

Definitiestudie Grootschalige inventarisatie kanaal- en rivierbodemweerstand



Definitiestudie Grootschalige inventarisatie kanaal- en rivierbodemweerstand

Auteur(s)

Victor Hopman
Roeland Nieboer
Thaiënne van Dijk
Eline Leentvaar

Definitiestudie Grootschalige inventarisatie kanaal- en rivierbodemweerstand

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer J.M.P.M. Peerboom
Trefwoorden	Kanaalbodem weerstand, vlakdekkend meten, conductivity, geofysica, ondergrond, geologie, ontgrondingskuilen

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	25-03-2024
Projectnummer	11209279-000
Document ID	11209279-000-BGS-0001
Pagina's	32
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Victor Hopman	
	Roeland Nieboer	
	Thaiënne van Dijk	
	Eline Leentvaar	

Samenvatting

In dit rapport wordt onderzocht of en hoe de kanaal- en rivierbodemweerstand vlakdekkend gemeten kan worden. Dit is belangrijk om een goed beeld te krijgen van de relaties tussen rivieren/kanalen en het grondwater om de effecten op de omgeving te kunnen beschrijven.

Voor het bepalen van geschikte meettechnieken en een gericht onderzoeksplan is het belangrijk om een globaal beeld te hebben van verschillende typen rivieren en kanalen en hun interactie met het grondwater. Een aantal veelvoorkomende situaties is geschetst in dit rapport.

Dit rapport beschrijft verschillende geofysische meetmethoden die potentie hebben om een bijdrage te leveren aan het vlakdekkend in kaart brengen van de bodemweerstand rondom kanalen en rivieren. Deze methoden verschillen in schaal, resolutie, meetparameters en acquisitie en kunnen zo allen op hun eigen manier bijdragen aan het onderzoek.

Een traditionele aanpak waarbij één techniek wordt toegepast leidt waarschijnlijk niet tot een optimaal resultaat. Daarom bevelen we aan om een combinatie van meettechnieken in te zetten waarbij de potentie van ieder van deze meettechnieken in een bepaalde setting vooraf numeriek wordt gesimuleerd. Vervolgens kan met de meest optimale combinatie van meettechnieken data worden ingewonnen en kunnen de meetresultaten worden gefuseerd tot een bruikbaar resultaat.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie rivier- en kanaalbodemweerstand	6
1.1	Probleemstelling	6
1.2	(Grond)waterstromingen in kanalen en rivieren	6
1.2.1	Boven- en benedenstroomse rivieren met kleidijken	6
1.2.2	Kanaal met kleidijken	9
1.2.3	Kanaal met damwanden	9
1.2.4	Scheepvaart	10
1.2.5	Veendijken	10
1.2.6	Erosiegevoelige ondergrond	11
1.3	Hydraulische conductiviteit	13
2	Meettechnieken	14
2.1	Varende meetmethoden	14
2.1.1	Bathymetrische metingen met multibeam echosounder	14
2.1.2	Sedimentclassificatie met multibeam backscatter	15
2.1.3	Bodemopbouw met sub-bottom profiler	16
2.2	Remote sensing	18
2.2.1	Infrarood	18
2.2.2	InSar	18
2.3	In-Situ meetmethoden	19
2.3.1	Natuurlijke radioactiviteit	19
2.3.2	Temperatuur	20
2.3.3	Elektrische metingen	21
2.4	Overzicht meettechnieken	23
2.5	Kwalificatie meettechnieken	24
2.6	Datafusie	25
2.7	Data analyse GeoSim	26
3	Conclusie en onderzoeksprogramma	28
3.1	Voorstel onderzoeksprogramma	28
4	Referenties	30

1 Introductie rivier- en kanaalbodemweerstand

1.1 Probleemstelling

Rijkswaterstaat (RWS) voert het beheer over alle grote kanalen en rivieren binnen Nederland. Deze watergangen hebben allemaal een relatie met het grondwater in de omgeving via uitwisseling van water door de kanaal-/rivierbodem. Deze relatie is afhankelijk van het actuele kanaal/rivierpeil, de grondwaterstand, de opbouw van de ondergrond en de weerstand van de kanaal- of rivierbodem. Bij kanalen betreft het in het algemeen stroming van oppervlaktewater naar het grondwater (infiltratie) terwijl bij rivieren vooral sprake is van het omgekeerde (drainage).

Het is belangrijk om een goed beeld te hebben van de relatie tussen de rivieren en kanalen en het grondwater om de impact van deze beheerobjecten op de omgeving te kunnen beschrijven zodat deze invloed op een juiste manier in hydrologische modellen wordt meegenomen en daarmee efficiënte mitigerende maatregelen voor te stellen

Het grootste probleem op dit moment is dat er geen vlakdekkend beeld is van de bodemweerstand van kanalen en rivieren omdat vrijwel alle bestaande technieken waarmee deze weerstand bepaald kan worden op puntniveau georiënteerd zijn en ook niet gericht zijn op variaties in de tijd. De verwachting van RWS is dat verschillende aardobservatie- en meettechnieken die de laatste jaren ontwikkeld zijn een bijdrage kunnen leveren aan het vlakdekkend en/of nauwkeuriger en sneller vaststellen van bodemweerstand.

De hoofddoelstelling van deze definitiestudie is om een inventarisatie te maken van de verschillende meettechnieken die een bijdrage kunnen leveren aan het vaststellen van bodemweerstand dan wel grootheden waarmee deze weerstand kan worden vastgesteld (fluxen- en potentialen). Mogelijk kunnen aardobservatie- en meettechnieken die de laatste jaren verder ontwikkeld zijn, alsmede moderne modelleringstechnieken een bijdrage leveren aan het meer vlakdekkend en nauwkeuriger en sneller vaststellen van bodemweerstand.

1.2 (Grond)waterstromingen in kanalen en rivieren

Om een meetstrategie vast te stellen voor het bepalen van de hydraulische conductiviteit en bodemweerstand, is het van belang inzicht te krijgen in de grondwaterstroming en wat deze beïnvloedt. In de grondwaterstroming rondom de rivier zijn er twee aspecten vooral van belang: de freatische grondwaterstand en de stijghoogte in het eerste watervoerend pakket. De stijghoogte is onder andere afhankelijk van hoogteverschillen, de geologie, rivierwaterstand en waterbodemweerstand.

Om dit inzichtelijk te maken wordt in de volgende paragrafen een aantal typische Nederlandse rivier- en kanaal configuraties beschreven in termen van in- en uitstroming van grondwater in rivieren en kanalen.

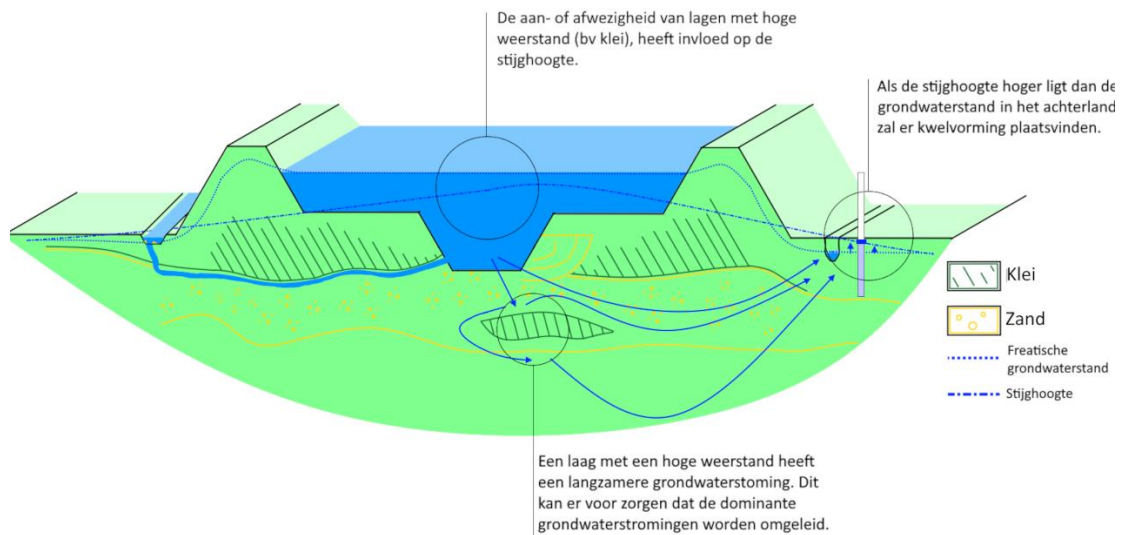
1.2.1 Boven- en benedenstroomse rivieren met kleidijken

In dit rapport maken we onderscheid tussen boven- en benedenstroomse rivieren. Deze keuze is gebaseerd op de opbouw van de ondergrond van de rivieren en op het grondwaterregime. De grens van boven- en benedenstrooms is geleidelijk en ligt voor de Lek

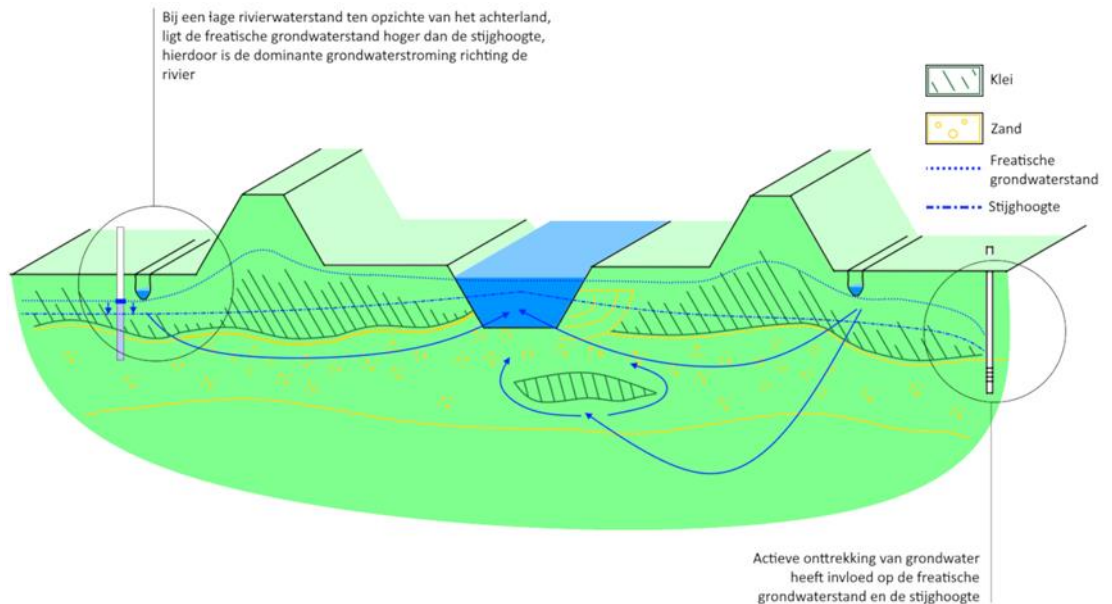
bijvoorbeeld rond Schoonhoven. Ten oosten van Schoonhoven zal de rivier vooral insnijden in zandige Pleistocene sedimenten die dicht onder de rivierbodem kunnen liggen. In dit gebied draineert de rivier de omgeving en is er, het grootste deel van het jaar, een grondwaterstroming richting de rivier. Ten westen van Schoonhoven vormen Holocene heterogene delta-afzettingen de rivierbodem. Het binnendijkse gebied is vaak lager dan de rivier en de rivier infiltreert gedurende het hele jaar.

De zandige (tot grind-zandige) ondergrond van bovenstroomse rivieren (schematische representatie in Figuur 1) heeft een grote doorlatendheid voor grondwater. Klei- en veenlagen in de ondergrond hebben invloed op deze grondwaterstromingen en kunnen aan- en afvoer van water naar en uit de rivier beïnvloeden.

