

**Informatiebehoefte en
aanbevelingen voor
monitoring in de Bovendelta
van de Rijn**



Informatiebehoefte en aanbevelingen voor monitoring in de Bovendelta van de Rijn

NKWK-pilot 2016 - A2

Frans Buschman
Astrid Blom
Thaiënne van Dijk
Maarten Kleinhans
Rolie van der Mark

11200356-000

Titel

Informatiebehoefte en aanbevelingen voor monitoring in de Bovendelta van de Rijn

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	11200356-000	11200356-000-ZWS-0004	72

Trefwoorden

Metingen, sediment, sedimenttransport, bodemligging, Bovendelta, NKWK-rivieren

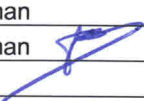


Samenvatting

Deze pilotstudie is een product van de NKWK Onderzoekslijn Rivieren. Het doel van deze pilotactiviteit is het in beeld brengen van de informatiebehoefte gerelateerd aan het voorspellen van de ontwikkeling van de Bovendelta en het doen van aanbevelingen over monitoring om aan die behoefte te voldoen. Het gaat hier specifiek om monitoring waarmee inzicht wordt verkregen in de langzame morfodynamische veranderingen in het Bovendelta-gebied op een tijdschaal van 100-200 jaar.

Aanbevelingen worden gedaan over welke metingen nodig zijn om de lange-termijn (100-200 jaar) morfologische ontwikkeling van de Nederlandse delta te kunnen voorspellen. Voor afvoer, waterstand, bodemniveau, sedimenttransport en bodemsamenstelling worden generieke aanbevelingen gedaan hoe deze variabelen gemonitord moeten worden om op deze lange termijn veranderingen in de Bovendelta te kunnen verklaren en voorspellen. Het is aangegeven wanneer extra metingen nodig worden geacht ten opzichte van de huidige meetpraktijk.

Daarnaast zijn enkele aandachtspunten voor het opslaan van gemeten gegevens benoemd, is een inventarisatie van beschikbare metingen gedaan, en zijn bestaande en innovatieve meetmethoden relevant voor de langzame morfodynamische verandering in de Bovendelta beschreven.

Referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	mrt 2017	Frans Buschman		Kees Sloff		Johan Boon	
1.9	mei 2017	Frans Buschman		Kees Sloff		Johan Boon	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Pilotstudie in de NKWK Onderzoekslijn Rivieren	1
1.2 Context	1
1.3 Probleembeschrijving	3
1.4 Opdracht	3
1.5 Aanpak en leeswijzer	3
1.6 Organisatie	3
1.7 Afbakening	4
2 Informatiebehoefte	5
2.1 Informatiebehoefte rivierbeheerder	5
2.2 Informatiebehoefte kennisinstellingen	7
2.3 De verschillende kennisbehoefte nader beschouwd	9
3 Dataopslag en -toegankelijkheid	11
4 Overzicht metingen	13
4.1 Inleiding	13
4.2 Afvoer	14
4.3 Waterstand	14
4.4 Bodemniveau	15
4.5 Sedimenttransport	15
4.5.1 Spoeltransport	16
4.5.2 Overig zwevend transport	16
4.5.3 Bodemtransport	16
4.6 Bodemsamenstelling	17
4.6.1 Bodemoppervlak (0-30cm)	17
4.6.2 Substraat (30cm tot 300 cm beneden bodemoppervlak)	17
5 Inventarisatie van (nieuwe) meetmethoden	19
5.1 Inleiding	19
5.2 Afvoer	21
5.2.1 Akoestische debietmeters (ADM)	21
5.2.2 Horizontale ADCP	21
5.2.3 Uit waterstandsmetingen	23
5.2.4 ADCP vanaf een schip	24
5.2.5 Vanaf veerponten met een ADCP	24
5.3 Waterstand	25
5.3.1 Digitale Niveaumeter (vlottersysteem)	25
5.3.2 Radarniveaumeter	25
5.4 Bodemniveau	26
5.4.1 Multibeamecholood	26
5.4.2 Singlebeamecholood	26
5.4.3 Temperatuurmeting met glasvezelkabel	27
5.4.4 LIDAR	28
5.5 Sedimenttransport	28
5.5.1 Spoeltransport	28

5.5.2	Overig zwevend transport	29
5.5.3	Bodemtransport	31
5.6	Bodemsamenstelling	38
5.6.1	Bodemoppervlak (0-30cm)	38
5.6.2	Substraat (30-300 cm onder het bodemoppervlak)	43
6	Aanbevelingen	49
6.1	Algemeen	49
6.2	Reguliere metingen	49
6.3	Continue metingen	50
6.4	Projectmatige metingen	51
6.4.1	Hoogwaterdraaiboek	51
6.5	Overige aanbevelingen	51
7	Referenties	53
	Bijlage(n)	
A	Bijlage: Memo Rijkswaterstaat ten aanzien van Informatiebehoefte	57
B	Bijlage: Technology Readiness Level	72

1 Inleiding

1.1 Pilotstudie in de NKWK Onderzoekslijn Rivieren

Deze pilotstudie is een product van de NKWK Onderzoekslijn Rivieren. Nederland is gevormd door rivieren. We hebben onze rivieren geprobeerd te temmen, maar de fysische processen in het water en de bodem gaan hun eigen gang. Hoe beïnvloeden deze fysische processen de lange-termijn ontwikkeling van de rivier? Hoe zal het veranderende klimaat de lange-termijn ontwikkeling van de rivier beïnvloeden? Op die vragen richt de NKWK Onderzoekslijn Rivieren zich. Overheid, kennisinstellingen en bedrijfsleven werken hierin samen om klaar te staan voor de vragen van nu en die van de toekomst. In 2016 zijn binnen de kennisagenda pilotstudies gedefinieerd. De voorliggende rapportage is het product van een van deze pilotstudies. Naast de pilotstudies is een Onderzoeksplan opgesteld voor 2017 en verder. Op de jaarlijkse NKWK conferentie wordt verslag gedaan van de resultaten.

1.2 Context

Nederland is grotendeels gevormd door het sediment dat al duizenden jaren door de rivieren wordt afgezet. In de afgelopen eeuwen zijn de Nederlandse rivieren sterk gereguleerd. De rivier past zich aan deze nieuwe situatie en de nieuwe randvoorwaarden aan. Die aanpassing kost veel tijd. De Bovendelta (d.w.z. bovenstrooms van het gebied waar getij een rol speelt en benedenstrooms van Xanten in Duitsland, zie Figuur 1.1) wordt al decennia gekenmerkt door bodemerosie (Frings et al., 2009; Blom, 2016). Deze langjarige bodemerosie zorgt voor veel problemen, zoals risico's van vaste lagen die letterlijk steeds meer een drempel vormen voor de scheepvaart, wat leidt tot reductie van de beladingsgraad, onvoldoende dekking van rivierkruisende kabels en leidingen, risico's voor krib- en dijkstabiliteit, risico's voor de fundering van sluizen en andere constructies, en risico dat innamepunten voor zoetwater niet langer water kunnen innemen onder vrij verval.



Figuur 1.1 Overzicht van het interessegebied: de Bovendelta van de Rijn. De zes takken zijn: de Niederrhein vanaf Xanten (oranje), de Bovenrijn (kobalt), het Pannerdensch Kanaal (groen), de IJssel tot Kattendiep (blauw), de Waal tot Vuren (paars) en de Nederrijn/Lek tot Hagestein (rood).

In de Waal mag bovenstrooms van Zaltbommel gebaggerd materiaal sinds 1992 niet meer uit het riviersysteem verwijderd worden om de huidige lange-termijn bodemerosie in de Bovendelta van de Rijn niet te versterken. We ondervinden de genoemde aan de langjarige bodemerosie gerelateerde problemen, maar we kennen het relatieve belang van de verschillende oorzaken van de langjarige bodemerosie niet (Blom, 2016).

De lange-termijn ontwikkeling van de Bovendelta is ook bepalend voor de ontwikkeling van en waterveiligheid rond de benedenstroomse takken van de splitsingspunten Pannerdensch Kop en IJsselkop, aangezien de geometrie van de rivier rond deze splitsingspunten het relatieve aanbod van water en sediment naar de benedenstroomse takken bepaalt (Frings & Kleinhans, 2008). Als onderdeel van de lange-termijn dynamiek van het splitsingspuntengebied is het ook belangrijk de dynamiek van de grind-zandovergang die in het splitsingspuntengebied aanwezig is in kaart te brengen (Kleinhans 2001, 2005; Frings, 2011). De Bovendelta wordt met de tijd steeds meer gedomineerd door grind (Frings et al. 2009), waardoor de riviereigenschappen (bodemruwheid, sedimenttransport, bodemvormen) op termijn mogelijk veranderen. De vraag is wat hiervan op langere termijn de gevolgen zijn voor waterveiligheid, scheepvaart en ecologie.

Kennis over de hoeveelheid en de samenstelling van het sediment dat de Rijn-Maas delta binnenkomt, hoe dit sediment zich verspreidt over de benedenstroomse takken van de splitsingspunten, welk deel van het sediment er wordt afgezet in de kribvakken en uiterwaarden, en welk deel er wordt doorgevoerd naar de Rijnmaasmonding vormt de basis voor het maken van langjarige prognoses van de rivierbodempligging (Ten Brinke et al., 2001). Daarnaast is deze kennis essentieel voor het bepalen van maatregelen om het sediment evenwichtig te verdelen over de takken, zodanig dat grootschalige erosie enerzijds en sedimentatie anderzijds worden beperkt. Dit geeft besparingen in baggeronderhoud en vermindert de problematiek rond de langjarige bodemerosie. Daarnaast leeft de vraag of in de Rijnmaasmonding het stopzetten van de zandwinning in sedimenterende takken effectief is voor het tegengaan van de erosie in andere takken. Ook hiervoor is kennis over hoeveel sediment de Bovendelta binnenkomt en hoe het zich binnen de delta verspreidt van belang.

Op dit moment lopen er uitgebreide programma's voor rivierherstel en -verruiming die primair gericht zijn op het vergroten van hoogwaterveiligheid en natuurherstel. De verwachting is dat deze rivierverruimingsmaatregelen lokaal leiden tot aanzanding in de hoofdgeul. Hierdoor kunnen baggerwerkzaamheden ter voorkoming van lokale ondieptes ten behoeve van scheepvaart toenemen. De verruimingsmaatregelen zullen naar verwachting een beperkt gunstige uitwerking hebben op de mitigatie van de lange-termijn bodemerosie in de Rijndelta (Sloff et al., 2014).

Daarnaast zullen de natuurontwikkelingsprojecten die de interactie tussen hoofdgeul en riviervlakte vergroten kunnen leiden tot een versterkt invangen van slib in de uiterwaarden (Middelkoop en Asselman, 1998), waardoor de hoeveelheid slib die nu in de Rijnmaasmonding terecht komt reduceert. Deze vraag speelt ook voor zand. Ook is de vraag relevant of de kribvakken in evenwicht blijven onder de veranderende condities. Bij die vraag speelt ook dat recent een groot aantal kribben in de Waal is verlaagd in het kader van Ruimte voor de Rivier. Een van de vragen gerelateerd aan het invangen van slib is wat hierbij de rol van vegetatie (soorten en verspreidingspatronen) is. Daarnaast is de toevoer van slib een belangrijke bovenstroomse randvoorwaarde voor de morfodynamiek in het Haringvliet en de Rijnmaasmonding, waar opslibbing van schorren c.q. kwelders van belang is voor de bescherming van de kustlijn bij stijgende zeespiegel. Anderszijds heeft een te grote concentratie slib zoals in de Eems-Dollard negatieve effecten op het ecosysteem, onder

andere door sterk verminderd doorzicht. Dit geldt in zekere mate ook voor het natuurgebied Biesbosch met een grote natuurwaarde, wat benedenstrooms van de Bovendelta gelegen is.

Sedimentatie in uiterwaarden leidt er ook toe dat Ruimte voor de Rivier maatregelen hun functie voor hoogwater verliezen. Dit leidt tot extra onderhoudsmaatregelen. Een langjarige kostenpost, omdat dit nooit eindigt aangezien er geen verplaatsende geulen meer zijn en uiterwaarden langzaam omhoog groeien. Beperking van erosie en sedimentatie in het riviersysteem kan flinke besparingen opleveren in het beheer en onderhoud van de watergangen en daardoor positief uitpakken voor de scheepvaart (grotere en meer stabiele aflaaddieptes). Het beperken of tegengaan van de langjarige bodemerosie in de Rijn beperkt ook de daarmee gepaard gaande problemen. Het voldoende in kaart brengen van sedimentfluxen naar en vanuit het systeem en tussen hoofdgeul, kribvakken en uiterwaarden draagt ook bij aan het behalen van de KRW-doelstellingen die voorschrijven dat onze wateren in een 'goede ecologische toestand' moeten verkeren.

1.3 Probleembeschrijving

Samenvattend spelen de volgende problemen in de wens om de ontwikkeling van de Nederlandse delta over de komende 100-200 jaar te voorspellen. We weten niet goed (a) hoeveel sediment de Bovendelta binnenkomt, wat de samenstelling daarvan is, en of daarin veranderingen optreden ten opzichte van het verleden, (b) hoe het sediment zich verdeelt over de benedenstroomse takken en wat dit betekent voor de stabiliteit van de splitsingspunten en voor de waterveiligheid in de benedenstroomse takken, (c) hoeveel sediment wordt doorgevoerd naar de Rijnmaasmonding. Om bovengenoemde in kaart te brengen zijn veldmetingen onmisbaar.

1.4 Opdracht

Het doel van deze pilotactiviteit is het in beeld brengen van de informatiebehoeftes gerelateerd aan het voorspellen van de ontwikkeling van de Bovendelta en het doen van aanbevelingen over monitoring om aan die behoefte te voldoen. Het gaat hier specifiek om monitoring waarmee inzicht wordt verkregen in de langzame morfodynamische veranderingen in het Bovendelta-gebied op een tijdschaal van 100-200 jaar.

Deze pilot maakt deel uit van de activiteiten van de NKWK-onderzoekslijn Rivieren (pilot A2; Schielen et al., 2016).

1.5 Aanpak en leeswijzer

De aanpak (met het hoofdstuk waarin dit beschreven wordt) is als volgt:

- Inventariseren van de informatiebehoefte bij enerzijds Rijkswaterstaat en anderzijds bij universiteiten en Deltares (hoofdstuk 2);
- Op een rij zetten van enkele aandachtspunten voor het opslaan van gemeten gegevens (hoofdstuk 3);
- Inventariseren van beschikbare metingen inclusief de huidige meetfrequenties en die in het verleden (hoofdstuk 4);
- Beschrijven van bestaande en innovatieve meetmethoden relevant voor de langzame morfodynamische verandering in de Bovendelta (hoofdstuk 5);
- Opstellen van aanbevelingen voor metingen (hoofdstuk 6).

1.6 Organisatie

De werkzaamheden binnen dit project zijn uitgevoerd door Deltares, de Technische Universiteit Delft (TUD), Universiteit Utrecht (UU) en Rijkswaterstaat. Het Deltares-team bestaat uit Frans Buschman, Thaiënne van Dijk en Rolien van der Mark (projectleider), het

TUD-team uit Astrid Blom, het UU-team uit Maarten Kleinhans en Hans Middelkoop en het RWS-team uit Ralph Schielen (opdrachtgever), Susanne Quartel, Arjan Sieben en Adri Wagener. Daarnaast zijn voor innovatieve akoestische technieken Mirjam Snellen (TU Delft) en Jim Best (University of Illinois) geraadpleegd.

1.7 Afbakening

In deze pilot is de Bovendelta gedefinieerd als de Niederrhein vanaf Xanten (km-827), de Bovenrijn, de Waal tot Vuren, de Nederrijn/Lek tot Hagestein, en de IJssel tot Kattendiep (zie Figuur 1.1). Er is geen plan opgesteld voor de Rijnmaasmonding en de Maas, maar in een later stadium kan voor deze rivieren gebruik worden gemaakt van deze rapportage voor de Bovendelta.

In de breedte van de rivier bestaat de rivier uit de hoofdgeul, kribvakken en uiterwaarden. In deze rapportage ligt de nadruk op de hoofdgeul, gedefinieerd als het gebied tussen de normaallijnen. Consequentie hiervan is dat we de slibproblematiek slechts gedeeltelijk meenemen in dit rapport.

We maken in deze rapportage onderscheid tussen projectmatige, reguliere en continue metingen. Projectmatige metingen zijn eenmalig. Reguliere metingen worden bijvoorbeeld ieder jaar uitgevoerd, terwijl continue metingen doorlopend worden uitgevoerd op plaatsvaste (MWTL) meetlocaties.

2 Informatiebehoefte

2.1 Informatiebehoefte rivierbeheerder

Rijkswaterstaat heeft in een notitie haar databehoeftes wat betreft de Nederlandse Rijn-Maasdelta geformuleerd. Onderstaand zijn die delen van de notitie die gaan over de langzame morfodynamische ontwikkeling op een tijdschaal van 100-200 jaar overgenomen. De volledige notitie is opgenomen als Bijlage A.

Monitoring in rivieren is gebaseerd op een informatiebehoefte die is afgeleid van de thema's van rivierbeheer en rivierbeleid. Dat betekent [voor morfologie] dat bekeken moet worden wat de invloed van rivierbodems op de functies en thema's van beleid en beheer, hoe de relevante delen van de rivierbodem zich gedragen op de termijnen van beleid en beheer en tenslotte hoe ingrepen (aanleg en onderhoud) dit gedrag beïnvloeden.

In de rijkswateren zijn hoogwaterveiligheid, zoetwaterhuishouding, natuur en vaarweggebruik als thema relevant. Een belangrijk operationeel aspect is onderhoud want rivierbodempluggingen funderen en bergen een groot volume aan kunstwerken en infrastructuur aan, in en onder de wateren.

De eerste vraag is hoe de bodem van de rijkswateren de genoemde thema's (hoogwaterveiligheid, zoetwaterhuishouding, natuur en scheepvaart) beïnvloedt. Vanzelfsprekend zijn voor die thema's meer parameters relevant dan morfologie. Bovendien varieert de invloed van morfologische parameters voor de verschillende thema's. Dat is uiteindelijk mede bepalend voor het formuleren van de informatiebehoefte.

Voor wat betreft de relevante rivierfuncties gaat het bij morfologie dus om bodemplugging, bodemruwheid, bodemvormen, substraat (bodemsamenstelling), vaargeulonderhoud en tot op zekere hoogte grondmechanische parameters.

Omdat morfodynamiek zich op verschillende tijd- en ruimteschalen manifesteert is een onderscheid nuttig van morfodynamiek op de langere termijn en grote schaal van het gehele riviersysteem en dynamica op de tijd- en ruimteschaal van maatgevende processen. De tijdschaal van de grootschalige rivierbodemplugging varieert voor wat betreft het rivierbeleid en -beheer van grofweg 10 jaar tot circa 100 á 200 jaar. De morfodynamiek op die lange termijn wordt meestal gezien als een trend onderweg naar een andere evenwichtsbodemplugging. Voor die evenwichtsbodempluggingen zijn met name de systeemforceringen (zeespiegelstijging, lange trends in hydrografen, bovenstroomse regulering van afvoeren en sediment en mobiliteit van de rivierbedondergrond) van belang. De horizon van deze langere termijn is onder meer afhankelijk van aard en leeftijd van beschikbare data uit het verleden waarmee de voorspelmodellen zijn geïkt. Kennis van deze lange termijn morfodynamiek is noodzakelijk voor het voorbereiden en evalueren van investeringen (aanleg en onderhoud) op de termijn van een of meerdere decennia, zoals in bijvoorbeeld het Deltaprogramma.

De variaties op deze lange termijn trends vormen de morfodynamiek op kortere termijn (minder dan een decennium) van het meeste rivierbeheer.

5 Informatiebehoefte trend morfodynamiek

De grootschalige meer-jaren dynamiek in rivierbodemplugging wordt voldoende meegenomen bij actualisatie van modellen die om de vijf jaar wordt gedaan. Afgezien van ingrepen als verruiming en zomerbedverdieping zijn deze grootschalige veranderingen in het zomerbed slechts in de orde van 0.1 m, de invloed op bijvoorbeeld hydraulische belasting niveaus is daarvan slechts een fractie. Dus, ten aanzien van de grootschalige morfologie in het zomerbed volstaat een jaarlijkse opname van de bodemplugging in het stroomvoerend profiel en een grofweg vijf-jaarlijkse actualisatie van modellen voor het vaststellen van de aspecten voor hoogwaterveiligheid, zoetwaterhuishouding en natuur. Dit kan met het bestaande monitoringsprogramma; hiervoor is dan ook geen aanvullende monitoring nodig.

Voorspellingen van toekomstige grootschalige ontwikkelingen van de rivierbodem worden veelal gemaakt door met modellen de trends van verschillende relevante fysische processen uit het verleden via calibratie van de modellen naar de toekomst te extrapoleren. Voorspellingen zijn daardoor voor een belangrijk deel een voortzetting van historische trends, maar wel met invloeden van gemodelleerde wisselwerkingen (trends hydraulica en morfologie, rivierbodem en ondergrond) en met gemodelleerde scenario's (klimaat, landgebruik, antropogene ingrepen).

Grootschalige (bodem)trends uit het verleden zijn daarom een belangrijke indicatie van grootschalige ontwikkelingen in de toekomst. De historische waarnemingen van de Rijntakken beschrijven de grootschalige rivierbodemonwikkeling op een tijdschaal van grofweg een eeuw. Historisch en geologisch onderzoek voor een groot deel van de rivieren biedt daarbij aanknopingspunten voor ouder systeemgedrag. Dat biedt een uitgangspunt voor een goed gecalibreerde en geverifieerde modellering van toekomstige grootschalige systeemtrend op een voldoende grote termijn¹. Ten aanzien van de grootschalige morfodynamiek wordt daarom gesteld dat er voldoende waarnemingen beschikbaar zijn om in modellen bodemtrends van een passende tijdschaal te kunnen iken en verifiëren. De grote waarde van deze historische waarnemingen illustreert meteen het grote belang om deze waarnemingen voort te zetten. Immers, om gesteld te blijven staan voor de toekomst is voortdurende aanvulling van deze database nodig.

De historische waarnemingen zijn niet alleen een goede basis van morfodynamische verwachtingen maar meteen ook de beperking ervan. Immers, deze set behoeft niet alle relevante trends bevatten, kan onvoldoende nauwkeurig zijn, of het zicht op potentiële trendbreuken in de toekomst beperken. Voor een goede extrapolatie van trends uit het verleden is ook begrip nodig van de wisselwerkingen (waterbeweging, bodem, ondergrond,..) en van de systeemforceringen (klimaat, menselijk ingrijpen). Voor wat betreft het laatste, menselijk ingrijpen speelt in toenemende mate een rol in zowel het sedimentaanbod (suppleren, baggeren en storten en fixatie van sediment in oevers,..) als in de systeemcapaciteit voor erosie of sedimentatie (landaanwinning, stroomregulering door normalisatie,..).

De grootste onzekerheden met het voorspellen van grootschalige toekomstige bodemtrends hebben te maken met

- 1) *de toekomstige mobiliteit van de rivierbodembodem in insnijdende trajecten, welke wordt bepaald door een onbekende en mogelijk heterogene ondergrond*
- 2) *het toekomstig rivierbeleid in Duitsland en Nederland ten aanzien van dalende rivierbodempliggingen*

8 Conclusie informatiebehoefte systeemkennis rivierbodembodem

Algemeen

- *voortzetting huidige monitoring (jaarlijkse bodempeiling van het normaalprofiel, 5 jaarlijkse bepaling van de bodemsamenstelling met ruimtelijke dekking)*
- *eventueel toegankelijker maken en gebruiken historische datadoorontwikkeling eenduidige methodiek voor definitie en bepaling van bodemparameters (bodemhoogte, bodemvormen, bodemruwheid, bodemsamenstelling)*
- *Formuleren scenario's ten aanzien van de belangrijkste onzekerheden die nu worden onderkend*
 - *de toekomstige mobiliteit van de rivierbodembodem in insnijdende trajecten*
 - *het toekomstig beleid in Duitsland en Nederland voor insnijdende rivierbodempligging*

Net als klimaat kent morfodynamiek een inherente onvoorspelbaarheid. Dat betekent dat behalve verdere ontwikkeling van kennis van fysische processen, ook inzet scenario's een strategie is om risico's van onzekerheden in morfodynamiek te beheersen. Met modellen is dit met verschillende graden van probabilistisch mogelijk. De waarde van nieuwe kennis van fysische processen voor rivierbeheer wordt bepaald door de mate waarin dergelijke risico's beter beheerst kunnen worden.

2.2 Informatiebehoefte kennisinstellingen

Net als Rijkswaterstaat hebben de kennisinstellingen (betrokken universiteiten en Deltares) de informatiebehoefte vastgesteld om de lange-termijn ontwikkeling van de Bovendelta van de Rijn op een tijdschaal van 50-100 jaar te kunnen voorspellen aan de hand van scenario's.

De volgende velddata zijn hiervoor noodzakelijk:

- We willen weten hoeveel sediment de Rijn-Maas delta binnenkomt, wat de samenstelling hiervan is, en wat hierin het aandeel spoeltransport, overig zwevend transport en bodemtransport is. We willen weten of in deze arriverende sedimentlast veranderingen optreden ten opzichte van het verleden. Deze informatie helpt om de randvoorwaarden van onze morfodynamische modellen te verbeteren, zodat we gerelateerde onzekerheden in modelresultaten kunnen reduceren.
- De concentraties spoeltransport in de Rijn bij Lobith zijn de afgelopen decennia flink afgenomen (orde 25%). Dit is gunstig voor drinkwaterinname, en vereist wellicht minder baggeren in het mondingsgebied. We willen weten wat de oorzaak is van

deze afname en hoe de toekomstige ontwikkeling van de hoeveelheid spoeltransport is.

