteringslocatie. Aan de linkerzijde zijn 3 monsters genomen met geringe afstand om te onderzoeken of variabiliteit in bodemligging (sporen) ook terugkomt in variabiliteit in samenstelling.




Boven-Rijn Km 863 rechts	Geschat: Long. 6.0928612° Lat. 51.852341°	Geschat X 203618.0 Y 429543.7
Hamon happer	van Veen happer	2020 Hamon
Code B863RH	Code B863RV	
		
Dg = 6.18 mm D10 = 1.25 D16 = 2.87 D50 = 7.65 D84 = 14.5 D90 = 17.0 Zand = 12.8 %	Dg = 4.67 mm D10 = 0.93 D16 = 2.18 D50 = 6.24 D84 = 9.63 D90 = 10.7 Zand = 15.1 %	Dg = 3.25 mm D10 = 0.56 D16 = 0.74 D50 = 11.1 D84 = 25.4 D90 = 31.4 Zand = 24.6 %
De monsters op deze locatie zijn relatief grof, ondanks dat deze in het ondiepere deel van de binnenbocht liggen. Mogelijk is hier een effect van de zich ontwikkelende erosiekuil benedenstrooms van de vaste laag. Uit bodempeilingen volgt dat de bodemligging stroomafwaarts van deze vaste laag tussen km 862 en 863.5 een geleidelijk erodeert sinds uitvoering van deze ingrepen. Bij km 863 bedraagt deze erosie meer dan circa 1.5 m. De bodemmonsters in 2021 zijn grover dan in 2020.		

Boven-Rijn Km 863 as	Geschat: Long. 6.0921825° Lat. 51.8516349°	Geschat X 203572.0 Y 429464.7
Hamon happer	van Veen happer	2020 Hamon
Code B863H	Code B863V	
		
Dg = 5.91 mm D10 = 0.60 D16 = 0.81 D50 = 9.43 D84 = 23.0 D90 = 29.5 Zand = 26.7 %	Dg = 4.91 mm D10 = 0.63 D16 = 0.92 D50 = 6.70 D84 = 16.6 D90 = 21.0 Zand = 24.1 %	Dg = 5.86 mm D10 = 0.95 D16 = 2.35 D50 = 6.93 D84 = 16.2 D90 = 20.0 Zand = 14.1 %
Samenstelling is relatief grof, maar vergelijkbaar voor 2021 monsters. Het zandgehalte in 2021 is hoger dan in 2020.		

Boven-Rijn Km 863 links	Geschat: Long. 6.0915776° Lat. 51.8510094°	Geschat X 203531.0 Y 429394.7
Hamon happer	van Veen happer	2020 Hamon
Code B863LH	Code B863LV	
		
Dg = 4.43 mm D10 = 0.39 D16 = 0.46 D50 = 7.51 D84 = 19.8 D90 = 24.7 Zand = 29.0 %	Dg = 3.51 mm D10 = 0.37 D16 = 0.42 D50 = 6.31 D84 = 19.5 D90 = 23.4 Zand = 37.1 %	Dg = 16.2 mm D10 = 7.19 D16 = 12.5 D50 = 22.4 D84 = 31.0 D90 = 35.2 Zand = 6.82 %
De Hamon en van Veen monsters zijn relatief vergelijkbaar. De monsters zijn aanzienlijk fijner dan het 2020 monster, dat vrijwel volledig uit grof grind bestond.		

Boven-Rijn Km 863 links-noord	Geschat: Long. 6.0916513° Lat. 51.8510808°	Geschat X 203536.0 Y 429402.7
Hamon happer	van Veen happer	2020 Hamon
Code B863LNH	Code B863LNV	
		
Dg = 4.69 mm D10 = 0.38 D16 = 0.45 D50 = 8.37 D84 = 22.9 D90 = 26.7 Zand = 29.8 %	Dg = 4.35 mm D10 = 0.37 D16 = 0.45 D50 = 8.42 D84 = 20.1 D90 = 23.0 Zand = 31.3 %	Dg = 16.2 mm D10 = 7.19 D16 = 12.5 D50 = 22.4 D84 = 31.0 D90 = 35.2 Zand = 6.82 %
De samenstelling van de Hamon en van Veen monsters wijken niet veel af van het naastgelegen monster Km 863 links (2021).		

Boven-Rijn Km 863 links-zuid	Geschat: Long. 6.0914604° Lat. 51.8509382°	Geschat X 203523.0 Y 429386.7
Hamon happer	van Veen happer	2020 Hamon
Code B863LZH	Code B863LZV	
Dg = 5.01 mm D10 = 0.39 D16 = 0.48 D50 = 8.84 D84 = 20.8 D90 = 24.6 Zand = 27.2 %	Dg = 4.45 mm D10 = 0.39 D16 = 0.47 D50 = 7.41 D84 = 20.6 D90 = 25.2 Zand = 30.0 %	Dg = 16.2 mm D10 = 7.19 D16 = 12.5 D50 = 22.4 D84 = 31.0 D90 = 35.2 Zand = 6.82 %
De samenstelling van de Hamon en van Veen monsters wijken niet veel af van het naastgelegen monster Km 863 links (2021).		

#### B.3.4 Bemonstering Pannerdensch Kanaal



KM 872.5 en 873 (Waterdiepte kaarten Rijntakken RWS ON, GeoWeb)



Pann. Kanaal Km 872.5 As	Geschat: Long. 5.9989182° Lat. 51.9064667°	Geschat X 197095.0 Y 435506.7
Hamon happer	van Veen happer	2020 Hamon
Code B872H	Code B872V	
Dg = 5.622 mm D10 = 2.42 D16 = 3.18 D50 = 6.31 D84 = 10.7 D90 = 12.6 Zand = 7.13 %	Dg = 4.07 mm D10 = 0.68 D16 = 1.63 D50 = 5.12 D84 = 9.57 D90 = 10.9 Zand = 17.1 %	Dg = 5.34 mm D10 = 1.43 D16 = 2.64 D50 = 6.42 D84 = 12.9 D90 = 15.4 Zand = 11.75 %
Samenstelling is op deze locatie vrij grof (grover dan km 873) door een relatief laag zand percentage. De Hamon monsters zijn iets grover dan van Veen monster.		

Pann. Kanaal Km 873.0 As	Geschat: Long. 5.9931719° Lat. 51.909247°	Geschat X 196697.0 Y 435812.7
Hamon happer	van Veen happer	2020 Hamon
Code B872H	Code B872V	
Dg = 3.39 mm D10 = 0.72 D16 = 1.04 D50 = 4.38 D84 = 9.67 D90 = 11.6 Zand = 31.3 %	Dg = 3.21 mm D10 = 0.58 D16 = 0.77 D50 = 4.18 D84 = 9.74 D90 = 11.9 Zand = 32.6 %	Dg = 3.04 mm D10 = 0.43 D16 = 0.54 D50 = 4.49 D84 = 10.2 D90 = 11.1 Zand = 32.1 %
De samenstelling van alle drie de monsters, zowel in 2020 en 2021, is vrijwel gelijk.		



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)