Tijdens hoogwater neemt de stijghoogte in de onderliggende zandlaag toe en kan kwel ontstaan. Als de druk te hoog wordt waardoor de deklaag opbarst, of er in de binnendijkse deklaag een opening aanwezig is, kunnen zandmeevoerende wellen ontstaan. Als dit proces doorzet kan het uiteindelijk leiden tot ernstige verzakking of zelfs doorbraak van de dijk. Dit fenomeen, piping, ontstaat vooral in gebieden waar een dunne deklaag aanwezig is, met daaronder een dikke en doorlatende zandlaag. Met laag water (Figuur 2) zal de dominante grondwaterstroming meestal richting de rivier zijn.

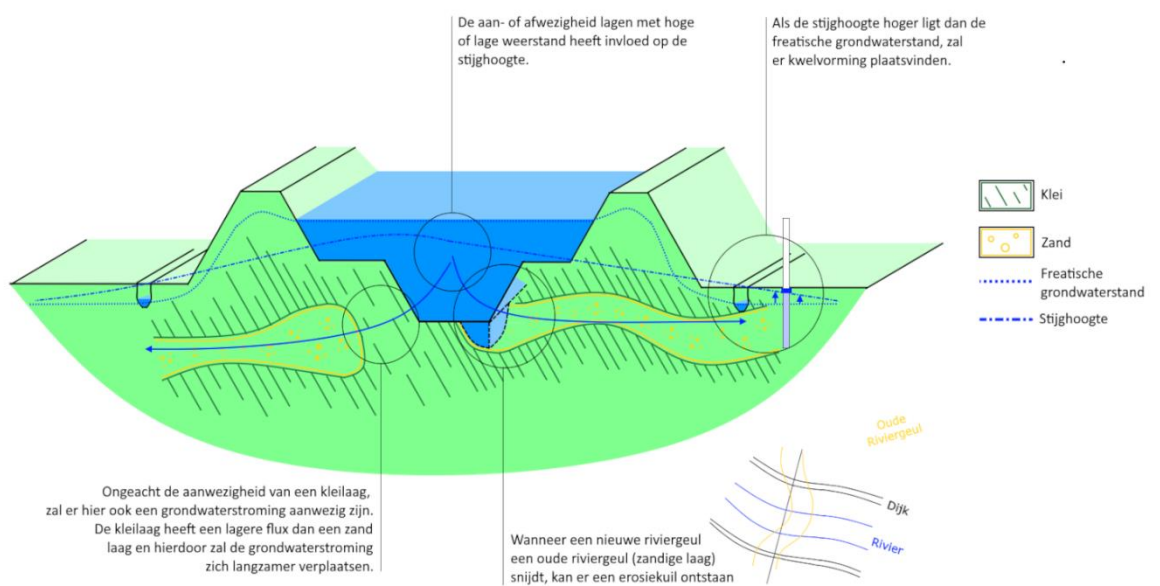


Figuur 1: Schematische representatie van een bovenstroomse rivier met hoog water.



Figuur 2: Schematische representatie van een bovenstroomse rivier met laag water

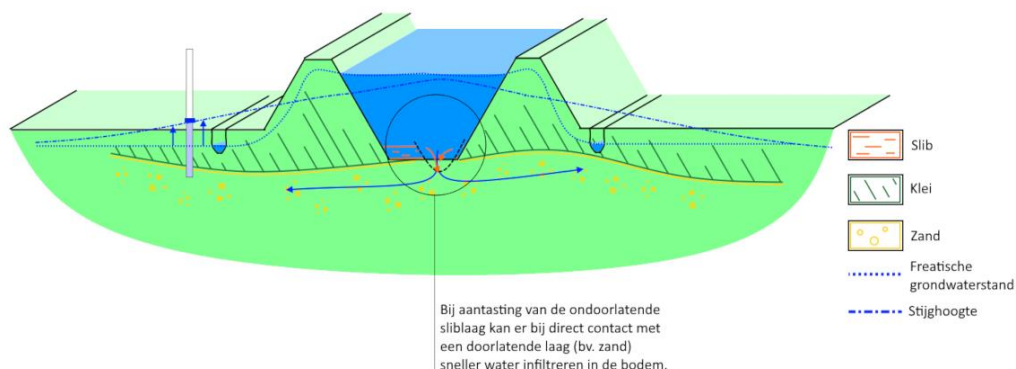
Benedenstroomse rivieren (Figuur 3) werken vergelijkbaar als bovenstroomse rivieren, al zal hier de rivierwaterstand hoger zijn dan omliggende grondwaterstanden en infiltratie plaatsvinden. In benedenstroomse gebieden zijn er veel oude zandige stroomgordels (“zandbanen”) in de ondergrond aanwezig. Als huidige rivieren deze zandlichamen kruisen is er een kans dat het rivierbed insnijdt, waarbij erosiekuilen kunnen worden gevormd (Huisman et al., 2021, Figuur 7). Doordat deze zandlichamen doorlatend zijn zal de grondwaterdruk zich verder verspreiden vanuit de rivier richting het binnendijkse gebied.



Figuur 3: Schematische representatie van een benedenstroomse rivier met hoog water

1.2.2 Kanaal met kleidijken

Kanalen zijn aangelegde waterwegen veelal omringd door kleidijken, kademuren of damwanden. Figuur 4 is een schematische weergave van een doorsnede van een ingedijkt kanaal. In een kanaal vormt zich vaak een sliblaag op de bodem vanwege beperkte doorstroming. Deze laag zorgt ervoor dat het water in het kanaal slecht infiltreert in de bodem. Om scheepvaart mogelijk te blijven houden, en om de ecologie te beschermen, wordt overtollig opgebouwd slib regelmatig weggebaggerd. Hierbij is het mogelijk dat de sliblaag dusdanig wordt aangetast dat bij direct contact met een doorlatende (zand)laag, water sneller infiltreert in de bodem en overlast ontstaat door hogere grondwaterstanden. Afhankelijk van de turbiditeit van het water kan de bodem ook weer snel dichtslaan (Talmon, 2013).

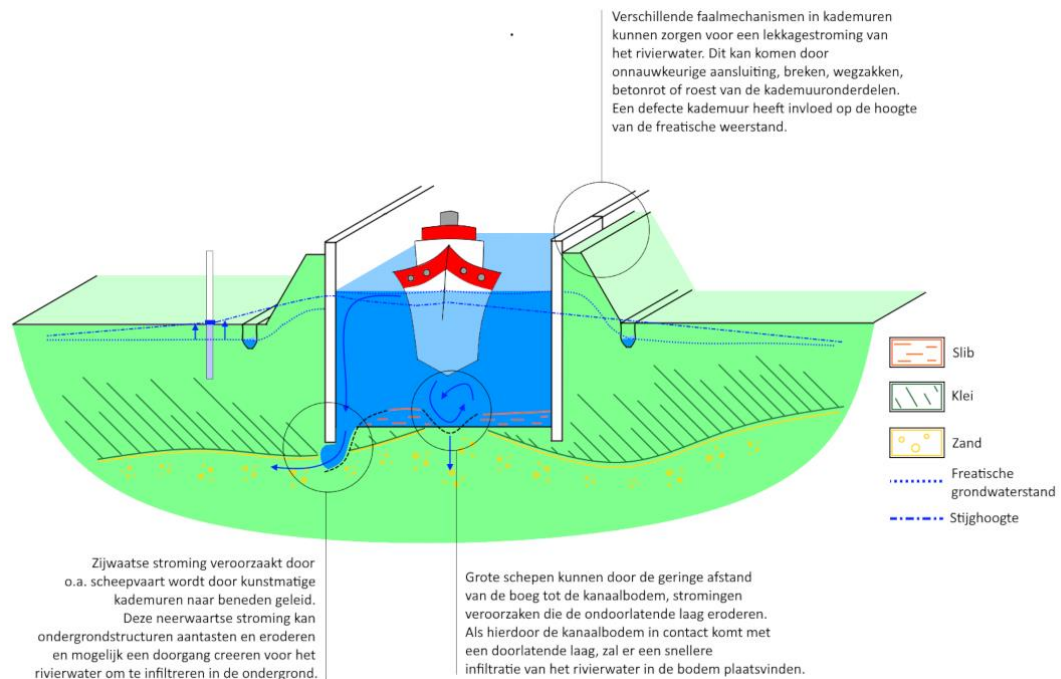


Figuur 4: Schematische representatie van een ingedijkt kanaal

1.2.3 Kanaal met damwanden

Een aantal kanalen in Nederland is versterkt met damwanden of kademuren (Figuur 5). De damwanden of kademuren voorkomen zijdelingse uitwisseling van grond- en rivier/kanaalwater. Bij damwand constructies zijn roestvorming en niet goed aansluiten van de damwand planken bronnen van lekkage en potentiële overlast in de loop der tijd. Kademuren kunnen wegzakken, roesten, breken, niet afsluitend zijn gemonteerd. Al deze defecten kunnen ervoor zorgen dat er een stroming van of naar de waterloop ontstaat. De stromingsrichting is afhankelijk van de grondwaterstanden in de omgeving.

1.2.4 Scheepvaart

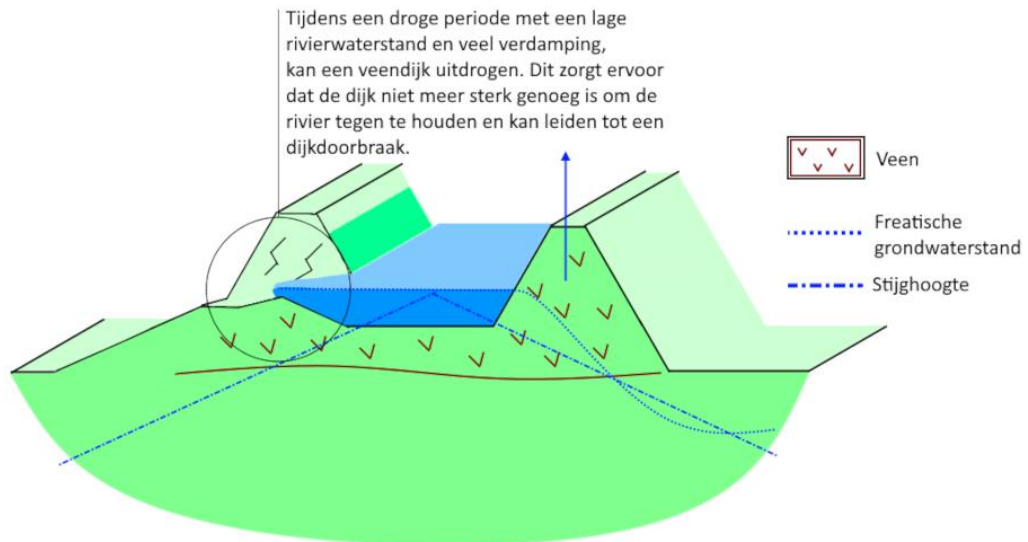


Figuur 5: Schematische representatie van een kanaal met damwanden en schip

De scheepvaart kan ook een grote invloed hebben op de waterstromingen in de waterloop (zie Figuur 5). Bij grote diepgang kunnen de schepen de bodemstructuur verstoren en zodoende afsluitende lagen aantasten. Scheepvaart zorgt ook voor een vergrote zijwaartse stroming. Door de verticale damwanden wordt deze stroming neerwaarts afgebogen en dit kan erosie veroorzaken. Dit kan zorgen voor een verhoogde infiltratie van rivierwater in de bodem

1.2.5 Veendijken

Veendijken (Figuur 6) zijn dijken die ontstaan zijn door afgraving of inzakking van het achterland. Deze dijken, volledig bestaand uit veen, zijn oudere, secundaire dijken. Deze dijken zijn erg gevoelig voor uitdroging. Bij een lage waterstand en veel verdamping van het grondwater kan de dijk uitdrogen waardoor het soortelijk gewicht sterk afneemt. Hierdoor kan de dijk afschuiven. Om deze reden is de saturatie van een veendijk een belangrijke parameter.