- Een grove sedimentgolf vanuit Duitsland lijkt langzaam het Nederlandse deel van de Rijn steeds verder binnen te lopen. We willen weten of dat zo is, hoe snel dat gaat, en wat de gevolgen zijn op de lange termijn, voor de bodemontwikkeling, waterveiligheid en scheepvaart. In samenhang hiermee willen we weten hoe de samenstelling van het rivierbodempoppervlak en de ondiepe ondergrond zich ontwikkelt. Deze is in de afgelopen 15 jaar niet meer gemeten. Het is van belang de bodemsamenstelling in de hoofdgeul, kribvakken en uiterwaarden te kennen.
- We willen weten hoe het jaarlijkse volume aan sedimenttransport (spoeltransport, overig zwevend transport en bodemtransport) zich verdeelt over de benedenstroomse takken van de splitsingspunten Pannerdensch Kop en IJsselkop. Dit maakt het enerzijds mogelijk om in vervolganalyses uit te zoeken wat deze verdeling van de jaarlijkse sedimentlast voor consequenties heeft voor (a) de stabiliteit van de splitsingspunten, (b) de waterveiligheid in de benedenstroomse takken en (c) de baggerinspanningen ten behoeve van de scheepvaart. Anderzijds maken dergelijke data het mogelijk om in vervolganalyses sedimenttransportrelaties te verbeteren, wat de onzekerheid in de uitkomsten van morfodynamische modellen verkleint.
- We willen weten hoe het bodemniveau in de hoofdgeul, kribvakken en uiterwaarden zich ontwikkelen en wat het effect hierop is van de uitgevoerde rivierverruiming, kribverlagingen en langsdammen. Het is belangrijk om in kaart te brengen of en in welke mate de huidige bodemerosie (Blom, 2016) zich doorzet in komende 100-200 jaar.
- We willen weten wat het effect is van de (steeds grotere) schepen op de bodemligging. We willen weten of bodemerosie in de vaargeul door de scheepvaart toeneemt (of alleen versneld wordt) en of de scheepvaart de sedimentfluxen tussen de drie zones (vaargeul, kribvakken en uiterwaarden) verandert.
- We willen weten hoeveel sediment wordt doorgevoerd naar de benedendelta, en welk deel achterblijft in uiterwaarden en kribvakken en welk deel wordt gewonnen (zandwinning).
- We willen weten hoeveel sediment en met welke samenstelling wordt ingevangen in de uiterwaarden. We willen weten hoe de sedimentatietrend wordt beïnvloed door het reliëf van nevengeulen en door vegetatie.

Temporele trends in metingen van (a) bodemligging, (b) bodemsamenstelling en (c) de sedimentaanvoer vanuit Duitsland (spoeltransport, overig zwevend transport en bodemtransport) en sedimenttransport en -samenstelling op de riviertakken rond de splitsingspunten maken het ons mogelijk te onderzoeken in welke richting de Nederlandse Bovendelta zich op lange termijn ontwikkelt. Het is daarom van belang dat het sedimenttransport, de samenstelling van het transport, de samenstelling van de rivierbedding langjarig en systematisch gemonitord worden om de fundamentele brongegevens te leveren voor onderzoek naar de langjarige ontwikkeling van de Rijn-Maas delta. Hiervoor zijn veldmetingen onmisbaar.

Een goede database met historische gegevens (d.w.z. bovengenoemde metingen voor zover verricht in de afgelopen halve eeuw) is cruciaal voor het maken van voorspellingen. Het is van belang waarnemingen voort te zetten en goed vast te leggen, om te zorgen dat de database een langere periode omvat.

2.3 De verschillende kennisbehoefte nader beschouwd

Het valt op dat de kennisbehoefte van de rivierbeheerder en kennisinstellingen duidelijk van elkaar verschilt. Dit lijkt te komen, omdat de vragen van de twee partijen verschillend zijn door het feit dat de taken van de twee partijen van elkaar verschillen.

Waar het de rivierbeheerder met name gaat om gedegen beleid ten aanzien van waterveiligheid, scheepvaart, ecologie en onderhoud, gaat het de universiteiten en andere kennisinstellingen met name om (1) inzicht in welke fysische mechanismen sturend zijn wat betreft de lange-termijn (over de komende 50-200 jaar) morfodynamische ontwikkeling van het riviersysteem, (2) inzicht in hoe deze mechanismen de lange-termijn morfodynamische ontwikkeling beïnvloeden, (3) de ontwikkeling van scenario's voor de sturende parameters, (4) de verdere ontwikkeling van modellen om ze geschikt te maken voor lange-termijn morfodynamische berekeningen, (5) efficiënte inzet van deze modellen in lange-termijn berekeningen, en (6) data die nodig is voor de kalibratie en validatie van deze modellen.

Onder punt (3) gaat het om scenario's voor (a) zeespiegelstijging en eventueel (in het geval het toekomstig beleid onduidelijk is) de waterstand in het IJsselmeer, (b) sedimentaanvoer vanuit Duitsland, onderverdeeld in grind, zand en de fijnere sedimentlast, (c) de uitwisseling van sediment tussen hoofdgeul en uiterwaarden, en (d) verdeling van grind, zand en de fijnere sedimentlast over de benedenstroomse takken van de splitsingspunten.

De NKWK Onderzoekelijk Rivieren is een goed platform om een gezamenlijk plan te maken voor de noodzakelijke stappen om uiteindelijk de lange-termijn (over de komende 50-200 jaar) morfodynamische ontwikkeling van de Rijn-Maas delta te kunnen voorspellen.

3 Dataopslag en -toegankelijkheid

Deze pilot gaat over het opzetten van een monitoringsplan, en niet over het opslaan van ingewonnen gegevens. Echter willen we hier wel alvast enkele elementen aanstippen, omdat het gaat om het inwinnen van data gedurende een groot aantal jaren en omdat de data ook over een groot aantal jaren nog toegankelijk moet zijn. Het is zinloos data in te winnen als de data niet goed worden beheerd.

Punten van aandacht zijn de volgende:

- De ontwikkelingen qua ICT gaan snel. Data die nu worden ingewonnen zijn misschien over 10 jaar niet meer te openen, omdat nieuwere software niet met bepaalde oude bestandsformaten overweg kan. Het verdient aanbeveling om de data op te slaan in een internationaal erkend, gestandaardiseerd formaat of simpelweg platte tekst.
- We bevelen aan ruwe data ook op te slaan.
- In het verleden zijn er grote, waardevolle meetcampagnes geweest. Het is belangrijk om nu al deze data bij elkaar te zoeken en duurzaam op te slaan. Er zijn veel data verloren gegaan ten aanzien van sedimenttransport. Het betreft bijvoorbeeld opgeleverde data uit de onderzoeken van Maarten Kleinhans, Roy Frings, Antoine Wilders en uit eerdere studies. Daarnaast liggen er datasets in verschillende bureaulades op harde schijven, en zijn weinig data globaal extern toegankelijk. Het opsporen en redden van data uit oude meetcampagnes levert mogelijk veel meer aan kennis en inzicht op dan we nu zouden kunnen gaan verzamelen, aangezien een grondige transportmeting miljoenen kost.
- We bevelen dus aan om data duurzaam op te slaan en ook toegankelijk te maken voor externen. Het zou goed zijn als er één systeem of portal komt waar alles te vinden is. Op dit moment zijn er verschillende portals voor verschillende datasets in de lucht. Er is een goed datamanagementsysteem (DMS) nodig. Enkele initiatieven zijn het vermelden waard.
 - Het Landelijk Opslagstelsel Lodingen (LOL) wordt momenteel gevuld met data. Het is de bedoeling dat half 2017 de data door externen kan worden bekeken (metadata) en gedownload. Het betreft hier een systeem waar, voor zover bekend, alleen lodingen in komen. Door het crashen van het systeem in 2016 is een deel van de informatie verloren gegaan. De database wordt nu langzaam weer gevuld.
 - Via onder andere “Waterbase”, “Matroos”, “waterinfo.rws.nl” en “watergegevens.rws.nl” zijn gegevens van afvoeren en waterstanden te downloaden. Dit zijn op zich goed-werkende, veel gebruikte systemen waar data van tientallen jaren terug te vinden zijn. Mogelijk kunnen sommige databases worden geïntegreerd om kosten te besparen en zoeken eenvoudiger te maken.
 - In de NKWK 2016-pilot C1 heeft een inventarisatie van data-ontsluiting voor rivieren plaatsgevonden (Spruyt, 2017). Er bestaan al flink wat dataportalen, webviewers en informatiehuizen. Aanbevolen wordt om (1) een “informatiehuis Rivieren” op te zetten, waarbij aangesloten wordt op de informatiehuizen Marien en Water, en (2) het opzetten van een dataportal/webviewer voor een concrete toepassing.
 - Voor het opzetten van een datamanagementsysteem (DMS) dient te worden aangesloten bij bestaande initiatieven, zodat kennis en ervaringen kunnen worden meegenomen.
 - Er loopt een initiatief vanuit Kustgenese. Dit is een vervolg op het systeem dat was opgezet voor de zandmotor, opgezet door Deltares met OpenEarth.

- Daarnaast is er een initiatief met betrekking tot het opzetten van een meetcampagne bij het Amelander Zeegat.

4 Overzicht metingen

4.1 Inleiding

De beschikbaarheid van metingen in de hoofdgeul is in tabellen weergegeven voor de volgende variabelen, met een definitie waar nodig:

1. afvoer
2. waterstand
3. bodemniveau
4. sedimenttransport
 - a. spoeltransport, gedefinieerd als transport van deeltjes kleiner dan 0,06 mm die in waterkolom blijven (Vlugter grens)
 - b. overig zwevend transport, gedefinieerd als transport van sediment groter dan 0,06 mm (Vlugter grens)
 - c. bodemtransport, gedefinieerd als transport van materiaal dat rolt en salteert over de bodem.
5. bodemsamenstelling
 - a. bodemoppervlak (0-30 cm beneden bodemoppervlak)
 - b. substraat (30-300 cm beneden bodemoppervlak)

Alle metingen (ook door externen) moeten voldoen aan de Nederlandse Normen voor Hydrografische Opnemingen. De metingen zijn projectmatig, regulier of continu. Metingen die alleen bij hoogwater worden uitgevoerd zijn bijvoorbeeld projectmatig.

Het zogenaamde **hoogwaterdraiboek** voor het doen van specifieke metingen tijdens hoogwater gaat een rol spelen vanaf 12-13 m + NAP bij Lobith. Dan worden voor iedere 10 cm toename van de waterstand met ADCP verticale snelheidsprofielen gemeten in raaien dwars op de rivier. Dit wordt gedaan boven- en benedenstrooms van de twee grote splitsingspunten om de verdeling van afvoeren te bepalen over de Rijntakken voor iedere 10 cm toename van de waterstand. Ook wordt tijdens hoogwater de bodemligging tussen Pannerden en Driel gemeten. Er worden geen andere morfodynamische metingen tijdens hoogwater gedaan.

Onderdeel van het regulier meetprogramma is het inmeten van de bodemhoogte in kribvakken op de Bovenrijn en Waal (100 km rivier, contactpersoon Frans Berber). Dit gebeurt eens in de 3 jaar, en staat voor dit jaar op de agenda zodra er een hoogwater zich aandient.

Er is geen **laagwaterdraiboek** voor het doen van specifieke metingen tijdens laagwater. De reguliere metingen dekken dit voldoende af (persoonlijke communicatie Adri Wagener).

4.2 Afvoer

raai	frequentie	instrument	locatie
Niederrhein	dagelijks sinds 1814	ADM plus rating curve	Rees
Bovenrijn	dagelijks sinds 1901	Q-f	Lobith***
Waal	Dagelijks sinds 1989	Q-h	Pannerdensche Kop
Waal	Dagelijks sinds 1989	Q-h	Tiel
Waal	dagelijks	?	Werkendam
Nederrijn	dagelijks	?	Driel boven
IJssel	dagelijks	?	Olst

* Bij lage afvoer is de afvoer bij Emmerich (Rees?) nauwkeuriger dan die bij Lobith (info Frank Kok).

** Bij de berekening van het debiet bij Lobith (obv Q-h relatie) wordt gecorrigeerd voor (1) stuweffecten tgv Driel, (2) hysteresis, en (3) lange-termijn bodemerosie (info Frank Kok).

Het feit dat de bodemligging bij Lobith sinds 1990 stabiliseert en niet of nauwelijks meer wordt beïnvloed door de lange-termijn bodemerosie in de Bovenrijn van ongeveer 2 cm/jaar, kan betekenen dat nu door de gehanteerde Q-f relatie met daarin een correctie voor bodemerosie nu niet meer accuraat is. We raden aan dit te analyseren.

4.3 Waterstand

raai	frequentie	instrument	locatie
Niederrhein	dagelijks sinds 1814	vlotter	Rees
Bovenrijn	dagelijks sinds 1901	vlotter	Lobith
Pannerdensch Kanaal	dagelijks	vlotter	Pannerdensche Kop
Waal	dagelijks sinds 1901	vlotter	Nijmegen haven Dodewaard Tiel Zaltbommel Vuren
Nederrijn/Lek	dagelijks	vlotter	Arnhem Driel boven Amerongen beneden Culemborg burg Hagestein boven
IJssel	dagelijks	vlotter	De Steeg Doesburg brug Zutphen Noord Deventer Olst Katerveer Kampen Keteldiep

4.4 Bodemniveauroai

raai	Frequentie	Instrument	locatie
Niederrhein	1934, 1960, 1975, 1980, 1985, 1991, 1995, vanaf 2000 iedere twee jaar	Singlebeam echo-soundings	iedere ~100 m, meerdere locaties over het dwarsprofiel
	2010, 2014, 2015	Multibeam echo-soundings	-
Boverrijn	1934, 1942, 1948, 1950, 1953-1969, 1971-1976, 1978-1983, 1985-1993, 1995-1999, 1999-2010	Singlebeam echo-soundings	****
	1999-2015 twee keer per jaar	Multibeam echo-soundings	Tussen normaallijnen
	**** Tweewekelijks ten behoefte van scheepvaart	Multibeam echo-soundings	Vaargeul
Waal	1926, 1934, 1942, 1948, 1950, 1953-1969, 1971-1976, 1978-1983, 1985-1993, 1995-1999, 1999-2010	Singlebeam echo-soundings	****
	1999-2015	Multibeam echo-soundings	Tussen normaallijnen
	**** Tweewekelijks ten behoefte van scheepvaart	Multibeam echo-soundings	Vaargeul
	**** Tweewekelijks ten behoefte van scheepvaart	Multibeam echo-soundings	Vaargeul
Pannerdensch Kanaal	1928, 1933, 1937, 1938, 1947, 1950, 1952-1964, 1966-1975, 1977-1994	Singlebeam echo-soundings	****
	2002-2015	Multibeam echo-soundings	Tussen normaallijnen
Nederrijn/Lek	1928, 1933, 1937, 1938, 1940, 1947, 1950, 1952-1991, 1993	Singlebeam echo-soundings	****
	2002-2015	Multibeam echo-soundings	Tussen normaallijnen
IJssel	1941, 1947, 1950, 1952-1964, 1966, 1968-1996, 1998, 1999, 2001, 2002	Singlebeam echo-soundings	****
	2002-2015	Multibeam echo-soundings	Tussen normaallijnen

**** Binnen dit project is dit niet volledig duidelijk geworden.

4.5 Sedimenttransport

4.5.1 Spoeltransport

raai	frequentie, duur	instrument	locatie
Niederrhein	dagelijks sinds 1983	bemonstering met emmer 50 cm onder het wateroppervlak in het midden van de rivier, filteren, drogen en wegen	Emmerich, permanent station
	sinds 1976 (af en toe)	afzuigbuisjes en metingen bodemtransport	iedere ~10 km, meerdere locaties en dieptes over het dwarsprofiel
Bovenrijn	dagelijks 1 meting, sinds op z'n minst 1990	pomp 1m beneden het wateroppervlak	Lobith ponton

4.5.2 Overig zwevend transport

raai	frequentie, duur	instrument	locatie
Niederrhein	sinds 1976 (af en toe)	afzuigbuisjes en metingen bodemtransport	iedere ~10 km, meerdere locaties en dieptes over het dwarsprofiel
Waal	1998 (November flood event)	AZTM	meerdere locaties en dieptes over het dwarsprofiel
IJssel	2004 (January flood event) , 2004 (September low flow conditions)	AZTM	

4.5.3 Bodemtransport

raai	frequentie, duur	instrument	Locatie
Niederrhein	bijna ieder jaar sinds 1976	Arnhm-Koblenz bodemtransport sampler	iedere ~10 km, meerdere locaties over het dwarsprofiel
Waal	1998 (November flood event)	Hely Smith bodemtransport sampler * en dune tracking**	* meerdere locaties over het dwarsprofiel ** verschillende takken van het splitsingspunt
Pannerdensch Kanaal	2002 (November flood event)** , 2004 (Januari flood event)*,** , 2004 (September low flow conditions)*	Delft Nile bodemtransport sampler* endune tracking**	* meerdere locaties over het dwarsprofiel ** verschillende takken van het splitsingspunt

4.6 Bodemsamenstelling

4.6.1 Bodemoppervlak (0-30cm)

raai	frequentie, duur	instrument	locatie
Niederrhein	1981, 1987, 1992, 1993, 2003, 2004, 2005	schip met duikersklok Bevroren monsters, bodemmonsters en lasertechnieken	varierende diepte tot 30 cm Beschikbare data per ~500 m in verschillende jaren Meerdere meetpunten per dwarsdoorsnede
Bovenrijn	1951, 1966, 1976, 1984, 1995*	Monstername	5-10cm toplaag per rivierkilometer
Waal	1966, 1976, 1984, 1995*	*Van Veen Happer	Op 3 locaties in het dwarsprofiel
Pannerdensch Kanaal	1966, 1976, 1984, 1995*		
Nederrijn/Lek	1966, 1976, 1984, 1995*		
IJssel	1951, 1966, 1976, 1984, 1995*		

4.6.2 Substraat (30cm tot 300 cm beneden bodemoppervlak)

raai	frequentie, duur	Instrument	locatie
Niederrhein	1987, 1993, 2000, 2003	schip met duikersklok Bevroren monsters, bodemmonsters en lasertechnieken	Tot 50 cm diepte Beschikbare data per ~500 m in verschillende jaren Meerdere meetpunten per dwarsdoorsnede
Bovenrijn	2000	Lithologische boringen	Tenminste 3 m diep
Pannerdensch Kanaal	2000		ledere 400 m
IJssel	2002	(vibrocores) en seismisch (geluidsgolven)	Meerdere meetpunten per dwarsdoorsnede

5 Inventarisatie van (nieuwe) meetmethoden

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft meetmethoden waarmee variabelen die belangrijk zijn bevonden bij de informatiebehoefte bepaald kunnen worden. Zowel methoden die al jaren succesvol worden toegepast in Nederland als meer innovatieve methoden worden beschreven. Het doel van deze inventarisatie is niet om compleet te zijn, maar om de voor- en nadelen van de belangrijkste meettechnieken te geven. Meettechnieken en eventueel daarbij behorende methoden voor het bepalen van de variabelen die relevant zijn voor het zichtbaar maken van langzame morfodynamische trends (100-200 jaar) worden beschreven.

Voor iedere meettechniek is de status in Nederland en een Technology Readiness level (TRL) gegeven. De TRL geeft aan hoe ver de techniek is ontwikkeld en in hoeverre de techniek operationeel wordt toegepast. De schaal loopt van 1 (er is een meetprincipe beschreven) tot 9 (de meetmethode wordt operationeel op verschillende plaatsen toegepast). Een beschrijving per schaal staat beschreven in bijlage B.

Eerder beschreef Schroevers et al. (2014) de informatiebehoefte voor waterstand, afvoer en bodemligging en de technieken relevant voor die informatiebehoefte. In dit hoofdstuk zijn deze technieken aangevuld en geactualiseerd voor het monitoren van langzame variaties in morfodynamiek. Voor de langzame variaties in morfodynamiek zijn sedimenttransport en de bodemsamenstelling relevant. Voor de bodemsamenstelling wordt onderscheid gemaakt in het classificeren of indelen van de korrelgrootte in klassen (bijvoorbeeld grindig zand of siltig zand) en het bepalen van de korrelgroottesamenstelling (zeefkromme) op een locatie. Tabel 5.1 geeft een overzicht van de methoden, welke in het vervolg van het hoofdstuk zijn uitgewerkt.

Tabel 5.1 Overzicht van meettechnieken en methoden voor het monitoren van morfodynamiek, inclusief de frequentie, de Technological Readiness Level (TRL) en de status van de techniek in Nederland.

Wat	Frequentie	Techniek/Methode	TRL	Status in Nederland
Afvoer	Continu	Akoestische debietmeter	9	Meerdere locaties in meetnet
	Continu	Horizontale ADCP / index velocity method – velocity profiling method – WUR method	9- 7- 6	Er zijn meerdere HADCP's geplaatst, maar debiet wordt niet bepaald of gepubliceerd.
	Continu	Uit relatie met waterstand	-	Q-h en Qf relaties worden op meerdere locaties toegepast
	Regulier of projectmatig	ADCP vanaf een schip	9	Vaak als validatie (regulier en tijdens hoge afvoeren projectmatig)
	Regulier	ADCP vanaf veerpont	7	In Marsdiep continu uitgevoerd, in Maas pilot
Waterstand	Continu	Digitale niveaumeter	9	Op veel plaatsen
	Continu	Radarniveaumeter	9	Vervangt digitale niveaumeter; al op veel locaties
Bodemniveau	Regulier	Multibeamecholood (MBES) vanaf een schip	9	Standaard techniek
	Regulier	Singlebeamecholood (MBES) vanaf een schip	9	Gebruikt ondiepe locaties

	Projectmatig (maar wel doorlopend in tijd)	Uit temperatuurmeting met glasvezelkabel (ruimtelijk dekkend) erosie en sedimentatie bepalen	7 (5)	Getest in Nederland
	Projectmatig	Light Detection And Ranging (LIDAR) voor o.a. bodemhoogte uiterwaarden	9	Standaard toegepast voor droogvallende gebieden
Spoel-transport	Continu	Emmer vullen en filteren	9	Standaard bij Lobith
	Projectmatig	Optical Backscatter (OBS) in combinatie met snelheidsmeting	9	Gebruikt.
Overig zwevend transport	Projectmatig	Akoestische zandtransport meter (AZTM)	9	Vooraf in jaren '80 en '90 gebruikt.
	Projectmatig	Waterkolomgegevens van backscatter MBES	7	Niet of nauwelijks toegepast nog.
Bodem-transport	Projectmatig	Nile sampler plaatsen op bodem om sediment in te vangen	8	Wordt iedere 5-10 jaar toegepast, maar laatste metingen van 2002
	Projectmatig	Passieve akoestiek	6	Geen voorbeelden bekend.
	Projectmatig	Verticale bodemdynamiek uit serie MBES opnamen	7	Vaker in kustgebied gebruikt, ook in rivieren.
	Projectmatig	Dune tracking uit series van MBES opnamen	7	Op zee toegepast en in de Waal is een pilot uitgevoerd.
	Projectmatig	ADCP vanaf een schip om bodemsnelheid te meten	5	Niet toegepast.
Bodem-samenstelling toplaag (0-30 cm)	Projectmatig	Bodemmonsters nemen (met van Veen happer, loden pot, box cores) en analyseren op korrelgrootte in laboratorium	9	Deze methode wordt toegepast, maar details van uitvoering zijn niet vastgelegd.
	Projectmatig	Korrelgrootteclassificatie uit backscatter van MBES	5-8	Techniek is op zee en op enkele plaatsen in rivieren toegepast.
	Projectmatig	Flying eyeball: camera die tot dichtbij bodem wordt gebracht	6	Wordt in november 2017 toegepast
	Projectmatig	Basegrain: op basis van onderwaterfoto's	5	Testen
	Projectmatig	Medusa: classificatie m.b.v. radioactiviteit sediment	8	Wordt toegepast
Bodem-samenstelling substraat (30-300 cm)	Projectmatig	Boringen	9	In rivieren en zee standaard.
	Projectmatig	Chirp sub-bottom profiler geeft de structuur van de bodem	9	Nog niet of nauwelijks toegepast
	Projectmatig	Parametric echosounder (PES)	7	Nog niet of nauwelijks toegepast
	Projectmatig	Andere sub-bottom profilers (X-star en ground penetrating radar)	9	Op zee en in rivieren veel toegepast.
	Projectmatig	Akoestiek met glasvezel om bodemvormen te monitoren	6	Nog nauwelijks toegepast

5.2 Afvoer

5.2.1 Akoestische debietmeters (ADM)

In Nederland wordt op enkele tientallen locaties een Akoestische Debietmeter (ADM) gebruikt in rivieren en kanalen. Dit instrument wordt ook looptijdmetre genoemd. De tijd wordt gemeten tussen het zenden van een akoestisch signaal van de ene oever tot het ontvangen van dit signaal schuin tegenover aan de andere oever. Door twee signalen kruislings over de rivier of kanaal te sturen, kan uit de tijdverschuiving de stroomsnelheid gemiddeld over de breedte op de hoogte van de zenders en ontvangers worden bepaald. De hoogte waarop de zenders en ontvangers worden geplaatst is vaak 0,37 maal de gemiddelde diepte. Met een k-factor wordt de stroomsnelheid op de gemeten hoogte vertaald naar dieptegemiddelde stroomsnelheid. Wanneer de zenders en ontvangers op 0,37 maal de diepte staan, wordt de k-factor 1 verondersteld uitgaande van een logaritmisch profiel. Uitgaande van een logaritmisch profiel is de fout door de geschatte ruwheid op die diepte het kleinst. In werkelijkheid zal het snelheidsprofiel afwijken van logaritmisch wanneer duinen aanwezig zijn of dichtbij de oever (Guo en Julien, 2005), waardoor ook 0,37 maal de diepte een systematische fout gemaakt kan worden. Uit de waterstand gemeten bij de ADM wordt de natte doorsnede bepaald. Vermenigvuldigd met de natte doorsnede levert dit het debiet.