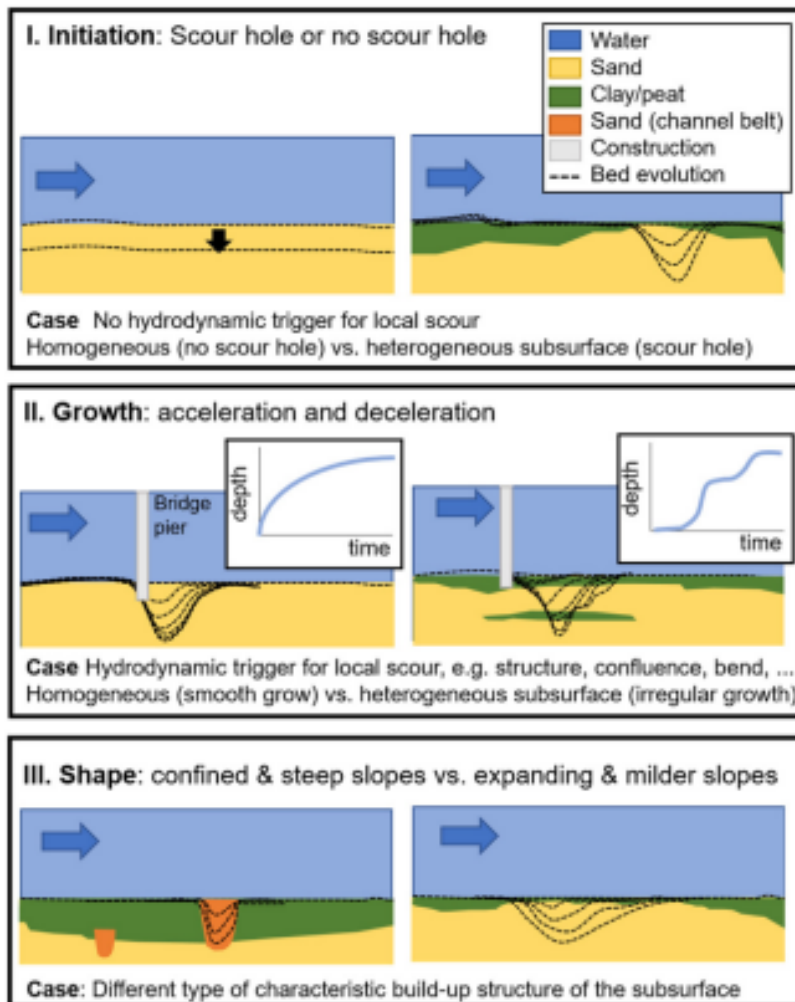


Figuur 6: Schematische representatie van een veendijk

1.2.6 Erosiegevoelige ondergrond

De ondergrond van Nederlandse rivieren en kanalen is heterogeen, met het lokaal voorkomen van zand-, grind-, klei- en veenlagen. Omdat de samenstelling en geologische opbouw van de ondergrond de doorlatendheid en erosiegevoeligheid van rivier- en kanaalbodems sterk bepaalt, is het belangrijk inzicht te hebben in de geologische opbouw onder rivieren en kanalen. Zo zijn harde lagen – natuurlijk of aangebracht – resistent tegen erosie.

Voorbeelden van natuurlijke harde lagen zijn stugge klei- of veenlagen, en zgn. *armoured layers*: waar door verwijdering van fijnere korrelgrootten, de achtergebleven grove sedimenten een resistente grindlaag vormen. Deze lagen kunnen aan de bodem voorkomen of dieper in de ondergrond. Door aanhoudende of verhoogde waterstroming over deze lagen kan lokaal versnelde erosie optreden doordat onderliggende lagen van andere sedimentsamenstelling en doorlatendheid worden blootgelegd (Huismans et al., 2021). Hierbij worden ontgrondingskuilen gevormd en de situatie vormt een risico voor een veranderende in- en uitstroom van water van en naar rivieren en kanalen. Aangebrachte harde lagen zijn neergelegd in rivieren en kanalen om bodemerosie te voorkomen. Ook sliblagen en kleibekledingen op de bodem van kanalen kunnen, op dezelfde wijze als harde lagen bij doorsnijding versneld eroderen en daarmee een laag blootleggen.



Figuur 7. Voorbeelden van de vorming van ontgrondingskuilen doordat erosieresistente lagen plotseling doorbreken. I laat zien dat erosie voornamelijk in zandige bodems plaatsvindt, maar bij kleiige bodems plotseling een ontgrondingskuil kan ontstaan. II laat zien hoe deze ontgrondingskuilen verder kunnen evolueren. III laat zien dat de configuratie van de ondergrond deze evolutie bepaald, en daarom belangrijk is om te meten (uit: Huismans et al., 2021).

Zandige lagen zijn erosiegevoeliger en meer waterdoorlatend. Het voorkomen van zandige lagen in de ondergrond verhoogt het risico op het ontstaan van erosiekuilen, zie figuur 7, (Huismans et al., 2021), die voor een verhoogde in- en uitstroom van water naar en van rivieren en kanalen kunnen zorgen. Daarnaast vormt deze erosie een gevaar voor nabije waterbouwkundige constructies (dijken, kanaalwanden, bruggen) en een verhoogde kans op oevererosie. Voorbeelden van natuurlijke zandlichamen in de ondergrond zijn oude stroomgordels van rivieren, die onder de huidige rivieren kruisen, en begraven rivierduinen (donken).

Onder rivieren en kanalen is nog weinig bekend over de geologische opbouw. Dit komt omdat de datadichtheid (van bv. seismische data en boringen) erg laag is in vergelijking met op land. Er zijn wel ondergrondmodellen beschikbaar van de geologische opbouw (TNO-modellen als DGM, REGISII, GeoTOP, opvraagbaar via dinoloket.nl). Deze modellen zijn echter juist onder rivieren en kanalen onbetrouwbaar omdat de benodigde ondergronddata ontbreekt. Hierdoor zijn de onzekerheden erg groot.

1.3 Hydraulische conductiviteit

Een belangrijke, meetbare parameter voor het in kaart brengen van de interactie tussen rivier- en grondwater, is de hydraulische conductiviteit (k), hiervoor ook wel benoemd als doorlatendheid, van de waterbodemsedimenten. Dit is de inverse van de kanaalbodemweerstand (gecorrigeerd voor de dikte) die in dagen wordt weergegeven. De hydraulische conductiviteit is sterk afhankelijk van de lithologie en materiaaleigenschappen. Voorbeelden van de hydraulische conductiviteit per grondsoort zijn gegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Hydraulische conductiviteit van verschillende materialen (Boek Geohydrologie, TU Delft)

Materiaal	k (m/dag)
Klei	< 0.0001
Zanderige klei	$0.0001 - 0.001$
Veen	$0.0001 - 0.01$
Silt	$0.001 - 0.01$
Heel fijn zand	$0.1 - 1$
Fijn zand	$1 - 10$
Grof zand	$10 - 100$
Zand met grind	$100 - 1000$
Grind	> 1000

Behalve de natuurlijk aanwezige bodemsamenstelling, kunnen waterbodems ook dichtslaan doordat fijne zwevend slibmateriaal uit de waterkolom de grond in wordt gezogen waardoor de relatief grote poriën in een zandbodem snel kunnen dichtslibben (Talmon, 2013). Het is bijvoorbeeld bekend dat bij baggeren in korte tijd de kanaalbodem kan worden geopend waardoor grondwaterstanden snel toe kunnen nemen. Na de baggerwerkzaamheden kan de bodemweerstand zich weer snel herstellen door het dichtslaan, vaak binnen een dag (Deltares, 2021),

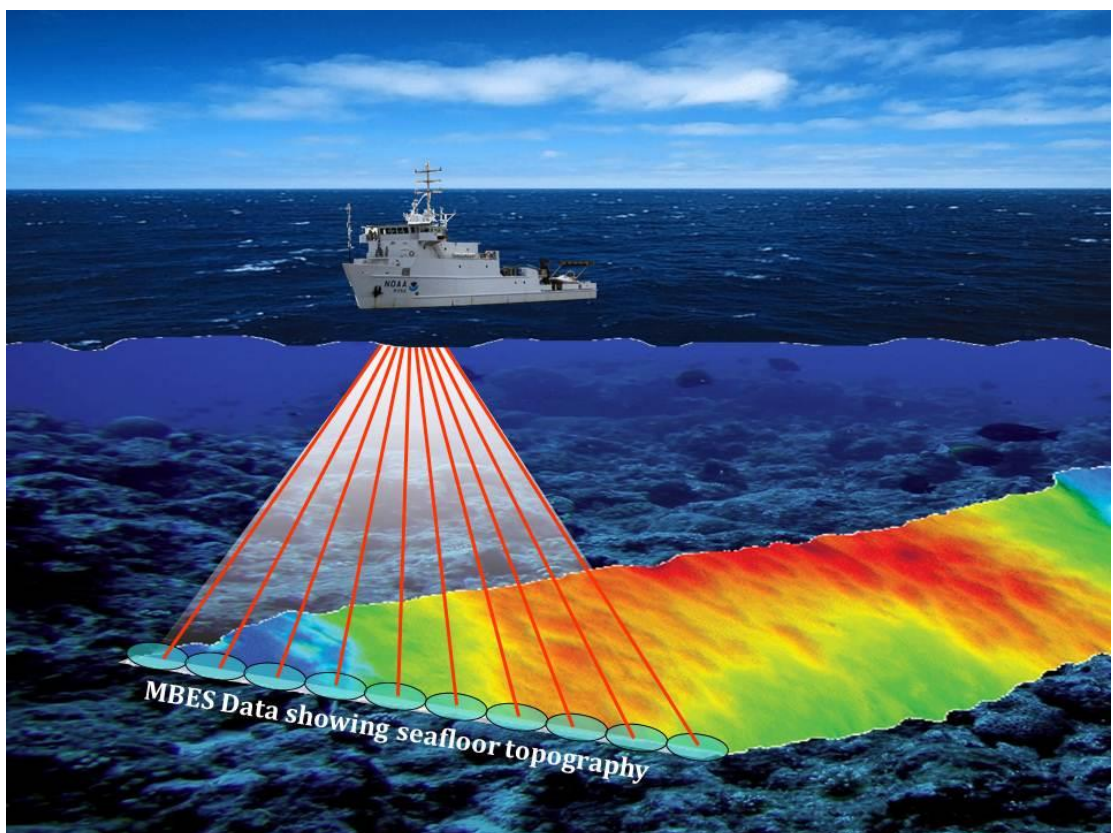
De lokale bodemsamenstelling en hydraulische conductiviteit van rivierbodems is slecht bekend. De verwachting is dat het vlakdekkend in kaart kan worden gebracht door (een combinatie van) geofysische technieken. Meerdere geofysische technieken die hierbij van toepassing kunnen zijn worden besproken in hoofdstuk 2. Er is niet één methode die zowel direct de hydraulische conductiviteit kan meten, als een grootschalig vlakdekkend beeld kan leveren. Daarom is het van belang om een combinatie van technieken te gebruiken. Een concept voor het meetplan wordt beschreven in het onderzoeksvorstel in hoofdstuk 3.

2 Meettechnieken

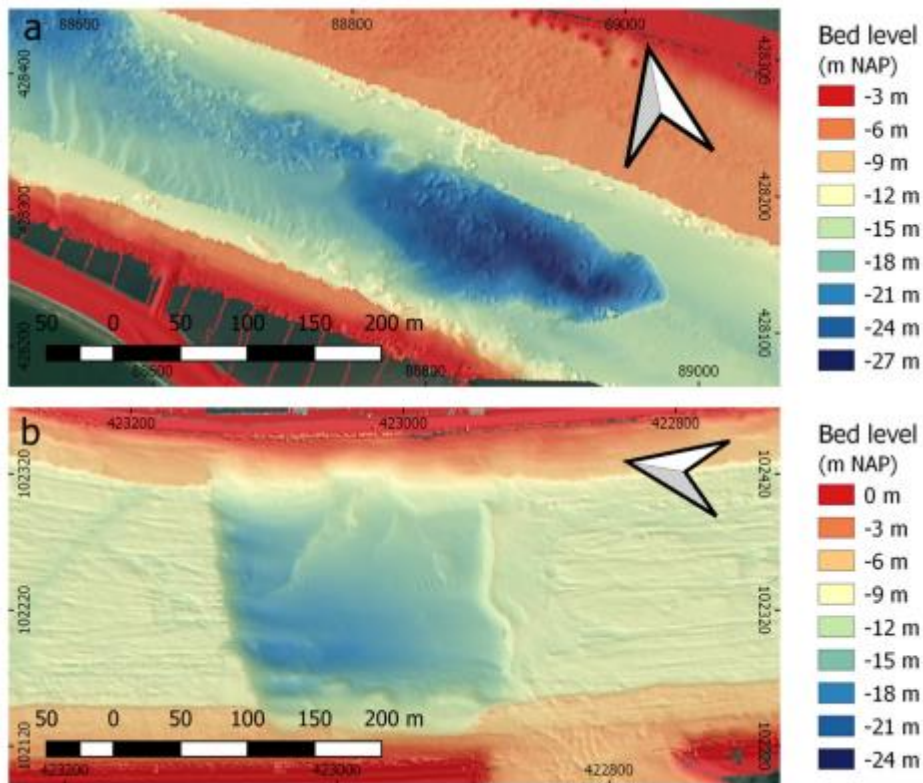
2.1 Varende meetmethoden

2.1.1 Bathymetrische metingen met multibeam echosounder

Multibeam echosounding (MBES) is een hydrografische onderzoekstechniek die wordt gebruikt om nauwkeurig de bathymetrie (waterbodemoogte) in kaart te brengen. Het omvat het gelijktijdig uitzenden van een groot aantal sonarsignalen in een waaivormig patroon (van meestal 256 beams) vanaf een schip of (autonoom) onderwater voertuig. Door de tijd te meten die nodig is voor geluidsgolven om van de waterbodem te kaatsen en terug te keren, produceert deze techniek bathymetrische kaarten in hoge resolutie die gebruikt kunnen worden om de gedetailleerde morfologie van de bodem van kanalen en rivieren in kaart te brengen. Het meetprincipe van de multibeam echosounder wordt geïllustreerd in figuur 8. Het vlakdekkende morfologische beeld geeft vaak informatie over de sedimentsamenstelling (zand, klei of veen) en ook erosie en gaten kunnen worden geïdentificeerd (Figuur 9).



Figuur 8: meetprincipe van multibeam echosounder. De kleuren geven diepte en vorm van de bodem aan, geen materiaaleigenschappen (Foster 2016, NOAA photo library)



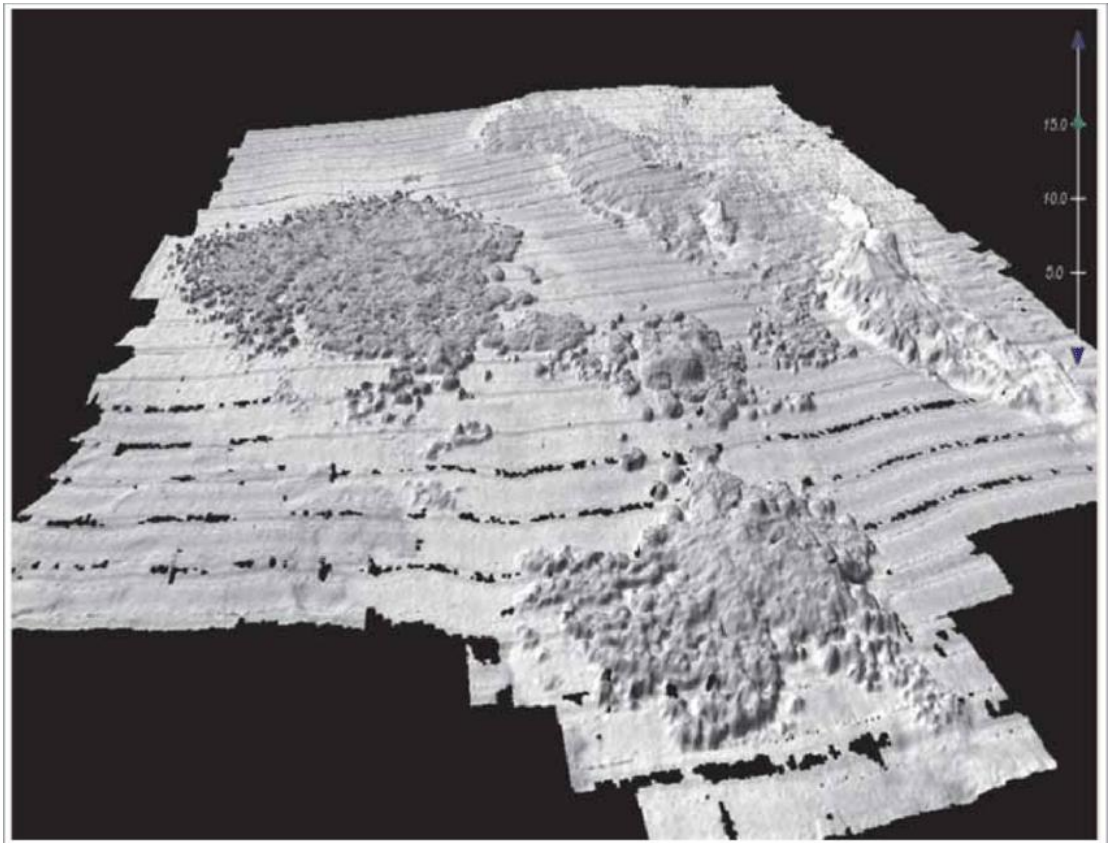
Figuur 9: Voorbeeld van MBES opnamen waarbij het karakter van de bodem op harde lagen duidt (vlak met structuren, maar sedimentaire bodemvormen zoals zandduinen) die zijn doorsneden waardoor een zandlichaam is blootgelegd waardoor een ontgrondingskuil ontstaat (Uit Huismans et al., 2021).

2.1.2 Sedimentclassificatie met multibeam backscatter

Multibeam backscatter (MBES-BS) analyse is een methode die MBES aanvult. De metingen kunnen tegelijk, met hetzelfde systeem worden uitgevoerd. Terwijl MBES bathymetrische gegevens oplevert, richt backscatteranalyse zich op de sterkte van het akoestische signaal dat wordt opgevangen van de bodem na verstrooiing. Deze informatie helpt bij het karakteriseren van de bodem, het identificeren van verschillende substraten (bijv. zand, klei). De TU Delft heeft in de afgelopen jaren een goede methode ontwikkeld voor bodemclassificatie (Snellen et al., 2019), waarbij akoestische klassen worden vastgesteld uit backscatter metingen die vervolgens gekoppeld worden aan sedimenttypen uit bodemmonsters. Middels kennisuitwisseling en een gezamenlijk pilotproject met RWS, TUDelft en Deltares (Van Dijk et al., 2019) is deze analysetechniek verder uitgewerkt door Deltares. De methode resulteert in een gebiedsdekkende kaart van sedimenttypen, op basis van hoge-resolutie metingen. Dit is een grote verbetering ten opzichte van huidige sedimentkarteringsmethoden, waarbij gegevens uit bodemmonsters (puntmetingen) worden geïnterpoleerd.

Verder kan een multi-frequency multibeam echosounder met gebruik van een lagere frequentie (bv 90 kHz), bij fijnkorrelige sedimenten, verder penetreren in de bodem, waarmee contrasterende samenstelling in de ondiepe bodem in kaart kunnen worden gebracht (Gaida et al., 2018).

De resultaten van de backscatter analyse kunnen weergegeven worden in een vlakdekkend beeld, maar kunnen ook over de bathymetrische resultaten van de multi-beam worden geprojecteerd als een 3D weergave. Figuur 10 laat een voorbeeld zien waar dit is gedaan voor de ruwe backscatter data (Conway et al., 2001), maar dit kan ook worden gedaan na classificeren zodat een bathymetrie-sedimenttype afbeelding kan worden verkregen.



Figuur 10: Multibeam image of backscatter intensity draped over bathymetry (Conway et al., 2001).

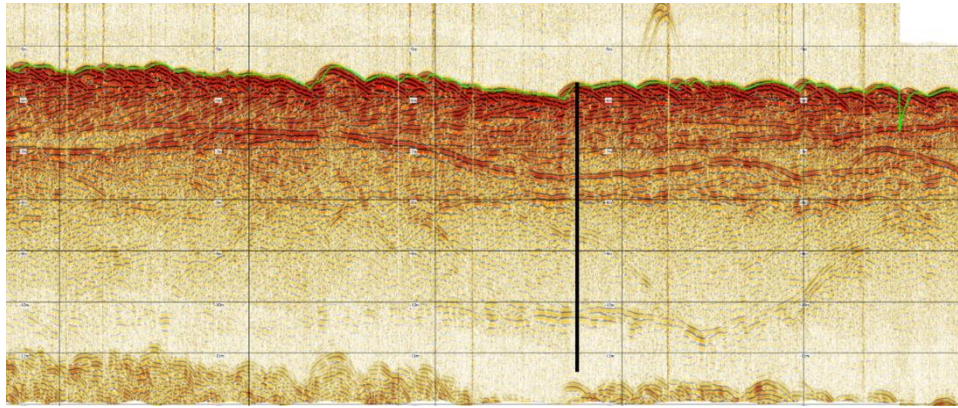
2.1.3 Bodemopbouw met sub-bottom profiler

Er bestaan verschillende soorten sub-bottom profilers die de bodemopbouw van de bovenste meters onder de waterbodem in kaart kunnen brengen. Een voorbeeld is de parametrische echosounder (PES). Het maakt gebruik van geluidsgolven om de ondergrondse structuur in kaart te brengen, typisch tot een diepte van 5 - 10 m onder de waterbodem (zie Figuur 11). Het voordeel van dit systeem is dat middels een hoge- en lage frequentie (bv 100kHz en 10 kHz) de ondergrond op een hoge verticale resolutie (15 cm) wordt gevisualiseerd, terwijl er ook een goede reflectie is van de bodem. Deze techniek is waardevol voor het onderzoeken van de geologische bodemopbouw en slibdikte. Waar MBES en MBES-BS een vlakdekkend beeld van de bathymetrie en bodemkenmerken geven door akoestische signalen onder verschillende hoeken te versturen, kan de PES alleen direct onder de sensor meten, maar dan wel de waterbodem in. Dit geeft uiteindelijk een 2D beeld als een profiel langs de vaarlijn en in de diepte. Door gebruik te maken van een opstelling van meerdere sensoren en/of het invaren van verschillende meetlijnen naast elkaar, kan een nagenoeg 3D beeld van de ondergrond worden verkregen. Voor de geologische interpretatie van de eenheden zichtbaar in de PES-profielen, zijn altijd boringen of sonderingen nodig. Deze kunnen echter wel op strategische plekken worden gezet, met behulp van de informatie uit de profielen. De informatie uit profielen zetten de boringen in context, waardoor uiteindelijke kwaliteit van de profielen beter wordt en/of er minder boringen nodig zijn (Figuur 12, 13).