De methode kan ook in nevengeulen en uiterwaarden worden toegepast, mits de zender en ontvanger vrij zicht hebben. Normaal zijn kabels noodzakelijk voor het overbrengen van het timing signaal en de data van de ene naar de ander zijde van de waterloop. De timing is nodig om er voor te zorgen dat de akoestische zender en ontvanger exacte "gelijk" lopen zodat de looptijd van de akoestische pulsen tot op de picoseconde nauwkeurig gemeten kan worden. Er zijn systemen zonder kabels beschikbaar, waarbij synchronisatie van zender en ontvanger plaats vinden via GPS en LAN of bluetooth. Deze methode maakt inzet van een ADM flexibeler en bespaart kosten, maar er is nog geen ruime ervaring mee.

Nadelen van een ADM zijn dat de zenders, ontvangers en kabels ertussen onderhouden (4 stuks) onderhouden moeten worden en dat de ruwheid (k-factor) en natte doorsnede nauwkeurig bekend moeten zijn en bijgesteld moeten worden bij veranderende omstandigheden. Windeffecten op het stromingsprofiel worden niet meegenomen en bij (erg) hoge waterstand wordt de onzekerheid groter doordat k-factor aanzienlijk groter wordt dan 1. Het grote voordeel is dat een ADM een robuust breedtegemiddelde stroomsnelheid oplevert, waaruit ook bij lage en hoge rivierafvoeren afvoer bepaald kan worden. Een beperking is dat debiet niet nauwkeurig wordt bepaald en vaak niet wordt uitgegeven, wanneer de uiterwaarden meestromen. Dit wordt zoveel mogelijk voorkomen door een locatie te kiezen met hoge kaden of dijken.

Technology Readiness Level: Operationeel. TRL 9.

Status in Nederland: De methode wordt toegepast door RWS.

5.2.2 Horizontale ADCP

Wereldwijd is een horizontaal opgestelde ADCP een geaccepteerde methode voor het meten van stroomsnelheden, waaruit debieten worden berekend. Op één hoogte wordt in een serie van meetcellen stroomsnelheid gemeten op basis van Doppler verschuiving van het uitgezonden en weerkaatste akoestische signaal. Debiet kan op verschillende manieren worden bepaald als functie van de natte doorsnede (waterstand) en gemeten snelheden.

De meest gebruikelijke methoden om de dwarsdoorsnede gemiddelde stroomsnelheid te bepalen zijn de Velocity Profiling Method (VPM) en de Index Velocity Method (IVM). Bij VPM

is het uitgangspunt dat een verticaal stromingsprofiel en horizontaal stromingsprofiel te bepalen is uit theorie. In veel gevallen wordt een logaritmisch profiel gebruikt als benadering voor het stromingsprofiel. De IVM gaat uit van een empirisch bepaalde relatie tussen de door de HADCP gemeten stroming en de gemiddelde stroming bepaald uit debietmetingen vanaf schepen. Hoe complex de IVM of VPM relaties zijn en of deze wijzigen met de waterstand hangt af van de locatie. Bij beide methoden kan de verleiding ontstaan om een te eenvoudige relatie op te stellen, die daardoor niet nauwkeurig is over het gehele bereik. Vanwege de fysische basis is bij VPM de relatie soms te extrapoleren buiten het validatiebereik, maar voor de IVM wordt de gemaakte fout buiten validatiebereik mogelijk te groot.

Daarnaast heeft de Universiteit van Wageningen een methode ontwikkeld die een combinatie is van indexing en profiling (Hoitink et al., 2009). Deze semi-deterministische en semi-stochastische methode heeft momenteel een vaste breedte, terwijl die op sommige locaties afhankelijk is van de waterstand. Het is niet veel werk de methode aan te passen om de breedte waterstandsafhankelijk te maken.

Voor ieder van deze 3 methoden geldt dat zij een continue afvoer opleveren, zolang de uiterwaarden niet meestromen. Een voordeel ten opzichte van een ADM is dat bij een HADCP slechts één locatie hoeft te worden onderhouden en geen kabels onder de rivier door gelegd hoeven te worden.

Technology Readiness Level

- De index velocity methode is operationeel voor gebruik met HADCP's en beschreven door de USGS. De methode is in gebruik in de VS en Groot Brittannië en door RWS (zie status): TRL 9.
- De Velocity profiling methode wordt gebruikt op enkele locaties in Frankrijk. Prototype operationeel: TRL 7.
- De methode van Wageningen is nog in ontwikkeling en op het niveau van een prototype: TRL 6.

Status in Nederland

- RWS maakt al vele jaren gebruik van HADCP's in het Rijn-Maasmondgebied voor het bepalen van stroming, waar geen debietberekening aan is gekoppeld. Uit deze snelheidsmetingen kan debiet worden bepaald. Door middeling over getijperioden kan een rivierdebiet worden bepaald. In de Rijn bij Lobith en in de IJssel heeft Rijkswaterstaat in 2011 en 2013 HADCP's geplaatst om debiet te bepalen.
- De fabrikant leverde de HADCP's met een rekenmethode gebaseerd op de IVM. De eenvoudige relatie die is opgesteld voor Lobith, is voldoende nauwkeurig tot 4500 m³/s, maar vertoont daarboven een onderschatting. Dit zou opgelost kunnen worden door het opstellen van een iets geavanceerdere (maar nog steeds vrij eenvoudige) relatie. De afvoeren van Lobith in Waterbase zijn afkomstig van een Q-f relatie. De afvoer gebaseerd op stroomsnelheden van de HADCP worden (nog) niet openbaar beschikbaar gesteld. Om vertrouwen te krijgen in dit debiet op deze belangrijke locatie, wenst Rijkswaterstaat een periode de afvoer op basis van de snelheidsmeting met de HADCP te vergelijken met de afvoer uit de Q-f relatie.
- De methode van de Universiteit Wageningen is toegepast voor enkele locaties in Nederland. Vooral vanwege de huidige beperking van een constante breedte is dit traject niet doorgezet voor de Nederlandse rivieren.

5.2.3 Uit waterstandsmetingen

Als voor een bepaalde dwarsdoorsnede een aantal afvoeren is gemeten, kan de relatie tussen de afvoer in de meetsectie en de bijbehorende waterstand worden bepaald. De resultaten van afvoermetingen en bijbehorende waterstanden worden gewoonlijk uitgezet als punten in een afvoer tegen waterstand (Q-h) diagram. Door deze punten kan een regressielijn worden bepaald die zo goed mogelijk de metingen benadert. Hiervoor is een voldoende aantal metingen nodig, verdeeld over het volledige bereik van mogelijk optredende waterstanden. Een methode om de relatie te bepalen tussen afvoer en waterstand is het bepalen van parameters a en b met een lineaire kleinste kwadratenmethode in:

$$Q = a(h - h_0)^b$$

waarin h_0 de waterstand is waarbij geen afvoer optreedt. De aanname bij het toepassen van deze methode is dat de relatie tussen afvoer en relatie een gladde polynoom is die met parameters a en b beschreven kan worden.

Wanneer een Q-h relatie onvoldoende nauwkeurige resultaten geeft, kan de relatie om afvoer te bepalen worden uitgebreid met waterstand(en) op andere locatie en kunnen correcties worden uitgevoerd. Een dergelijke relatie wordt een Qf relatie genoemd. Bij Lobith wordt de afvoer die beschikbaar is in Waterbase met een dergelijke relatie bepaald. Omdat deze locatie van groot belang is voor de Bovendelta wordt de Qf relatie hieronder toegelicht.

De afvoer bij Lobith wordt sinds 1998 bepaald met de volgende Qf relatie (Ogink en Stolker, 2004):

$$Q_L = a_1 H + a_2 H^2 + a_3 H^3 + a_4 H^4 + a_5 \frac{dH}{dt_0} + a_6 Dagnr + a_7 dHd_1^2 + a_8 dHd_2^2 + C$$

$$dHd_1 = H_{drielfboven} - H_{drielfbeneden}; dHd_2 = 0 \text{ als } Q_{driel} \leq Q_0$$

$$dHd_1 = 0; dHd_2 = H_{drielfboven} - H_{drielfbeneden} \text{ als } Q_{driel} > Q_0$$

Met daarin:

H= waterstand bij Lobith

$$\frac{dH}{dt_0} = \text{waterstandsverandering bij Lobith over het voorgaande etmaal (cm/uur)}$$

$Dagnr$ = het dagnummer na 1-1-1956

$a_1 - a_8$ = regressiecoëfficiënten

Q_0 = drempelwaarden afvoer Nederrijn voor de modellering van stuweffecten.

C = een constante

In de vergelijking komt naast de waterstand bij Lobith ook de verandering in tijd voor (dH/dt_0). Ogink en Stolker (2004) adviseerden deze aan te passen naar de methode van Jones, welke een fysische basis heeft. De term met $Dagnr$ corrigeert voor de netto erosie (bodemdaling) die plaats vindt bij Lobith. Door deze netto erosie neemt de waterstand bij een zelfde afvoer af. Bij gemiddelde rivierafvoer is deze afname ongeveer 2 cm/j over de periode 1901-2000. Bij hoge rivierafvoer is er nauwelijks een gemiddelde waterstands daling in die periode. De invloed van deze netto erosie bij Lobith ligt jaargemiddeld in de orde van tientallen m^3/s . Het is bij dit projectteam onbekend hoe de correctie momenteel wordt toegepast en of daarbij rekening is gehouden met de vermindering van de netto erosie bij Lobith. Tot slot, zijn de termen met waterstanden bij Driel nodig om het backwatereffect door de stuw bij Driel te kunnen corrigeren.

Het voordeel van Q-h of Qf relatie is dat hieruit continu afvoer kan worden bepaald zonder dat een continue stroommeting noodzakelijk is. Een nadeel is dat de onzekerheid van de bepaalde afvoer toeneemt in het afvoerregime waar weinig gemeten afvoeren beschikbaar zijn, zoals bij extreme hoge afvoeren.

Technology Readiness Level

Het gaat voor deze methode vooral om het bepalen van de afvoer waterstandsrelatie en niet zozeer om het bepalen van afvoer uit een directe meting. Om deze reden wordt geen TRL gegeven.

Status in Nederland

RWS maakt al vele jaren gebruik van Q-h en Qf relaties. Voor de Bovendelta kan deze methode goed worden toegepast, omdat het getij geen of nauwelijks invloed meer heeft.

5.2.4 ADCP vanaf een schip

Om afvoer bepaald bij continue meetlocaties te valideren en om afvoer te bepalen op locaties waar geen ADM of HADCP is geplaatst, voert Rijkswaterstaat regelmatig metingen uit met een Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) vanaf een schip. Onder de ADCP wordt de stroomsnelheid in drie richtingen gemeten in het hele profiel, behalve direct onder de ADCP en de onderste 6% van de bemeeten diepte. Door extrapolatie van de stroomsnelheid naar de bodem, het wateroppervlak en de oever wordt debiet bepaald uit iedere overtocht. Door minimaal 4 overtochten te maken en debiet hieruit te middelen, wordt een betrouwbaar debiet bepaald, mits de afvoer niet verandert tijdens de overtochten.

Technology Readiness Level

Afvoer op basis van ADCP metingen vanaf een schip worden wereldwijd standaard toegepast. Het is volledig operationeel: TRL 9.

Status in Nederland

RWS maakt al vele jaren gebruik van ADCP metingen vanaf een boot als validatie. Het gehele jaar door worden bij verschillende afvoerniveaus metingen uitgevoerd.

5.2.5 Vanaf veerponten met een ADCP

Het is mogelijk om een veerpont uit te rusten met een ADCP en volledig automatisch afvoer te bepalen uit de overtochten zonder tussenkomst van een surveyor. De meetgegevens worden verstuurd via telemetrie (bijv. gsm) naar een server, waar vervolgens automatische verwerking en validatie plaatsvindt. De resulterende afvoeren worden steekproefsgewijs gevalideerd door een medewerker.

Voordelen voor afvoerbepaling uit metingen vanaf een veerpont zijn dat metingen beschikbaar komen met grote regelmaat, het debiet is gebaseerd op stroommeting in meer dan 50% van de natte doorsnede en het volledig automatisch bepaalde debiet.

Nadelen zijn dat een veerpont vaak niet 's nachts vaart en niet bij extreem hoge afvoer.

Technology Readiness Level

De methode is al 10 jaar in gebruik op de veerdienst van Den Helder naar Texel (Buijsman en Ridderinkhof, 2007). Toch krijgt het nog niet het predicaat prototype-operationeel, omdat dit de enige locatie in de wereld is waarvan bekend is dat er ook automatisch een debiet berekend wordt: TRL 7.

Status in Nederland

In navolging van de veerpont in het Marsdiep is in 2009 is een succesvolle pilot uitgevoerd naar afvoermetingen vanaf een veerpont in de Maas door RWS Dienst Limburg. De metingen werden automatisch uitgevoerd en overgezonden naar het kantoor van een consultant (Aqua Vision BV) die de gegevens bijna volledig automatisch verwerkte en doorgaf aan RWS. De pilot is nog niet vervolgd, onder andere vanwege onderbezetting van het betrokken personeel van RWS Limburg.

5.3 Waterstand

5.3.1 Digitale Niveaumeter (vlottersysteem)

Een Digitale Niveaumeter (DNM), of vlottersysteem, bestaat uit een verticaal in het water staande buis met openingen. Door de openingen staat het water in de buis even hoog als daarbuiten. In de meetbuis is een vlotter opgehangen, die via een metalen vlotterband en Gray-codeschijven continu de waterstand registreert. De stand van de vlotter is soms direct af te lezen (gebaseerd op het principe van het schrijvende echolood), soms alleen door een zogenaamd vlotterluikje te openen. Voor het verkrijgen van betrouwbare informatie over de waterstand wordt de meetpaal met de Digitale Niveaumeter uitgerust met een golfdemper, wat inhoudt dat de verhouding tussen de doorsnede van de toevoeropening en de binnenste buisdiameter rond de 1:4 ligt.

De Digitale Niveaumeter controleert zichzelf voortdurend op de betrouwbaarheid van de gemeten waarden. Het enige nadeel van dit systeem is dat het tamelijk onderhoudsgevoelig is: de vlotterbuis, die in een bak met water hangt, krijgt te maken met bezinkend sediment, waardoor de meetpaal regelmatig moet worden schoongemaakt. De Digitale Niveau Meter met vlottersysteem is ontworpen door Rijkswaterstaat. Doordat bepaalde onderdelen in de toekomst niet meer kunnen worden aangeleverd en het systeem onderhoudsgevoelig is, worden alle DNM's vervangen door radarniveaumeters.

Technology Readiness Level

DNM's worden op veel locaties toegepast en zijn operationeel: TRL 9.

Status in Nederland

Op veel plaatsen toegepast.

5.3.2 Radarniveaumeter

Een radarniveaumeter wordt boven het water geplaatst, al dan niet in een buis. Een radarsignaal wordt uitgezonden en reflecteert op het wateroppervlak. Het verschil in tijd tussen uitzenden van de geluidspuls en ontvangen van de echo is een maat voor de afstand tussen de radarniveaumeter en het wateroppervlak. Bij het bepalen van de afstand en dus de waterstand wordt over het algemeen gebruik gemaakt van de faseverschuiving. Middeling van metingen zorgt voor het uifilteren van golfinvloeden. Op deze manier wordt op een punt continu waterstand bepaald.

Een radarniveaumeter heeft als voordeel ten opzichte van een DNM dat het een contactloze meting is. Er is geen onderdeel dat het water raakt of daar in steekt en aldus beschadigd kan worden. Een klein nadeel is dat schuim op het water evenals drijvende voorwerpen de meting kunnen verstoren.

Technology Readiness Level

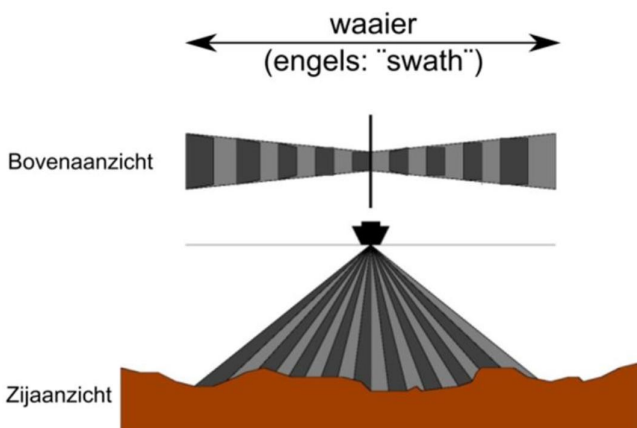
Radarniveaumeters zijn de huidige standaard in het meetnet van Rijkswaterstaat en zijn operationeel: TRL 9.

Status in Nederland

Op veel plaatsen toegepast.

5.4 Bodemniveau**5.4.1 Multibeamecholood**

In de huidige praktijk wordt bodemhoogte in rivieren voornamelijk gepeild met een multibeamecholood (of Multibeam Echo Sounders, MBES). Het systeem zendt een akoestische puls uit in een bundel die smal is in de vaarrichting en breed in de richting daar loodrecht op, zoals schematisch is weergegeven in Figuur 5.1. Uit de looptijden van het akoestische signaal kan over de hele bundel de waterdiepte worden bepaald. Het schip vaart raaien en de bodemhoogte wordt bepaald uit de verschillende bundels van het multibeamecholood.



Figuur 5.1 Schematische weergave van de meetconfiguratie met een multibeamecholood

Bij voorkeur wordt aan beide zijden van het schip een echolood onder water gemonteerd. Dat geeft onder andere de mogelijkheid om de werkelijke bodemhoogte te bepalen, wanneer een van de echoloden de bodemhoogte onderschat doordat een obstakel in het water aanwezig is.

Over het algemeen is MBES de standaard techniek om de bodemligging te bepalen. Het zijn metingen waarvoor een schip nodig is. Daarmee zijn ze regulier of projectmatig, waarbij de metingen in de huidige praktijk regulier worden toegepast. De breedte van de opname aan beide zijden van de gevaren raai is afhankelijk van de waterdiepte. Wanneer de dikte van de waterlaag onder de kiel van het schip klein is, is ook de opgemeten breedte klein. In ondiepere zones wordt vaak een singlebeamecholood gebruikt vanaf een kleiner schip.

Met een multibeamecholood kan vlakdekkende informatie over bodemhoogte worden verkregen. Standaard worden multibeamopnamen uitgevoerd in hoge resolutie. Achteraf wordt deze data vaak geGRID op 1x1 of 2,5x2,5 m roosters.

Technology readiness level: TRL 9 – operationeel.

Status in Nederland: standaard wordt de looptijd van het signaal dat reflecteert op de bodem gebruikt voor onder andere het peilen van de vaargeul.

5.4.2 Singlebeamecholood

Op ondiepere locaties zet Rijkswaterstaat een singlebeamecholood in (of Single-beam Echo Sounders, SBES) onder andere om de minst gepeilde diepte (MGD) te bepalen. In de

gevaren raaien wordt de bodemhoogte onder het single-beamecholood bepaald verticaal onder het schip. De datadichtheid is daarmee lager dan die van MBES.

Technology readiness level :
TRL 9 – operationeel.

Status in Nederland:
Gebruikt op ondiepere locaties, o.a. op de Waal en Rijn.

5.4.3 Temperatuurmeting met glasvezelkabel

Een specifieke techniek waar in Nederland veel onderzoek naar gedaan wordt is Distributed Temperature Sensing (DTS) in glasvezelkabels. De ruimtelijke resolutie van temperatuurbepaling voor veel glasvezelkabels is 1 m en kan worden uitgevoerd met enkele kilometers kabel. De toepassing van DTS in glasvezelkabels kan vooral uitkomst bieden op plaatsen die moeilijk toegankelijk zijn per (meet)schip, zoals ondiepe zones tussen kribben of in uiterwaarden.

Door een glasvezelkabel om een paal te winden en het temperatuurprofiel in de tijd te monitoren, kan de hoeveelheid materiaal dat geërodeerd of gesedimenteerd is worden vastgesteld (Hopman et al., 2014). Ook kan de bodemligging hieruit worden bepaald.

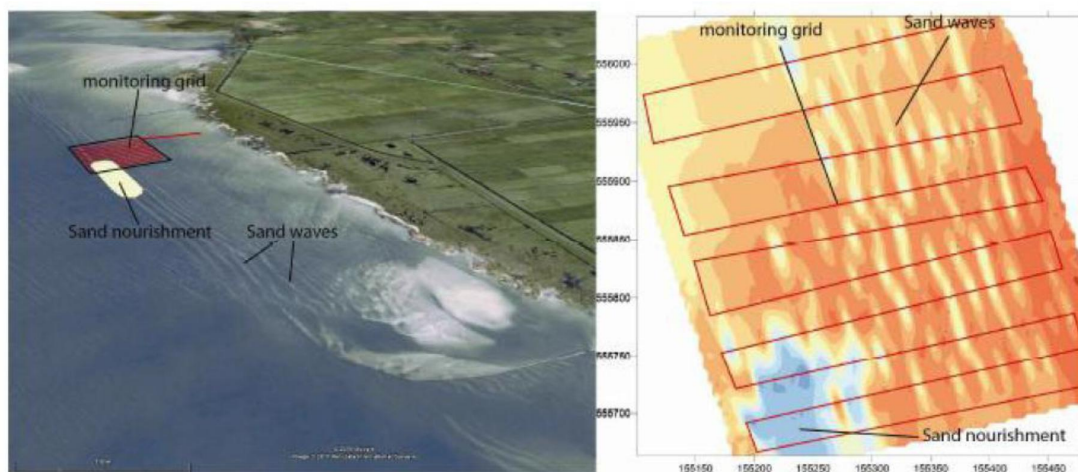
De kabel kan ook in een patroon over de bodem worden gelegd en bedekt worden door een laag materiaal. De bodemdynamiek wordt vervolgens bepaald uit de temperatuur in de bodem. Een voorbeeld van een glasvezelmeting voor de monitoring van een zandsuppletie is weergegeven in Figuur 5.2. De verspreiding van het gesuppleerde zand en de vorming van zandgolven is duidelijk in de data terug te zien.

Technology readiness level:

Prototype operationeel. TRL 7, in de ruimtelijk dekkende vorm is deze techniek nog in ontwikkeling (TRL 5).

Status in Nederland:

De techniek is getest in Nederland.



Figuur 5.2 Geïnterpreteerd resultaat van een DTS (glasvezel-) meting. Rode kleuren geven aan dat de kabel aan het oppervlak ligt, wit = nabij het oppervlak, blauw = kabel begraven onder sediment (suppletie).

5.4.4 LIDAR

Bodemhoogte in droogvallende gebieden (uiterwaarden) kan worden bepaald met laseraltimetrie (Light Detection And Ranging: LiDAR). De laser, bevestigd aan een vliegtuig of helikopter, zendt een signaal uit dat enige tijd later door reflectie weer worden opgevangen. De afstand tot het object of oppervlak wordt bepaald door de tijd te meten die verstrijkt tussen het uitzenden van een puls en het opvangen van een reflectie van die puls. Door de locatie van de laser en de richting van het signaal nauwkeurig te bepalen, kan met een hoge resolutie de bodemhoogte in een vlak worden bepaald uit een enkele overtocht.

Ook kan uit een laseraltimetrie meting hydraulische ruwheid en vegetatiepatronen worden bepaald. Voordeel is dat in korte tijd bodemhoogte kan worden bepaald over een groot drooggevalen gebied. Een nadeel is dat de bodemhoogte onder water niet met deze standaard laseraltimetrie bepaald kan worden. Het is mogelijk om met twee kleuren lasers ook onder water de bodemhoogte te bepalen, maar deze techniek is nog niet bewezen in rivieren met spoeltransport waar de bodem niet zichtbaar is.

Technology readiness level

Laseraltimetrie met één kleur licht is operationeel toegepast op meerdere plaatsen: TRL 9.

Status in Nederland

Deze techniek wordt in Nederland gebruikt, bijvoorbeeld voor het bepalen van het Actuele Hoogtebestand Nederland (AHN), maar ook in uiterwaarden van rivieren.

5.5 Sedimenttransport

5.5.1 Spoeltransport

5.5.1.1 *Emmer water filteren*

Het spoeltransport wordt bepaald door de afvoer te vermenigvuldigen met de concentratie sediment zwevend in de waterkolom. De concentratie zwevend sediment kan worden bepaald door een emmer water op 50 cm onder het wateroppervlak te nemen in het midden van de rivier. Een alternatief voor het verkrijgen van het water is water aan te zuigen met een buis door te pompen. Het volume water wordt gefilterd. Het filter wordt gedroogd, de massa van het residu wordt bepaald en gedeeld door het volume gefilterd water.

Het voordeel van deze techniek is dat deze een nauwkeurig resultaat geeft. Een nadeel is dat handwerk nodig is om te komen tot spoel transport.

Technology readiness level

Deze techniek is eenvoudig en wordt al decennia toegepast: TRL 9.

Status in Nederland

De techniek met een emmer wordt in Nederland iedere dag bij Lobith gebruikt.

5.5.1.2 *Optical Backscatter (OBS) in combinatie met snelheidsmeting*

De concentratie zwevend sediment kan bepaald worden uit metingen met een Optical BackScatter (OBS). Een OBS meet reflectie van een uitgezonden lichtsignaal op deeltjes in het water. Overig zwevend sediment reflecteert ook licht en wordt dus meegenomen bij deze meting. De reflectie is afhankelijk van de grootte van de korrels: bij fijnere fracties is de troebelheid over het algemeen groter. Het is nodig om een kalibratie uit te voeren van gemeten troebelheid met de sedimentconcentratie bij de sensor. Door watermonsters te

nemen, te filteren en te drogen wordt de sedimentconcentratie bepaald. Doorgaans wordt een lineair verband tussen troebelheid en sedimentconcentratie verondersteld. Uit deze sedimentconcentratie en de watersnelheid nabij de OBS kan de sedimentflux worden bepaald door een kleine doorsnede nabij de OBS.

Afhankelijk van de locatie, sediment eigenschappen en de variatie hiervan met de stroming, kan de sedimentconcentratie worden vertaald naar de rest van de dwarsdoorsnede. Wanneer in de rest van de dwarsdoorsnede ook stroomsnelheden bepaald zijn, kan de sedimentconcentratie worden vermenigvuldigd met de stroomsnelheid (bij voorkeur per dieptecel en breedtecel) om het spoeltransport te bepalen.