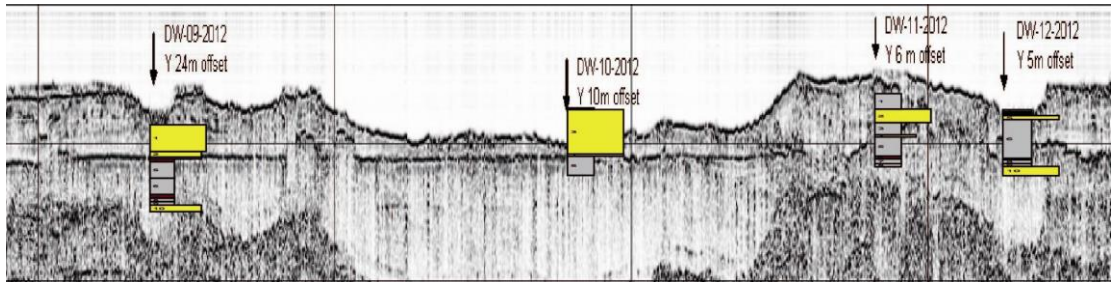
Een combinatie tussen bathymetrie, MBES en MBES-BS levert een driedimensionaal inzicht op van de zwakke plekken in de waterbodem en locaties waar kleilagen lokaal ontbreken en mogelijk uitwisseling met het grondwater plaatsvindt (Figuur 14).

Er zijn in de afgelopen jaren enkele succesvolle projecten geweest waarbij de opbouw en samenstelling van rivierbodems goed kon worden bepaald. Voorbeelden zijn delen van de

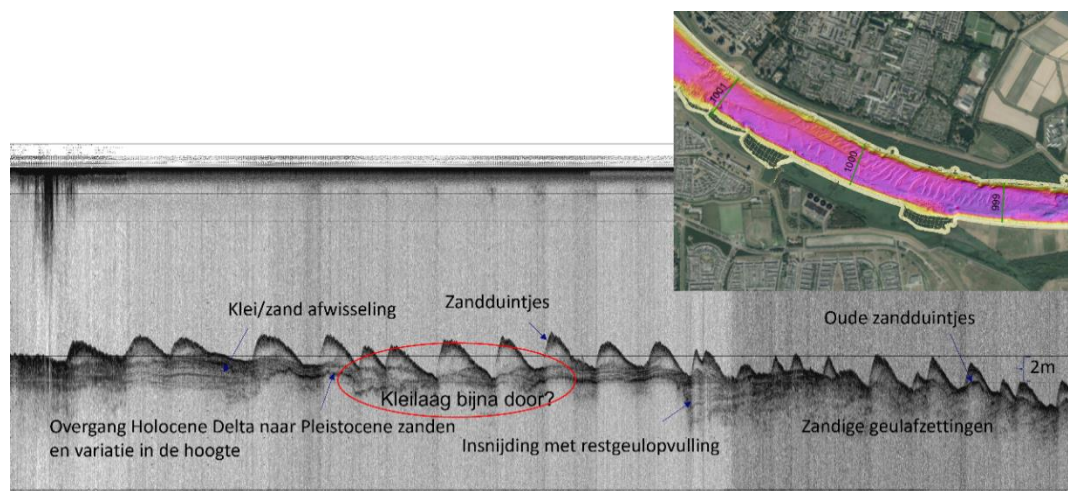
Oude Maas, Spui, Lek en de Waal. Een landsdekkende studie heeft nog niet plaatsgevonden.



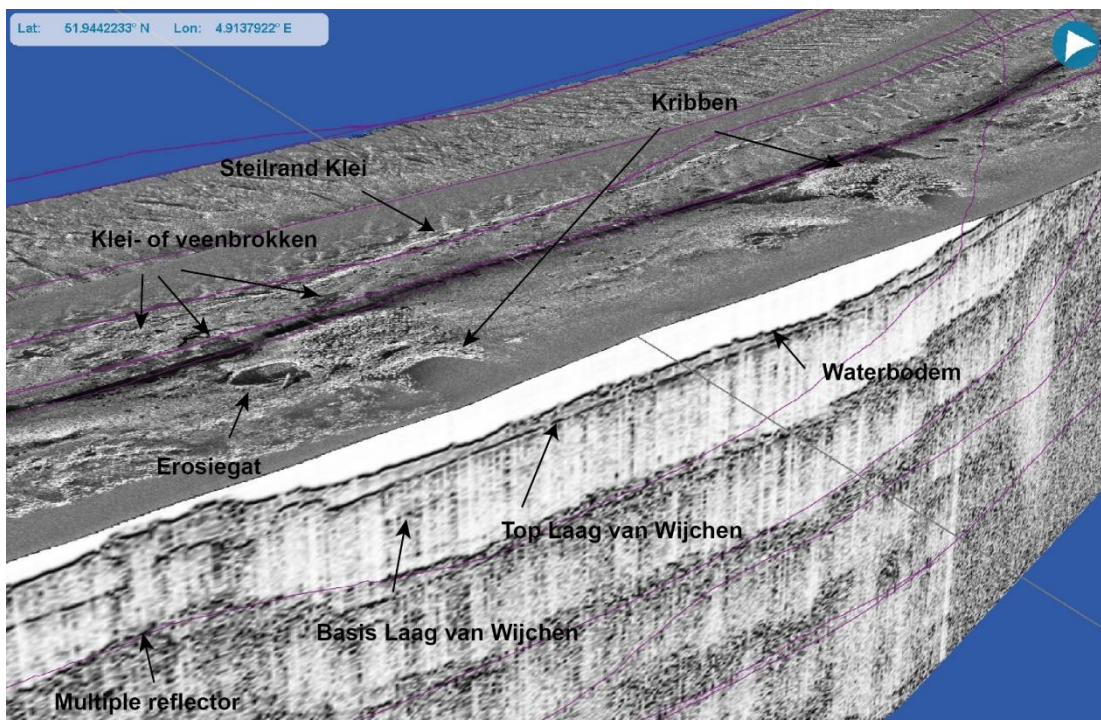
Figuur 11: Voorbeeld van parametrische echosounder data in de Waal (zoals opgenomen door Deltares in het [TKI DEL107 project](#)). De figuur toont een verticaal profiel van de ondergrond. De lichte bovenkant is de waterkolom, waarna de eerste lijn de waterbodem met bodemvormen (duintjes) weergeeft. De reflecties daaronder in de ondergrond visualiseren de geologische opbouw: van diepere lagen in de ondergrond tot interne structuren van recente duinen bovenaan. De gridlijnen representeren horizontaal 20 m en verticaal 1 m. De dikke zwarte lijn is een de locatie van een boring.



Figuur 12: Voorbeeld van een sub-bottom profiler vertikaal ondergrondprofiel in de Lek. De lichte bovenkant is de waterkolom, de bovenste zwarte lijn is de reflectie van de waterbodem, en daaronder laten reflecties gelaagdheid in de ondergrond zien. In dit geval komt een duidelijke reflector in de ondergrond overeen met een kleilaag in de boringen (geel is zand, grijs is klei). Op deze manier kan vlakdekkend worden bepaald of een weerstand biedende laag aanwezig is (Deltares, 2012)



Figuur 13: Een ander voorbeeld van sub-bottom profiler. Profiel met PES uit de Oude Maas met interpretatie waarbij zwakke plekken zijn aangegeven (Archief Deltares)



Figuur 14: Resultaten van MBES-BS (in dit geval side-scan sonar) die vlakdekkend een beeld geeft van de morfologie en samenstelling van de rivierbodembodem, gecombineerd met een verticaal profiel van bodemopbouw ingewonnen met een sub-bottom profiler (Deltares, 2012).

2.2 Remote sensing

Bij remote sensing wordt vanaf een platform (satelliet, vliegtuig, helikopter, drone) met een sensor vlakdekkende informatie van het aardoppervlak verzameld. De sensoren gebruiken vaak verschillende golflengten, zoals zichtbaar licht, infrarood en microgolven. De meettechnieken op de platforms kunnen zowel actief (laser hoogtemetingen, InSar) als passief (infraroodmetingen) zijn.

Het is niet mogelijk om de kanaalbodembodemweerstand direct te meten met remote sensing technieken. Indirecte effecten op de omgeving kunnen wel worden gemeten. We hebben twee technieken geïdentificeerd die indirect iets over de stijghoogte of grondwaterstroming kunnen zeggen. Deze zijn respectievelijk gericht op temperatuurvariaties en bodembeweging. Zoals verder beschreven in paragraaf 2.7, kunnen deze technieken, hoewel niet op zichzelf, maar in combinatie met andere technieken een beter inzicht geven in processen rondom waterlopen. De voor hydraulische conductiviteit mogelijk relevante technieken worden hieronder aangestipt.

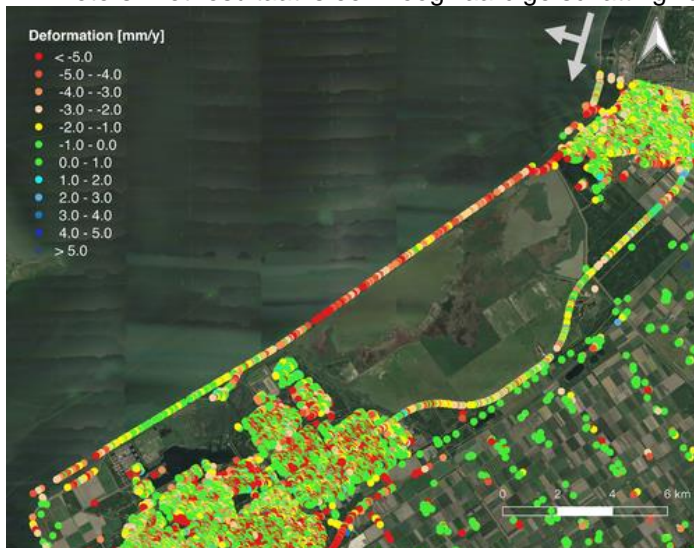
2.2.1 Infrarood

Temperatuurvariaties van het aardoppervlak worden met infraroodsensoren gemeten. Infrarood wordt veel gebruikt rond dijken om geconcentreerde kwel en lekkages op te sporen. Kwelwater heeft de temperatuur van grondwater. Daar waar de temperatuur van het water afwijkt van de omgeving is kwel te constateren met deze techniek. Aangezien de meeste hoogwaters in de winter plaatsvinden kan de anomalie in temperatuur worden gebruikt om die lokale kwel te meten. Deze techniek is daarom afhankelijk van het seizoen en de buitentemperatuur.

2.2.2 InSar

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is een actief radarbeeldvormingssysteem dat met behulp van uitgezonden radargolven vanuit een satelliet de deformatie van het aardoppervlak kan vastleggen.

De methode berust op het identificeren van coherente verstrooiers, objecten die herkenbaar blijven in het radarsignaal gedurende een meetcyclus, d.w.z. de tijd dat de satelliet opnieuw overkomt (meestal enkele dagen). In de meeste gebieden zijn potentiële doelen relatief stabiel in de tijd en is mogelijk om een groot aantal natuurlijk voorkomende verstrooi punten te vinden, met name in stedelijke omgeving of lijninfrastructuur (o.a. dijken, gebouwen, bestrating, enz.). Radarbeelden verkregen op verschillende tijdstippen worden vergeleken om uit de tijdserie het verschil in fase en amplitude van het radarsignaal af te leiden. Uit dit verschil kan de relatieve verplaatsing van de geobserveerde objecten tussen twee opnames worden berekend, met een gemiddelde nauwkeurigheid van enkele centimeters tot millimeters. Het resultaat is een hoogwaardige schatting van de vervorming op deze punten.



Figuur 15: vervormingssnelheden van dijksegmenten in Flevoland van 2003-2010, gemeten met InSAR (Özer 2019)

Door stijghoogteveranderingen in een dijk zwelt de grond op (mm schaal). Met behulp van InSAR is deze subtiele verandering over tijd mogelijk te monitoren en te kwantificeren (Özer 2019, voorbeeld van dijkvervormingen over tijd in Figuur 15). Door de vervorming van de dijk te meten en te correleren aan het stijghoogteverschil, kan potentieel een inschatting worden gemaakt over de variërende stijghoogte rondom de dijk.

InSAR is een krachtig instrument voor het meten van deformaties van het aardoppervlak. Maar is wel gevoelig voor vegetatie (bij snelle groei geen coherente reflectie). De techniek is semi vlakdekkend: de positie en de dekkingsgraad van de meetpunten is pas na het meten bekend. Immers vooraf is moeilijk vast te stellen of het uitgezonden radarsignaal onder de juiste hoek naar de satelliet terug reflecteert.

2.3 In-Situ meetmethoden

In deze paragraaf staan een aantal potentiële in situ meetmethoden beschreven voor het bepalen van de hydraulische conductiviteit. Hierbij is de beschikking over grondonderzoek (sonderingen, boringen, labtesten) voor de kalibratie van de geofysische metingen een gegeven, en is hier niet verder uitgewerkt.

2.3.1 Natuurlijke radioactiviteit

De MS-1200 sensor is de nieuwste versie van het 'MEDUSA' systeem (Multi Element Detector for Underwater Sediment Activity) dat de natuurlijke radioactiviteit van waterbodems meet. Het is een passieve sensor, dus het zendt zelf geen straling uit. Het spectrogram van

de gemeten straling kan gerelateerd worden aan bodemsamenstelling, zo geeft een zandige waterbodem een ander signaal dan bijvoorbeeld een kleiige bodem.

De sensor is een sleepdetector wat betekent dat het achter een schip aan over de bodem wordt getrokken. Het betreft dus een varende meting, waar vele kilometers op een dag van kunnen worden ingemeten. De verkregen meting is een lijnmeting en geeft informatie over de bodemsamenstelling langs de vaarlijn van het schip in het bovenste laagje van de waterbodem (enkele decimeters). Door meerdere lijnen te varen of een reeks van meerdere sensoren naast elkaar te slepen kan middels interpolatie eventueel een vlakdekkend beeld verkregen worden.

De MS-1200 sensor bevat ook een microfoon, deze wordt gebruikt om te garanderen dat de sensor daadwerkelijk over de bodem sleept (zie Figuur 16). De verkregen data hieruit geeft ook een indicatie van de bodemruwheid die gerelateerd kan worden aan korrelgrootte die vervolgens een indicatie geeft voor hydraulische weerstand (Kooijmans et al., 2016).

De sensor is in het verleden al herhaaldelijk ingezet door Rijkswaterstaat. Voorbeelden van projecten zijn beschreven door Roberti et al. (2001).



Figuur 16: De MS-1200 sensor sleept over de bodem en meet de natuurlijke radioactieve straling van het sediment (Medusa Institute)

2.3.2

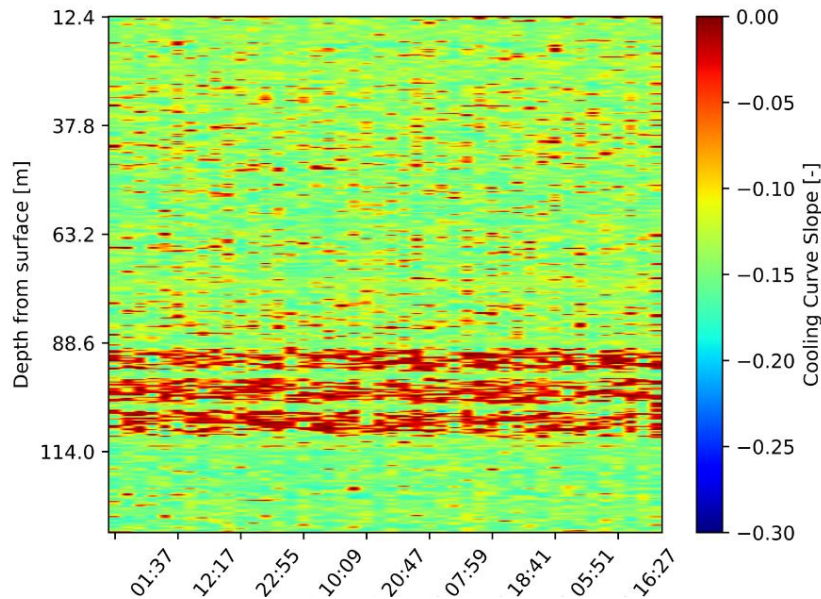
Temperatuur

Glasvezelkabels worden gebruikt als sensoren voor metingen van onder andere DAS (Distributed Acoustic Sensing) en DTS (Distributed Temperature Sensing). Door het aanleggen van glasvezelkabels op verschillende locaties in en rond de rivier is het mogelijk om verschillende parameters gerelateerd aan de infiltratie of drainage van het rivierwater te meten over grote afstanden. Een voorbeeld hiervan is Vogt et al., (2010) die infiltratiesnelheden in een Zwitserse rivier bepaalde met nauwkeurige temperatuursmetingen met glasvezel.

Een toepassing van glasvezel op het gebied van de hydrologie is het actief verwarmen van een glasvezel en daarbij de warmteflux met de glasvezelkabel te meten. Hierdoor is het mogelijk om een vertaling naar snelheid van grondwaterstroming te maken. Momenteel is er een TKI project opgestart, gericht op de vertaling van deze metingen naar stroomsnelheid en stroomrichting.

Eerder uitgevoerd werk richtte zich op het toepassen van Active Heating DTS (AH-DTS) in de nabijheid van grondwateronttrekkingsputten (data zichtbaar in Figuur 17), met

stroomsnelheden die veel hoger zijn dan die rond om een kanaal of rivier. De uitdaging zal dan ook voornamelijk liggen in het kunnen meten van lage natuurlijke stroomsnelheden zoals die in de ondergrond voorkomen.



Figuur 17: AH-DTS resultaten van een Deltares project in een water-onttrekkingsput. De x-as geeft metingen over de tijd weer met diepte op de y-as. De rode uitslag indiceert meer stroming van water, waar de groene uitslag geen of weinig stroming betekent. De filters van de put, waar veel stroming wordt verwacht, zijn duidelijk te zien als de 3 rode meetuitslagen in de AH-DTS data.

De glasvezelkabel meet in een lijn, maar bij gebruik van een grid kan dit worden uitgebreid naar een meer vlakdekkend beeld. Voor AH-DTS is de maximale meetlengte beperkt door de mogelijkheid tot het verwarmen van de kabel. Deze techniek kan daardoor vooral worden toegepast in kleinere (focus) gebieden voor extra resolutie.

2.3.3 Elektrische metingen

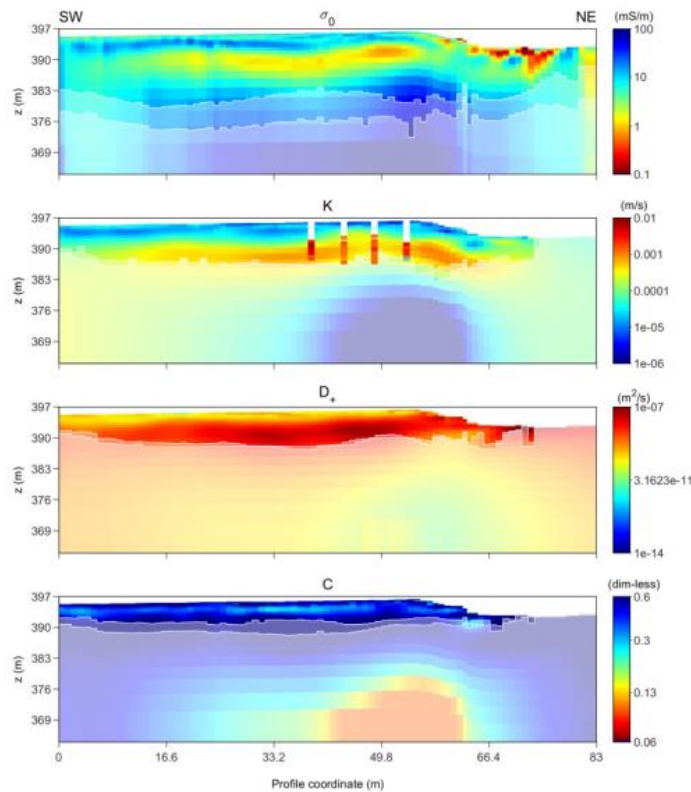
Geo-elektrische metingen (ERT) worden gebruikt in verschillende toepassingsgebieden. Ze helpen bij het verkrijgen van informatie over de ondergrond, het grondwaterpeil, het in kaart brengen van ondergrondse structuren en zoet-zoutverdeling van het grondwater.

Bij het basisprincipe van de geo-elektrische metingen worden vier metalen geleiders (elektroden) in de grond geplaatst: twee stroomelektroden en twee meetelektroden voor de ontstane spanning. Er wordt een elektrische stroom opgewekt, waarbij gelijktijdig de spanning wordt gemeten tussen de twee meetelektrodes.

Op basis van deze metingen kan met behulp van de wet van Ohm de elektrische weerstand van de ondergrond worden bepaald. Afhankelijk van de elektrode-afstand en aantal combinaties van de 4 genoemde elektroden, kan op verschillende dieptes de bodemweerstand worden gemeten en in 2D in kaart kan worden gebracht. Deze bodemweerstand kunnen, bij voorkeur in combinatie met andere metingen, worden gebruikt voor het in kaart brengen van ondiepe zandlagen of het meten van de sliblaagdikte in kanalen/rivieren.

Induced Polarization (IP) is een meettechniek waarin een sinusvormige elektrische stroom in de grond geïnjecteerd wordt. Het verschil in de fase van de geïnjecteerde en gemeten spanning wordt gebruikt om de chargeability (vermogen om elektrische lading in de grond vast te houden) van de ondergrond te meten. Over het algemeen vertonen poreuze materialen een hogere chargeability. Mede hierdoor kan de data van IP metingen worden

gebruikt om de grondsoort en daarmee de hydraulische conductiviteit van de bodem af te leiden (Fiandaca et al. 2021). Deltares heeft ervaring met het analyseren van IP data om de hydraulische conductiviteit af te leiden. Deltares werkt hierbij onder andere samen met de Lund University, Zweden. De methode is veelbelovend, maar nog niet uitontwikkeld.



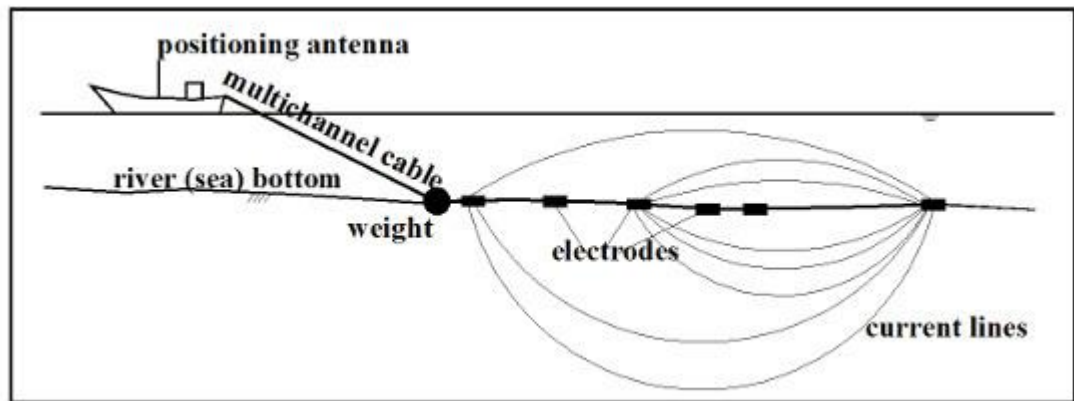
Figuur 18: Resultaten veldtesten (a. elektrische conductiviteit, b. hydraulische conductiviteit, c. diffusie coëfficiënt, d. dielectrische relaxatie, uit Martin et al. 2021).