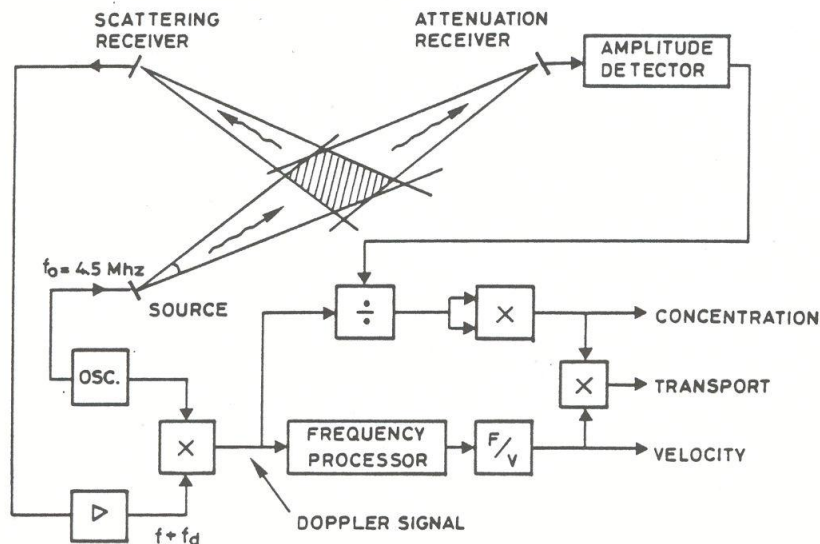
Voordeel van een OBS is dat deze gevoelig is en sedimentconcentraties in de orde van 0,01-0,1 kg/m³ kan bepalen. Nadeel is dat het lineaire verband van de kalibratie niet altijd geldig blijft bij extremere omstandigheden, zoals bij een hoogwater. Een ander nadeel is dat het signaal vaak verloopt door aanslag (bio-fouling) op de sensor, waardoor pieken uit het signaal gefilterd moeten worden en de sensor regelmatig schoon gemaakt moet worden.

Technology readiness level : TRL 9 – operationeel.
Status in Nederland: gebruikt.

5.5.2 Overig zwevend transport

5.5.2.1 AZTM

Bepaling van de concentratie van zand (overig zwevend) met een Akoestische Zand Transport Meter (AZTM) is gebaseerd op de uitdemping en reflectie van ultrasoon geluid. Tussen bron en een eerste ontvanger wordt de uitdemping bepaald en de reflectie wordt met een tweede ontvanger bepaald (Figuur 5.2). Uit de intensiteit en de frequentieverschuiving (Doppler verschuiving) van het gereflecteerde signaal wordt de zandconcentratie bepaald en de snelheid van de zandkorrels. In het meetvolume wordt hiermee continu het transport van zand bepaald.



Figuur 5.3 Meetprincipe van een AZTM

Een AZTM heeft een zendfrequentie van 4.5 MHz, welke is geoptimaliseerd om de afhankelijkheid van korrelgrootte van zand te minimaliseren en aan de andere kant om het instrument ongevoelig te laten zijn voor silt. Het concentratiebereik van een AZTM is duidelijk hoger dan voor OBS. Een AZTM heeft een bereik in de orde van 0,1-10 kg/m³.

Een AZTM is robuust en geeft ook bij hoge zandtransportpieken nauwkeurige resultaten. De stroomsnelheid is vergeleken met Ottmolen metingen en de concentratie bepaald met een AZTM en op basis van pompmonsters is vergeleken door Ditzel en de Vos (1986). De regressielijn door deze metingen ging vrijwel door 0 en heeft een helling van vrijwel 1: de sedimentconcentratie en het transport bepaald met een AZTM lijkt hiermee betrouwbaar. Omdat een AZTM licht gevoelig is voor de diameter van de zandkorrels, is in sommige gevallen een correctie nodig. Voor de Waal is de diameter vergelijkbaar als waarvoor het instrument is ontworpen: een correctie is in de Waal niet nodig (Kleinans en ten Brinke, 2001).

Technology readiness level: TRL 9 – operationeel.
Status in Nederland: gebruikt.

5.5.2.2 *Akoestische Backscatter uit Multibeamecholood: waterkolomgegevens*

Backscattergegevens ingewonnen met een multibeamecholood kunnen ook worden gebruikt voor het simultaan meten van de concentraties van overig zwevend sediment en de 2D stromingspatronen en -snelheden (Best et al., 2010; Simmons et al., 2010). In dit geval wordt dan niet de backscatterintensiteit van de bodem gebruikt, maar die van de waterkolom-data. Uit de backscatterintensiteit wordt de sedimentconcentratie bepaald. Uit opeenvolgende opnamen van backscatterintensiteit (iedere 0,1 s) in diepte en langs de rivier wordt de stroomsnelheid bepaald door het volgen van ruimtelijke patronen in de backscatterintensiteit, op een vergelijkbare manier als met 'Particle Imaging Velocimetry'. De gemiddelde stroomsnelheden in deze methoden zijn vergeleken met gemiddelde stroomsnelheden uit ADCP metingen (Best et al., 2010) en komen goed overeen. De MBES-backscatter data lijkt zelfs beter de variabiliteit in snelheden te kunnen vastleggen. Uit de combinatie van stroomsnelheid en overig zwevend sedimentconcentratie, kan over het grootste deel van de waterkolom het transport van overig zwevend sediment worden bepaald.

Deze methode is toegepast vanaf een stil liggend schip in rivieren bij confluentiezones, waar de stromingspatronen voor een verhoogde concentratie van overig zwevend materiaal zorgen. Simmons et al. (2010) vinden een duidelijke overgang in de waterkolomdata, met een hellende grens, waar het instromende en meer turbulente water met hogere concentraties overig zwevend sediment gedeeltelijk onder het water van de ontvangende rivier duikt. Daarnaast is deze methode toegepast voor het kwantificeren van de turbulente stroming over de lijzijde van een bodemvorm in de rivier, die verantwoordelijk is voor het suspenderen van sediment (Best et al., 2010). Met de frequente MBES-opnamen op één vaste locatie en per uitgezonden signaal, ofwel per afzonderlijke *ping*, vinden Best et al. (2010) dat de concentraties van overig zwevend sediment het hoogst zijn bij een opwaartse stroming en het laagst bij een neerwaartse stroming. Dit soort waarnemingen konden voorheen enkel in een experimentele opzet in een laboratorium worden gedaan, maar nu kunnen de resultaten van MBES-backscatter in de waterkolom kwantitatief worden gevisualiseerd in vectorkaarten voor stroming en suspensieve sedimentconcentraties in kleuren.

Verder is deze methode toegepast op de pluimen van overig zwevend sediment door visserij met gesleepte korplanken (O'Neill et al., 2016), en zo kan het ook worden ingezet om het effect van *propeller wash* (erosie door binnenvaartschepen, zie paragraaf 5.5.3.1) op het

totaal overig zwevend sediment transport vast te stellen door achter een schip aan te varen. Deze kwantitatieve metingen zijn ook cruciaal in het valideren en optimaliseren van fysische riviermodellen voor morfodynamiek en sediment transport (zoals Delft3D).

De voordelen van het gebruik van MBES-backscatterdata uit de waterkolom ten opzichte van ADCP zijn dat:

- bij MBES de gehele breedte van de bundel (*swath*) wordt gebruikt om het stromingsveld te visualiseren. Bij een ADCP is dit niet mogelijk, omdat ADCP in een smalle *cone* meet.
- In potentie dezelfde analyse uitgevoerd kan worden vanaf een varende schip. In dat geval worden de backscatterdata gelijktijdig opgenomen met de MBES-ladingen en backscatter van de bodem en er dus geen extra vaartijd of apparatuur voor nodig is.

Enkele nadelen zijn dat:

- de benodigde opslagcapaciteit voor waterkolomdata groot is.
- Voor kalibratie veel watermonsters nodig zijn.
- Zoals bij alle akoestische methoden is er tijd nodig om de apparatuur optimaal te kalibreren voor de lokale omstandigheden: de ruimtelijke en temporele variatie. Wanneer de omstandigheden veranderen dient deze kalibratie opnieuw uitgevoerd te worden.

Technology Readiness Level: Het opnemen van MBES-backscatter data is operationeel; het verwerken van de data en het analyseren van concentraties overig zwevend materiaal vraagt om specifieke expertise. Deze analyses worden bijvoorbeeld uitgevoerd op universiteiten of door gespecialiseerde bedrijven zoals Partrac uit Schotland. Deze techniek is onder andere toegepast in een rivier in de Verenigde Staten (bv. Missouri/Mississippi: Best et al., 2010) en in rivieren in Argentinië (Simmons et al., 2010). De methode is getest voor de juiste instellingen en getoetst met directe monstername op locaties met hogere sedimentconcentraties (Simmons et al., 2010). TRL 7 – prototype-operationeel.

Status in Nederland: wordt nog niet of nauwelijks toegepast.

5.5.3 Bodemtransport

5.5.3.1 Nile sampler

Een Nile sampler is het meest geschikt om direct 'bed load transport' te bepalen op een locatie bij de bodem (Kleinhans & Grasmeijer 2006). De Nile sampler bestaat uit een opening van ongeveer 8 bij 8 cm. Sediment dat door deze opening gaat in de tijd dat de Nile sampler op de bodem staat wordt opgevangen in een poreuze zak. Water en deeltjes fijner dan 150 of 250 micrometer, afhankelijk van de monsterzak, kunnen naar buiten, maar grotere deeltjes blijven in de zak. Door het volume van het sediment te bepalen of het sediment na drogen te wegen is het 'bed load transport' bepaald gemiddeld over de tijd dat de Nile sampler geplaatst was.

Meestal wordt een Nile sampler vanaf een schip geplaatst, waarbij de opening dwars op de hoofdstroomrichting geplaatst wordt door een staart. Strikt gesproken zal ook suspensief getransporteerd sediment worden ingevangen. Vaak wordt daarom praktisch 'bed load transport' gedefinieerd als transport in de onderste 8 cm van de waterkolom. De monsterzak is zo gemaakt dat het opgestuwde water ontsnapt via een grove zeef in de bovenkant, waardoor niet alle zwevend transport wordt ingevangen.

Door intensief het bodemtransport te meten en de monsters te bulken en te zeven (specialistisch werk) kan naast het transport ook de korrelgroottesamenstelling worden bepaald. Om een goed gemiddeld beeld van een dwarsdoorsnede in een rivier te krijgen

vonden Kleinhans en ten Brinke (2001) dat 30 samples als minimum gehanteerd dient te worden, in combinatie met twee verticalen waarin de overig zwevend transport wordt bepaald. De locaties in de dwarsdoorsnede kunnen zodanig in de tijd worden verdeeld dat door interpolatie ook de variatie gedurende de afvoergolf kan worden verdisconteerd. De gemeten transporten komen goed overeen met die van de duinverplaatsingsmethode (Frings & Kleinhans 2008).

Technology Readiness Level: Het uitvoeren van de meting en analyse is specialistisch. Er zijn verschillende zaken die fout kunnen gaan. Toch is het vaker uitgevoerd. Vanwege het specialistische karakter is de TRL 8 – pre-operationeel.

Status in Nederland: wordt projectmatig toegepast in Nederland, waarbij de laatste metingen van Frings zijn.

5.5.3.2 *Passieve akoestiek*

Het is mogelijk om een hydrofoon op de bodem te plaatsen. Iedere keer dat een zand- of grindkorrel de hydrofoon raakt, wordt dit geregistreerd. Voor een grindrivier is dit principe getoetst en uitgewerkt tot operationeel bruikbaar (Geay et al. 2017, jgr-ES).

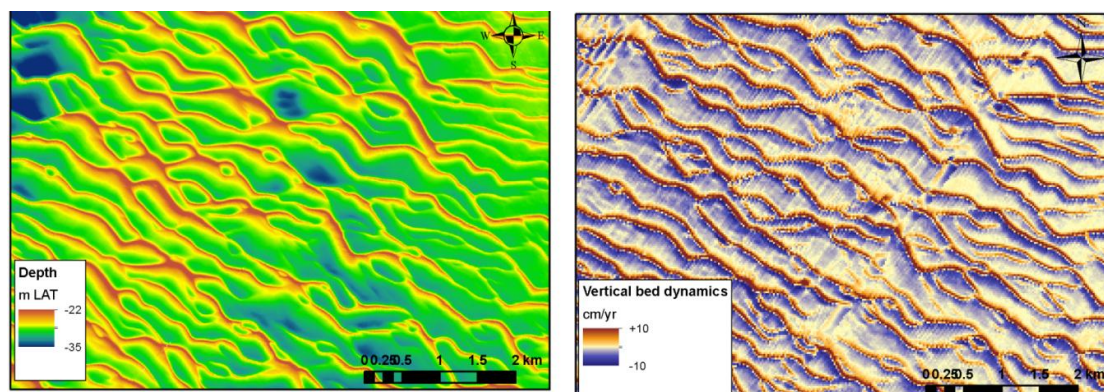
Technology Readiness Level: In een grindrivier is het operationeel inzetbaar. In zandrivieren is passieve akoestiek ook toegepast, maar nog niet operationeel: TRL 6 – prototype.

Status in Nederland: Geen voorbeelden bekend van toepassing in Nederlandse rivieren.

5.5.3.3 *Verticale bodemdynamiek uit een serie van hoge resolutie multibeamopnamen*

Op basis van een tijdreeks hoge resolutie multibeamopnamen kunnen trends (in m/jaar) van verticale bodemdynamiek gekwantificeerd worden. Om veranderingen in bodemligging vast te stellen, kan de verticale bodemdynamiek worden geanalyseerd uit de gehele tijdreeks van multibeamdata. Op basis van deze analyse kan een sedimentbalans worden bepaald.

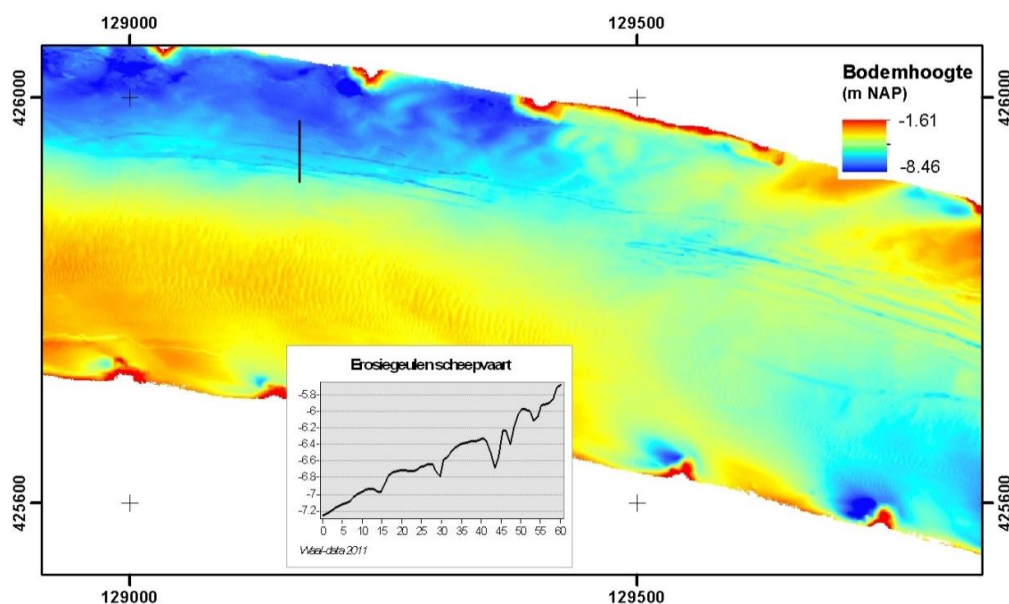
Deltares heeft een volledig geautomatiseerde methode ontwikkeld voor het kwantificeren van verticaal dynamische trends (dz/dt in meter/jaar, zie Van Dijk et al., 2011; Van Dijk et al., 2012a; Van Dijk & Lindenbergh, 2017). Deze methode is speciaal gericht op het verwerken van zeer grote hoeveelheden, hoge-resolutie multibeamdata in complexe tijdreeksen. De data worden ruimtelijk geordend voor optimale rekensnelheden. Van de bodemhoogte opnamen, worden Digital Elevation Models (DEMs) geïnterpoleerd op een door de gebruiker gewenste resolutie (bv 1 x 1 m of 0.3 x 0.3 m, indien de datadichtheid dit toelaat). De methode definieert de unieke overlap van alle opnamen in de tijd voor het corrigeren van externe factoren (door afwijkingen in de datasets) en identificeert automatisch de meest recente opname, wat resulteert in een bathymetrische kaart (een mosaïek van de meest recente opnames, zie Figuur 5.4 links). Van alle DEMs in de tijd, worden op ieder gridpunt (bv. de 0.3 m DEM-resolutie) parameters berekend, zoals gemiddelde, minimale en maximale bodemhoogte, en de verticale bodemdynamiek in (centi)meter/jaar over de gehele tijdreeks (Figuur 5.4 rechts). Met deze analyses kan een lange-termijn prognose van bodemdynamiek worden gemaakt en de veranderlijkheid van bodemdynamiek in de tijd worden bepaald aan de hand van trendbreuken. Ieder gridpunt in de methode kan ook worden voorzien van andere berekende waarden, zoals een kwaliteitsaanduiding.



Figuur 5.4 Links: voorbeeld van hoge resolutie bathymetrische kaart van zandgolven in de zuidelijke Noordzee. Rechts: Geautomatiseerd bepaalde verticale bodemdynamiek in cm/jaar op dezelfde resolutie. (Figuur aangepast uit Van Dijk & Lindenberg, 2017).

Deze methode is toegepast in de Waal op een tienjarige tijdreeks van halfjaarlijkse peilingen, waarbij de 10-jaar lange-termijn bodemdynamische trend werd geanalyseerd (Van Dijk et al., 2012b), en zou uitermate geschikt zijn om tijdreeksen van hogere frequentie (bijvoorbeeld de twee-wekelijkse data) te analyseren. De twee-wekelijkse data zouden een goed overzicht geven van de variabiliteit in bodemdynamiek in de tijd, zoals seizoengebonden variaties en afwijkingen van de norm. Het gebruik van deze methode op de tijdreeksen van de bovenrivieren geeft inzicht in de ruimtelijke verdeling van de gebieden van sedimentatie- en erosie in de rivier, en kan daarmee specificeren in welke delen van de rivier bodemaccretie of –degradatie plaatsvindt, en hoe bodemvormen, suppleties, oevers, erosiekuilen en *scour* rond kunstwerken (waterbouw) zich ontwikkelen.

Een andere toepassing van deze methode is het bepalen van bodemerosie door scheepvaart. Multibeamdata laten bijzonder mooie voorbeelden zien van lange sporen van schepen (Figuur 5.5), die vermoedelijk door de belasting van scheepsschroeven worden veroorzaakt. De vormen en volumes van deze sporen van schepen kunnen gekoppeld worden aan scheepsinformatie (AIS-data) om zo de relatie te leggen tussen bijvoorbeeld type schip en diepgang. Door de vormen en volumes ook te koppelen aan afvoer, kan de relatieve bijdrage van schepen op bodemerosie en op het totale sedimenttransport in de rivier worden onderzocht.



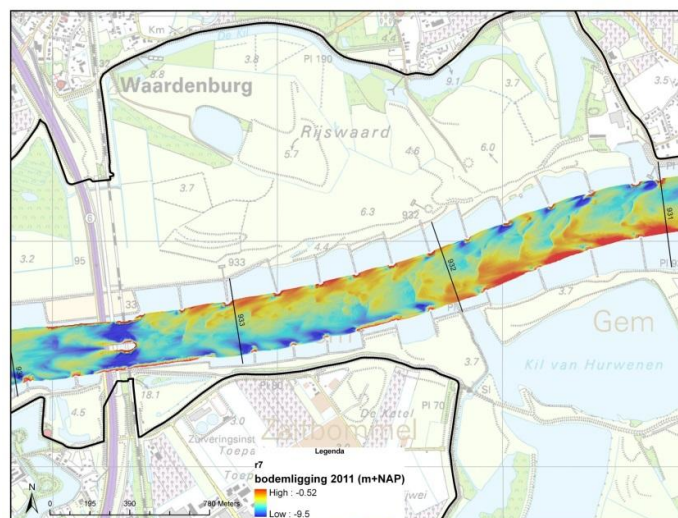
Figuur 5.5 Voorbeeld van erosiegeulen door de scheepvaart in de Waal.

Technology Readiness Level: Deze state-of-the-art morfodynamische analysemethode (dz/dt) is ontwikkeld bij de afdeling Toegepaste Geologie en Geofysica (TGG) van Deltares voor de bathymetrische database van de Dienst der Hydrografie en Rijkswaterstaat (samen in het Nederlands Hydrografisch Instituut, NHI) en is toegepast op de Noordzee en in de Waal. De methode is operationeel, maar in rivieren nog niet op veel plaatsen toegepast: TRL 7, prototype-operationeel.

Status in Nederland: Vaker gebruikt in kustgebieden, en wordt daarnaast momenteel ook in rivieren toegepast.

5.5.3.4 Dune tracking uit een tijdreeks van hoge resolutie multibeamopnamen

Op rivierbodems komen bodemvormen voor van verschillende maat (grote duinen met lengtes van bv. 200 m en hoogtes van ongeveer 1 m, en kleine duinen van een tiental meter lang en decimeters hoog daarop gesuperponeerd) (Figuur 5.6). De bodemvormen zijn extreem dynamisch, zowel in hoogte (groei of demping) als in stroom-afwaartse verplaatsing (migratie). Dat betekent dat de tijd tussen opeenvolgende opnames niet te groot mag zijn, wat beperkingen geeft aan het te peilen gebied (Kleinhans et al. 2007, Frings & Kleinhans 2008). Met uitzondering van perioden met piekoafvoeren, is het in afgelopen jaren mogelijk gebleken grote duinen te volgen op basis van 2-wekelijkse gegevens.



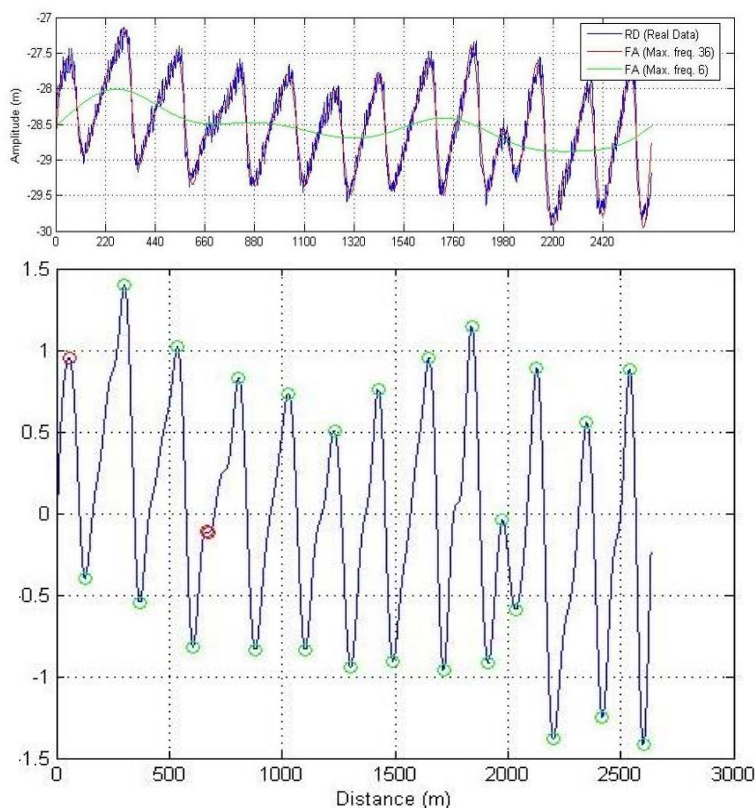
Figuur 5.6 Voorbeeld van bodemvormen in de Waal.

De groei van deze vormen is van groot belang voor de binnenvaart, omdat bij kritieke waterdiepten de verhoging van de bodemvormen zal leiden tot aanpassing van de laaddiepten van de schepen om vastlopen te voorkomen. Met name de relatie bodemhoogte en afvoer is hierin relevant: als bodemvormen groeien bij hoge afvoer en hogere waterstand (door meer sedimenttransport en verminderde limiet in hoogte), en maar langzaam weer dempen terwijl de waterstanden al weer laag zijn (Wilbers & Ten Brinke, 2003; Kostaschuck & Best, 2005), heeft dit een tweevoudige uitwerking op de bevaarbaarheid van de rivier. Voor migratie geldt: omdat bodemvormen in de rivier in één richting migreren, kunnen de volumes van verplaatst sediment in de rivier direct worden bepaald uit de morfodynamische verschillen van de bodemvormen.

Deltares heeft een methode ontwikkeld, waarin kam-, trog- en inflectiepunten (en ook brinkpunten) semi-geautomatiseerd worden bepaald (Figuur 5.7), waaruit de vormen (duinlengten, -hoogten en -asymmetrie) van individuele bodemvormen kunnen worden bepaald (Van Dijk et al., 2008). Indien toegepast op tijdreeksen, kunnen ook de groei en migratie van duinen worden bepaald. Deze methode is ontwikkeld voor zandgolven op het continentaal plat. Hoewel de migratiesnelheden en dimensies verschillen, is het principe voor grote duinen in een rivier hetzelfde. In een pilotstudie is de methode ook succesvol toegepast op de morfologie van kleinere bodemvormen in de Waal, maar het volgen van deze kleine duinen is niet mogelijk omdat kleine duinen niet individueel te identificeren zijn in de tijd (Frings & Kleinhans 2008, Van Dijk et al., 2014). Het gebruik van deze methode op multibeam-tijdreeksen van de bovenrivieren kan (1) de afmetingen van bodemvormen kwantificeren, (2) het gedrag van bodemvormen vaststellen, dat dan gekoppeld kan worden aan rivierafvoer en waterstand, om zo de relatie tussen morfodynamiek en hydrodynamiek te maken voor veilige binnenvaart, en (3) hieruit de volumes aan doorgevoerd sediment in de rivier kwantificeren ($m^3/jaar$) aan de hand van de migratie van individuele bodemvormen (*dune tracking*, zie Wilbers & Ten Brinke, 2003).

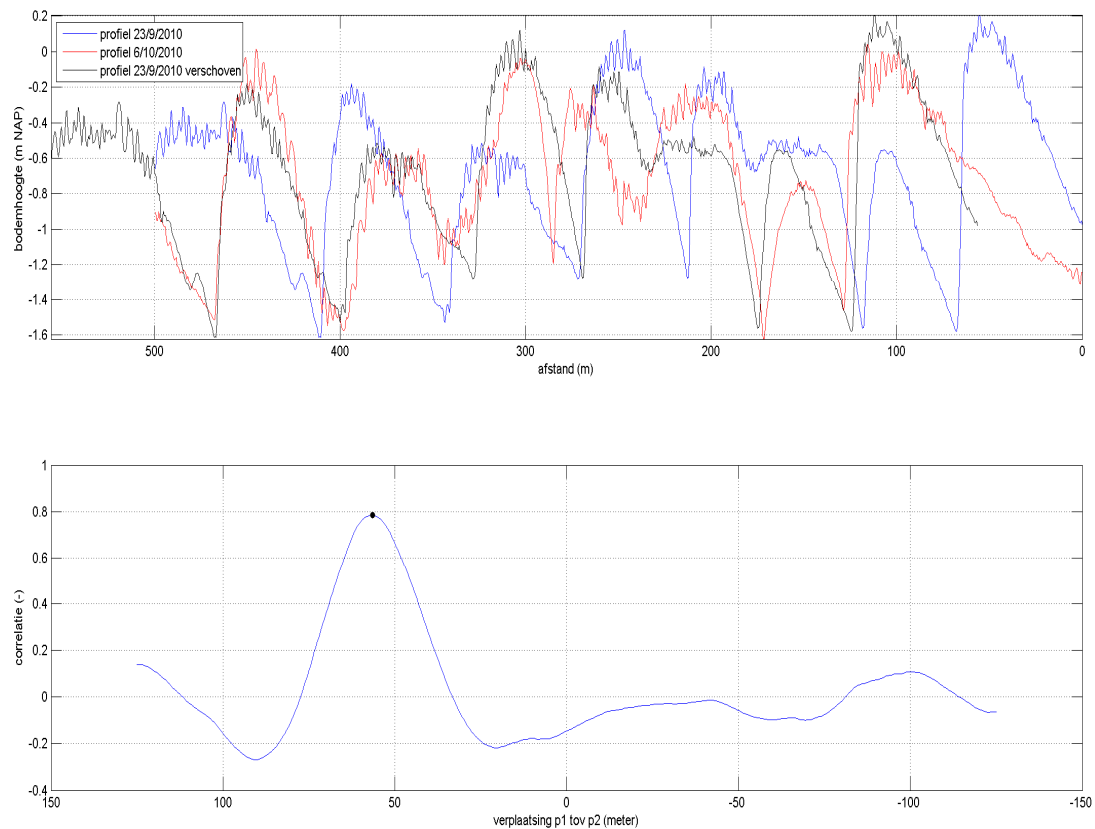
Een specifiek meetprotocol is nodig om de migratie te kunnen bepalen tijdens dynamische condities. Om de bodemhoogte bij de lijzijde van duinen nauwkeurig genoeg te kunnen bepalen, dient alleen stroomopwaarts gevaren te worden bij het opnemen met de multibeamecholood zodat de datadichtheid groot genoeg is. Ook moet voldoende frequent

opgenomen worden: tijdens een hoogwater op de rivier is dat iedere 2 uur (mond. Med. M.G. Kleinhans, toegepast in Kleinhans et al. 2007, Frings & Kleinhans 2008).



Figuur 5.7 Semi-geautomatiseerde methode om de morfologie (lengte, hoogte, asymmetrie) en migratie van individuele duinen uit te rekenen.

De kruiscorrelatietechniek is een alternatieve methode voor *dune-tracking*. Een 2D-kruiscorrelatie wordt gebruikt voor het analyseren van de verplaatsing van grootschaligere patronen die verscheidene bodemvormen bevatten (plan-view migratie), resulterend in een migratievector met grootte en richting. Een 1D-analyse bepaalt de afstand van verplaatsing voor dwarsdoorsnedes van een serie bodemvormen. In een pilotstudie als voorbereiding op een KPP onderdeel wat nog geen doorgang heeft gevonden zijn de 2-wekelijkse multibeamdata voldoende frequent bevonden om de migratie van deze individuele grote duinen in de Waal te kunnen waarnemen en bepalen. Deze test is uitgevoerd voor 10 twee-wekelijkse intervallen in de periode september 2010 tot maart 2011 (zie Figuur 5.8 voor één interval van 2 weken), een periode met een hoogwater met een piekafvoer tot 5794 m³/s bij de Pannerdensche Kop en in de meeste intervallen bleven grote duinen identificeerbaar en traceerbaar (ongepubliceerde data). De verplaatsing varieerde tussen 55 m en 180 m per 2 weken voor de verschillende intervallen en bij verplaatsingen meer dan 150 m per 2 weken, werd de identificatie moeilijker door vormverandering van de duinen. Precies deze relatie tussen morfologie en dynamiek en afvoerpieken is relevant om in meer detail te onderzoeken.



Figuur 5.8 1D-kruiskorrelatie van grote duinen in de Waal: deze analyse is van een twee-wekelijkse periode (23/09-06/10/2010) bij een afvoer van 1450 m³/s. De vorm van individuele duinen is voldoende gelijk om duinen te identificeren. De berekende verplaatsing in dit voorbeeld is 55 m in 13 dagen (4.2 m/dag).

Met deze morfodynamische kennis kan het gedrag van de rivierbodem worden verklaard, zoals de sedimentverdeling bij splitsingen van rivieren, binnen- en buitenbochtverschillen en de relatie met variatie in afvoer. Wanneer de morfodynamiek gekoppeld wordt aan informatie van sedimentologie en lagen in de ondergrond, kan ook het gedrag worden verklaard bij veranderde geologische eigenschappen (bv. meer zandige bodems), de uitwisseling van sediment met de bodem, de snelheid van erosie of juist de stabiliteit van de bodem.

Technology Readiness Level: Deze methode wordt toegepast in toegepaste studies op zee (bv Van Dijk et al., 2011, en veel windmolenparkprojecten) en is getest in een pilotstudie voor bodemvormen in de Waal en succesvol bevonden. Voor de operationele toepassing van de methode zijn wat aanpassingen nodig om de analyses van grote tijdreeksen data van rivieren geautomatiseerd te kunnen doen. TRL 7, prototype operationeel.

Status in Nederland: Vaak gebruikt in kustgebieden en offshore, en wordt daarnaast momenteel ook in rivieren toegepast.

5.5.3.5 ADCP vanaf een schip

In de literatuur is beschreven dat sediment transport bij de bodem (bed load transport) direct gemeten kan worden met een ADCP vanaf een schip. Bij ADCP metingen vanaf een schip wordt de watersnelheid bepaald uit de gemeten snelheid ten opzicht van het schip en de

scheepssnelheid. De scheepssnelheid wordt bepaald met *bottom track* signalen vanuit de ADCP. Door het bepalen van de systematische afwijkingen in de *bottom tracking* ten opzichte van een nauwkeurig (Real-Time Kinematic) GPS, kan de snelheid van het bodemtransport worden bepaald.

Rennie et al. (2002) vonden voor kiezel-bodems goede overeenkomst. Voor zandbodems is de uitdaging het bepalen van de afhankelijkheid van de korrelgroottesortering en de dikte van de actieve laag, wat Rennie deed met de saltatiehoogtevoorspeller uit de transportvoorspeller van Van Rijn (1984). Daarmee is de methode geen onafhankelijke bepaler van transport. Jamieson et al. (2011) tonen op basis van metingen met een stilliggend en een varend schip aan dat bodemsnelheid goed geschat kan worden tot bodemsnelheden van 0,6 m/s in een rivier met een zandbodem. De patronen van bodemsnelheid uit de transects konden worden gecorreleerd met de aanwezige bodemvormen.

Technology readiness level: TRL 5 – ontwikkeling. Er is een twijfelachtig wetenschappelijk artikel (Rennie et al. (2002)) over een toepassing in een rivier.

Status in Nederland: niet gebruikt

5.6 Bodemsamenstelling

5.6.1 Bodemoppervlak (0-30cm)

5.6.1.1 *Bodemmonsters nemen en analyseren in het laboratorium*

Het nemen van bodemmonsters gebeurt op verschillende manieren en luistert nauw. Vervolgens zijn er ook keuzen te maken bij de analyse van de monsters. Het is goed mogelijk dat resultaten behoorlijk verschillend zijn door het gebruik van een verschillende methode van monsternamen of van de analyse.

Verschillende manieren voor het nemen van bodemmonsters inclusief hun voor- en nadelen zijn:

- Van Veen happer: voor het nemen van verstoorde bodemmonsters. Deze grijper klapt dicht wanneer die de bodem raakt. Het nadeel hiervan is dat de happer niet geheel dichtklapt als er iets (zandkorrel, steentje o.i.d.) tussen de happer blijft zitten. In dat geval blijft slechts een gedeelte van het monster (vaak met grovere korrelgrootte) over na het omhoog brengen en is het monster niet representatief voor de toplaag van de bodem. Ook dringt de happer vaak niet door in een grindige bodem.
- Loden pot: deze pot vult door het vallen op de bodem. Bij het omhoog brengen van de pot verliest de pot nauwelijks sediment, waarmee het overblijfsel redelijk representatief is voor de toplaag. Deze methode is eerder gebruikt voor de reguliere 10-jarige analyse en werkt goed met grind als meerdere monsters per locatie worden genomen (Kleinhans & Ten Brinke 2001).
- Box cores: voor het nemen van ongestoorde bodemmonsters. Bij het vallen onder het eigen gewicht van de box corer, penetreert een cilinder (diameter ~30 cm) tot maximaal enkele decimeters in de bodem, maar veel minder bij grind. Bij het raken van de bodem, klapt er een schuif onder de cilinder. Zo wordt een vrijwel ongestoord monster omhoog gehaald, waaruit een sedimentkern (diameter 97 mm) gestoken wordt (Figuur 5.9), die in het laboratorium wordt doorgesneden en geopend. Het voordeel van een ongestoorde kern is dat de gelaagdheid van de bodem kan worden beschreven en dat de monsters voor korrelgrootteanalyses in het laboratorium nauwkeurig kunnen worden

genomen per laag uit de kern (bijvoorbeeld oppervlaktemonsters en zand- of kleilagen op diepte). Box coring kan op de rivier worden toegepast op iedere waterdiepte.



Figuur 5.9 Voorbeelden van box cores in fijnkorrelig materiaal (links) en zandig materiaal (rechts) met de steekkeren.

Een speciale manier van bodemmonsters nemen is door een duikersklok op de bodem van de rivier te plaatsen. In de duikersklok kan relatief ongestoord bemonsterd worden. Een duikersklok biedt de gelegenheid de structuren in korrelgrootten visueel te inspecteren maar is niet te gebruiken bij hoogwater. Deze methode wordt veel in Duitsland gebruikt (Frings en Kleinhans, 2008).

Technology Readiness Level: TRL 9 – Operationeel.

Status in Nederland: Standaard methode van analyse, maar details van het nemen van monster en uitvoering labmeting, inclusief voorbereiding, zijn niet beschreven.

5.6.1.2 Classificatie korrelgrootte uit backscatter van een multibeamecholood

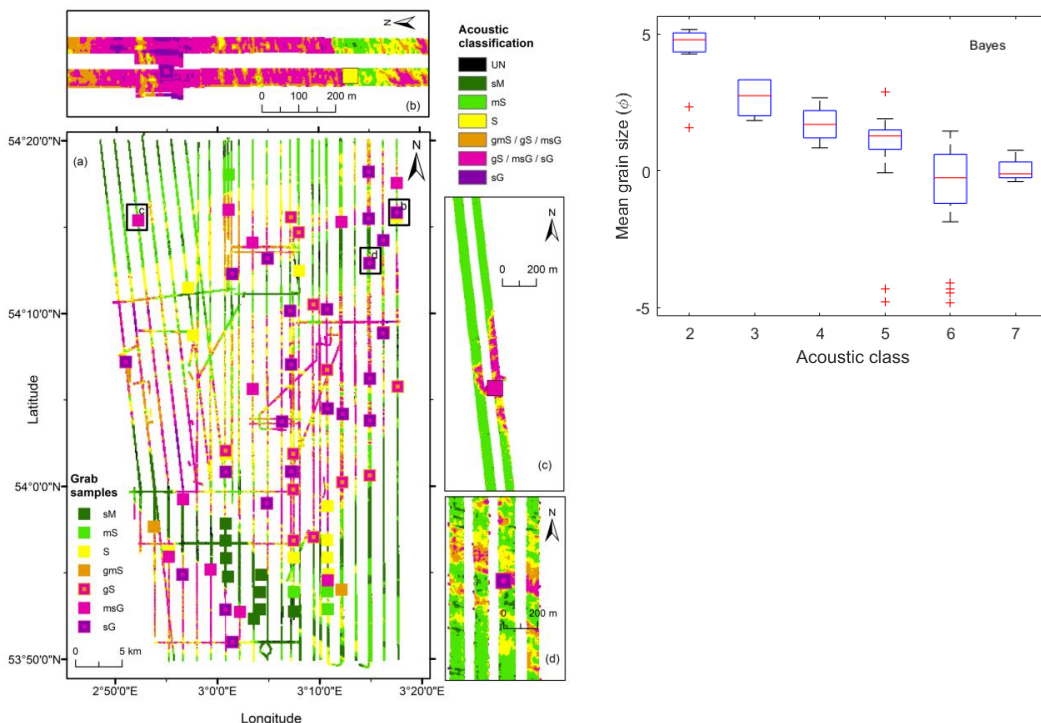
Uit metingen met een multibeamecholood kan naast bodemhoogte ook het bodemsediment geclassificeerd worden (Lurton & Lamarche, 2015). Uit de gemeten intensiteit van het terugkerende signaal en andere informatie van de meting, kan de 'backscatter strength' worden bepaald. Sommige echoloden kunnen deze vertaalslag op basis van invoerparameters automatisch maken. Deze 'backscatter strength' is gerelateerd aan de gemiddelde korrelgrootte van het sediment. Een grovere gemiddelde korrelgrootte geeft over het algemeen een grotere 'backscatter strength'. Op basis van dit principe kan de toplaag van de bodem vlakdekkend worden geclassificeerd.

Een beperking van het classificeren van sediment op basis van multibeam-backscatter is dat het momenteel nog niet mogelijk is om de zogenaamde 'backscatter strength' direct te relateren aan de korrelgrootte. Dit is in theorie wel mogelijk, maar wordt bemoeilijkt door de imperfecte kalibratie van de echoloodapparatuur. Zonder de beschikbaarheid van andere metingen is daardoor alleen relatieve classificatie mogelijk, dat wil zeggen classificatie in categorieën van fijn naar grof. Met behulp van bodemmonsters is classificatie in gemiddelde korrelgrootte mogelijk.

Daarbij komt dat de gemeten intensiteit van het terugkerende signaal onderhevig is aan statistische fluctuaties, fouten in de kalibratie van het echolood (verschillen in gevoeligheid van de individuele ontvangers) en variaties in bronniveau (Huismans et al., 2013). Bij de TU

Delft zijn drie methoden ontwikkeld die rekening houden met deze effecten: de Bayesiaanse classificatiemethode (BCM), de clusteranalyse (Principle Components Analysis, PCA) en de modelgebaseerde methode. Voor een beschrijving van deze methoden wordt verwezen naar Huismans et al. (2013) en Snellen et al. (2015). De Bayesiaanse en clusteranalyse methoden geven een relatieve classificatie (klassen van fijn naar grof). Alleen met een aanzienlijke hoeveelheid bodemmonsters kan een absolute classificatie gegeven worden. De modelgebaseerde classificatie is in ontwikkeling en speciaal ontwikkeld voor absolute classificatie, waarbij de kalibratie vooraf wordt uitgevoerd met bodemmonsters voor iedere klasse van gemiddelde korrelgrootte.

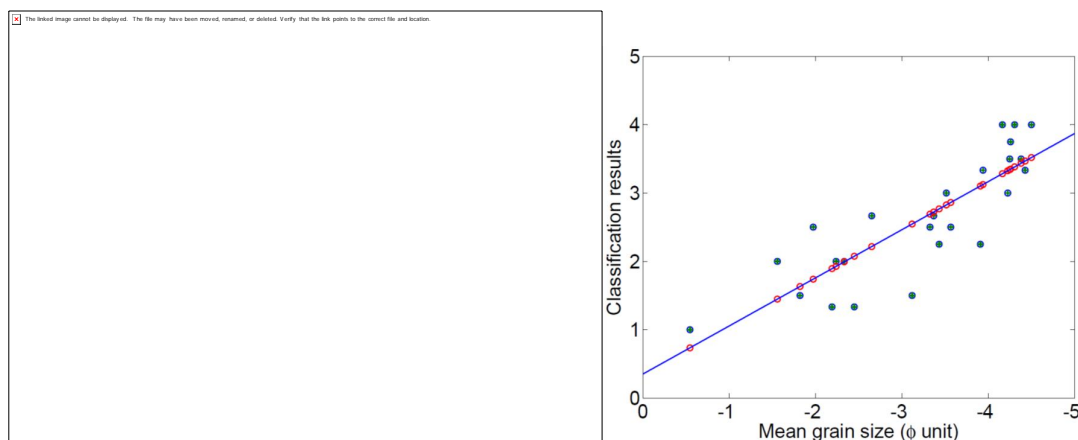
De drie algoritmen voor het classificeren van backscatter-intensiteit zijn toegepast op de Klaverbank. De Klaverbank is een offshore gebied met oude glaciale geulen uit het Weichselien (de laatste ijstijd) en met oppervlakesedimenten die qua samenstelling variëren van zandige klei tot zandig grind. Figuur 5.10 laat zien dat de Bayesiaanse bodemclassificatiemethode op de meeste locaties dezelfde classificering geeft als bepaald uit bodemmonsters. De gemiddelde korrelgrootte is aangegeven op de phi schaal. Phi is 0 wanneer de korrelgrootte 1 mm is en phi neemt toe voor afnemende korrelgrootte. In dit voorbeeld is de multibeam data niet gebiedsdekkend opgenomen, maar in lijnen. Wanneer de multibeam-backscatter gebiedsdekkend wordt opgenomen (zoals in de standaard opnemingsplannen van Rijkswaterstaat), kan er wel gebiedsdekkend worden geclassificeerd.



Figuur 5.10 Links: Voorbeeld van bodemclassificatie uit multibeam backscatter voor de Klaverbank op het Nederlands Continentaal Plat. De akoestische bodemklassen van korrelgrootten worden gekoppeld aan korrelgrootten uit bodemmonsters (vierkanten) (naar Gaida et al., submitted). (sG = zandig grind; gS = grindig zand; (g)S is zand of grindig zand; mS/S is siltig zand of zand; sM = zandig slib (silt/klei). Rechts: gemiddelde korrelgrootte in phi als functie van de akoestische klasse voor de akoestische classificatie en monsters van de Klaverbankdataset. De bodem en top van de blauwe rechthoeken corresponderen met de

25- en 75-percentielen. De rode horizontale lijnen geven de mediaan. Outliers worden weergegeven met de rode symbolen (+).

De Bayesiaanse methode is toegepast op de rivierbodem van de Waal, bijvoorbeeld bij St Andries (Figuur 5.11). In vergelijking met de bodemmonsters, komt de classificatie op de meeste locaties overeen. Voor het herkennen van de vaste laag in de bocht werd de backscatter gecombineerd met bodemruwheidsanalyses uit multibeam lodingen en het toepassen van de PCA classificatiemethode (Eleftherakis et al., 2012).



Figuur 5.11 Links: Bodemclassificatie van een deel van de Waal nabij St Andries. Rechts: correlatieplot voor akoestische klassen en gemiddelde korrelgrootte als blauwe cirkels (in Phi). Omdat er geen bodemmonsters zijn genomen op de vaste laag worden alleen akoestische klassen 1 – 4 getoond. De blauwe lijn en de rode cirkels geven het resultaat van een least squares fit door de datapunten. De correlatiecoëfficiënt is 0.84 (uit: Eleftherakis et al., 2012).

Voordelen van bodemclassificatie uit MBES-backscatter zijn:

- Door de gebiedsdekkende aard van MBES-data, kan er ook gebiedsdekkend worden geclassificeerd. Daarbij is de resolutie van de ruwe gegevens hoog (bv 1 m, of 0.3 m, afhankelijk van de dataopneming). Bij het nemen van monsters is er alleen op de monsterpunten informatie beschikbaar.
- De intensiteit van het terugkerende signaal kan gelijktijdig met de bodemhoogte worden opgenomen. Het kost geen extra tijd tijdens de meting en er is geen extra opslagruimte (geheugen) nodig (bij een Kongsberg echolood is daarnaast standaard een locatie gereserveerd voor 'backscatter strength').
- Bodemclassificatie op basis van verschillende metingen levert een overeenkomstig resultaat. Daarmee kunnen variaties van gemiddelde korrelgrootte in de tijd worden gevolgd.

Kanttekeningen bij bodemclassificatie uit MBES-backscatter zijn:

- De trendlijn (least squares fit) tussen 'backscatter strength' en gemiddelde korrelgrootte wordt gebruikt bij de classificatie. Bij een hoge correlatiecoëfficiënt van deze fit zijn de resultaten betrouwbaar, maar bij weinig correlatie zijn de resultaten van de methode onbetrouwbaar. Nadere verkenning/inventarisatie is gewenst op het gebied van correlatie en eenduidigheid van de relatie om vertrouwen in de techniek te vergroten.
- Voor relatief fijne sedimenten wordt in Huismans et al. (2013) gesteld dat de relatie tussen de 'backscatter strength' en het sedimenttype eenduidig is, maar dat voor sommige bodemtypen, zoals sedimenten grover dan circa 4 mm of een vaste laag, het

backscattersignaal meerduidig is. Daarom wordt in deze gevallen de bodemclassificatiemethode gecombineerd met bijvoorbeeld bodemruwheid.

- Alleen sedimentklassen (gemiddelde korrelgrootte) kunnen worden bepaald, geen zeefkrommes. Om de korrelgroottesamenstelling te bepalen, bijvoorbeeld nodig bij het bepalen hoe een grovere fractie zich verdeelt over de Rijntakken, blijven bodemmonsters nodig.
- Sedimentclassificatie kan alleen worden gedaan door akoestische klassen aan sedimenteigenschappen uit bodemmonsters te koppelen. Monsternamen blijven nodig.
- Het opslaan na het uitvoeren van de meting van de backscatter informatie vergt extra opslagcapaciteit en datamanagement.

Technology Readiness Level: TRL 5 - 8 – ontwikkeling tot pre-operationeel. Het opnemen van MBES backscatter is operationeel. De analyse dient uitgevoerd te worden door experts (zoals bij groep Akoestiek, Faculteit van Lucht- en Ruimtevaarttechniek, TU Delft). Er zijn toepassingen beschikbaar waar de PCA algoritme en de Bayesiaanse methode zijn toegepast en overeenkomsten werden gevonden met classificatie op basis van bodemmonsters.

Status in Nederland: State-of-the-art classificatie van waterbodems. De techniek is getest zowel op zee als op enkele plaatsen in rivieren in Nederland.

5.6.1.3 *Flying eyeball*

Voor zandige bodems kan met de 'flying eyeball' de bodemsamenstelling worden bepaald door een camera die in een soort bal tot dichtbij de bodem wordt gebracht. Voor zandige gebieden die niet te troebel zijn, kan hiermee de bodemsamenstelling bepaald worden. Voor de Bovendelta waar ook grind voorkomt in de bodem is deze methode niet direct toepasbaar, maar wellicht wel in de lager gelegen delta.

Technology readiness level: TRL 6: prototype.

Status in Nederland: De flying eyeball zal in november worden toegepast in Nederland.

5.6.1.4 *Basegrain*

Korrelgroottes kunnen worden herkend op onderwaterbeeldmateriaal. Een programma hiervoor is Basegrain ontwikkeld door de ETH Zurich. Met bovenwaterbeeldmateriaal van grove korrels geeft Basegrain goede resultaten. Het programma is getest op video's van de rivierbodem van diverse Nederlandse rivieren.

Volautomatische herkenning van het beschikbare onderwatervideomateriaal geeft helaas zeer matige resultaten; veel korrels worden niet juist herkend en zelfs korrels die met het oog te onderscheiden zijn worden niet altijd juist herkend. Dit komt mogelijk door het spoeltransport waardoor het doorzicht in rivieren wordt beperkt. Ook heeft onderwater beeldmateriaal een ander type belichting en vereist het daarom een andere instelling van de filters. Ook was de kwaliteit van de gebruikte opnamen niet optimaal. Wanneer er oplossingen zijn gevonden voor het kleine doorzicht in rivieren, wordt aanbevolen Basegrain te testen met nieuw beeldmateriaal en de resultaten te vergelijken met zeefcurves.

Voor de gebruiker is het programma goed gedocumenteerd en redelijk gebruikersvriendelijk en geeft uitgebreide uitvoer files voor Excel, Matlab en Gis. Het instellen van de vele parameters in het programma is echter lastig, omdat de effecten van andere instellingen niet altijd duidelijk zijn.

Technology readiness level: TRL 5 – ontwikkeling (voor zandige bodems is het nog geen bewezen techniek, hoewel op het strand een vergelijkbare methode succesvol is toegepast) .

Status in Nederland: Testen.

5.6.1.5 *Medusa*

Met de 'metallic trace elements' (MEDUSA) techniek wordt op basis van de aanwezige natuurlijke radioactiviteit de bodem geclassificeerd. Een meetsensor wordt achter een boot over de waterbodembodem gesleept. Deze sensor meet de natuurlijke radioactiviteit in de toplaag van de waterbodembodem. Hieruit kan verschillende informatie over de bodemclassificatie worden afgeleid en ook bodemruwheid of chemische kwaliteit.

Het systeem bestaat uit een aantal sensoren, waarvan de gammasensor de belangrijkste is. Deze gammasonde meet de concentraties van een aantal in de bodem aanwezige radioactieve stoffen. Deze stoffen zijn ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U en - soms - ^{137}Cs . Van deze stoffen is ^{137}Cs het gevolg van de kernramp bij Tsjernobyl in 1986, de overige drie komen van nature voor in de bodem. De gammastraling wordt gedetecteerd met een scintillatie kristal en een fotomultiplier buis. De meting is passief, wat betekent dat er geen straling wordt uitgezonden of met bronnen wordt gewerkt maar de natuurlijke straling die uit de bodem komt wordt gemeten.

De bekende relatie tussen concentraties radionucliden en de sedimentsamenstelling wordt gebruikt om aan de hand van de gemeten concentraties radionucliden de samenstelling van de rivierbodembodem te definiëren. De radiometrische samenstelling van de bodem wordt ingemeten. Vervolgens wordt op basis van de veldmetingen een aantal (ongeveer 5-10) bodemmonsters genomen. Van elk van deze monsters wordt in het lab zowel de concentratie radioactieve stoffen bepaald, als ook de textuur en (indien gewenst) de chemische kwaliteit. Door de fysisch/chemische eigenschappen van de monsters te relateren aan de nuclidconcentraties in de monsters, kan een verband worden vastgesteld waarmee de veldmeting kan worden vertaald naar bodemeigenschappen. Op deze manier kan achteraf de samenstelling in percentages klei, silt en zand worden gegeven op ieder meetpunt.

MEDUSA wordt ook gebruikt om graniet te volgen, wat bovenop suppleties is aangebracht.

Technology readiness level: TRL 8 – Pre operationeel.

Status in Nederland: Wordt toegepast.

5.6.2 Substraat (30-300 cm onder het bodemoppervlak)

5.6.2.1 *Boringen*

De meeste boringen in Nederland zijn genomen op land, langs de rivier en – destijds – onder dijken. Boringen in de rivier zijn nog relatief schaars. Het nemen van boringen in de rivierbodembodem geeft de meest betrouwbare data voor inzicht in de sedimentaire samenstelling en gelaagdheid van de rivierbodembodem. Om de gehele actieve laag te monitoren zijn boringen van 3 m diep voldoende. Deze eigenschappen zijn van belang bij het verklaren van de variaties in snelheden van bijvoorbeeld bodemerosie, sedimenttransport en bodemdynamiek. Interpretaties van akoestische sub-bottom profiler data kunnen worden gebruikt om tussen boringen te interpoleren.

De meest geschikte methode voor boren in de rivier is het nemen van vibrocores. Vibrocores leveren ongestoorde boorkernen tot maximaal 6 m onder het bodemoppervlak. Met een

vibrocorer wordt vanaf een schip met studpalen een steekkern genomen (diameter 97 mm) in de rivierbodem; indien nodig vibreert het apparaat om de juiste penetratiediepte te behalen. Het einde van de kern wordt gesloten met een zachte 'core catcher' of een afsluitklep, afhankelijk van het sediment, om de sedimenten in de kern te houden. De ongestoorde kern wordt in delen van 1 m gesneden, vervoerd naar het laboratorium en daar geopend voor beschrijving. Het voordeel van ongestoorde kernen is dat de gelaagdheid van de sedimenten kan worden beschreven (bv voor de interpretatie van sub-bottom profiel data) en de bemonstering voor korrelgrootteanalyses in het laboratorium nauwkeurig kan worden gedaan (zie ook paragraaf 5.6.1.1 voor box cores).

Andere technieken zijn:

- piston coring: ook voor ongestoorde boorkernen, maar piston cores hebben vrijwel geen penetratie in zand. Ook moet de piston corer een vrije val hebben van circa 3 meter, wat in de rivier kritiek wordt.
- spoelboringen: voor verstoorte boormonsters. Met een spoelboring wordt een mengsel van water en sediment omhoog gehaald en per diepte-interval opgevangen. Hiermee kan enkel de lithologie van het sediment worden bepaald, maar kan de sedimentaire gelaagdheid niet worden waargenomen en de nauwkeurigheid van diepte is minder. Spoelboren heeft een zwaar (10 ton) apparaat nodig en een zware kraan, dus is enkel op grote schepen toepasbaar.

Voor de locatiekeuzen van boringen is de beste methode om de onderwaterseismiek te analyseren en te gebruiken voor het interpreteren van de ondergrondprofielen. Op deze manier van slimme keuzes van locaties, kan het aantal boringen tot een minimum worden beperkt, om toch een volledig beeld te krijgen middels de ondergrondprofielen. In het ontwerpen van een vaarplan is het aan te raden om de locaties en timing van het boren af te stemmen met de experts van sub-bottom profiling data. Deltares kan het vaarplan opstellen in gezamenlijkheid met de Universiteit Utrecht en de University of Illinois.

Technology readiness level: TRL9 - operationeel. Marine Sampling Holland (MSH) voert regelmatig vibrocores uit op de rivier, zoals recentelijk 36 vibrocores bij Kampen. Deltares is ingericht op het verwerken, beschrijven, bemonsteren en interpreteren van boringen. Korrelgrootteanalyses kunnen worden uitgevoerd in het gezamenlijke laboratorium van de Universiteit Utrecht, TNO en Deltares (Castel).

Status in Nederland: vaak uitgevoerd in rivieren en op zee (zoals in het recentelijke Noordzee project 2016 voor RWS).

5.6.2.2 Chirp Sub-bottom Profiler

De tot nu toe beschreven akoestische systemen detecteren de bovenkant van de bodem. Indien de frequentie van het akoestische signaal verlaagd wordt, kan het signaal in de bodem doordringen en op structuren in de bodem reflecteren. Het belang van deze akoestische methoden is, net als bij de vlakdekkende oppervlaktewaarnemingen, dat een continu beeld van het substraat wordt verkregen in doorlopende profielen. Op deze manier kan de gelaagdheid worden gerelateerd aan de sedimentaire gegevens verkregen uit boringen op punten. Er zijn verschillende bodempenetrerende systemen. De eerste die we beschrijven is de chirp sub-bottom profiler.

Een chirp sub-bottom profiler zendt een signaal uit met een bepaalde tijdsduur (bijvoorbeeld 40 ms) waarbinnen de frequentie lineair toeneemt. In de akoestiek wordt dit signaal een 'sweep' of 'chirp' genoemd. Het signaal wordt opgewekt door een piëzo-elektrische bron en opgevangen door korte in het sleeplichaam verwerkte hydrofoonstreamer(s). Uit de

reflectiesterkte van de bodemecho kan de bodem geclassificeerd worden tot maximaal tientallen meters diep.

Door over een lengte langs de rivier te varen, kan de diepte van bijvoorbeeld klei- of veenlagen bepaald worden. Ook kan bepaald worden waar de rivier insnijdt in deltasedimenten. Deze informatie kan gebruikt worden om informatie uit boringen te interpoleren. Zoals bij alle bodemclassificatietechnieken geldt ook hier dat het resultaat gekalibreerd dient te worden met boringen.

Technology readiness level: TRL 9 – operationeel.

Status in Nederland: Chirp sub-bottom profilers worden in Nederland gebruikt.

3D-chirp

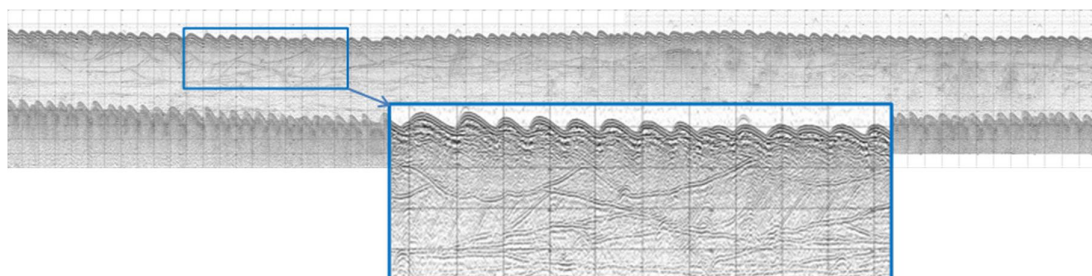
Een nieuwe techniek is de 3D-chirp. Deze geeft 3-dimensionale informatie over de footprint waarop deze werkt (5 à 6 m breed). Het voordeel van deze chirp ten opzichte van de gewone chirp is dat de drie-dimensionale informatie een volledig beeld van de ondergrond geeft en daarmee een heterogene ondergrond en interne structuren volledig kan weergeven. Deze techniek werkt goed in zand heeft een grotere footprint dan de 3D-parametrische echo sounder.

Technology Readiness Level: TRL6 – prototype. Een 3D chirp kan worden gebruikt van een partnerinstituut in het Verenigd Koninkrijk. De inplanning van dit apparaat speelt een rol in de inzet.

Status in Nederland: nog niet of nauwelijks toegepast.

5.6.2.3 *Parametric Echo Sounder (PES)*

De parametrische echosounder kan op decimeter-nauwkeurigheid de interne gelaagdheid in de bodem in continue langsprofielen weergeven (Sambrook Smith et al., 2013). PES zendt twee primaire frequenties van 100 kHz uit en genereert daarmee secundaire hoge-frequentie signalen (>200 kHz). Een tweede lage frequentie (1 – 10 kHz) kan in de bodem doordringen en de interne gelaagdheid weergeven. De PES werkt uitstekend in fijnkorrelig materiaal, ook goed in zand (tot enkele meters onder het oppervlak), maar minder goed in grind. De PES heeft ook een kleinere verstoring aan het bodemoppervlak dan andere systemen en werkt met de korte puls uitstekend in kleine waterdiepten (bv. 2 meter). Het grote voordeel van deze PES is dat de ongeëvenaarde resolutie de interne gelaagdheid in recente bodemvormen in de rivier kan detecteren (Figuur 5.12), terwijl de meeste andere sub-bottom profilers in dit relatief homogeen materiaal (kleine verschillen in korrelgrootte) geen reflecties geven. Door een aantal langsprofielen in de rivier op te nemen, kunnen 2.5D sedimentaire structuren in de ondergrond en de variabiliteit van deze structuren in zijn geheel worden gekarakteriseerd, wat met enkel puntinformatie van alleen boringen onzeker blijft. Zo kunnen ook andere alluviale afzettingen in de architectuur, zoals laterale en verticale accretievlakken (*point bars*, geulmigratie) en de erosie en opvulling van kleinere geulen, van duinen worden onderscheiden (Sambrook Smith et al., 2016). Ditzelfde geldt ook voor de erosie en opvulling van erosiegeulen door propellers van schepen (paragraaf 5.5.3.3). Deze dwarsdoorsnedes van de ondergrond zijn extra waardevol samen met de sedimentclassificatie uit multibeam backscatter en boringen om een volledig beeld van de rivierbodem te krijgen. Ware 3D PES-data kan ook worden opgenomen met de nieuwe multi-transducer techniek, voor de (heel kleine) footprint waarmee de PES werkt.



Figuur 5.12 Voorbeeld van een PES-profiel van de interne structuren in bodemvormen en erosievlakken in de Mekong rivier, Cambodja. Voor schaal: één vak in het grid is 10 m in de horizontaal en 1 m in de verticaal. (Figuur aangedragen door J. Best.)

In rivieren zijn er verschillende toepassingen van PES denkbaar. Uit PES opnamen is mogelijk te bepalen hoe sediment uitwisselt met de diepere lagen. Uit diktes van de individuele duinafzettingen en de analyse van erosievlakken kan zandtransport en sedimentatie worden bepaald. Ook kan de mate waarin duinen bewaard blijven in de ondergrond (preservatiepotentieel) voor verschillende rivieren worden gekwantificeerd.

Een tweede denkbare toepassing is dat actieve duinen kunnen worden gevolgd in de tijd. Dit is van belang voor het begrip van de structuren in het substraat en het vaststellen van wanneer de verschillende duinen in de sequentie zijn afgezet en geërodeerd. Dit kan - bij benadering - door de huidige migratie van bodemvormen in de rivier te gebruiken (morfodynamiek uit MBES tijdreeksen, paragraaf 5.5.3.4), maar het zou beter zijn om een korte tijdreeks van PES profielen op te nemen, van bijvoorbeeld 6 opnamen in de tijd (aantal en frequentie is o.a. afhankelijk van de mate van dynamiek). De meerwaarde van een korte tijdreeks van PES-data is dat de actieve duinen kunnen worden gevolgd en de preservatie, afsnijdingen en het hertransporteren van sediment kunnen worden gekoppeld aan tijd en migratiesnelheden. Hiermee worden rivierprocessen en de afzettingen in de rivier aan elkaar gerelateerd, wat leidt tot het begrip van het natuurlijke gedrag van de rivierbodem in ruimte en tijd.

Een derde toepassing is dat met het reconstrueren van de afzetting en erosie van duinen uit de sedimentaire structuren in de eerste paar meter onder de rivierbodem een nauwkeurige (kwantitatieve) inschatting kan worden gemaakt van sediment dat in de bodem gepreserveerd blijft en sediment dat opnieuw wordt opgenomen door de stroming en verder getransporteerd (gereactiveerd) wordt (Sambrook Smith et al., 2013; 2016). Omdat de structuren gerelateerd zijn aan de waterstand, migratiesnelheid van duinen en sedimentaanvoer, kan de verticale sequentie ook inzicht geven in de veranderingen van het sedimentatie- en erosiegedrag over langere tijd: veranderingen in dikte van de gelaagdheid en/of een verandering in de complexiteit van de afsnijdingen indiceren een verandering in stroomcondities en bodemvormgeometrie en -migratie (bv. tijdens floods).

Voor de PES-data is het belangrijk dat deze samen met de multibeamlodingen kunnen worden geïnterpreteerd: vaak kunnen PES en MBES tegelijk worden opgenomen in dezelfde meetcampagne (dat spaart tijd) of anders in de dag(en) direct daarop volgend. Ook de combinatie met sedimentclassificatie levert informatie over bijvoorbeeld de korrelgrootteverschillen van de invullingen van natuurlijke geulen of scheepserosiegeulen. Boringen zijn nodig om de korrelgrootten van de sedimenten op diepte te bepalen en afvoer- of stroomsnelheidsgegevens zijn nodig om de sedimentmobiliteit uit te kunnen rekenen en de conclusies over rivierprocessen en afzettingen te kunnen trekken.

Zoals bij alle akoestische methoden, vraagt iedere survey wat tijd voor calibratie om het apparaat met de juiste instellingen goed af te stemmen op de lokale omstandigheden.

Technology Readiness Level: TRL 7 – prototype operationeel voor bestaande apparatuur door experts. In deze survey werken Deltares en de UU samen met Prof. Jim Best, University of Illinois, USA, een expert op het gebied van PES-opnemingen in rivieren en het interpreteren van de data. Prof. Best is bereid zijn Innomar SES-2000 Light systeem beschikbaar te stellen. Dit huidige systeem is operationeel; met het nieuwe Innomar 4-transducer (3D) systeem zou een testopname moeten worden gedaan (TRL 7). In Nederland heeft o.a. de TUD-CITG een SES-2000 light PES, die in samenwerkingsverband (Deltares, Universiteit Gent) gebruikt wordt. Een 3D-PES is in bezit van het Vlaams Instituut voor de Zee (VLIZ). In het buitenland is PES toegepast in verscheidene rivieren in Argentinië (Sambrook Smith et al., 2013; Sambrook Smith et al., 2016) en in de Mekong (Figuur 5.12).

Status in Nederland: nog niet of nauwelijks toegepast.

5.6.2.4 *Andere sub-bottom profilers (X-star, GPR)*

Andere opties voor sub-bottom profiling zijn X-star en Ground Penetrating Radar (GPR), maar de laatste is minder geschikt voor gebruik op de rivier. GPR is een goede methode voor het karakteriseren van de ondergrond, op resoluties vergelijkbaar met PES, en ook geschikt voor grove sedimenten (grind), maar GPR is het meest geschikt voor oppervlakken van zandbanken die boven water liggen. Wanneer GPR wordt toegepast in water hebben de GPR-data vaak een lagere resolutie in de ondergrond (Sambrook Smith et al., 2013).

X-star is een goede sub-bottom profile techniek, die kan worden toegepast op de rivier (een kleine X-star wordt bevestigd aan het schip; de grote aan een kraan) en heeft een penetratie tot maximaal 10 m onder het bodemoppervlak. In de waterdiepten op de rivier heeft X-star wel last van *multiples* (verstoring door secundaire reflectie met het wateroppervlak, en dus zitten de multiples ondieper in ondiep water) en is er een waterbodembrelectie (verstoring) van de eerste paar decimeters. X-star zou interne structuren in bodemvormen kunnen detecteren in de bovenste meters van het substraat, en werkt zeker goed voor reflecties op lagen van tegengestelde lithologie (klei, zand, veen).

Technology Readiness Level: TRL 9 – operationeel.

Status in Nederland: veel toegepast op zee en ook in de rivier. Deltares-TGG heeft een SB424 en SB512.

5.6.2.5 *Akoestiek met glasvezel*

Een nieuwe mogelijkheid met glasvezel is het meten van akoestiek. De glasvezel wordt op een bodem gelegd, waarover het sediment transporteert en wordt afgezet. Zo wordt er van onderaf door het nieuw afgezette sediment gemeten en kunnen interne structuren worden waargenomen. Een voorbeeld van een toepassing zou kunnen zijn het waarnemen van migrerende bodemvormen in de rivier en de interne structuren die daarmee gepaard gaan. Door de hoge frequentie van de metingen kan dit proces van sedimentatie en erosie worden gevolgd. Dit is een innovatieve methode, waarvan het waardevol en zou zijn om deze toe te passen op bodemvormen in de rivier.

Technology Readiness Level: TRL 6 – Prototype: de apparatuur bestaat en is getest, dus de technologie werkt; de verwerking en interpretatie van de data is nog experimenteel.

Status in Nederland: nog nauwelijks toegepast.

6 Aanbevelingen

6.1 Algemeen

Aanbevelingen worden gedaan over welke metingen nodig zijn om de lange-termijn (100-200 jaar) morfologische ontwikkeling van de Nederlandse delta te kunnen voorspellen. Voor afvoer, waterstand, bodemniveau, sediment transport en bodemsamenstelling worden generieke aanbevelingen gedaan hoe deze variabelen gemonitord moeten worden om op deze lange termijn veranderingen in de Bovendelta te kunnen verklaren en voorspellen. Het is aangegeven wanneer extra metingen nodig worden geacht ten opzichte van de huidige meetpraktijk.

Om aan de informatiebehoefte van Rijkswaterstaat en de kennisinstellingen te voldoen is een meetstrategie nodig, waarbij een combinatie van meetmethoden of technieken gekozen wordt die past bij de vraag. Vanzelfsprekend is voor het monitoren van morfodynamische trends een enkele campagne niet voldoende. Deze zal meerdere keren op vergelijkbare manier herhaald moeten worden om trends te kunnen bepalen.

In samenspraak tussen onderzoekers en beheerders van de rivieren, kan op basis van deze rapportage een gezamenlijk plan uitgewerkt worden voor optimale meetplannen. Bij deze toekomstige concretisering wordt dan specifiek voor de belangrijkste vragen in detail een meetcampagne uitgewerkt, inclusief welke sensoren op welke plaats met welke frequentie en met welke duur en afvoeromstandigheden worden ingezet.

Deze rapportage is een eerste aanzet, waarbij drie partijen enkele brainstorms hebben gehad. Zodra er daadwerkelijk gemeten gaat worden, zal meer/beter moeten worden overlegd met de experts en worden gematched met de noden van RWS en de kennisinstellingen.

6.2 Reguliere metingen

Metingen van de *samenstelling van de rivierbodem (zeefkromme)* werden tot 2002 regelmatig met een gemiddelde frequentie van eens in de 10 jaar uitgevoerd. Deze meetreeks is helaas onderbroken. De behoefte aan dergelijke data is juist nu erg groot, omdat er enerzijds aanwijzingen zijn dat veranderingen van de korrelgroottesamenstelling van het sediment aan het bodemoppervlak en die van de sedimentlast een grote rol spelen in de voortgaande bodemerosie en in de toekomstige ontwikkeling van de Bovendelta. Anderzijds is de behoefte juist nu groot omdat de mogelijkheden toenemen om het lange-termijn riviergedrag, en de invloed van het niet-uniforme karakter van het sediment daarop, te voorspellen.

Om lange-termijn morfodynamische toekomstvoorspellingen te kunnen doen (wordt de Nederlandse Rijn steeds meer een grindrivier, hoe verdelen zand en grind zich over de splitsingspunten), hebben we metingen van de fractiepercentages van 4 à 5 representatieve sedimentfracties nodig aan het bodemoppervlak (bijv 2 grind, 2 zand, fijner).

Wat betreft de techniek voor het meten van de samenstelling van het bodemoppervlak raden we aan dat de hoofdgeul wordt afgedekt over een groot gebied, via metingen middels (a) een "Loden Pot" (bijvoorbeeld iedere 500 m of afgestemd op andere metingen), (b) vibrocores (rond splitsingspunten Pannerdensch Kop en IJsselkop en rond de grind-zand overgang), en als aanvulling daarop (c) backscatter uit multibeamopname. De voorgestelde frequentie voor

de Loden Pot metingen en voor de vibrocores is eens per 5 jaar. Alleen op basis van bodemmonsters kan de korrelgroottesamenstelling (zeefkromme) worden bepaald.

Multibeam backscatter is geen alternatief voor het nemen van monsters. Het is wel een betrekkelijk eenvoudige en goedkope techniek om een ruimtelijk dekkend beeld te krijgen van de gemiddelde korrelgrootte (classificatie van fijn naar grof). Daarom wordt aanbevolen deze techniek te blijven onderzoeken en doorontwikkelen, en eens per jaar de backscatter van een multibeamopname te analyseren. De backscatter kan bij iedere multibeam survey zonder moeite worden opgenomen. Aanbevolen wordt de backscatter van de jaarlijkse peiling tussen de normaallijnen te analyseren. In gebieden met korrelgrootten kleiner dan 4 mm kan de gemiddelde korrelgrootte worden geclassificeerd van fijn naar grof en kunnen verschillen tussen jaren inzichtelijk worden gemaakt (zoals volgen van een grof front).

Het levert meerwaarde op wanneer bodembemonstering wordt afgestemd met de akoestische methoden in zowel locaties als timing in de meetplannen. Zo kunnen vibrocores worden gekoppeld aan sub-bottom profiling gegevens voor de ondergrond van de rivierbodem en bodemmonsters aan de akoestische classificatie van oppervlakte sedimenten. Het zou daarom goed zijn om bodembemonstering af te stemmen met eventuele andere toekomstige meetplannen (bijvoorbeeld campagnes met seismiek of akoestiek).

Wat betreft het bodemniveau in de hoofdgeul zijn de tweewekelijkse metingen nuttig. Tezamen met deze opnamen dienen de baggerlocaties en –volumen geanalyseerd te worden, zodat bekend is waar is gebaggerd (afgetopt) en gestort vlak voor de tweewekelijkse peiling. De beperkte periode van twee weken tussen opnamen maakt het mogelijk om uit de verschillen tussen opnamen inzicht in rivierprocessen te verkrijgen, zoals bijvoorbeeld de afhankelijkheid van erosie en sedimentatie met afvoer. De periode van twee weken maakt het ook mogelijk om methoden als verticale bodemdynamiek en “dune tracking” toe te passen, wat minder goed zal gaan wanneer de periode tussen opnamen wordt verlengd.

De huidige frequentie van de multibeam-metingen over een groter deel van de breedte (tussen de normaallijnen) van twee keer per jaar lijkt voldoende. Het bodemniveau in de kribvakken wordt eens in de 3 jaar bemeten: het droge deel via Lidar en het natte deel via multibeam-metingen (dit jaar op de agenda bij hoogwater). Deze frequentie lijkt in orde. Wat betreft het bodemniveau in de uiterwaarden bevelen we voor het droge deel aan Lidar in te zetten.

6.3 Continue metingen

Wat betreft afvoermetingen bevelen we aan de huidige correcties op de Q-h-relaties te onderzoeken, deze tegen het licht te houden, en de Q-h relaties frequent te controleren. Aangeraden wordt om de correctie van de rivierafvoer bij Lobith voor de voortgaande bodemerosie te heroverwegen. Dit omdat er ongeveer 20-30 jaar geleden een trendbreuk te zien is ten aanzien van de bodemerosie in de Bovenrijn (Blom, 2016).

We bevelen aan continue spoeltransportmetingen uit te voeren op de benedenranden van de Bovendelta: in de Waal bij Werkendam, Tiel en Nijmegen en Kop van de Oude Wiel, in de Nederrijn/Lek bij Hagestein, en in de IJssel bij Deventer en Kattendiep. Door ook op ingangen te meten, weet je beter in welke riviertak welk gedeelte achterblijft: ingang Pannerdensch Kanaal (Huissen), ingang Nederrijn (Arnhem), ingang IJssel (Westervoort, Doesburg). We raden aan dezelfde meetmethode te hanteren als die bij Lobith wordt gehanteerd. Daarmee kan onafhankelijk worden vastgesteld wat op de uiterwaarden achterblijft.

6.4 Projectmatige metingen

Wat betreft overig zwevend transport en bodemtransport bevelen we aan geen reguliere metingen uit te voeren, maar alleen projectmatige metingen. Overig zwevend transport en bodemtransport variëren namelijk teveel met het debiet en andere parameters. Er moeten dan teveel metingen worden uitgevoerd om een jaargemiddeld beeld te verkrijgen van het sedimenttransport.

We bevelen aan, afhankelijk van de bodemsamenstelling, met een parametric echo sounder of chirp langs de riviertakken van de Bovendelta eenmalig het substraat te classificeren (interne structuur van de ondergrond). In combinatie met boringen, wordt op deze manier bekend wat de bodemsamenstelling en verspreiding is van lagen die aangesneden worden bij verdere insnijding. Ook wordt duidelijk hoe boringen in de rivier geïnterpoleerd moeten worden. Aanbevolen wordt om in de meetplannen de timing en locaties van de seismiek en boringen op elkaar af te stemmen.

6.4.1 Hoogwaterdraaiboek

Ten aanzien van het Hoogwaterdraaiboek worden metingen van het sedimenttransport van korrelgrootteklassen tijdens hoogwater aanbevolen, zodanig dat we op basis daarvan sedimenttransportrelaties kunnen kalibreren. Op basis van beter gekalibreerde sedimenttransportrelaties ontstaat een beter beeld van de ontwikkeling van de Bovendelta delta in de komende 100-200 jaar. Er wordt aangeraden om, bijv. 3 weken lang tijdens een hoogwater, de volgende grootheden te meten op verschillende plaatsen in een dwarsdoorsnede:

- spoeltransport door middel van pomp vanaf ponton.
- overig zwevend transport via AZTM (snelheid en concentratie) plus pompfiltersysteem voor korrelgrootteverdeling (volume afzuigen en dan door valbuis, met extra fijn filter voor opvangen spoeltransport).
- bodemtransport aan de hand van verticale bodemdynamiek uit multibeam metingen (zeer frequente metingen met hoge resolutie noodzakelijk en daarom beperken tot een niet te lang traject). Dit levert ook informatie over de groei van bodemvormen en de daarmee gepaard gaande vormruwheid.
- samenstelling bodemoppervlak boringen via vibrocores (apart schip) tot 3 m diep in duintoppen en -troggen. We raden hier niet aan de "Loden Pot" te gebruiken, en geen digitale beeldopnames vanwege hoge concentraties spoeltransport.
- samenstelling bodemtransport via Nile sampler (geen Helly Smith), geen andere instrumenten, geen snelheidsmeters, geen camera's, evt wel op een iets hogere positie een snelheidsmeter
- waterdiepte voor stroomsnelheid.

6.5 Overige aanbevelingen

- Er zijn akoestische technieken die nu nog niet voldoende geschikt of betrouwbaar zijn, zoals het bepalen van bodemtransport uit ADCP metingen en het gebruik van waterkolom-backscatter metingen voor zwevend transport concentraties en 2D stromingspatronen. Aangeraden wordt om ontwikkelingen in de wetenschap en bij andere overheden te volgen, omdat deze techniek relatief eenvoudig ruimtelijk dekkende informatie levert.
- Aangeraden wordt om te investeren in het doen van AZTM metingen van overig zwevend transport. Dit type metingen lijkt sinds 2004 niet meer te zijn ingezet en er zal opnieuw ervaring moeten worden opgedaan met deze techniek in rivieren.

7 Referenties

- Best, J., S.M. Simmons, D.R. Parsons, K. Oberg, J. Czuba and C. Malzone (2010). A new methodology for the quantitative visualization of coherent flow structures in alluvial channels using multibeam echo-sounding (MBES). *Geophysical Research Letters* 37, L06405, doi: 10.1029/2009GL04185.
- Blom, A. (2016). Bodemerosie in de Rijn. WaterViewer, Technische Universiteit Delft, http://waterviewer.tudelft.nl/#/bodemerosie-in-de-rijn-1476873029138_151,152,155,184,163.
- Buijsman, M.C. and H. Ridderinkhof (2007) Long-term ferry-ADCP observations of tidal currents in the Marsdiep inlet, *Journal of Sea Research* 57, 237-256.
- Ditzel, H., and De Vos, W. (1986). "Afnametests gemodificeerde AZTM." Rijkswaterstaat Directie Zeeland notitie DDWTZ 86.382 (in Dutch).
- DOD, Department of Defense USA, Defense Acquisition Guidebook, 2006.
- Eleftherakis, D., Amiri-Simkooei, A.R., Snellen, M. & Simons, D.G., (2012) Improving riverbed sediment classification using backscatter and depth residual features of multi-beam echo-sounder systems, *Journal of the Acoustical Society of America*, Volume 131 (number 5), pp. 3710-3725
- Frings, R.M., and Kleinhans, M.G. (2008) Complex variations in sediment transport at three large river bifurcations during discharge waves in the river Rhine. *Sedimentology* 55, 1145-1171, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3091.2007.00940.x>
- Frings, R.M., Berbee, B.M., Erkens, G., Kleinhans, M.G. and Gouw, M.J.P. (2009) Human-induced changes in bed shear-stress and bed grain-size in the river Waal (The Netherlands) during the past 900 years. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 503-514, <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1746>
- Frings, R.M. (2011). Sedimentary characteristics of the gravel–sand transition in the River Rhine, *Journal of Sedimentary Research*, 2011, v. 81, 52–63, DOI: 10.2110/jsr.2011.2
- Gaida, T.C., Snellen, M., Van Dijk, T.A.G.P. and Simons, D.G. (submitted). High-resolution seabed-mapping using multi-beam backscatter: comparison of acoustic seabed classification results and state-of-the art geological maps. *Submitted to Hydrobiologia*.
- Guo en Julien (2005), Modified log–wake law for zero-pressure-gradient turbulent boundary layers, *Journal of Hydraulic Research* Vol. 43, No. 4.
- Hoitink, A.J.F., F.A. Buschman & B. Vermeulen, 2009, Continuous measurements of discharge from a horizontal acoustic Doppler current profiler in a tidal river, *Water Resources Research* 45, W11406.
- Hopman, V., G. Diaferia, P. Doornebal, Fibre Optics - potential applications for environmental monitoring, Deltares rapport 1208987-000-BGS-0003, 2014.

- Huisman, Y., E. Mosselman (Deltares), D. Eleftherakis en M. Snellen (TU Delft) (2013), Bodemblues: echoclassificatie van Rivierbodems: naar de praktijktoepassing, Deltares rapport 1205961-002.
- Jamieson, E.C. , C. D. Rennie, R. B. Jacobson and R. D. Townsend, Evaluation of ADCP Apparent Bed Load Velocity in a Large Sand-Bed River: Moving versus Stationary Boat Conditions, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 1372011, doi [10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000373](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000373), 2011.
- Kleinhans, M.G. and Ten Brinke, W.B.M. (2001). Accuracy of cross-channel sampled sediment transport in large sand-gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering* 127 (4), 258-269, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:4\(258\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:4(258))
- Kleinhans, M.G. (2001). The Key Role of Fluvial Dunes in Transport and Deposition of Sand-Gravel Mixtures, a preliminary note, *Sedimentary Geology* Vol. 143, issues 1-2 (ExpresSed), 7-13, [http://dx.doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00109-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00109-9)
- Kleinhans, M.G. (2005). Subaqueous dunes, transport and deposition of sand-gravel mixtures: linking process and deposit in fluvial channels. Special Publication Number 35 of the International Association of Sedimentologists, eds. M.D. Blum S.B. Marriott and S.F. Leclair, Blackwell publishing, Malden, USA, 75-97
- Kleinhans, M.G. and Grasmeyer, B.T. (2006). Bed load transport on the shoreface by currents and waves. *Coastal Engineering* 53 (2006), 983-996, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.06.009>
- Kleinhans, M.G., Wilbers, A.W.E. and Ten Brinke, W.B.M. (2007). Opposite hysteresis of sand and gravel transport up- and downstream of a bifurcation during a flood in the River Rhine, The Netherlands. *Netherlands Journal of Geoscience* 86(3), 273-285
- Kleinhans, M.G., K.M. Cohen, J. Hoekstra and J.M. Ijmker (2012), Evolution of a bifurcation in a meandering river with adjustable channel widths, Rhine delta apex, The Netherlands, *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 2011-2027, <http://dx.doi.org/10.1002/esp.2222>
- Kostaschuk, R., and J. Best (2005), Response of sand dunes to variations in tidal flow: Fraser Estuary, Canada, *J. Geophys. Res.*, 110, F04S04, doi:10.1029/2004JF000176.
- Lurton, X. and G. Lamarche, Eds. (2015). *Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars: guidelines and recommendations*, 200 pp., <http://geohab.org/wp-content/uploads/2014/05/BSWGREPORT-MAY2015.pdf>.
- Middelkoop en Asselman (1998), Spatial variation of floodplain sedimentation at the event scale in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands, *Earth Surf. Process. Landforms* 23, 561–573.
- O'Neill, F.G., S.M. Simmons, D.R. Parsons, J.L. Best, P.J. Copland, F. Armstrong, M. Breen and K. Summerbell (2013). Monitoring the generation and evolution of the sediment plume behind towed fishing gears using a multibeam echosounder. *ICES Journal of Marine Science* 70(4): 892-903, doi: 10.1093/icesjms/fst051.
- Ogink, H.J.M. en C. Stolker (2004), Verbetering Qf-relaties, WL rapport ZWS5957/Q3847.95 in opdracht van RWS/RIZA.

- Sambrook Smith, G.H., Best, J.L., LeRoy, J.Z. and Orfeo, O. (2016) The alluvial architecture of a suspended sediment dominated meandering river: the Río Bermejo, Argentina. *Sedimentology*, doi: 10.1111/sed.12256
- Sambrook Smith, G.H., Best, J.L., Orfeo, O., Vardy, M.E. and Zinger, J.A. (2013) Decimeter-scale in situ mapping of modern cross-bedded dune deposits using parametric echo sounding: A new method for linking river processes and their deposits. *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/grl.50703
- Schielen R., H. Middelkoop, A. Blom (2016). NKWK Onderzoekslin Rivieren - Naar een meerjarig onderzoeksprogramma.
- Schroevers, M. et al., Verkenning ontwikkelingen aanbod natte informatie t.b.v. RWS: Waterbeweging, waterkwaliteit en bodemligging, Deltares rapport 1209377-002-ZKS-0003, Versie 1, 3 augustus 2014.
- Simmons, S.M., D.R. Parsons, J.L. Best, O. Orfeo, S.N. Lane, R. Kostaschuk, R.J. Hardy, G. West, C. Malzone, J. Marcus and P. Pociwardowski (2010). Monitoring Suspended Sediment Dynamics Using MBES. *Journal of Hydraulic Engineering* 136(1): 45-49, doi: 10.1061/_ASCE_HY.1943-7900.0000110.
- Sloff, K., R. vd Sligte, W. Ottevanger (2014) Morfologische Pakketsom Waal, Deltares rapport 1208454-000.
- Snellen, M., K. Siemes, J. Janmaat and D.G. Simons (2015). The effect of bathymetric measurement uncertainty on multibeam echosounder sediment classification. 37(part 1): 273-280.
- Spruyt, A. (2017). Data ontsluiting rivieren; NKWK-pilot C1. Deltares rapport 1230044-000.
- Ten Brinke, W.B.M., L.J. Bolwidt, E. Snippen en L.W.J. van Hal (2001), Sedimentbalans Rijntakken 2000: Een actualisatie van de sedimentbalans voor slib, zand en grind van de Rijntakken in het beheersgebied van de Directie Oost-Nederland, RIZA rapport 2001.043, ISBN 9036953995
- Van Dijk, T.A.G.P. & Lindenbergh, R.C. (2017). Methods for analysing bedform geometry and dynamics. Thematic chapter, CH2, p. 7-13. In: Guillén, J., Acosta, J., Chiocci, F.L., Palanques, A. (Eds.): *Atlas of Bedforms in the Western Mediterranean*, Springer. Edition 1, ISBN 978-3-319-33940-5 (eBook), 978-3-319-33938-2 (hardcover); DOI 10.1007/978-3-319-33940-5, 307 pages.
- Van Dijk, T.A.G.P., Lindenbergh, R.C. & Egberts, P.J.P. (2008). Separating bathymetric data representing multi-scale rhythmic bedforms: A geostatistical and spectral method compared. *Journal of Geophysical Research*, 113, F04017, doi:10.1029/2007JF000950.
- Van Dijk, T.A.G.P., van der Tak, C., de Boer, W.P., Kleuskens, M.H.P., Doornenbal, P.J., Noorlandt, R.P. and Marges, V.C. (2011). The scientific validation of the hydrographic survey policy of the Netherlands Hydrographic Office, Royal Netherlands Navy. Deltares report 1201907-000-BGS-0008, 165 pp.
- Van Dijk, T.A.G.P., Van Heteren, S., Kleuskens, M.H.P., Vonhögen-Peters, L.M., Doornenbal, P.J., Van der Spek, A.J.F., Hoogendoorn, R.M., Dorst, L.L. and Rodriguez Aguilera, D. (2012a). Quantified sea-bed dynamics of the Netherlands

Continental Shelf and the Wadden Sea: a morphological and sedimentological approach. Conference proceedings Hydro12, 57-62, doi 10.3990/2.233, <http://proceedings.utwente.nl/233/>

Van Dijk, T.A.G.P., van der Mark, C.F., Doornenbal, P.J., Menninga, J., Keppel, J.F., Rodriguez Aguilera, D., Hopman, V. and Erkens, G. (2012b). Onderzoek Meetstrategie en Bodemdynamiek. Deltares-rapport 1203849-000-BGS-0006, 92 pp.

Vermeulen, B., M. G. Sassi and A. J. F. Hoitink, Improved flow velocity estimates from moving-boat ADCP measurements, Water Resources Research, doi 10.1002/2013WR015152, 2014.

Wilbers, A.W.E. and Ten Brinke, W.B.M. (2003). The response of subaqueous dunes to floods in sand and gravel bed reaches of the Dutch Rhine. Sedimentology, 50, 1013-1034, doi: 10.1046/j.1365-3091.2003.00585.x.

A Bijlage: Memo Rijkswaterstaat ten aanzien van Informatiebehoefte

Aanzet actualisatie definitie informatiebehoefte systeemwerking morfologie rivieren,
Susanne Quartel en Arjan Sieben RWS ON & WVL d.d.15-02-2017

- 1) Achtergrond
- 2) Hoe speelt bodem een rol in de thema's voor rivierbeheer en –beleid
- 3) Wat zijn de relevante bodemparameters
- 4) Wat is de aard en variatie van de morfodynamiek
- 5) Informatiebehoefte trend morfodynamiek
- 6) Informatiebehoefte variaties morfodynamiek
- 7) Hoe moeten bodemparameters worden bepaald?
- 8) Conclusie informatiebehoefte systeemkennis rivierbodem

1) Achtergrond

Monitoring in rivieren is gebaseerd op een informatiebehoefte die is afgeleid van de thema's van rivierbeheer en rivierbeleid. Van de verschillende informatietoepassingen binnen RWS (berichtgeving, handhaving, prestatie-verificatie,..) richt deze notitie zich vooral op het inzicht dat voor beleid en beheer nodig is in het huidige en toekomstige gedrag van de rivierbodempligging. Er zijn als het gaat om kennis van morfologie min of meer vier afgeleide domeinen te onderscheiden:

Systeemkennis

1. *aard en variatie* van de dynamiek van die bodemparameters op de voor beleid en beheer relevante termijn
2. *invloed* van de dynamiek van bodemparameters op de thema's (functies) veiligheid, infrastructuur, bevaarbaarheid en ecologie

Toepassing van kennis - effectbeoordelingen

3. *effect* van maatregelen op bodemparameters, en daarmee op de genoemde gebruiksfuncties
4. *weging* van die effecten in de evaluatie van maatregelen

Allen spelen een rol bij het vaststellen van de informatiebehoefte. In deze notitie ligt de nadruk op de twee eerste aspecten. Het derde betreft bijvoorbeeld uitvoering van de pilots sedimentsuppletie en langsdammen, het analyseren en simuleren van vaargeulafmetingen en onderhoud gedurende de verschillende contractperioden, en op wat langere termijn het analyseren en simuleren van bodemveranderingen bij rivierverruimingsmaatregelen.

Dat betekent dat bekeken moet worden wat de *invloed van rivierbodempligging is op de functies en thema's van beleid en beheer, hoe de relevante delen van de rivierbodem zich gedragen op de termijnen van beleid en beheer en tenslotte hoe ingrepen (aanleg en onderhoud) dit gedrag beïnvloeden.*

In feite leidt zo'n inventarisatie tot een functioneel programma van eisen voor de informatiebehoefte als onderdeel van een instandhoudingsplan waarin tot uitdrukking komt *hoe kan worden geborgd dat de juiste informatie goed en voldoende wordt ingewonnen en toegepast.*

2) Hoe speelt bodemligging een rol in de thema's voor rivierbeheer en -beleid

In de rijkswateren zijn hoogwaterveiligheid, zoetwaterhuishouding, natuur en vaarweggebruik als thema relevant. Een belangrijk operationeel aspect is onderhoud want rivierbodempliggingen funderen en bergen een groot volume aan kunstwerken en infrastructuur aan, in en onder de wateren.

A) hoogwaterveiligheid

Hoogwaterveiligheid kan worden opgevat als de maatgevende resultante van een belasting (AI) en sterkte. Bodemligging is voor beide factoren van belang. Immers, een hydraulische belasting is een combinatie van golven, windopzet en een stromingsgedreven waterstand. Elk van deze drie is in meer of mindere mate onder andere afhankelijk van waterdiepte en daarmee van bodemhoogte in een relatief groot invloedsgebied rondom de kering.

De sterkte van een kering is de mate van weerstand tegen bezwijkmechanismen die het functioneren aantasten. De bodem rondom de kering vormt het fundament van de kering en is bepalend voor destabiliserende grondwaterstromen onder en door de kering. Door stroming en golven kunnen stroomgeulen en kuilen zich verplaatsen of uitbreiden richting keringen waardoor de sterkte van dit fundament vermindert.

B) waterhuishouding

Ten aanzien van de kwalitatieve aspecten van zoetwaterhuishouding (BI) speelt bodemligging een rol bij het tegengaan van zoutindringing in de Rijn-Maasmonding; direct via de lokale weerstand tegen zouttongen en wat grootschaliger indirect via afvoerdeling over diverse splitsingspunten in de Rijn-Maasmonding.

Kwantitatieve aspect van zoetwaterhuishouding (BII) is de verdeling van water. De bodemligging i.r.t. de ligging van inlaten bepaalt de beschikbaarheid van water voor aangetakte (regionale) systemen.

C) natuur

De dynamiek tussen getijde-wateren, wind en bodem is met name langs de kust een basis voor hoogwaardige natuur. De hoogte, samenstelling en dynamiek van de bodem dragen in zeer grote mate bij aan natuurwaarden van bijvoorbeeld de Waddenzee. Voor rivieren is de bodemligging met name substraat voor ecologische ontwikkeling en, wat grootschaliger, de drager van (grond-) waterstanden. Dynamiek in bodem en oevers biedt een grotere diversiteit in substraat en dat is wenselijk voor natuur. Voortdurende rivierbodemerrosie leidt tot verdere verdroging langs rivieren en een beperkter verbinding tussen het zomerbed en uiterwaardnatuur (mondigen van beken,..).

D) scheepvaart&infrastructuur

Op grotere lengteschaal dragen bodemliggingen de (laag) waterstanden in rivieren en zijn daarmee van grote invloed op de handhaving van vaargeuldiepten en –breedten op de langere termijn. Op kleinere lengte schaal zijn bodemliggingen bepalend voor lokale diepten en dat is bepalend voor het gebruik en onderhoud van vaarwegen op de kortere termijn van het operationele rivierbeheer. Bovendien speelt de bodemligging een rol bij het afdekken van rivierkruisende kabels en leidingen. Wanneer de bodemhoogte daalt, dan neemt de dekkingsgraad af en kunnen kabels en leidingen bloot komen te liggen.

3) Wat zijn de relevante bodemparameters

De eerste vraag is hoe de bodem van de rijkswateren de genoemde thema's (hoogwaterveiligheid, zoetwaterhuishouding, natuur en scheepvaart) beïnvloedt. Vanzelfsprekend zijn voor die thema's meer parameters relevant dan morfologie. Bovendien varieert de invloed van morfologische parameters voor de verschillende thema's. Dat is uiteindelijk mede bepalend voor het formuleren van de informatiebehoefte.

Onder de noemer Deltamodel¹ zijn verschillende modellen samengebracht waarin verschillende bodemparameters een inputvariabele zijn. Met deze modellen kan de invloed van de bodemligging (zie hoofdstuk 1) gesimuleerd worden voor de eerder genoemde thema's:

- A. - bepaling van hydraulische belastingen op waterkeringen. Dit is een exercitie met hydraulische modellen waar representatieve *bodemhoogten en bodemruwheid* in worden beschouwd om een maatgevende belasting te bepalen.
 - beoordeling van sterkte van keringen en andere infrastructuur aan, in en onder de rivierbodem. Dit vergt grondmechanische modellen die voor representatieve *bodemhoogten en grondmechanische parameters* de stabiliteit van kunstwerken en keringen karakteriseren.
- B. Bepaling van het zoetwatergebruik. Dit vergt hydraulische modellen voor het bepalen van zoutindringing in de Rijn-Maasmond en de zoetwaterafvoerdeling in de Rijntakken. Ook in deze hydraulische modellen wordt morfodynamiek in termen van *bodemhoogten en bodemruwheid* beschouwd.
- C. Bepaling van de systeeminvloed op natuur. Dit vergt ecologische modellen om de verwachte abiotische parameters van water en bodem (*areaal droogvallende bodem, zand&slib verdelingen en de dynamiek hierin*) te vertalen in ecologische waarden
- D. Bepaling van vaargeulafmetingen en het bijpassend vaargeulonderhoud en vaargeulgebruik. Hiervoor zijn morfologische modellen nodig voor het weergeven van *bodemhoogte en bodemvormen* en waterstanden, en van de dynamiek hierin in combinatie met vaargeulonderhoud. Daarnaast vergt dit nautische modellen om met de morfologie de impact van (toekomstige) vaargeulafmetingen op het vaarweggebruik te schatten.

¹ Een onderdeel van het Deltamodel is het Riviermorfologisch Deltamodel voor de simulatie van bodemdynamiek in Rijntakken en Rijn-Maasmond.

De relevante bodemparameters die moeten worden bepaald en voorspeld op een voor het rivierbeheer en -beleid relevante termijn zijn dus

ten tijde van maatgevende belastingen/sterkte (i.e. groter rivierafvoeren of storm)

- o bodemligging; bij (het voorland van) keringen;
- o
- o bodemruwheid (i.e. bodemsamenstelling en bodemvormen);
- o grondmechanische sterkte-parameters bij (het voorland van) keringen.

bij mediane en lagere afvoeren

- o bodemligging;
- o bodemruwheid (zoetwaterverdeling&zoutindringing)
- o bodemvormenonderhoud in de vaargeul (baggeren, storten, ploegen)
dynamiek en samenstelling van bodem en (onderwater) oevers in voor ecologie belangrijke seizoenen.

Voor wat betreft de relevante rivierfuncties gaat het bij morfologie dus om bodemligging, bodemruwheid, bodemvormen, substraat (bodemsamenstelling), vaargeulonderhoud en tot op zekere hoogte grondmechanische parameters.

4 Wat is de aard en variatie van de morfodynamiek

Omdat morfodynamiek zich op verschillende tijd- en ruimteschalen manifesteert is een onderscheid nuttig van morfodynamiek op de langere termijn en grote schaal van het gehele riviersysteem en dynamica op de tijd en ruimte-schaal van maatgevende processen. De tijdschaal van de grootschalige rivierbodempligging varieert voor wat betreft het rivierbeleid en -beheer van grofweg 10 jaar tot circa 100 á 200 jaar. De morfodynamiek op die lange termijn wordt meestal gezien als een trend onderweg naar een andere evenwichtsbodempligging. Voor die evenwichtsbodempliggingen zijn met name de systeemforceringen (zeespiegelstijging, lange trends in hydrografie, bovenstroomse regulering van afvoeren en sediment en mobiliteit van de rivierbedondergrond) van belang. De horizon van deze langere termijn is onder meer afhankelijk van aard en leeftijd van beschikbare data uit het verleden waarmee de voorspelmodellen zijn geijkt. Kennis van deze lange termijn morfodynamiek is noodzakelijk voor het voorbereiden en evalueren van investeringen (aanleg en onderhoud) op de termijn van een of meerdere decennia, zoals in bijvoorbeeld het deltaprogramma.

De variaties op deze lange termijn trends vormen de morfodynamiek op kortere termijn (minder dan een decennium) van het meeste rivierbeheer. Het gaat daarbij om processen die elk hydrografisch jaar optreden. Daarbij zijn veranderingen ook op een kleinere ruimteschaal relevant. Voorspellingen leunen daardoor op modellen die met meer temporeel en ruimtelijk detail gecalibreerd en geverifieerd moeten zijn. Een voorbeeld van karakteristieke perioden is gegeven in Tabel 1.

hoogwaterveiligheid zoetwaterhuishouding natuur scheepvaart	hoogwatergolven, stormperioden droogte periode seizoenen (vis, macrofauna, vegetatie,...) laagwaterperioden	meerdere dagen/enkele weken weken / enkele maanden enkele maanden drie kwart jaar
--	---	--

Tabel 1 Voorbeeld van karakteristieke tijdschalen voor morfodynamiek met een jaarlijkse cyclus.

De vier bodemparameters (bodemhoogte, bodemvormen, ruwheid en substraat) moeten zowel voor processen met een jaarlijkse cyclus als voor meerjaren-processen worden beschouwd. De overeenkomst tussen de jaarprocessen en meerjaren-ontwikkeling met rivierbeheer en rivierbeleid is overigens niet noodzakelijkerwijs.

Voorbeeld van modelparameters voor morfodynamiek op de lange termijn

- a) normaalbreedte-gemiddelde bodempligging per km vak :
- 1) meer-jaren trend (decennium) [m/jaar]
 - 2) standaardafwijking van meer-jaren trend [m]
 - 3) ratio standaardafwijkingen relatieve variatie en relatieve gradiënt [km/jaar]
 - 4) trend en grootte van bodemsprongen bij Pannerdensche Kop en IJsselkop [m]
- b) waterstand voor elk MWTL station
- 1) meer-jaren trend (decennium) en waarde bij mediane afvoer [m/jaar];[m]
 - 2) meer-jaren trend (decennium) en waarde bij lage afvoer (OLA) [m/jaar];[m]

Voorbeeld van modelparameters voor morfodynamiek op de kortere termijn

- c) gemiddelde en standaardafwijking van bodemligging per km vak,
links, rechts van de rivieras en rondom rivieras
NAP+[m], [m]
- d) jaarlijks totaal (zo nodig per hotspot) gebaggerd volume
als functie van de gemiddelde afvoer Nov-Maart [m³/jaar]
- e) jaarlijks gebaggerd en gestort volume per km vak, links en rechts van de as [m³]
- f) jaarlijkse statistiek (gemiddelde, standaardafwijking en 90% waarden)
van twee-wekelijkse bodem in de vaargeul, per km vak NAP/OLR+[m]
- g) jaarlijkse statistiek (gemiddelde, standaardafwijking en 90% waarden)
van de mgd per km vak NAP/OLR+[m]

5 Informatiebehoefte trend morfodynamiek

De grootschalige meer-jaren dynamiek in rivierbodemligging wordt voldoende meegenomen bij actualisatie van modellen die om de vijf jaar wordt gedaan. Afgezien van ingrepen als verruiming en zomerbedverdieping zijn deze grootschalige veranderingen in het zomerbed slechts in de orde van 0.1 m, de invloed op bijvoorbeeld hydraulische belasting niveaus is daarvan slechts een fractie. Dus, *ten aanzien van de grootschalige morfologie in het zomerbed* volstaat een jaarlijkse opname van de bodemligging in het stroomvoerend profiel en een grofweg vijf-jaarlijkse actualisatie van modellen voor het vaststellen van de aspecten voor hoogwaterveiligheid, zoetwaterhuishouding en natuur. Dit kan met het bestaande monitoringsprogramma; hiervoor is dan ook geen aanvullende monitoring nodig.

Voorspellingen van toekomstige grootschalige ontwikkelingen van de rivierbodem worden veelal gemaakt door met modellen de trends van verschillende relevante fysische processen uit het verleden via calibratie van de modellen naar de toekomst te extrapoleren. Voorspellingen zijn daardoor voor een belangrijk deel een voortzetting van historische trends, maar wel met invloeden van gemodelleerde wisselwerkingen (trends hydraulica en morfologie, rivierbodem en ondergrond) en met gemodelleerde scenario's (klimaat, landgebruik, antropogene ingrepen).

Grootschalige (bodem)trends uit het verleden zijn daarom een belangrijke indicatie van grootschalige ontwikkelingen in de toekomst. De historische waarnemingen van de Rijntakken beschrijven de grootschalige rivierbodemontwikkeling op een tijdschaal van grofweg een eeuw. Historisch en geologisch onderzoek voor een groot deel van de rivieren biedt daarbij aanknopingspunten voor ouder systeemgedrag. Dat biedt een uitgangspunt voor een goed gecalibreerde en geverifieerde modellering van toekomstige grootschalige systeemtrend op een voldoende grote termijn². Ten aanzien van de grootschalige morfodynamiek wordt daarom gesteld dat *er voldoende waarnemingen beschikbaar zijn om in modellen bodemtrends van een passende tijdschaal te kunnen iken en verifiëren*. De grote waarde van deze historische waarnemingen

² Daarbij blijkt overigens dat de grootte en snelheid van opgetreden autonome bodemveranderingen in een aantal stroomvoerende rijkswateren veelal van vergelijkbare orde is als de verwachte grootte en snelheid van veranderingen in zeespiegel of rivierwaterstand door klimaatsverandering.

illustreert meteen het grote belang om deze waarnemingen voort te zetten. Immers, om gesteld te blijven staan voor de toekomst is voortdurende aanvulling van deze database nodig.

De historische waarnemingen zijn niet alleen een goede basis van morfodynamische verwachtingen maar meteen ook de beperking ervan. Immers, deze set heeft niet alle relevante trends bevatten, kan onvoldoende nauwkeurig zijn, of het zicht op potentiële trendbreuken in de toekomst beperken. Voor een goede extrapolatie van trends uit het verleden is ook begrip nodig van de wisselwerkingen (waterbeweging, bodem, ondergrond,..) en van de systeemforceringen (klimaat, menselijk ingrijpen). Voor wat betreft het laatste, menselijk ingrijpen speelt in toenemende mate een rol in zowel het *sedimentaانبod* (suppleren, baggeren en storten en fixatie van sediment in oevers,..) als in de *systeemcapaciteit voor erosie of sedimentatie* (landaanwinning, stroomregulering door normalisatie,..).

De grootste onzekerheden met het voorspellen van grootschalige toekomstige bodemtrends hebben te maken met

- 1) de toekomstige mobiliteit van de rivierbodem in insnijdende trajecten, welke wordt bepaald door een onbekende en mogelijk heterogene ondergrond
- 2) het toekomstig rivierbeleid in Duitsland en Nederland ten aanzien van dalende rivierbodempliggingen

De informatie behoefte voor lange termijn bodemontwikkeling is dus gericht op een

- i) voortzetting van historisch bemeaten bodemparameters (bodempliggingen, bodemsamenstelling), van waterstanden en afvoeren en tenslotte van aard en effecten van ingrepen en onderhoud (incl. zandwinning)
- ii) regelmatige (circa 10 jaar) calibratie en verificatie van relevante gemodelleerde wisselwerkingen tussen waterbeweging, rivierbodem en ondergrond,..
- iii) ontwikkeling en beschrijving van scenario's voor (toekomstige) antropogene invloeden en voor sets heersende fysische condities (klimaat, landgebruik,..)
- iv) verkenning van de behoefte aan uitbreiding van ondergrondmodellering in insnijdende trajecten

6 Informatiebehoefte variatie morfodynamiek

De informatiebehoefte van bodemparameters met een dynamiek op een tijd- en ruimteschaal van hoogwaterveiligheid, waterhuishouding, natuur en scheepvaart wordt als volgt verkend.

A. hoogwaterveiligheid: voorspellen belastingniveau's en sterkte

Voor de functie hoogwaterveiligheid is het noodzakelijk om voorspellen van hydraulische belastingniveau's en de sterkte van keringen.

Tijdens hoogwater kunnen bodempligging en ruwheid in het zomerbed variëren. De invloed daarvan op hoogwaterstanden wordt momenteel impliciet beschouwd middels calibratie van ruwheidsvoorspellers. Omdat de duur van hoogwatergolven versus de tijdschaal van bodemverandering en bodemvormen hier een rol speelt, is het de vraag of zo'n aanpak voldoende is voor het generiek voorspellen van extreme condities. Dus, voor de bepaling van hydraulische belastingniveau's worden geen morfodynamische modellen ingezet. Echter, een gevoeligheidsstudie om te verkennen of onzekerheden in hydraulische belastingen en voorspelde

hoogwaterstanden door een generieker simulatie van deze hoogwatermorfodynamiek (bodemhoogte en –ruwheid) relevant kleiner worden, is nuttig. Als dat zo blijkt te zijn kan waarneming van het hoogwatergedrag van bodemhoogte en bodemruwheid worden toegevoegd aan de monitoringsbehoefte. Het betreft dan vermoedelijk vooral zandiger rivierstukken met grote variaties in stroomsnelheid (Midden- en Beneden-Waal, Midden en Beneden-IJssel, Lek, Zandmaas en Getijde Maas).

Bij deze morfodynamiek tijdens hoogwater verdienen de splitsingspunten bijzondere aandacht. Een verkenning van scenario's van morfodynamiek bij splitsingspunten, en de impact daarvan op hydraulische belastingniveaus langs de takken kan nuttig zijn.

Een tweede aspect bij hoogwaterveiligheid betreft de voorspelling van sterkte van keringen voor zover die door rivierbodemdynamiek wordt beïnvloed. Het gaat dan om stabiliteit en kwelweerstand van voorlanden in het invloedsgebied van keringen of buitendijkse infrastructuur. Een eerste stap hiervoor is het voor de relevante rivierstukken ontwikkelen van

- i) voldoende accurate ondergrondsmodellen voor het inschatten van kansen op afschuiven, bressen en zettingsvloeiingen, en voor het inschatten van de mate van doorlatendheid)
- ii) voldoende accurate voorspelmodellen voor de ontwikkeling van de bodem in heterogene ondergrond (afwisselend harde lagen en dynamische zand bodem)

Ad i ondergrondmodellering. Dit geldt vooral voor Lek, Oude Maas, Noord, Beneden Merwede, delen van het Spui en de noordelijke helft van de Dordtsche Kil. Voor die takken is op dit onderwerp al een aantal stappen gezet. Omdat het veelal gaat om een grensvlak tussen verschillende beheergebieden is daarom een goede volgende stap om bij de betrokken beheerders te inventariseren wat aanvullend nodig is. Vervolgens zou moeten worden bepaald welke informatiebehoefte hieruit volgt en op welke manier deze data ingewonnen en gebruikt zou moeten worden.

Ad ii voorspelling van rivierbodempligging met heterogene opbouw.

Veranderingen in de rivierbodem zijn relevant voor de sterkte van keringen ter plekke van lokale, diepere kuilen in het invloedsgebied van (het voorland van) keringen (of buitendijkse infrastructuur). Dergelijke kuilen worden veroorzaakt door een plotseling toename in *bodemschuifspanning* (door forcering van stroming, bv bij onregelmatige oeverbelijning) en/of in *mobilititeit* (van een harde laag naar een zandige bodem). Vooral bij het tweede (heterogene bodem) is er weinig ervaring met een generieke voorspelling van bodemontwikkeling. Dus, voor een rivierbodem met kuilen en een heterogene opbouw, die relevant is voor de sterkte van (het voorland van) keringen, is behoefte aan voorspelgereedschap van a) *trendmatige* bodemontwikkeling in de kuilen zelf en aan de randen daarvan b) en *trendbreukscenario's* voor de kuil en het bodem daarom heen. Om de monitoringsbehoefte vast te kunnen stellen zou bepaald moeten worden welke informatie voor beide typen voorspelling nodig is. Dit speelt met name in de Rijn-Maasmonding (zie de nodige rapportages van Deltares in opdracht van RWS-WNZ, KPP Rivierkunde).

B. zoetwaterhuishouding: actualisatie van $Q(h)$ of $Q(f)$ relaties in de waterbalans

Een waterbalans is de basis voor het voeren van een waterhuishouding. Dat betekent dat grootte en kwaliteit van afvoeren in het riviersysteem voldoende nauwkeurig bekend moeten zijn. Bij gebruik van $Q(h)$ of $Q(f)$ relaties kan bodemdynamiek die correlatie verstoren. Als in komende decennia vanwege een grotere morfodynamiek door vele ingrepen (RVR, KRW, suppleties) de

geldigheidsduur van $Q(h)$ of $Q(f)$ relaties korter wordt dan zou er voortaan gestreefd moet worden om elke twee a drie jaar een voldoende set van afvoermetingen te hebben voor het actualiseren van met name de lagere afvoeren uit de $Q(h)$ of $Q(f)$ relaties in het riviersysteem.

D. scheepvaart: voorspellen afmetingen, onderhoud en gebruik vaargeul

Verwacht wordt dat de intensiteit van gebruik en onderhoud van de vaargeul (nog afgezien van ontwikkelingen in markt en vloot) groeit; lagere afvoeren betekent minder vaarwater met een intenser gebruik en ingrepen door RVR en KRW leiden tot aanzanding. Daarbij wordt overwogen om in de toekomst streefbodemliggingen in rivierbeheer te introduceren. Vermoedelijk speelt sedimentbeheer (suppletie) daarin een grote rol. Om met deze veranderde condities de vaarwegen verantwoord en effectief te kunnen handhaven is inzicht nodig in de ontwikkelingen van bodem, waterstand, onderhoud en mgd in komende jaren.

Bij dit thema worden intensief morfodynamische modellen ingezet in studies voor rivierbeleid en rivierbeheer. Simulatie met modellen speelt een grote rol en om deze modellen accuraat en actueel te houden is het noodzakelijk dat de huidige monitoring op de hoofdtransportas (dagelijkse mgd, tweewekelijkse peiling van de vaargeul, rapportage van onderhoud (sedimentlogboek) inclusief vaarttracks) en op de hoofdvaarwegen (jaarlijkse bepaling van bodemligging, rapportage van onderhoud en dagelijkse mgd's) onverminderd wordt voortgezet.

De pragmatische (maar weinig generiek) werkwijze is momenteel dat een onderscheid wordt gemaakt in grotere bodemvormen die vooral bepalend zijn voor de afmetingen van de vaargeul en het onderhoud daarvan, en kortere bodemvormen die bijdragen aan bodemruwheid bij zowel lagere en mediane afvoeren (scheepvaart). Voor de eerste categorie wordt de seizoensdynamiek mee genomen in morfodynamische voorspellingen. Voor de twee categorie wordt middels calibratie met algebraïsche correlaties eenvoudig instantane aanpassing aan de waterbeweging verondersteld. Verkend zou kunnen worden in welke mate dat de voorspelkracht van waterstanden beïnvloed.

Door de ingrepen van afgelopen jaren kan de rivierbodem trendbreuken vertonen die de waterstanden rondom mediane afvoer en lager beïnvloeden. Omdat dit belangrijke parameters zijn voor het gebruik en onderhoud van de vaargeul, is het nodig om jaarlijks, in verschillende afvoerclassen, meerdere waterstandsverhanglijnmetingen in de vrij-afstromende takken uit te voeren, in combinatie met simultane afvoermetingen. Deze metingen dienen geschikt te zijn om maatgevende waterstandsvlakken (OLR) jaarlijks te verifiëren, en bij grote afwijkingen zo nodig te actualiseren.

Een groot aantal rivieroevers zijn/worden aangepast ten behoeve van natuur. Dit kan op de smallere rivieren (IJssel en Maas) leiden tot i) lokale veranderingen in weerstands- en dwarskrachten op varende schepen en ii) lokale aanzanding en daarmee tot meer onderhoud in de vaargeul. Vooral nog zijn hiervoor monitoringsprogramma's gestart. Als de monitoringsprogramma's er niet in voorzien dan is het voor het inzicht in bodemontwikkelingen aanvullend nodig om grofweg elke vijf jaar de bodemligging tussen normaallijn en de stabiele oeverzone te meten op trajecten waar kribvakken/oever/inlaten door ingrepen dynamischer zijn geworden.

7 Hoe moeten bodemparameters worden bepaald?

De relevante bodemparameters zijn bodemhoogte, bodemvormen, bodemruwheid, en bodemsubstraat. De dynamiek hierin wordt zo nodig verklaard, inzichtelijk gemaakt en voorspeld met behulp van modellen voor morfodynamiek.

Voor een groot deel van de rivieren geldt dat deze modellen goed ontwikkeld en gebruikt kunnen worden met behulp van informatie uit bodempeilingen, zolang de bodemdynamiek en andere relevante parameters (bodemsamenstelling, baggeren en storten) voldoende worden gemonitord. Bodemdynamiek is onvolledig zonder informatie over antropogene ingrepen (gebaggerd, gestort, gesuppleerd) en zonder informatie over bodemsamenstelling.

bodempeilingen

Omdat bodempeilingen, naast informatie over ingrepen en bodemsamenstelling een centrale rol hebben bij het calibreren en verifiëren van modellen voor de lange en korte termijn bodemontwikkelingen, verdient het definiëren van de bodemparameters (trends variaties en trendbreuken in bodemvorm-gemiddelde ligging, gedrag van verplaatsende en plaatsvaste bodemvormen) en het eenduidig bepalen daarvan een belangrijkere rol dan nu. Verkend kan worden of de huidige werkwijze geschikt is en hoe dit kan worden verbeterd.

bodemsamenstelling

Voor een goede voorspelling van bodemligging in de vaargeul nodig om de bodemsamenstelling van alle riviertrajecten in een vijf-jaarlijks ritme te bepalen. Daarbij is meer dan vroeger behoefte aan ruimtelijke dekking van waarnemingen van de bodemsamenstelling. Inzet van bodemklassificatie op basis van MBES backscatter in combinatie met efficiënte bemonstering lijkt hiervoor een goede optie. Bovendien kan korrelgrootte-bepaling door bewerking van beeldopnamen van rivierbodem / bodemmonsters een efficiënte aanvulling zijn op fysieke zeefanalyses. Daarmee nemen de mogelijkheden voor bepaling van de bodemsamenstelling met een goede ruimtelijke dekking aanzienlijk toe.

onderhoud

Zonder informatie over het onderhoud zijn bodemliggingen niet goed te interpreteren. Van belang is dat dit onderhoud de aard (hoeveelheden, gebaggerd, gestort) en coördinaten (waar, wanneer) wordt gerapporteerd. Omdat op de hoofdtransportas het onderhoud zeer intensief is, behalve de tweewekelijkse bodempeiling van de vaargeul en een rapportage van onderhoud (sedimentlogboek) ook rapportage van de vaarttracks (welk schip, wanneer, waar, hoeveel gebaggerd/gestort) nodig om de dynamiek van de rivier inzichtelijk te kunnen maken. en op de hoofdvaarwegen (jaarlijkse bepaling van bodemligging, rapportage van onderhoud en dagelijkse mgd's) onverminderd wordt voortgezet.

sedimenttransportmetingen

Omdat de laatste decennia een frequente inwinning van gedetailleerde, ruimtelijke dekkende bodeminformatie mogelijk is geworden, is de noodzaak voor nieuwe verifiërende (kwantitatieve) transportmetingen sterk afgenomen. Het huidige modelinstrumentarium voor morfologie van de Rijntakken is dan ook voornamelijk gebaseerd op gemeten, ruimtelijk-dekkende bodemdynamiek in plaats van op gemeten sedimenttransporten. Metingen van sedimenttransport lijken ook in de

toekomst niet nodig zolang voorspelmodellen voldoende geverifieerd kunnen worden met bodemdynamiek. Dat is het geval als die bodemdynamiek via peilingen voldoende in beeld is, de rivierbodembodem alluviaal (dynamisch is) en de relevante antropogene ingrepen goed geregistreerd zijn. Nieuwe verifiërende metingen van sedimenttransport kunnen in principe dus nodig zijn als sprake is van

- i) relevante prototype condities buiten het toepassingsgebied van transportvoorspellers
- ii) niet-alluviale bodemdelen / trajecten
- iii) een veranderd gebruik van voorspelmodellen

Ad i) In dit geval zijn gemeten bodemveranderingen niet eenduidig te verklaren. Als transportrelaties te kort schieten bij het gebruik van modellen in de RWS praktijk, dan is ontwikkeling en verificatie van kennis omtrent sedimenttransport nodig. Dat vindt vooral plaats onder gecontroleerde condities in laboratoria en heel beperkt in het prototype. Dit lijkt vooralsnog nog niet aan de hand te zijn, al krijgt de invloed van wisselwerkingen tussen bodem en varende schepen wel steeds meer aandacht vanuit het perspectief van een veilige en vlotte verkeersafwikkeling op het water.

Ad ii) Op niet-alluviale delen (afgepleisterde trajecten, harde veen/kleilagen) is bodemdynamiek niet zonder meer een eenduidige afspiegeling van het passerende sedimenttransport. Als die delen een noodzakelijke instroomrand vormen van een beheersgebied, dan is daar een kennis van het passerend sedimenttransport nodig. Hiervoor zijn modelconcepten in gebruik, maar als bestaande kennis en data hiervoor ontoereikend zijn, dan is investeren in meer inzicht relevant. Dat kan zijn de ontwikkeling van verbeterde interpretatie van gepeilde morfodynamiek in stukken met harde lagen, al of niet met behulp van sedimenttransportmetingen in het laboratorium en/of prototype.

Ad iii) De laatste decennia zijn morfologische modellen steeds meer gericht op het voorspellen van bodemhoogten en van het onderhoudsregime dat nodig is voor het realiseren van die bodem. Het wordt nu niet voorzien, maar als bij dit veranderde gebruik de grootte van het sedimenttransport een andere bijdrage krijgt aan de voorspelkracht dan nu, dan zou verkend moeten worden in welke mate verifiërende transportmetingen in het prototype nodig zijn om het voor beleid en beheer benodigde inzicht nauwkeuriger te kunnen genereren.

8 Conclusie informatiebehoefte systeemkennis rivierbodem

Algemeen

- voortzetting huidige monitoring (jaarlijkse bodempeiling van het normaalprofiel, 5 jaarlijkse bepaling van de bodemsamenstelling met ruimtelijke dekking)
- eventueel toegankelijker maken en gebruiken historische data
- doorontwikkeling eenduidige methodiek voor definitie en bepaling van bodemparameters (bodemhoogte, bodemvormen, bodemruwheid, bodemsamenstelling)
- Formuleren scenario's ten aanzien van de belangrijkste onzekerheden die nu worden onderkend
 - de toekomstige mobiliteit van de rivierbodem in insnijdende trajecten
 - het toekomstig beleid in Duitsland en Nederland voor insnijdende rivierbodempligging

Ten behoeve van hoogwaterveiligheid

- aanvullende verhanglijnmetingen met simultane afvoermeting voor hogere afvoeren
- verkennen mate waarin hoogwaterdynamiek in bodem en ruwheid onzekerheden in belastingniveaus kan verkleinen (zandige rivierstukken), en zonodig op basis hiervan monitoring uitbreiden met bodempeilingen tijdens hoogwater
- inventariseren behoefte ondergrondmodellering tbv sterkte van keringen (Rijn-Maasmonding en Lek)
- generaliseren en verbeteren voorspelmodellen voor trendmatige ontwikkeling van kuilen en voor trendbreuk scenario's (Rijn-Maasmonding)

Ten behoeve van waterhuishouding

- voortzetting huidige monitoring (jaarlijkse bodempligging)
- jaarlijkse aanvullende verhanglijnmetingen met simultane afvoermeting voor mediane afvoeren
- uitbreiding jaarlijkse afvoermetingen in trajecten met Q-h/Q-f relaties ten behoeve van actualisatie voor met name lagere afvoeren

Ten behoeve van de vaargeul

- voortzetting huidige monitoring (zoals in de hoofdtransportas: *dagelijkse bepaling mgd, tweewekelijkse opname van de vaargeul, logboek van het sedimentbeheer (wat [m³] waar wanneer gebaggerd & gestort / gesuppleerd)*)
- waar nodig aanvullend aan huidige monitoring: grofweg elke vijf jaar bepaling bodemhoogte tussen normaallijn en stabiele oeverzone

- uitbreiding verhanglijnmetingen met simultane afvoermeting voor mediane en lagere afvoeren
- bepaling bodemsamenstelling met goede ruimtelijke dekking (groteweg elke vijf jaar)
- verkennen of (en in welke mate) tijdsafhankelijkheid in bodemruwheid relevant is en bijdraagt aan voorspelling van vaargeulafmetingen en het onderhoud daarvan
- verkennen relevantie ondergrond en zonodig hoe de risico's daarvan beter beheerst kunnen worden
- verkennen mate waarin nieuwe kennis sedimenttransport bijdraagt aan verbeterde voorspelling lange-termijn bodemontwikkeling

Dit is een schets van de informatiebehoefte op basis van systeemkennis. Het devies is grotendeels voortzetting van de huidige monitoring. De huidige informatiebehoefte voor wat betreft effectief rivierbeheer omvat vooral pilots van suppletie en langsdammen, monitoring van KRW-oeveren (Maas en IJssel) en analyse van het intensieve vaargeulonderhoud op de hoofdtransportas.

Een klein deel van de aanbevelingen betreft aanvullende monitoring vanwege een vermoedelijk grotere dynamiek in het riviersysteem in komende jaren en een deel betreft het verkennen van de potentie van verbeterde modellering en/of aanvullende monitoring. In komende jaren worden beheer-strategieën ontwikkeld voor een toekomstbestendige en economische handhaving van rivierfuncties. Hieruit moet verder blijken welke informatie en kennis verder aanvullend nodig is.

Net als klimaat kent morfodynamiek een inherente onvoorspelbaarheid. Dat betekent dat behalve verdere ontwikkeling van kennis van fysische processen, ook inzet scenarios een strategie is om risico's van onzekerheden in morfodynamiek te beheersen. Met modellen is dit met verschillende graden van probabilistisch mogelijk. De waarde van nieuwe kennis van fysische processen voor rivierbeheer wordt bepaald door de mate waarin dergelijke risico's beter beheerst kunnen worden.

B Bijlage: Technology Readiness Level

De mate van gereedheid voor toepassing van een techniek is aangegeven met *Technology Readiness Levels*, zoals gebruikt bij defensie in Amerika (DOD, 2006). In **vet** staan de Nederlandse termen beschreven die in dit document gebruikt worden voor de verschillende niveaus van gereedheid.

1. Basic principles observed and reported.	Lowest level of technology readiness. Scientific research begins to be translated into applied research and development. Example might include paper studies of a technology's basic properties.
2. Technology concept and/or application formulated	Invention begins. Once basic principles are observed, practical applications can be invented. The application is speculative and there is no proof or detailed analysis to support the assumption. Examples are still limited to paper studies.
3. Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept	Active research and development is initiated. This includes analytical studies and laboratory studies to physically validate analytical predictions of separate elements of the technology. Examples include components that are not yet integrated or representative.
4. Component and/or breadboard validation in laboratory environment	Basic Technology components are integrated to establish that the pieces will work together. This is "low fidelity" compared to the eventual system. Examples include integration of 'ad hoc' hardware in a laboratory.
5. Component and/or breadboard validation in relevant environment Ontwikkeling	Fidelity of breadboard technology increases significantly. The basic Technology components are integrated with reasonably realistic supporting elements so that the technology can be tested in a simulated environment. Examples include 'high fidelity' laboratory integration of components.
6. System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment Prototype	Representative model or prototype system, which is well beyond the breadboard tested for TRL 5, is tested in a relevant environment. Represents a major step up in a technology's demonstrated readiness. Examples include testing a prototype in a high fidelity laboratory environment or in simulated operational environment.
7. System prototype demonstration in an operational environment Prototype operationeel	Prototype near or at planned operational system. Represents a major step up from TRL 6, requiring the demonstration of an actual system prototype in an operational environment, such as in an aircraft, vehicle or space. Examples include testing the prototype in a test bed aircraft.
8. Actual system completed and 'flight qualified' through test and demonstration Pre operationeel	Technology has been proven to work in its final form and under expected conditions. In almost all cases, this TRL represents the end of true system development. Examples include developmental test and evaluation of the system in its intended weapon system to determine if it meets design specifications.
9. Actual system 'flight proven' through successful mission operations Operationeel	Actual application of the technology in its final form and under mission conditions, such as those encountered in operational test and evaluation. In almost all cases, this is the end of the last "bug fixing" aspects of true system development. Examples include using the system under operational mission conditions. Toegepast in verschillende omgevingen