Martin et al. 2021 heeft deze methode gevalideerd met veldtesten. In Figuur 18 is één van de veldresultaten geïllustreerd waarin ERT-IP resultaten worden gevalideerd met data uit boringen. Hierbij is met ERT en IP de conductiviteit gemeten en zijn door middel van conventionele en petrofysisch inversies, elektrische conductiviteitswaarden, de hydraulische conductiviteit (K), de diffusie coëfficiënt (D₊) en de dielectrische relaxatie (C) verkregen. De resultaten uit de ERT-IP metingen zijn hierna vergeleken met hydraulische conductiviteit uit boorgatmetingen (geplot in Figuur 18 b) en worden beschreven als een zeer goede fit. Er kan hier uit worden geconcludeerd dat het mogelijk is om ERT-IP te gebruiken om onder andere hydraulische conductiviteit en andere hydrologische parameters als de diffusie coëfficiënt in 2D te meten. Deze parameters geven een inzicht in de hydrologische situatie van het meetgebied.

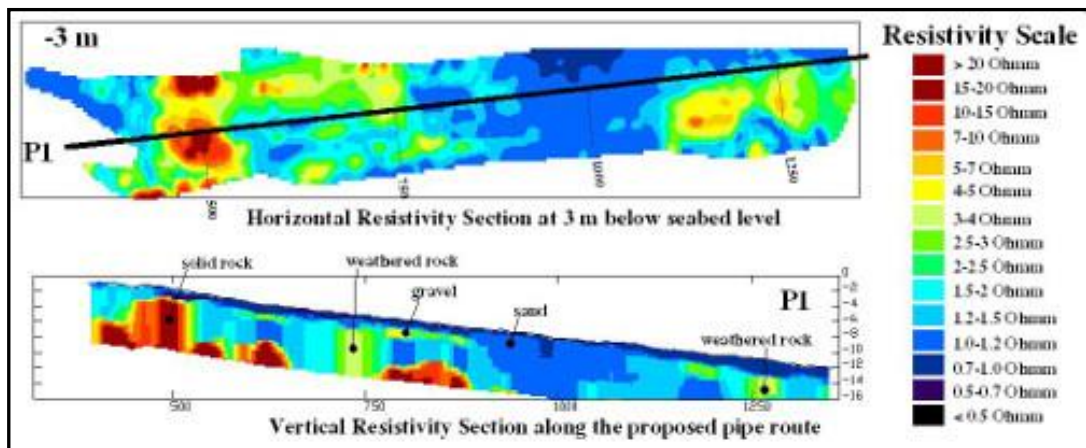
Een nadeel van deze techniek is dat voorkennis vereist is over de hydraulische conductiviteit van de voorkomende grondsoorten. Omdat de chargeability niet rechtlijnig kan worden gecorreleerd aan porositeit, maar ook afhankelijk is van de mineralogie. Het ligt hierbij voor de hand om IP met ERT te combineren met een andere meettechniek of eerder verkregen geotechnische/geologische data om deze informatie te verkrijgen. Daarnaast is het meten van de chargeability een langzaam proces, voor een meting moet de meetapparatuur vrijwel stil liggen. Per meting kan rekening gehouden worden met een duur van enkele tot tientallen minuten (afhankelijk van de meetparameters) voor een profiel van 30 tot maximaal 100 meter.

Slepende elektrische meting

Er bestaat ook een getrokken ERT systeem: Aquares (Brabers 2018) die als een varende meting kan worden ingezet (zie Figuur 19). Het voordeel t.o.v. een reguliere ERT kabel is dat de productie vele malen hoger ligt en er meerdere kilometers op een dag kunnen worden ingewonnen. Dit gaat wel ten koste van de horizontale resolutie (~5 m) en naar verwachting ook de gevoeligheid. De meetopstelling van dit systeem en een voorbeeld van een elektrische weerstandkaart en de interpretatie naar bodemsamenstelling zijn weergegeven in Figuur 20. De verschillende gemeten weerstanden kunnen worden geïnterpreteerd naar grondsoorten en hierbij bijdragen aan kennis en inzicht over de bodemsamenstelling onder het kanaal of de rivier.



Figuur 19: Illustratie van een varende ERT meting



Figuur 20: Aquares elektrische weerstand systeem en verkregen data na verwerking (Demco NV). Duidelijk zichtbaar is de heterogeniteit van de ondergrond, uitgedrukt in ohm.m

2.4 Overzicht meettechnieken

Binnen de verschillende meettechnieken kan onderscheid worden gemaakt tussen methoden die direct de hydraulische conductiviteit, instroom of uitstroom meten, en methoden waarbij deze kan worden afgeleid. Dit gaat bijvoorbeeld om het meten van bodemvormen, korrelgrote, stijghoogte of ondergrondopbouw die in verband kunnen worden gebracht met infiltratie of drainage van rivierwater. In Tabel 2 is per techniek aangegeven welke materiaaleigenschap of parameter wordt gemeten. Het combineren van verschillende parameters kan leiden tot een vlakdekkend overzicht van de waterstromingen in en rondom

te rivier en op basis hiervan kunnen potentiële combinaties van meettechnieken worden samengesteld in het onderzoeksvoorstel.

Tabel 2: Parameters meetmethoden

	Korregrootte/ bodemruwheid	Bodemopbouw	Hydraulische conductiviteit	(Grond-) Waterstroming	Morfologie	Oppervlakte effecten grondwater
Meetmethoden						
MBES					+	
MBES-BS	+				+	
PES		+				
Infrarood						+
InSar						+
Underwater gamma spectrometer	+	+				
AH-DTS				+		
ERT IP		+	+			
Aquares		+				

2.5 Kwalificatie meettechnieken

Naast de gemeten materiaaleigenschappen of parameters zijn ook de eigenschappen van elke meettechniek belangrijk. Onder andere de vlakdekkendheid, snelheid van meten en kosten van datawinning is hierbij belangrijk om het onderzoekplan uitvoerbaar te maken.

Tabel 3: Mogelijkheden verschillende meetmethoden

*R = research, DV=in development, DP= in deployment

** varende metingen meenemen tijdens reguliere bathymetry metingen reduceert inwinkosten

	Vlak dekkend	Betrouwbaar	Nauwkeurigheid	Snelheid meten	Kosten data inwinning	Haalbaarheid	TRL methode*	TRL data analyse*
Meetmethoden								
MBES	xy	++	+++	++	€**	+++	DP	DP
MBES-BS	xy	++	+++	++	€**	+++	DP	DV
PES	xz	++	+++	++	€**	+++	DP	DP
Infrarood	xy	++	+++					
InSar	xy	-	+	+++	€	+/-	DP	R
Underwater gamma spectrometer	x	+	+	+++	€**	+	DV	DV
AH-DTS	x	++	++	+++	€€	+	DP	DV
ERT IP	xz	++	++	+	€€	++	DP	DV
Aquares	xz	+	-	++	€€**	++	DP	DV

Tabel 3 geeft een overzicht van de diverse potentiële meetmethoden en hun eigenschappen. Hieruit is bijvoorbeeld af te leiden dat er geen enkele techniek vlakdekkend is en dat alleen een combinatie van technieken (een benadering van) vlakdekkendheid kan opleveren. De tabel geeft ook een indicatie voor zaken als nauwkeurigheid, haalbaarheid en kosten. Ook is een inschatting gemaakt van het TRL niveau per meetmethode. Hieruit is af te lezen dat een aantal technieken, zoals MBES en PES, al erg ver in TRL zijn en bovendien makkelijk en snel toepasbaar voor het meten van de rivier- en kanaalbodems,. Daarentegen zijn dit niet de technieken die zich specifiek richten op het meten van de hydraulische conductiviteit of bodemopbouw, zoals ERT-IP en AH-DTS. Echter, deze laatste zijn veelal weer lastiger op grote schaal te gebruiken. Dit vraagt dus om een combinatie van meetmethoden en data-analyses om de vraagstelling zo goed mogelijk te kunnen beantwoorden.

2.6 Datafusie

Het combineren van technieken kan de uitkomst zijn voor zowel het schaalprobleem, als het verkrijgen van de gewenste parameters. Soms is het mogelijk om meer informatie te halen uit de data, als data van verschillende technieken wordt gecombineerd. Deze aanpak noemen wij datafusie. Omdat de gewenste hydraulische conductiviteit van de bodem bij veel technieken niet de direct gemeten parameter is, kan datafusie een uitkomst bieden. Door verschillende data te combineren kan de gewenste parameter, of een afgeleide hiervan, mogelijk alsnog worden bepaald. Om dit vast te kunnen stellen is een modelsimulatie de aangewezen weg. Hiermee kan vooraf vastgesteld worden of combineren van technieken kan leiden tot betrouwbare, vlakdekkende informatie over de hydraulische conductiviteit rondom rivieren en kanalen. Deze aanpak is ontwikkeld door Deltares onder de naam GeoSim (zie paragraaf 2.7).

2.7 Data analyse GeoSim

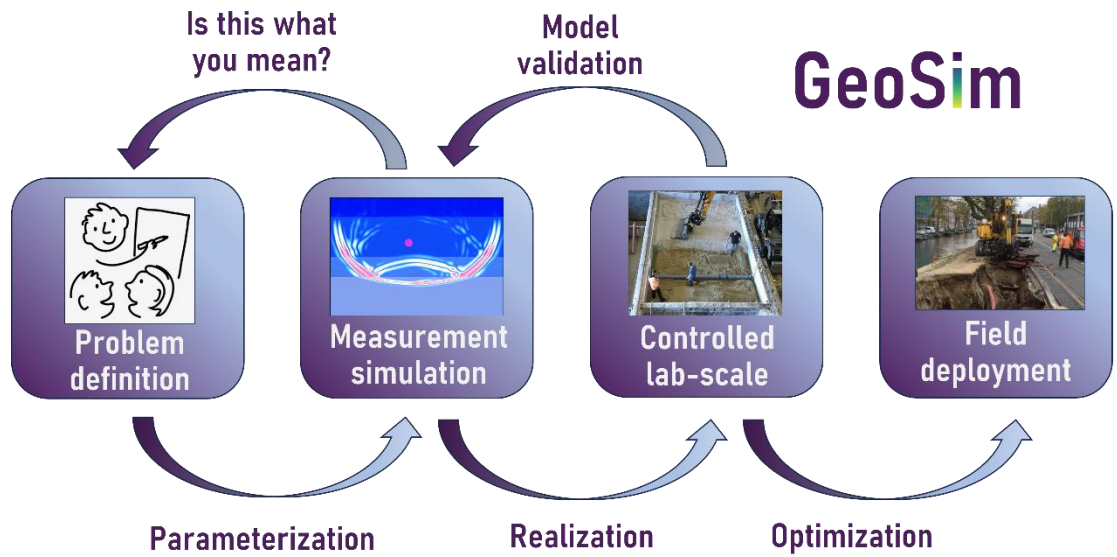
Om te bepalen welke geofysische meettechnieken het meest kansrijk zijn is het mogelijk om eerst te modelleren/simuleren wat de verwachte prestaties van welke meetmethode zijn. Dit is onderdeel van een zogenaamde GeoSim workflow (zie Figuur 21).

Met het vastleggen van de probleemdefinitie kunnen met de computer meetsimulaties uitgevoerd worden om te onderzoeken wat voor data verkregen kan worden voor specifieke scenario's. Hieruit kan bepaald worden wat de parametergevoeligheid is van verschillende meettechnieken en bijvoorbeeld of de gewenste resolutie kan worden gehaald. Uit de opgestelde scenario's worden de beste kandidaat technieken geselecteerd voor de volgende stap.

De volgende stap in de GeoSim workflow is de gecontroleerde lab-opstelling. Door een scenario na te bouwen, bijvoorbeeld in de water-grondgoot bij Deltares is er volle controle over alle parameters en kan er dus een (geschaalde) waterbodem worden nagebouwd met verschillende hydraulische weerstanden die van tevoren exact bekend zijn. Door vervolgens de meettechnieken uit de vorige stap in te zetten en de data te verwerken en te analyseren, kan worden onderzocht hoe goed de gevraagde parameters kunnen worden bepaald. Indien het gewenst is om een "blinde test" uit te voeren om de methode te testen, kan de eventueel aanwezige kennis met betrekking tot hydraulische weerstanden door de opdrachtgever worden achter gehouden. In andere gevallen kan de voorkennis worden ingezet voor gebruik in datakalibratie voor latere veldtoepassing.

De laatste stap in GeoSim betreft de veldtest. De technieken die het meest kansrijk uit de vorige stappen kwamen worden nu in het veld ingezet. Door de vorige stappen is de kans van slagen van de veldproef enorm toegenomen doordat er veel bekend is over wat de beste meetinstellingen zijn en wat voor resultaten en resoluties verwacht kunnen worden. Voor een (eerste) veldtest raden wij aan om een locatie te kiezen waar al heel veel bekend is over de kanaalbodem, bijvoorbeeld uit boringen of sonderingen. Als er goede resultaten verkregen worden uit de geofysische metingen die overeenkomen met deze in-situ metingen, dan kan de meetopstelling op grote schaal worden ingezet.

De wijze waarop de stappen in GeoSim doorlopen moeten worden, hangt sterk af van toepassing en de geselecteerde techniek(en). Voor conventionele technieken is een lab-opstelling niet altijd nodig en in sommige gevallen is het zelf raadzaam om direct van probleemdefinitie naar veldtest te gaan. In alle gevallen kan de uitkomst van een stap als een go/no-go fungeren.



Figuur 21: Deltares GeoSim workflow brings you from problem statement to field solution.

3 Conclusie en onderzoeksprogramma

Op dit moment is het niet goed mogelijk om een betrouwbaar vlakdekkend beeld van de bodemweerstand rondom de kanalen en rivieren te produceren. Bestaande ondergrondmodellen zijn erg grof en hebben grote onzekerheid omdat de data waarop de modellen gebaseerd zijn schaars is in waterlopen. In dit rapport zijn verschillende technieken besproken die gezamenlijk een bijdrage zouden kunnen leveren aan een hogere informatiedichtheid van bodemweerstand.

De besproken meetmethoden kunnen elk een stukje bijdragen aan een beter beeld van de hydraulische conductiviteit van de waterbodem. Echter, in een "standalone" analyse met één methode is de verkregen informatie beperkt. Daarom is het van wezenlijk belang om meerdere methoden te gebruiken en de data aan elkaar te koppelen en dan te analyseren. Welke methoden dat moeten zijn is afhankelijk van de lokale situatie en de precieze vraag, en kan worden bepaald door vooraf een simulatie te maken (GeoSim). Het resultaat is een optimale "vlakdekkendheid", die met individuele analyse van de resultaten per meting nooit gehaald kan worden. Hoe goed een en ander uit zal pakken kan worden uitgetest in een pilot als vervolg op deze inventarisatie.

Over het algemeen geldt dat over de samenstelling van de ondergrond onder rivieren en kanalen maar beperkt informatie beschikbaar is. Er zijn in de afgelopen jaren in verschillende projecten (Lek, Oude Maas, Waal) successen geboekt met sub-bottom profilers waarbij de ondergrond en de weerstand biedende lagen goed in kaart konden worden gebracht. Een uitrol van een combinatie van technieken over alle waterlopen in Nederland zou een belangrijke kennisbasis kunnen opleveren voor de bodemweerstand en ongewenste erosie. Hierbij kunnen huidige stabiele situaties of gaten en zwakke plekken worden geïdentificeerd, en toekomstige problemen (bijv. dunne kleilaag op zand) op tijd worden voorspeld en voorkomen.

3.1 Voorstel onderzoeksprogramma

Zoals benoemd is vlakdekkend én met hoge resolutie meten over grote afstanden een uitdaging voor veel geofysische technieken. Door eerst met technieken te meten die snel, grootschalige data kunnen inwinnen, kunnen risico- of focusgebieden bepaald worden. Die kunnen vervolgens ingemeten worden met kleinschaligere, hoge resolutie geofysica, om een goed beeld van de hydraulische en geologische situatie te verkrijgen van deze gebieden.

Grootschalige inwinning kan met remote sensing:

- Infrarood
- InSar

Daarnaast is het ook mogelijk een grootschalig beeld te krijgen van de ondergrond in en dichtbij de rivieren/kanalen met varende meetmethoden. Deze methoden kunnen worden gecombineerd met reguliere bathymetriemetingen:

- MBES (-BS)
- Sub-bottom profiler
- Aquares varende ERT
- Medusa

De risicogebieden kunnen vervolgens met hogere resolutie worden ingemeten met technieken als:

- ERT (IP) voor het verkrijgen van de bodemweerstand en hydraulische conductiviteit
- AH-DTS voor het verkrijgen van grondwaterstromingen

Door met remote sensing locaties te identificeren waar grondwaterstromingen veel fluctueren of risico opleveren, kunnen op die locaties in-situ methoden worden ingezet om de hydraulische conductiviteit en grondwaterstroming in kaart te brengen en te monitoren. Multibeam backscatter data en sub-bottom profiler data kan snel en op grote schaal worden ingewonnen tijdens reguliere bathymetrische (MBES) metingen, waarna aan de hand van deze data ook focusgebieden kunnen worden aangewezen.

Met GeoSim kan de werking van de in-situ methoden op verschillende pilot situaties worden getest en gevalideerd. Wij stellen voor om in overleg een kansrijke pilotlocatie te bepalen met een veelvoorkomende probleemsituatie met betrekking tot kanaalbodemweerstand. Hierbij is het van grote waarde als er ondergrondinformatie aanwezig is zoals sonderingen en/of boringen. De pilot kan bestaan uit een simulatie en een veldtest.

De simulatie geeft de mogelijkheid om verschillende in-situ meetmethoden te testen en te valideren op de gekozen hydro-geologische situatie. Daarnaast is het mogelijk om vormen van datafusie (het combineren van verschillende soorten data op 1 locatie) vroegtijdig te valideren. Door gebruik te maken van simulatiedata kunnen, op een snelle en gecontroleerde manier, verschillende meetmethoden worden getest en gecombineerd om meer of betere informatie uit de data te halen.

De veldtest geeft een realistisch beeld van de prestaties van de geofysische technieken op de gekozen situatie. Door met de verschillende meettechnieken, één pilotlocatie in kaart te brengen, kunnen onderlinge verbanden tussen de grootschalige en hoge resolutie technieken worden onderzocht.

4 Referenties

Brabers, P. (2018). Geophysical alluvial exploration using the Aquares Resistivity method. *Diamonds Source to Use 2018 conference paper*.

Conway, K.W., Krautter, M., Barrie, J.V., and Neuweiler, M. (2001). Hexactinellid sponge reefs on the Canadian continental shelf: a unique "living fossil": *Geoscience Canada*, v. 28, no. 2, p. 71-78.

Deltares, 2012. Geologisch en seismisch onderzoek bodem Lek, Langerak-Schoonhovenseveer-Kinderdijk. Rapportnummer 1206155-000-BGS-0008

Deltares, 2021. Gebiedsbreed schade onderzoek aan panden Almelo de Haandrik kanaal. Rapportnummer 11203512-005-GEO-0015

Demco NV. The principles of Aquares resistivity sounding. http://www.demco-surveys.com/English/principles_english.html

E.R.van der Graaf, R.L.Koomans, J.Limburg, K.deVries (2006). Insitu radiometric mapping as a proxy of sediment contamination: Assessment of the underlying geochemical and physical principles

Fiandaca, G., Madsen, L. M., Olmo, M., Römhild, L., & Maurya, P. (2021, August). Inversion of hydraulic conductivity from Induced Polarisation, Part A: methodology and verification. In *NSG2021 1st Conference on Hydrogeophysics* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Foster, N. (2016) Artist's conception of multibeam sonar on NOAA Ship. NOAA photo library. <https://www.flickr.com/photos/naaphotolib/27555144884/>

Gaida, T.C., Tengku Ali, T.A., Snellen, M., AmiriSimkoei, A., Van Dijk, T.A.G.P. & Simons, D.G. (2018). A multispectral Bayesian classification method for increased acoustic discrimination of seabed sediments using multi-frequency multibeam backscatter data. *Geosciences* 8, 455.

Huisman, Y., Koopmans, H., Wiersma, A., de Haas, T., Berends, K., Sloff, K., Stouthamer, E. (2021). Lithological control on scour hole formation in the Rhine-Meuse Estuary. *Geomorphology* 385, 107720, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107720>.

Medusa Institute. Gamma-ray surveying - best practices for an underwater survey. <https://the.medusa.institute/wiki/best-practices-for-an-underwater-survey>

Leven, C., & Barrash, W. (2022). Fiber optic pressure measurements open up new experimental possibilities in hydrogeology. *Groundwater*, 60(1), 125-136.

Martin, T., Pauw, P. S., Karoulis, M., Mendoza, A., Günther, T., Madsen, L. M., ... & Fiandaca, G. (2021, August). Inversion of hydraulic conductivity from Induced Polarisation, Part B: field examples from five countries. In *NSG2021 1st Conference on Hydrogeophysics* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Özer, I. E., van Leijen, F. J., Jonkman, S. N., & Hanssen, R. F. (2019). Applicability of satellite radar imaging to monitor the conditions of levees. *Journal of Flood Risk Management*, 12(S2), e12509.

R.L. Koomans, S. de Vries & J. Limburg (2016). An Underwater Gamma Spectrometer as Tool for Ecological Assessment. Near Surface Geoscience 4-8 September 2016, Barcelona, Spain

Roberti, J.R., Cox, H.L.H., Bosman, J.J. (2001). *Meten met MEDUSA, een leidraad voor gebruik bij Rijkswaterstaat* (Bodemrichtlijn.nl)

Snellen, M., Gaida, T.C., Koop, L., Alevizos, E., Simons, D.G. (2019). Performance of Multibeam Echosounder Backscatter-Based Classification for Monitoring Sediment Distributions Using Multitemporal Large-Scale Ocean Data Sets. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 44, 142-155.

Talmon, A.M., Mastbergen, D.R. & Huisman, M., 2013. 'Invasion of pressurized clay suspensions into granular soil'. *Journal of Porous Media*, vol. 16, no. 4, pp. 351-365. <https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v16.i4.70>

TU Delft Open Source ware: Geohydrologie Geraadpleegd op 20-11-2023, van <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Hydrologie-hfdst-7.pdf>

Van Dijk, T.A.G.P., Karaoulis, M., Gaida, T.C., Van Galen, R.J., Huisman, S.E., de Vries, S. and Ahlrichs, E. (2019). Sediment mapping of sand extraction pit Maasvlakte 2, using bed classification from multibeam backscatter data. Deltares report 11202743-002-BGS-0002, 51 pp., <http://kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/1000003608>.

Vogt, T., Schneider, P., Hahn-Woernle, L., Cirpka, O.A. 2010. Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiber-optic high-resolution vertical temperature profiling. *Journal of Hydrology* 380, 154-164.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl