

RAPPORT

Vorstudie Monitoringstechnieken Zwerfafval grote rivieren

Klant: RWS

Referentie: BI2774-WM-RP-220421-1534WM

Status: Definitief/00

Datum: 21 april 2022



George Hintzenweg 85
3068 AX Rotterdam
Water & Maritime
Trade register number: 56515154

+31 88 348 90 00 **T**
info@rhdhv.com **E**
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Voorstudie Monitoringstechnieken Zwerfafval grote rivieren

Referentie: BI2774-WM-RP-220421-1534WM
Status: 00/Definitief
Datum: 21 april 2022
Projectnaam: Inventarisatie Meettechnieken Zwerfafval
Projectnummer: BI2774
Auteur(s): Mark de Weerd, Emiel Verstegen

Opgesteld door: Mark de Weerd, Emiel Verstegen

Gecontroleerd door: Herman Evenblij

Datum: 21 april 2022

Goedgekeurd door: Herman Evenblij

Datum: 21 april 2022

Classificatie

Projectgerelateerd

Behoudens andersluidende afspraken met de Opdrachtgever, mag niets uit dit document worden verveelvoudigd of openbaar gemaakt of worden gebruikt voor een ander doel dan waarvoor het document is vervaardigd. HaskoningDHV Nederland B.V. aanvaardt geen enkele verantwoordelijkheid of aansprakelijkheid voor dit document, anders dan jegens de Opdrachtgever.

Let op: dit document bevat mogelijk persoonsgegevens van medewerkers van HaskoningDHV Nederland B.V.. Voordat publicatie plaatsvindt (of anderszins openbaarmaking), dient dit document te worden geanonimiseerd of dient toestemming te worden verkregen om dit document met persoonsgegevens te publiceren. Dit hoeft niet als wet- of regelgeving anonimiseren niet toestaat.

Inhoud

1	Inleiding	1
2	Inventarisatie technologische meettechnieken	2
2.1	Uitgevoerde inventarisatie	2
2.2	Resultaat	2
2.3	Conventionele meettechnieken	3
2.3.1	Bemonstering middels crowd-sourcing of Citizen Science	3
2.3.2	Bemonstering met vangsystemen	3
2.4	Technologische meettechnieken	7
2.4.1	Monitoring met satellieten – actief en passief	7
2.4.2	Monitoring met Drones (Unmanned Airborne Vehicles) en vliegtuigen	8
2.4.3	Monitoring met Stationaire (wild)camera's	9
2.4.4	Monitoring met Stationaire onderwatercamera's	9
2.4.5	Monitoring met sonar	10
2.4.6	Monitoring met Onderwaterdrones (ROV's)	12
2.4.7	Monitoring met Sea-Air integrated drones	13
3	Haalbaarheidstoets	15
3.1	Resultaten haalbaarheidstoets.	15
3.2	Synthese	15
4	Pilots	17
4.1	Monitoring van zwerfafval op het wateroppervlak vanaf vaste objecten (zoals bruggen, sluisen, etc.) met behulp van camera's	17
4.1.1	Inleiding	17
4.1.2	Onderzoeksvragen	17
4.1.3	Beschrijving aanpak	18
4.1.4	Kosten	18
4.2	Monitoring van zwerfafval op het wateroppervlak en de oever vanaf bewegende objecten (zoals drones, voer- en vaartuigen) met behulp van camera's	19
4.2.1	Inleiding	19
4.2.2	Onderzoeksvragen	19
4.2.3	Beschrijving aanpak	20
4.2.4	Kosten	20
4.3	Monitoring van zwerfafval in de waterkolom met sonar	21
4.3.1	Inleiding	21
4.3.2	Onderzoeksvragen	21
4.3.3	Beschrijving aanpak	22
4.3.4	Kosten	22
4.4	Monitoring van zwerfafval op het wateroppervlak en de oever met behulp van satellietbeelden en luchtbeelden van inspectievluchten.	23
4.4.1	Inleiding	23

4.4.2	Onderzoeksvraag	23
4.4.3	Beschrijving aanpak	24
4.4.4	Kosten	25
5	References	26

Tabellen

Tabel 3-1: Haalbaarheidstoets meettechnieken	16
--	----

Figuren

Figuur 2-1: Catchy, bron: allseas.com [a], Shoreliner, bron: tauw.nl [b], Noria, bron: plasticsoupfoundations.com [c], Interceptor, bron: theoceancleanup.com [d]	4
Figuur 2-2: Een larvennet [a] en plaatsing van een larvennet op verschillende dieptes [b]. Bron: helpdeskwater.nl	5
Figuur 2-3: Een foto van een ankerkuil [a] en een schematische weergave van een ankerkuil gespannen onder een boot [b]	5
Figuur 2-4: Van duur naar goedkoop: De boomkor, bron: goedevisser.nl [a], de Mantatrawl, bron: https://www.nhbs.com/manta-trawl-net [b], de laditrawl, civiclaboratory.nl [c] en de babylegs, civiclaboratory.nl [d]	6
Figuur 2-5: Verschillende positionering van de ADCP en vergelijkbare apparatuur.	12
Figuur 2-6: Illustration of multiple underwater drones equipped with cameras, lights, or water quality sensors. Neptune [a]; OpenROV 2.7 [b]; BlueROV2 [c]; PowerRay [d]. Bron: [51]	13
Figuur 2-7: Sea-air integrated drone. Bron: designboom.com	13

1 Inleiding

Om inzicht te kunnen krijgen in de omvang van het probleem van zwerfafval in rivieren en om maatregelen te kunnen onderbouwen, te ontwikkelen en te verbeteren werkt Rijkswaterstaat (RWS) aan een monitoringstrategie. Deze monitoringsstrategie wordt op basis van een routekaart [1] [2] ontwikkeld. RWS stelt onderzoeksprojecten en pilots op die gericht zijn op de ontwikkeling van structurele en landelijke zwerfafvalmonitoring langs en in rivieren.

De uiteindelijke doelstelling is om een structurele monitoring op te kunnen zetten en deze monitoring idealiter te implementeren in de Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands (MWTL) om de hoeveelheid en typen plastic die zich in en om de Nederlandse rivieren bevindt te rapporteren. Op deze manier kunnen gericht maatregelen ter preventie, mitigatie en verwijdering van zwerfafval in Nederlandse rivieren opgesteld en geëvalueerd worden.

Binnen de routekaart is zwerfafval gedefinieerd als 'alle antropogene voorwerpen en fragmenten groter dan 0,5 mm, maar kleiner dan 5 cm (meso) en voorwerpen en fragmenten groter dan 5 cm (macro)'. Daarnaast zijn binnen de routekaart vijf compartimenten van de rivier onderscheiden: zwerfafval op de oever, drijvend zwerfafval, zwerfafval in de waterkolom, zwerfafval in het sediment en afval in biota. Binnen RWS ligt voor nu de focus op afval op de oever, drijvend zwerfafval en zwerfafval in de waterkolom.

Op dit moment worden door onder andere RWS meerdere meettechnieken onderzocht en getest voor het monitoren van zwerfafval langs de oevers, op het wateroppervlak en in de waterkolom. Hierbij wordt zowel gekeken naar conventionele meettechnieken (visuele observaties, handmatige tellingen, meten met netten) als naar technologische meettechnieken (inzet van camera's, drones, sonardetectie, satellietbeelden, artificial intelligence voor beeldherkenning, etc.). Voor de conventionele meettechnieken geldt dat er begonnen is met de voorbereiding op structurele monitoring en het uitvoeren van nulmetingen. Voor technologische meettechnieken geldt dat er met name kleinschalige pilots uitgevoerd zijn.

Deze voorstudie valt in het cluster Nieuwe Meettechnieken van de routekaart. Binnen dit cluster wordt gekeken naar technologische meettechnieken die potentie hebben om te kunnen worden ingezet voor zwerfafvalmonitoring langs en in de rivieren en mogelijk de handmatige monitoring in de toekomst kunnen vervangen.

Tijdens de uitvoer van deze voorstudie is een overzicht gemaakt van beschikbare technologische meettechnieken (hoofdstuk 2). Van deze meettechnieken is vervolgens met een haalbaarheidstoets de huidige staat en de optie tot implementatie in de komende jaren ingeschat (hoofdstuk 3). Hierbij zijn de technieken beoordeeld op welke compartimenten van de rivier hiermee kunnen worden gemonitord, de benodigde kosten van monitoring met deze techniek, de praktische inzetbaarheid voor structurele monitoring en de *technology readiness level* (op een schaal van 0 tot 10, van idee tot uitgebreide implementatie) van de techniek. Van een viertal kansrijke technologische meettechnieken is een voorstel gemaakt voor de opzet van een pilotstudie (hoofdstuk 4).

Deze voorstudie is met de grootst mogelijke zorg uitgevoerd. Er zijn echter wereldwijd ontwikkelingen op dit gebied en deze ontwikkelingen gaan zeer snel. Er wordt wekelijks over het onderwerp en over nieuwe meettechnieken gepubliceerd. Het is daarom vrijwel zeker dat er bij het verschijnen van deze voorstudie inmiddels aanvullende informatie beschikbaar is. Desondanks wordt volgens de auteurs met de voorliggende plannen in hoofdstuk 4 een zinvolle stap voor structurele monitoring van de grote rivieren gezet. Het lijkt echter raadzaam om over 1,5 à 2 jaar een update te maken van hoofdstuk 2.

2 Inventarisatie technologische meettechnieken

2.1 Uitgevoerde inventarisatie

Tijdens de inventarisatie is informatie verzameld vanuit verschillende bronnen. Er is met meerdere experts in het werkveld gesproken over de projecten en onderzoeken waar zij mee bezig zijn. Daarnaast is (wetenschappelijke) literatuur geraadpleegd die door deze experts is aangeleverd, evenals aanvullende literatuur buiten deze experts om. Ook is het patentenregister geraadpleegd.

2.2 Resultaat

Wereldwijd zijn meerdere samenwerkingsverbanden opgezet om plastic in rivieren en maritieme wateren te monitoren. Mondiaal zijn de Verenigde Naties op 2 maart 2022 overeengekomen om toe te werken naar bindende afspraken over het tegengaan, monitoren en afvangen van plastic in onder andere de rivieren. Binnen het UNEP (United Nations Environmental Programme) zijn de richtlijnen opgezet voor het harmoniseren van de methodologieën van het monitoren van plastic in rivieren en meren [3]. Op continentale schaal zijn onder andere de volgende samenwerkingsverbanden opgezet:

- Plastic free Rivers and Seas for South Asia Project (PLEASE) – South Asia Co-operative Environment Programme (SACEP) [4];
- African Marine Waste Network [5];
- RIMMEL: Riverine and Marine floating macro litter Monitoring and Modelling of Environmental Loading [6];

Op stroomgebiedniveau zijn dit onder andere:

- de Rijn en de Maas (LIVES - litter free rivers and streams) [7];
- de deltarivieren die naar de Baltische Zee afvoeren (BLASTIC – Plastic waste pathways into the Baltic Sea) [8];
- de deltarivieren die naar de Adriatische Zee afvoeren (DeFishGear) [9] of;
- de deltarivieren die naar de Middellandse Zee afvoeren (MIDaS) [10].

Ook binnen deze continentale samenwerkingsverbanden zijn strategieën en meerdere voorstellen voor standaardisatie van de monitoring opgesteld [11] [12] [13] [14] [15]. Ook zijn er verschillende overzichten gemaakt van uitgevoerde onderzoeken en de beschikbare monitoringstechnieken [16] [17] [18]. Er zijn ook websites waarop projecten en onderzoeken zoveel mogelijk worden verzameld, zoals onder andere de Plastic Network [19] en Climate Scan [20].

Het merendeel van deze monitoringsprotocollen richt zich op *crowd-sourcing* of *Citizen Science*, waarbij het verzamelen van data met behulp van een groot aantal personen wordt uitgevoerd, veelal door vrijwilligers. Er zijn geen grootschalige projecten of samenwerkingsovereenkomsten gevonden waar de monitoring van plastic in meren en rivieren enkel of met name met behulp van arbeidsextensieve technologische meettechnieken is of wordt uitgevoerd. Voor de monitoring van plastic in oceanen is echter wel al langer een focus op monitoring met technologische meettechnieken, met name het gebruik van satellietgegevens. De European Space Agency (ESA) is de Open Space Innovation Platform (OSIP) campagne gestart om veel verschillende onderzoekstrajecten te financieren [21]. De verzamelde literatuur laat zien dat met name in de laatste jaren veel pilots en onderzoekstrajecten gestart zijn om deze kennis te vertalen naar monitoringsprotocollen voor rivieren en meren.

De gevonden meettechnieken zijn onderverdeeld in verschillende meetprincipes. Om zo compleet mogelijk te zijn worden eerst de conventionele meettechnieken uiteengezet. Ook worden enkele hulpmiddelen beschreven waarmee deze meettechnieken goedkoper en sneller kunnen worden ingezet. Vervolgens wordt ingegaan op de arbeidsextensieve technologische meettechnieken.

2.3 Conventionele meettechnieken

2.3.1 Bemonstering middels crowd-sourcing of Citizen Science

Het meetprincipe van *crowd-sourcing* gaat uit van het verzamelen van data met behulp van een groot aantal personen, veelal vrijwilligers. Vaak worden segmenten van de oever afgebakend waarbinnen het zwerfafval wordt verzameld, en met behulp van een bepaalde standaardisatie, zoals Chemical Retrieval on the Web (CROW), EU Marine Strategy Framework Directive (MSDF) of River-OSPAR [22] geïnclassificeerd en geregistreerd. Dit geeft inzicht in het aantal stuks plastic of zwerfafval, de massa, de grootte, het type en soms ook de herkomst van het plastic of zwerfafval. Er zijn veel onderzoeken met deze methodiek uitgevoerd [23] [24] [25] [26] [27] en bekende projecten zijn de Schone Rivieren en Plastic Pirates. Het verzamelen van data kan worden uitgevoerd met apps en hulpmiddelen voor het sorteren en analyseren van het plastic. Voorbeelden van apps zijn de 'JRC Floating Litter Monitoring Application', 'CrowdWater' en 'Literatti'. Een voorbeeld van een hulpmiddel voor het differentiëren van het plastic naar type is de Plastic Scanner [28].

Crowd-sourcing en *Citizen Science* hebben als toepassingsgebied met name de oever en het wateroppervlak. Dit meetprincipe wordt slechts beperkt ingezet voor de monitoring van de waterkolom. Omdat plastic zich over de tijd op de oevers afzet en ook weer mee wordt gevoerd door de rivier, zijn de resultaten afhankelijk van (recente) hoogwatergolven en voorgaande schoonmaakacties. Ook zijn de resultaten en de nauwkeurigheid van de data door de benodigde grote aantallen vrijwilligers in hoge mate afhankelijk van goede instructies en de beschikbaarheid van deze vrijwilligers.

Crowd-sourcing en *Citizen Science* wordt op grote schaal toegepast in verschillende landen, vooral door NGO's en universiteiten. De meeste monitoringsprogramma's van zwerfafval op en langs de rivieren zijn opgezet met gebruik van dit meetprincipe. Er zijn internationaal gestandaardiseerde methodes ontwikkeld om resultaten internationaal met elkaar te kunnen vergelijken.

Echter, aangezien deze manier van dataverzameling afhankelijk is van een groot aantal (betaalde) vrijwilligers brengt deze daardoor een onzekerheid en veel organisatorisch vermogen (en kosten en/of arbeidsuren) met zich mee. Hierdoor is het niet wenselijk dat enkel dit meetprincipe bij RWS ingezet zal worden voor structurele jaarlijkse monitoring.

2.3.2 Bemonstering met vangsystemen

Het meetprincipe van bemonstering met vangsystemen gaat uit van het verzamelen van zwerfafval in stationaire containers, waarbij plastic door de stroming van de rivier wordt aangevoerd, of in bewegende containers, waarmee het plastic actief wordt afgevangen. Het verzamelde zwerfafval kan na verzameling worden geanalyseerd. Er zijn verschillende methodes voor bemonstering die hieronder worden beschreven.

Passieve Plastic vangsystemen

Deze systemen combineren een arm die het plastic afvangt en begeleidt naar een verzamelvoorziening. Een viertal voorbeelden is weergegeven in Figuur 2-1. Het zwerfafval wordt in de container vastgehouden vanwege de fuikwerking van deze voorziening. De container kan met regelmaat worden geleegd en de inhoud kan worden geanalyseerd en geïnclassificeerd, net zoals bij de *crowd-sourcing* oplossingen. Monitoring kan dus goed inzicht bieden in aantallen, massa en type plastic. Deze techniek is tevens geschikt voor structurele monitoring. Fluxen kunnen echter niet goed ingeschat worden, aangezien niet wordt gemonitord wanneer welk afval in het systeem terecht is gekomen.

Voor deze systemen geldt dat de arm, die het plastic afvangt, tevens een obstakel voor de scheepvaart kan zijn. Om deze reden worden deze systemen vaak uit de vaarroute gehouden, maar hiermee verliezen zij ook deels hun effectiviteit. Een aantal van deze systemen heeft daardoor aanpassingen zoals verkortingen aan de arm doorgevoerd. Zo blokkeren de systemen niet de volledige breedte van de watergang waardoor deze in zekere mate bevaarbaar blijft. Daarnaast is er ook de Great Bubble Barrier [29], een techniek waarbij de plastic-geleidende arm is vervangen door een bellenscherm.



Figuur 2-1: Catchy, bron: allseas.com [a], Shoreliner, bron: tauw.nl [b], Plastic Catcher, bron: noria.earth [c], Interceptor, bron: theoceancleanup.com [d]

De resultaten van een vijftal pilots van verschillende systemen zijn door Deltares vergeleken [30]. Uit dit onderzoek blijkt dat de effectiviteit van deze vangsystemen door de hoeveelheid organische bijvangst relatief laag is ten opzichte van de *Citizen Science* projecten zoals Schone rivieren.

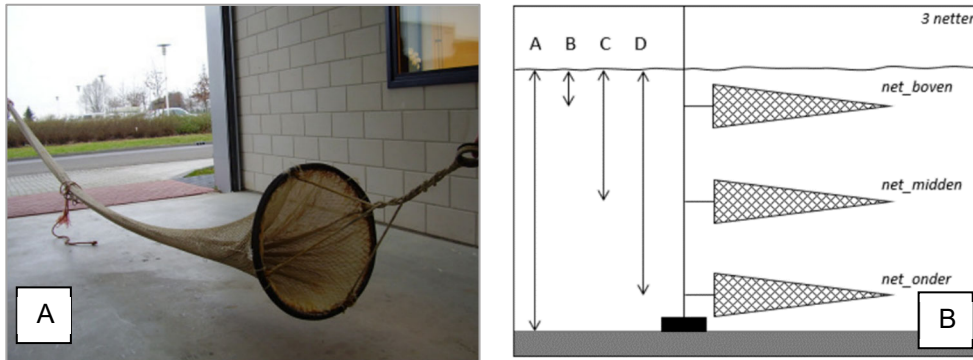
Passieve bemonstering met stationaire netten

Naast passieve bemonstering van stationaire vangsystemen kan ook worden bemonsterd met behulp van stationaire netten. Door RWS is monitoring van de waterkolom met behulp van stationaire netten enkele keren in Oost-Nederland uitgevoerd. Hierbij werden ankerkuilen en larvennetten gebruikt. Een recente rapportage hiervan met de resultaten van deze bemonstering t/m januari 2021 is recent opgeleverd [31]. Het uitvoeren van dergelijke monitoring is zeer arbeidsintensief en kostbaar. Daarnaast is het vanwege de hinder voor scheepvaart onwenselijk om in de vaargeul te bemonsteren.

Larvennetten

Een larvennet is een net in de vorm van een ronde trechter die op verschillende hoogtes aan een paal kan worden opgehangen. Dit net is door RWS in Oost-Nederland bij een pilot ingezet om de verdeling van de hoeveelheid zwerfafval over de hoogte van de waterkolom te monitoren. Op deze manier kon voor

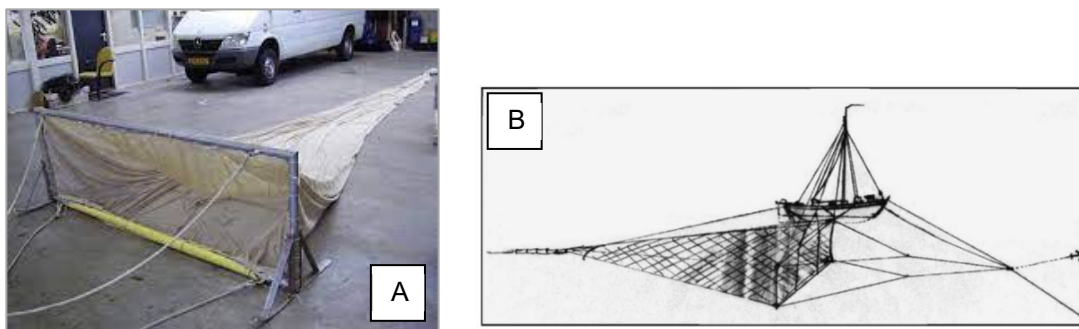
verschillende locaties de aanwezigheid van een dieptegradiënt van meso- en macroplastic worden vastgesteld. Voor de bepaling van deze gradiënt zijn meerdere netten nodig die op verschillende diepten hangen (zie figuur 2-2). Deze methodiek blijft aantrekkelijk voor toepassing als onder andere validatie van andere meettechnieken vanwege de relatief hoge betrouwbaarheid van de metingen. Larvennetten blijken goed geschikt voor het monitoren van hoeveelheden meso- en macroplastic over de waterkolom.



Figuur 2-2: Een larvennet [a] en plaatsing van een larvennet op verschillende dieptes [b]. Bron: helpdeskwater.nl

Ankerkuil

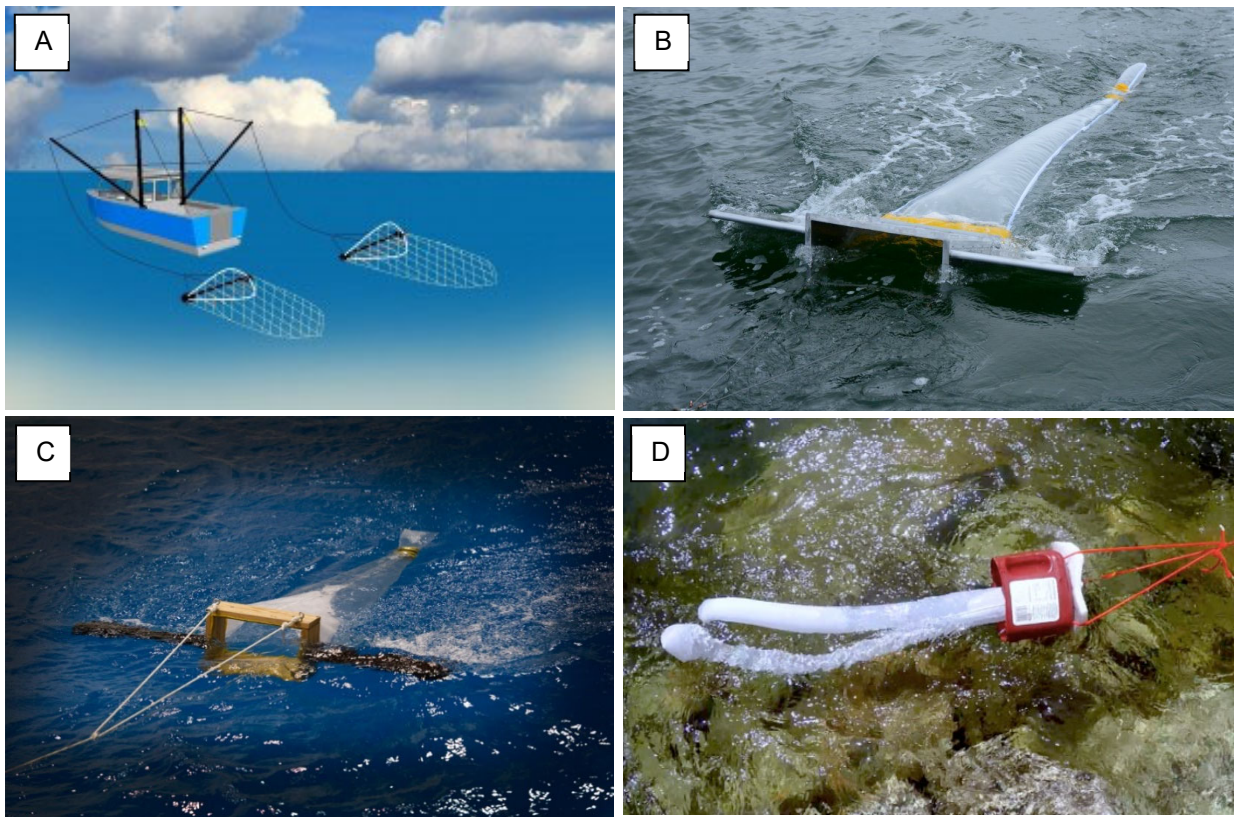
Ook de ankerkuil is bij het hiervoor genoemde project ingezet. Bij deze methode worden twee, 8 m brede stalen balken in het water gelaten. Tussen deze balken wordt een net gespannen. De onderste balk wordt tot op de bodem neergelaten en de bovenste balk wordt net boven de waterlijn gepositioneerd (zie figuur 2-3). Het geheel, de balken en het schip, zijn verbonden met het scheepsanker waarmee het schip voor anker ligt. Het net tussen de balken wordt door de stroming van het water geopend. Het net heeft verschillende maaswijdtes, waarbij de maaswijdtes kleiner worden richting het uiteinde (de punt) van het net. Het uiteinde van het net heeft een maaswijdte van 20 mm. De ankerkuil bleek goed geschikt voor het monitoren van macroplastics.



Figuur 2-3: Een foto van een ankerkuil [a] en een schematische weergave van een ankerkuil gespannen onder een boot [b]

Actieve bemonstering met sleepnetten

Met actieve bemonstering wordt bemonsterd met behulp van sleepnetten die achter een boot worden gespannen. Dit meetprincipe is zinvol om een gradiënt van het plastic over de lengte van een rivier of over de breedte van een rivier te monitoren. Er zijn meerdere typen van deze sleepnetten. Zo is er de Boomkor, die over de bodem van de rivier of het water worden gesleept. Daarnaast zijn er veel verschillende sleepnetten waarmee het wateroppervlak kan worden gemonitord, zoals de Manta Trawl, de Ladi Trawl en de budget uitvoering genaamd de Babylegs. Met name de laatste twee zijn vanwege de lage kosten zeer geschikt gebleken voor toepassing in combinatie met *Citizen Science*. Hoewel de oplossing relatief *low-tech* en goedkoop is en de scheepvaart niet gehinderd hoeft te worden, is de bemonsteringsmethode vrij arbeidsintensief door de benodigde besturing van het schip en verwerking van de netten en daarom zijn de kosten ingeschat op gemiddeld.



Figuur 2-4: Van duur naar goedkoop: De boomkor, bron: goedevisser.nl [a], de Mantatrawl, bron: <https://www.nhbs.com/manta-trawl-net> [b], de laditrawl, civiclaboratory.nl [c] en de babylegs, civiclaboratory.nl [d]

2.4 Technologische meettechnieken

2.4.1 Monitoring met satellieten – actief en passief

Satellietbeelden kunnen goed worden gebruikt voor het detecteren van zwerfafval. Deze techniek wordt al meerdere jaren onderzocht en ingezet in het marine gebied [32] [33] [34] en er zijn veel onderzoeken op dit onderwerp door o.a. de ESA gestart [21].

Monitoring met passieve sensoren

Bij het monitoren met passieve sensoren wordt de energie van de aarde (straling) en de zon (reflectie) gemonitord. Bij deze monitoring worden verschillende bandbreedtes van het elektromagnetisch spectrum gemonitord, en verschillende combinaties zijn dan representatief voor verschillende typen zwerfafval en plastic [35]. Dit in tegenstelling tot het monitoren met actieve sensoren, waarbij de satelliet een puls uitzendt waarvan de terugkaatsing (of verspreiding) van de uitgezonden puls wordt gemonitord.

Omdat de ruimtelijke resolutie van satellietbeelden relatief laag is, kunnen alleen grotere voorwerpen of ophopingen van zwerfafval worden herkend. Met elke nieuwe satelliet gaat deze resolutie wel omhoog. Commerciële satellieten zoals de Worldview-3 kunnen inmiddels beelden leveren met een resolutie hoger dan 35x35 cm. Naast de relatief lage ruimtelijke resolutie geldt dat ook de frequentie relatief laag is. Bij Sentinel-2 geldt dat de frequentie één beeld per 5-10 dagen is, van Landsat is de frequentie één beeld per 16 dagen. Van Superview, een doorgaans commerciële satelliet, is eens per zes weken één beeld beschikbaar via de satellietdataportaal van de Netherlands Space Office (NSO).

Vanwege deze relatief lage frequentie en ruimtelijke resolutie is de techniek met name goed inzetbaar voor het monitoren van bewegende ophopingen van plastic, zoals bijvoorbeeld de Great Garbage Patch. Daarnaast zijn ook plekken waar zwerfafval stagneert op beelden te herkennen. Hierbij kan gedacht worden aan plekken waar de rivier zwerfafval op de oever 'dumpst', of ophopingen van zwerfafval voor sluizen of in estuaria en havens. Zo wordt er onderzoek uitgevoerd naar de ophoping van zwerfafval in *windrows* [36]. Naast monitoring van ophopingen wordt ook onderzoek uitgevoerd naar het monitoren van *proxies* om de hoeveelheid plastic in te schatten. Proxies zijn onderdelen die een relatie hebben met de hoeveelheid zwerfvuil in een rivier, en die in tegenstelling tot losse onderdelen zwerfafval door hun grootte wel met satellieten waar te nemen zijn. Door het monitoren van proxies kan een inschatting gemaakt worden van de werkelijke hoeveelheid zwerfafval of plastic in de rivier. Voorbeelden van proxies zijn waterhyacinten [37] [38], waar veel plastic in blijft hangen, en de aanwezigheid van bepaalde soorten micro-organismen en de daaraan gerelateerde andere kleur van het water, die met name aanwezig zijn als er (micro)plastic in het water aanwezig is [32].

Het voordeel van het gebruik van satellieten is dat de beschikbare data grote gebieden beslaat en er met regelmaat nieuwe beelden beschikbaar komen. Voor de monitoring van binnenlandse wateren en rivieren geldt dat dit meetprincipe momenteel nog in de fase 'proof-of-concept' is, de techniek krijgt zodoende een *Technology Readiness Level 4 – experimentele pilotfase*. Het meetprincipe moet nog verder doelgericht ontwikkeld worden voor toepassing bij rivieren en binnenlandse wateren voordat het echt kan worden ingezet. Maar zoals aangegeven is deze techniek relatief goedkoop, zijn veel sensoren al in de lucht aanwezig, en vindt er daarom veel onderzoek plaats bij onder andere de Sapienza University of Rome (Bonifazi), de Cyprus University of Technology, de Plymouth University, Deltares en vele overige instellingen [21].

De dataverwerking is veelal gebaseerd op geautomatiseerde beeldherkenning. Voor automatische beeldherkenning is het nodig om een algoritme te trainen op basis van beelden en observaties. Voor elk type camera en voor elke locatie vraagt dit om een opnieuw getraind algoritme, en daarmee om een initiële investering.

Het grote voordeel is dat satellieten met regelmaat nieuwe beelden produceren met een vergelijkbare hoogte en hoek. Daarnaast is een groot voordeel dat deze beelden eenvoudig gecentraliseerd opgeslagen, geanalyseerd en verwerkt kunnen worden. Daarom is deze techniek goed om te zetten naar structurele monitoring, mocht deze techniek goed inzetbaar blijken voor de monitoring van zwerfafval langs en in de rivieren en grote wateren. De kosten voor de verwerking van de data tot bruikbare informatie is laag tot gemiddeld, afhankelijk van of er gebruik gemaakt wordt van commercieel verkochte (en kwalitatief betere) kaarten.

Monitoring met actieve sensoren

Naast het monitoren van oppervlakten met passieve sensoren is het ook mogelijk om met behulp van actieve sensoren onder satellieten te monitoren. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van radar, het uitzenden van een puls door de satelliet waarbij de terugkaatsing van de puls of de verspreiding van de puls op het oppervlak (scatter) gemeten wordt. Of huidige satellieten uitgerust zijn met de goede meetinstrumenten om plastic met behulp van radar op het wateroppervlak te monitoren wordt momenteel onderzocht door de ESA en door Deltares (Door o.a. Anton de Fockert en Frans Buschman) [21].

2.4.2 Monitoring met Drones (Unmanned Airborne Vehicles) en vliegtuigen

Monitoring met passieve sensoren

Een stapje dichterbij het wateroppervlak ten opzichte van de monitoring met satellieten valt de monitoring met drones en vliegtuigen. De techniek bij monitoring met drones en met vliegtuigen is in principe vergelijkbaar als de techniek van monitoring met satellieten. Het grote voordeel van de monitoring met drones en vliegtuigen ten opzichte van monitoring met satellieten is de hogere ruimtelijke resolutie van de beelden. Daarnaast kan door het gebruik van drones gericht op een bepaalde locatie opnames gemaakt worden en ook van moeilijk bereikbare locaties. Een belangrijk nadeel van het verzamelen met drones is dat er langs de grote rivieren veel no-fly zones zijn, locaties waar niet met een drone gevlogen mag worden. Zeker in het broedseizoen is deze techniek op veel locaties niet toegestaan.

Bij passieve monitoring zijn drones uitgerust met een camera (bij voorkeur verschillende banden binnen het elektromagnetisch spectrum) en worden beelden van rivieren en oevers verzameld. Deze beelden kunnen met behulp van (geautomatiseerde) beeldherkenning worden verwerkt, zodat zwerfafval wordt herkend en aantallen en mogelijk ook typen zwerfafval kan worden bepaald.

Door middel van wetenschappelijk onderzoek is aangetoond dat het mogelijk is om op deze manier plastic te herkennen op de oever en op het wateroppervlak [39], hoewel onderscheiding tussen typen zwerfafval nog aanvullend onderzoek vergt. Er wordt echter onderzoek uitgevoerd naar deze techniek [21], maar ook voor deze techniek geldt dat doelgericht onderzoek in de Nederlandse binnenlandse wateren nog ontbreekt. De *Technology Readiness Level* is 6, prototypes zijn aanwezig.

Monitoring met actieve sensoren

Drones met actieve sensoren sturen zelf signalen uit. Het gaat hierbij om technieken zoals lidar (licht) of radar (radiogolven). De weerkaatsing van de signalen wordt geanalyseerd en omgezet in 'ruwheid van het oppervlak'. Anders dan bij passieve monitoring is bij deze beelden met name de mate van 'verschil' in reflectie van twee naast elkaar gelegen objecten te zien. De techniek is daarom waarschijnlijk met name waardevol voor met name vlakke wateroppervlakken. De techniek kan ook worden ingezet voor wateroppervlakken waar golven of rimpels van het wateroppervlak van de objecten kan worden onderscheiden. Hier wordt op dit moment onderzoek naar gedaan [21]. Deze beelden kunnen vervolgens met behulp van patroonherkenning worden omgezet in aantallen en omvang van het zwerfafval.

Dit meetprincipe bevindt zich in een vroege fase van ontwikkeling. In een gecontroleerde omgeving is inmiddels bij Deltares aangetoond dat het concept waarbij dicht bij het wateroppervlak wordt gemonitord werkt, maar het is de vraag in hoeverre monitoring van een grotere afstand en in een natuurlijke omgeving niet door te veel ruis wordt verstoord. Het is dus nog de vraag of zwerfafval te onderscheiden is als de meetapparatuur onder een drone of een vliegtuig wordt geplaatst. De techniek krijgt om deze reden *Technology Readiness Level 2*, de conceptuele fase.

Voor zowel actieve als passieve monitoring geldt dat het verzamelen van data een gecertificeerde (drone)piloot en natuurlijk een drone of vliegtuig voorzien van de juiste apparatuur vereist. Omdat het verkrijgen van beelden relatief weinig inspanning vergt is het mogelijk deze techniek in te zetten voor structurele monitoring, door verspreid over langere tijd inwinvluchten op dezelfde locatie uit te voeren. De dataverwerking is gebaseerd op beeldherkenning van videobeelden. Voor deze toepassing is het nodig om een algoritme te trainen op basis van beelden in verschillende omstandigheden en beeldmateriaal genomen vanaf verschillende hoogten en hoeken. Dit vergt een initiële investering. Maar als de techniek eenmaal ontwikkeld is dan worden de totale kosten ingeschat op *gemiddeld*.

2.4.3 Monitoring met Stationaire (wild)camera's

Voor het monitoren van plastic kunnen ook stationaire (wild)camera's worden ingezet, wederom een stap dicht bij het wateroppervlak dan monitoring met behulp van drones en vliegtuigen. De techniek is in principe vergelijkbaar als de techniek van monitoring met drones (passief) en satellieten (passief). Het kan gaan om reeds aanwezige camera's die gericht zijn op de rivier of watergang, zowel stationaire camera's van bruggen als ook camera's op schepen die ook gericht zijn op het wateroppervlak (zij het onder een andere hoek). Het kan ook gaan om nieuw te plaatsen camera's die het wateroppervlak filmen. Veel hangt af van welke combinatie van sensoren (welke bandbreedtes door de camera worden waargenomen) het beste het gewenste zwerfafval kunnen monitoren en of deze camera's al aanwezig zijn op objecten van RWS en al het wateroppervlak monitoren.

Met deze camera's kunnen in combinatie met beeldherkenning geautomatiseerde tellingen van voorbijrijvend plastic worden uitgevoerd. Omdat deze camera's zo ingesteld kunnen worden dat deze 24 uur per dag en 7 dagen in de week het wateroppervlak monitoren kan met deze techniek een continue en structurele meetopstelling worden gerealiseerd voor de monitoring van het wateroppervlak of de oever (als vanaf een boot wordt gemeten).

Deze technologie wordt bij veel vergelijkbare toepassingen ingezet. Zo wordt met behulp van camera's op auto's de toestand van belijning of bewegwijzering gemonitord. Ook wordt de techniek door onder andere de gemeente Amsterdam, Utrecht en Rotterdam ontwikkeld om zwerfafval op straat te monitoren [40]. De techniek om drijvend zwerfafval en zwerfafval op oevers te monitoren vergt met name het trainen van nieuwe algoritmes voor beeldherkenning. Dit is al enkele keren onderzocht [41] en wordt op dit moment ook binnen enkele internationale projecten onderzocht [21] [42]. Het *Technology Readiness Level* wordt daarom ingeschat op 7, een prototype kan getest worden onder operationele omstandigheden. Voor het opzetten van het algoritme en de eventuele plaatsing van het monitoringsnetwerk voor de grote rivieren (indien deze niet al aanwezig blijkt) is voor Nederlandse binnenwateren een initiële investering vereist. Daarnaast dient voor de real-time verzameling van de data een ICT-architectuur opgezet te worden.

2.4.4 Monitoring met Stationaire onderwatercamera's

Hoe zwerfafval wordt verplaatst door de rivier hangt af van het drijfvermogen, de verhouding tussen oppervlak en het volume van het object, en de omstandigheden van de rivier en het water.

Om deze redenen kan zwerfafval zich op drie verschillende manieren door een rivier verplaatsen: als permanent drijvend object, als object dat afwisselend drijft en onder het oppervlak beweegt, of als permanent verzonken object dat dieper onder het oppervlak zweeft of over de bodem rolt. Volgens enkele onderzoeken kan het gehalte verzonken zwerfafval (zwerfafval wat zich onder het wateroppervlak stroomafwaarts beweegt) meer dan 50% zijn [43].

Door de verschillende stromingspatronen in een rivier varieert daarnaast het type zwerfafval ook over de horizontale doorsnede van de rivier. Om deze reden is het van belang ook het transport van zwerfafval in de waterkolom op verschillende locaties in een rivier met verschillende hydraulische omstandigheden te monitoren. Met behulp van deze gegevens kunnen hydraulische modellen worden opgezet om te bepalen hoe verschillende typen zwerfafval zich door de rivier voortbewegen [44].

Vergelijkbaar met stationaire (wild)camera's die het wateroppervlak en, indien bevestigd op schepen, de oever kunnen monitoren, kunnen ook stationaire onderwatercamera's geplaatst worden op bepaalde locaties om plastic onder het wateroppervlak te monitoren. Deze camera's kunnen bijvoorbeeld aan brugpijlers worden geplaatst, of bij sluizen. Zodoende kan het transport van plastic door de waterkolom op een vergelijkbare manier als boven het wateroppervlak gemonitord worden. Wel hoort hierbij de kanttekening dat het zicht onder het wateroppervlak vaak een stuk minder is dan boven het wateroppervlak (zeker bij hogere afvoeren of na neerslag), dus dat deze toepassing minder kansrijk ingeschat wordt voor structurele monitoring dan voor monitoring boven het wateroppervlak.

Het is wellicht mogelijk de techniek te combineren met stationaire camera's welke het wateroppervlak monitoren om de hoeveelheid drijfvuil wat op de locatie langs komt en de hoeveelheid zwerfafval in de waterkolom aan elkaar te kunnen relateren en zo kentallen op te kunnen bouwen. Zodoende is op een vergelijkbare locatie (zoals bijvoorbeeld elders boven- of benedenstrooms) mogelijk alleen monitoring van het wateroppervlak voldoende voor een goede inschatting van het totaal passerende zwerfafval, wat erg kan schelen in de kosten.

De techniek van onderwatercamera's is breed beschikbaar. De techniek van het analyseren van de opnames en automatisch herkennen van voorwerpen, ook onder het wateroppervlak, wordt op meerdere plekken ingezet, maar ook hier geldt dat een algoritme voor beeldherkenning voor de specifieke toepassing moet worden ontwikkeld en moet worden getraind. Er moet dus voldoende goed beeldmateriaal beschikbaar zijn. Een manier om deze techniek te trainen is de inzet van *Citizen Science*, zoals gedaan is bij de visdeurbel in de gemeente Utrecht [45]. De *Technology Readiness Level* is ingeschat op 4, de technologie van alle sleutelcomponenten werkt onder laboratoriumcondities. De kosten worden ingeschat op *gemiddeld* tot *hoog*, afhankelijk van het aantal nieuw te plaatsen onderwatercamera's en het onderhoud hiervan.

2.4.5 Monitoring met sonar

Naast monitoring met onderwatercamera's wordt de waterkolom voor verschillende toepassingen ook gemonitord met sonar. Hierbij worden geluidsgolven uitgezonden, en wordt de (timing of verspreiding van) weerkaatsing van deze geluidsgolven op objecten in de waterkolom of op de bodem opgevangen. Deze techniek wordt veelvuldig gebruikt in onder andere de visserij (zowel op amateur als op professioneel niveau) voor het lokaliseren en identificeren van bepaalde typen of scholen van vissen. Sommige professionele apparatuur bevat een module om op basis van de beelden automatisch vissen te kunnen herkennen. Zo is een belcurve op het scherm representatief voor een vis welke zich van beneden naar boven en weer naar beneden beweegt. Daarnaast wordt deze techniek veelvuldig gebruikt voor het in kaart brengen van de bodem van de rivier of objecten op de bodem van de rivier (bathymetrie), of voor het meten van de stroomsnelheid van het water.

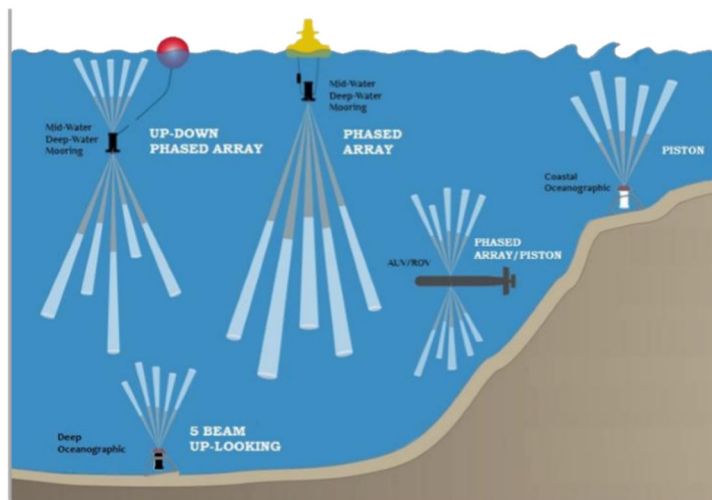
Er zijn verschillende soorten sonar. Bij een *single beam* wordt een enkele puls uitgezonden onder een hoek van 10 tot 30 graden. Bij *multibeam* wordt een breder vlak door meerdere beams of door swath (heen en weer bewegen van de sensor) gemonitord. Bij *sidebeam* wordt de sonar zijwaarts op de vaarrichting gericht. Bij *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) worden verschillende pulsen in verschillende richtingen uitgezonden (een kegel onder het vaartuig), waardoor met behulp van eventuele frequentieverandering tussen de pulsen door de beweging van deeltjes (objecten) in het water de stroomsnelheid van het water kan worden bepaald (dopplereffect).

Hoewel de techniek dus veelvuldig gebruikt wordt en voor verschillende toepassingen professioneel wordt ingezet, is er slechts zeer beperkt onderzoek uitgevoerd naar de monitoring van zwerfafval met behulp van sonar. Er zijn enkele onderzoeken uitgevoerd om zwerfafval in de waterkolom als proof-of-concept te monitoren met de Deeper Chirp + sonar [46], de Humminbird Helix sonar [47], de ARIS Explorer 3000 FLS [48] [49] en ADCP [50]. Door Noria en Deltares is er een afweging gemaakt tussen de verschillende sonarapparatuur [47].

Volgens de onderzoekers kan verzonken zwerfafval goed geteld en onderscheiden worden van overige verzonken levende en niet levende objecten. De *proof-of-concept* is voor de verschillende onderzochte meetapparatuur dus succesvol, maar er wordt in het onderzoek wel aanbevolen om de set van testobjecten uit te breiden met onder andere meer groottes en types zwerfafval om de dataset van herkenbare objecten uit te breiden en te testen buiten gecontroleerde omgevingen. Ook wordt aangegeven dat andere apparatuur zoals een *side-scan sonar* of *multibeam sonar* tot andere resultaten kunnen leiden. De apparatuur is vermoedelijk complementair aan elkaar, maar dit dient nog te worden onderzocht. RWS heeft de beschikking tot meerdere typen sonarapparatuur [47]:

- Nortek Aquadopp profiler 1 MHz, 2 MHz en 600 kHz;
- Nortek DVL 1000;
- TRDI Workhorse Monitor ADCP – 600 , 1200 kHz;
- TDRI Workhorse H-ADCP 300, 600 kHz;
- TRDI H-ADCP Channelmaster 600 kHz;
- TDRI Riverray;
- Kongsberg EM204 Multi Beam systeem;
- Kongsberg EA440 singlebeam;
- Klein 3900 side scan sonar;
- Klein 5000 side scan sonar.

Onderstaande figuur geeft de verschillende posities weer van de ADCP, elk met een bepaald focusgebied in de waterkolom.



Figuur 2-5: Verschillende positionering van de ADCP en vergelijkbare apparatuur

Sonar kan op een vaste plek in de waterkolom en in de rivier geïnstalleerd worden. Daarom is de verwachting dat deze methode zeer geschikt is voor een continue en structurele monitoring van zwerfafval in de waterkolom. De techniek is echter kostbaar. Om kosten te sparen zou de relatie tussen zwerfafval op het wateroppervlak en onder het wateroppervlak onderzocht kunnen worden. Mogelijk geldt namelijk dat de hoeveelheid drijfvuil in de waterkolom gerelateerd kan worden aan de hoeveelheid zwerfafval op het wateroppervlak. Als deze relatie bekend is dan is het mogelijk om minder frequent of op minder locaties onder het wateroppervlak te hoeven monitoren.

De *Technology Readiness Level* wordt ingeschat op 4, de technologie van de componenten werkt onder laboratoriumcondities. Er is relatief weinig onderzoek buiten een gecontroleerde omgeving. De techniek heeft zich wel al veelvuldig bewezen voor bijvoorbeeld monitoring van vissen of objecten op de waterbodem. De verwachting is dan dus ook dat deze techniek goed toe te passen is voor het monitoren van zwerfafval in de waterkolom. De kosten voor structurele monitoring worden ingeschat op *gemiddeld tot hoog*.

2.4.6 Monitoring met Onderwaterdrones (ROV's)

Onderwaterdrones (of Remotely Operated Vehicles (ROV's)) hebben de mogelijkheid om uitgerust te worden met vergelijkbare camera's die beschreven zijn in 2.4.4 (Stationaire onderwatercamera's - passieve monitoring), evenals met (lichte) sonarapparatuur (actieve monitoring) die beschreven zijn in 2.4.5. Het grote voordeel is dat deze drones goed ingezet kunnen worden voor gerichte monitoring. Drones kunnen gericht op een bepaald moment, op een bepaalde locatie en op een bepaalde diepte monitoren. Hiermee kan bijvoorbeeld gericht een verzameling van zwerfafval op een bepaalde locatie worden gemonitord. Pedroso de Lima beschrijft de ervaringen die met een breed scala aan onderzoeken met onderwaterdrones zijn opgedaan [51]. Er is slechts beperkt onderzoek naar detectie van verzonken zwerfafval met behulp van een ROV. Bij een voorbeeld van deze onderzoeken is gebruik gemaakt van een ARIS-Sonar en het onderzoek is uitgevoerd in een relatief gecontroleerde omgeving [48].

De *Technology Readiness Level* wordt ingeschat op 6 voor passieve monitoring (camera's) en op 4 voor actieve monitoring (sonar), gelijk aan de technieken onder 2.4.4 en 2.4.5. De techniek wordt met name waardevol geacht voor gerichte monitoring op een bepaalde locatie (zoals een estuarium), of gerichte monitoring op een specifiek moment (bijvoorbeeld een hoogwatergolf) om zo de afvoer van zwerfafval tijdens dit relatief zeldzame moment te kunnen monitoren.

Ook kan de techniek goed dienen voor de validatie van andere apparatuur, zoals sonar. Voor de ijking van de apparatuur kan een onderwaterdrone nabij sonarapparatuur worden ingezet om datgene wat de sonar ziet te vergelijken met wat de camera van de onderwaterdrone ziet. De kosten van onderwaterdrones met passieve technieken (camera's) wordt ingeschat op *gemiddeld* en *hoog* wanneer deze met actieve technieken (sonar) uitgerust wordt.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figuur 2-6: Illustration of multiple underwater drones equipped with cameras, lights, or water quality sensors. Neptune [a]; OpenROV 2.7 [b]; BlueROV2 [c]; PowerRay [d]. Bron: [51]

2.4.7 Monitoring met Sea-Air integrated drones

Sea-Air integrated drones zijn pas recent op de markt gekomen. Dit is een combinatie van een vliegende drone met een kleine onderwaterdrone aan de onderkant bevestigd [52]. Met deze drone kan naar een locatie worden gevlogen waar de onderwaterdrone wordt losgekoppeld en vervolgens kan deze onder water opnames maken. Deze onderwaterdrone kan in theorie worden uitgerust met vergelijkbare (lichte) camera's die beschreven staan in 2.4.4, evenals met (lichte) sonarapparatuur wat beschreven wordt in 2.4.5.

Naast de onderwaterdrone is ook de vliegende drone uitgerust met een camera waarmee potentieel verschillende bandbreedtes van het elektromagnetisch spectrum gemonitord kunnen worden. De techniek is dus een combinatie van vliegende en onderwaterdrones en wordt met name aanbevolen voor de inspectie van windturbines of grote schepen. In theorie kan deze dus ook ingezet worden voor het monitoren van zwerfafval langs de oevers, op het wateroppervlak en in de waterkolom.



Figuur 2-7: Sea-air integrated drone. Bron: designboom.com

Omdat het relatief weinig inspanning kost om een dergelijke opname te maken (er is een drone en waarschijnlijk een tweetal dronepiloten voor nodig) is het in theorie mogelijk om een structurele monitoringscampagne hiermee op te zetten en op bepaalde locaties op bepaalde momenten gericht monitoring uit te voeren. De *Technology Readiness Level* wordt echter ingeschat op 2-4 (geformuleerde applicatie tot proof-of-concept) omdat het niet duidelijk is welk gewicht de huidige vliegende drones kunnen dragen en of de apparatuur voor het monitoren van de waterkolom niet te zwaar is. Daarbij is er ook nog geen onderzoek naar monitoring van zwerfafval met deze drone-combinatie uitgevoerd. De kosten voor deze methode worden ingeschat op *hoog*, vanwege de specialistische apparatuur en de inzet van een gecertificeerde en gespecialiseerde piloot (zowel voor de vliegende drone als de onderwaterdrone). Maar het is dus wel de enige monitoringstechniek hier beschreven die in potentie alle drie de compartimenten van de rivier zou kunnen monitoren.

3 Haalbaarheidstoets

3.1 Resultaten haalbaarheidstoets.

De technieken die in hoofdstuk 2 beschreven zijn, worden in dit hoofdstuk beoordeeld op:

- Het meetprincipe;
- De toepasbaarheid per compartiment (oever, wateroppervlak, waterkolom);
- De mogelijkheid tot continue monitoring of monitoring van een momentopname;
- De Technology Readiness Level;
- De praktische inzetbaarheid voor structurele monitoring, eventueel in combinatie met andere (bestaande) technieken;
- De kosten.

De resultaten van deze beoordeling zijn in tabel 3-1 samengevat.

3.2 Synthese

Zoals in hoofdstuk 2 naar voren komt zijn er wereldwijd veel ontwikkelingen voor het monitoren van zwerfafval langs en in de rivieren. Voor de monitoring van elk compartiment zijn meerdere voorbeelden van technieken aan te wijzen die hier een rol in kunnen vervullen. De meeste van deze technieken hebben zich reeds voor een andere, maar vergelijkbare toepassing bewezen. Voor enkele technieken is er met pilots getoetst of deze ook ingezet kunnen worden voor het monitoren van zwerfafval langs en in stromend water. Echter, voor de specifieke toepassing van het monitoren van zwerfafval zijn, anders dan de vangsystemen, geen technologische meettechnieken op de markt gevonden. Er zijn ook geen voorbeelden gevonden van rivieren waar op een structurele manier met behulp van technologische meettechnieken de hoeveelheden en typen zwerfafval wordt gemonitord.

Hoewel er dus voor meerdere technologische meettechnieken pilots zijn uitgevoerd, moeten de meeste technologische meettechnieken zich nog bewijzen voor structurele monitoring van zwerfafval langs en in de rivier. Deze ontwikkeling vraagt een zekere investering. Hierbij geldt dat er een prioritering moet worden aangebracht in de vraagstukken die nog beantwoord moeten worden. Met deze prioritering kan bepaald worden welke meettechnieken het beste verder ontwikkeld kunnen worden. De ontwikkeling van deze technologische meettechnieken zal de eerste jaren nog moeten worden ondersteund met monitoring door middel van conventionele meettechnieken, welke wél breed beschikbaar zijn op de markt en waarvan de kwaliteit van de metingen bekend is. Tegelijk met de ontwikkeling van deze meettechnieken kunnen de gewonnen gegevens gebruikt worden voor het vullen van een kentallen-database en voor het opstellen van zwerfafval-balansen en hydraulische modellen om de beweging van verschillende typen zwerfafval in een rivier te kunnen berekenen en simuleren [43] [44].

Er wordt daarom aangeraden om diverse grootschaligere onderzoeken uit te voeren om de ontwikkeling van deze technologische meettechnieken te stimuleren en om deze technieken klaar te maken voor structurele monitoring door RWS. Een viertal meettechnieken lijkt voor de short- tot midterm het meest kansrijk. Deze meettechnieken zijn complementair aan elkaar. Dit betreft in volgorde van kansrijkheid in short- tot midterm:

- De monitoring van zwerfafval op het wateroppervlak vanaf bestaande assets van RWS met behulp van stationaire camera's;
- De monitoring van zwerfafval op het wateroppervlak en de oevers met behulp van camera's onder drone's, camera's vanaf schepen en camera's op voertuigen;
- De monitoring van zwerfafval in de waterkolom met behulp van verschillende sonarapparatuur;
- De monitoring van hotspots met behulp van satellietgegevens.

Voor deze meettechnieken is in hoofdstuk vier een voorstel gemaakt van de opzet van het onderzoek.

Tabel 3-1: Haalbaarheidstoets meettechnieken

Meettechniek																										
Sampling					Spectroscopie		Pulsdetectie	Wat kun je hier mee meten?				Temporele resolutie		Toepassings-gebied				Technology Readiness Level				Praktische inzetbaarheid voor structurele monitoring		Kosten en/of arbeidsuren		
Hand- en telwerk	Netten	Vangsystemen	Passief	Actief			Bron (herkomst)	Massa	type	Aantal	Continu	Momentopname	Oever	Wateroppervlakt	Waterkolom	Sediment	Idea	Proof of concept	Scientificly proven	On the market/applied	Ja	Nee	Hoog	Middel	Laag	
Crowd-sourcing	X						X	X	X	X		X	X	X						X		X	X			
Ondersteund door apps	X						X	X	X	X		X	X	X						X		X	X			
Ondersteund met hulpmiddelen	X						X	X	X	X		X	X	X					X			X	X			
Bemonstering Plastic Catch		X						X	X	X		X		X	?					X	X			X		
Bemonstering stationaire netten		X						X	X	X		X		?	X				X			X	X			
Bemonstering sleepnetten		X						X	X	X		X		X	?					X		X		X		
Satellieten - Passief			X							X		X	X					X			X			X	X	
Satellieten - Actief					X					X		X	X					X			X			X	X	
Drones (UAV's) - Passief			X						?	X		X	X		?				X			X		X	X	
Drones (UAV's) - Actief				X	X					X		X	X				X					X		X	X	
Stationaire (wild)camera's			X						?	X	X		X	X					X		X			X	X	
Stationaire onderwatercamera's			X						?	X	X			X				X			X			X		
Sonar					X				?	X	X		X	X	?			X			X			X	X	
Onderwaterdrones (ROV's) - Passief			X						?	X		X		?	X	?			X			X	X	X	X	
Onderwaterdrones (ROV's) - Actief					X				?	X		X		?	X	?		X				X	X	X	X	
Sea-Air Integrated Drones - Passief			X						?	X		X	X					X				X	X			
Sea-Air Integrated Drones - Actief					X					X		X	X				X					X	X			

4 Pilots

In dit hoofdstuk wordt een viertal pilots voorgesteld waarmee de monitoring van zwerfafval langs en in rivieren verder kan worden gebracht. De meettechnieken waarvoor pilots worden voorgesteld zijn complementair aan elkaar. Er wordt aangeraden om de pilots zo mogelijk gezamenlijk of tegelijkertijd uit te voeren, aangezien verschillende datasets elkaar kunnen aanvullen of valideren. Voor de meettechnieken geldt dat de verwachting is dat deze allen uitgewerkt kunnen worden tot een robuuste meetmethodiek die in de toekomst kan worden geïmplementeerd in structurele monitoring door RWS.

4.1 Monitoring van zwerfafval op het wateroppervlak vanaf vaste objecten (zoals bruggen, sluizen, etc.) met behulp van camera's

4.1.1 Inleiding

Het monitoren van zwerfafval met behulp van camera's is een meettechniek die de laatste jaren op meerdere plekken wordt onderzocht. Deze meettechniek gaat vaak gepaard met beeldherkenning om zo een arbeidsextensieve structurele monitoring vorm te geven. Zo is een proof-of-concept beschreven door Colin van Lieshout et al. [41] van de Ocean Clean Up, en lopen er op dit moment ook onderzoekstrajecten bij de TU Delft en nadere onderzoeken bij de Ocean Clean Up [42]. Ook elders wordt de techniek ontwikkeld om met behulp van camera's zwerfafval te detecteren. Onder andere de gemeente Amsterdam, Utrecht en Rotterdam zetten deze techniek in om zwerfafval op straat te monitoren [40].

Er wordt aan RWS geadviseerd om te onderzoeken of deze techniek ook toegepast kan worden vanaf de objecten die RWS beheert. Daarnaast wordt aan RWS geadviseerd om te onderzoeken of de camera's die op deze objecten aanwezig zijn toereikend zijn voor de monitoring, of dat andere of aanvullende camera's noodzakelijk zijn.

4.1.2 Onderzoeksvragen

Hoofdvraag

Deze pilot richt zich op de monitoring van zwerfafval op het wateroppervlak met behulp van camera's. De hoofdvraag is als volgt:

“Is het mogelijk om de monitoring van drijvend zwerfafval met behulp van (al aanwezige) camera's vanaf vaste objecten die in beheer zijn bij Rijkswaterstaat uit te voeren?”

Deelvragen

Vooronderzoek:

- Welke (combinatie van) golflengten van het elektromagnetisch spectrum zijn het beste geschikt voor monitoring van drijvend plastic en van drijvend zwerfafval? Is de opgedane kennis vanuit de meteorologie [35] hierbij toepasbaar?
- Welke hoogte en ruimtelijke resolutie en welke minimale frequentie is nodig voor het monitoren van drijvend zwerfafval op meso- en macroniveau? Is het noodzakelijk om 24 uur per dag te monitoren of is een beperktere timeframe voldoende?
- Welke bruggen van RWS komen hiervoor in aanmerking? Zijn daar de camera's met het benodigde elektromagnetisch spectrum en is de minimale frequentie en ruimtelijk resolutie beschikbaar?
- Kunnen deze camera's (deels van de tijd) op het wateroppervlak gericht worden of zijn deze camera's permanent 'bezet'?
- Staan deze camera's op een voor monitoring logische plek? Of zit er bijvoorbeeld de helft van de tijd een schip voor het te monitoren oppervlak?

- Hoe kan de gewonnen meetdata zo effectief mogelijk worden toegespitst (opslag en analyse) op de interne systemen bij RWS?

Uitvoering en verificatie metingen:

Bij de uitvoering en verificatie van de metingen wordt aangeraden tegelijkertijd in situ het wateroppervlak te bemonsteren met behulp van conventionele meettechnieken. Zo kunnen correlaties gelegd worden tussen wat met het beeldmateriaal zichtbaar is en wat daadwerkelijk langs de camera is gedreven. Er wordt ook aangeraden om een extra camera te plaatsen met betere specificaties (hogere resolutie en breder spectrum) dan de al aanwezige camera om te testen of dit merkbaar effect heeft op de kwaliteit van de metingen. Na uitvoering kunnen de volgende deelvragen worden beantwoord:

- Hoe bruikbaar is de gewonnen data? Wat is de kwaliteit van de monitoring of wordt het beeld veel van de tijd geblokkeerd door bijvoorbeeld een schip of is het zicht te slecht door weersomstandigheden (reflectie of regen) voor wat je probeert te monitoren? Heeft dit invloed op de positie van de camera en de minimaal benodigde frequentie en ruimtelijke resolutie en vallen hierdoor camera's van Rijkswaterstaat af van de lijst?
- Tot welk detailniveau ('resolutie', macro-, of eventueel mesoniveau) kan het zwerfafval gedetecteerd worden? In hoeverre is dit afhankelijk van de positionering van de camera of overige factoren (zoals reflectie of rimpeling van het wateroppervlak)?
- In hoeverre is het mogelijk om (materiaal)typen met behulp van enkel de camerabeelden te bepalen?
- Wat is het verschil in kwaliteit van de metingen uitgevoerd met de al aanwezige camera tegenover de nieuwe camera met betere specificaties?

Training van een AI-model (eventueel koppeling met het huidig lopende PhD onderzoek aan de TU Delft):

- Zijn de beelden van voldoende kwaliteit om zwerfafval te herkennen en een AI-model te trainen?
- Welk type AI-model leent zich het beste voor beeldherkenning van zwerfafval op het wateroppervlak?
- Wat is de aanpak om het model te beoordelen? Hoeveel beeldmateriaal is nodig om het model te trainen om de error rate onder een bepaalde drempelwaarde te krijgen?
- Wat zijn de benodigde manuren en kosten om het model te trainen waarbij de error rate onder een bepaalde drempelwaarde is gekomen?
- Is het mogelijk om het getrainde model te gebruiken als startmodel voor een tweede camera, en scheidt dit in de benodigde hoeveelheid beeldmateriaal, manuren en kosten?

4.1.3 Beschrijving aanpak

Stap 1) Vooronderzoek om te bepalen of RWS camera's beheert met de juiste instellingen en de juiste positionering. Als er geen geschikte camera's van RWS beschikbaar zijn, dan dient een aantal (bijvoorbeeld vijf) van deze camera's tijdens de pilot met een juiste positionering geplaatst te worden.

Stap 2) Uitvoer van de pilot door het plaatsen van een aantal vangsystemen achter de aanwezige camera's. Daarnaast plaatsing van extra camera's met betere specificaties. Verwerking en interpretatie beeldmateriaal en monsters. Beschouwing en beantwoording deelvragen en hoofdvraag. Beschrijving data-architectuur.

Stap 3) Beschouwing of volgens de resultaten van deze pilot de meetmethodiek als robuuste meetmethodiek bij kan dragen aan structurele monitoring van de grote rivieren.

4.1.4 Kosten

Het vooronderzoek kan vermoedelijk bij RWS intern worden uitgevoerd. Waarschijnlijk kunnen de overige onderdelen van deze pilot, inclusief een eerste analyse voor de beeldherkenning, worden uitgevoerd onder 33.000 euro. Dit is afhankelijk van het aantal locaties wat binnen de pilot wordt onderzocht en de vereiste nauwkeurigheid van een eventueel AI-model.

4.2 Monitoring van zwerfafval op het wateroppervlak en de oever vanaf bewegende objecten (zoals drones, voer- en vaartuigen) met behulp van camera's

4.2.1 Inleiding

Het monitoren van zwerfafval met behulp van camera's vanaf bewegende objecten is een meettechniek die de laatste jaren op meerdere plekken wordt onderzocht. Er zijn pilotprojecten uitgevoerd om de mogelijkheid van monitoring met behulp van drones aan te tonen en om de mogelijkheid van monitoring vanaf een beweegbare boot aan te tonen, zoals bij de Ocean Clean-up. Deze meettechniek gaat vaak gepaard met beeldherkenning om zo een arbeidsextensieve structurele monitoring vorm te geven. Zo is een proof-of-concept beschreven door Colin van Lieshout et al., en lopen er onderzoekstrajecten bij de TU Delft en bij de Ocean Clean Up.

Ook buiten de monitoring van rivieren om wordt de techniek om met behulp van camera's op bewegende objecten zwerfafval te detecteren ontwikkeld. Onder andere de gemeenten Amsterdam, Utrecht en Rotterdam zetten deze techniek in om, naast overige objecten, ook zwerfafval op straat te monitoren.

Er wordt aan RWS geadviseerd om te onderzoeken of monitoring met camera's vanaf vaartuigen, voertuigen of vliegende drones ook toegepast kan worden om zwerfafval op de oevers en het wateroppervlak te monitoren.

4.2.2 Onderzoeksvragen

Hoofdvraag

Deze pilot richt zich op de monitoring van zwerfafval op de oever en/of het wateroppervlak met behulp van camera's vanaf bewegende objecten, zoals voertuigen, vaartuigen en drones. De hoofdvraag is als volgt:

“Is het mogelijk om de monitoring van zwerfafval op de oevers en/of drijvend zwerfafval met behulp van camera's vanaf vaartuigen, voertuigen en drones uit te voeren?”

Deelvragen

Vooronderzoek

- Welke (combinatie van) golflengten van het elektromagnetisch spectrum zijn het beste geschikt voor monitoring van drijvend plastic en van drijvend zwerfafval? Is de opgedane kennis vanuit de meteorologie [35] hierbij toepasbaar?
- Welke hoogte is nodig voor het monitoren van drijvend zwerfafval op macro- en eventueel mesoniveau? Is het noodzakelijk om 24 uur per dag te monitoren of is een beperktere timeframe voldoende?
- Welke oevers kunnen en mogen gemonitord worden met behulp van drones (en op welke hoogten mag gevlogen worden), welke met behulp van vaartuigen en welke met behulp van voertuigen?
- Welke wateroppervlakken kunnen en mogen gemonitord worden met behulp van drones en welke met behulp van vaartuigen? Hoe groot is het wateroppervlak dat vanaf een vaartuig goed beschouwd kan worden? Is het noodzakelijk dat het schip bijvoorbeeld meandert?
- Hoe kan de gewonnen meetdata zo effectief mogelijk worden aangesloten (opslag en analyse) op de interne systemen bij RWS?

Uitvoering:

Bij de uitvoering en verificatie van de metingen van de oever wordt aangeraden deze oever aansluitend met behulp van conventionele meettechnieken te bemonsteren. Voor de metingen van het wateroppervlak wordt ook aangeraden tegelijkertijd het wateroppervlak te bemonsteren met behulp van sleepnetten.

Zo kunnen correlaties gelegd worden tussen wat met het beeldmateriaal zichtbaar is en wat daadwerkelijk op de oever lag of langs de camera is gedreven. Na uitvoering kunnen de volgende deelvragen worden beantwoord:

- Welke handvatten/ instructies/ materiaal (om bijvoorbeeld de camera op de boot stabiel te hebben) zijn voor de piloot of schipper nodig zodat inspectievluchten en vaarrondes goed uitgevoerd kunnen worden? Welke handvatten en instructies kunnen achteraf aan de uitvoering toegevoegd worden?
- Hoe bruikbaar is de gewonnen data? Wat is de kwaliteit van de monitoring of wordt het beeld veel van de tijd geblokkeerd door bijvoorbeeld begroeiing of is het zicht te slecht door weersomstandigheden (reflectie of regen) voor wat je probeert te monitoren? Heeft dit invloed op de manier van monitoren zoals de positie van de camera en de minimaal benodigde resolutie?
- Tot welk detailniveau ('resolutie', macro- of eventueel mesoniveau) kan het zwerfafval gedetecteerd worden? In hoeverre is dit afhankelijk van de positionering of overige factoren (zoals reflectie of rimpeling van het wateroppervlak)?
- In hoeverre is het mogelijk om (materiaal)typen met behulp van enkel de camerabeelden te bepalen?
- Is het mogelijk om een gridmap op te stellen van gegevens welke elkaar aanvullen? Hoe moeten deze elkaar aanvullende gegevens over elkaar heen worden gelegd? Wordt de kwaliteit van de monitoring of met name de frequentie van monitoring met behulp van deze gridmap beter?

Training van een AI-model (eventueel koppeling met het momenteel lopende PhD onderzoek aan de TU Delft):

- Zijn de beelden van voldoende kwaliteit om zwerfafval te herkennen en een AI-model te trainen?
- Welk type AI-model leent zich het beste voor beeldherkenning van zwerfafval op het wateroppervlak?
- Wat is de aanpak om het model te beoordelen? Hoeveel beeldmateriaal is nodig om het model te trainen om de error rate onder een bepaalde drempelwaarde te krijgen?
- Wat zijn de benodigde manuren en kosten om het model te trainen waarbij de error rate onder een bepaalde drempelwaarde is gekomen?
- Is het mogelijk om het getrainde model te gebruiken als startmodel voor een tweede camera, en scheidt dit in de benodigde hoeveelheid beeldmateriaal, manuren en kosten?

4.2.3 Beschrijving aanpak

Stap 1) Vooronderzoek om te bepalen welke specificaties de camera's nodig hebben, wat de benodigde maximale hoogte van de drone is en welke positie de camera's op de vaartuigen en voertuigen aan kunnen houden. Keuze van de oever(s) en de rivier.

Stap 2) Uitvoer van de pilot door deze oevers en rivier te monitoren met de drie meetmethodieken (waar mogelijk). Daarnaast verificatie van de metingen door het gelijktijdig of aansluitend monitoren van de oever en/of het wateroppervlak. Verwerking en interpretatie beeldmateriaal en monsters. Beschouwing en beantwoording deelvragen en hoofdvraag. Beschrijving data-architectuur.

Stap 3) Beschouwing of volgens de resultaten van deze pilot één of meerdere van deze meetmethodieken als robuuste meetmethodiek bij kunnen dragen aan structurele monitoring van de grote rivieren.

4.2.4 Kosten

De kosten van het onderzoek monitoring met behulp van de drone of een simpele camera vanaf een auto of een enkele monitoring met een sloep vanaf het water zal waarschijnlijk onder 33.000 euro uitgevoerd kunnen worden. Echter, als er gebruik gemaakt wordt van meer specialistisch materiaal (zoals de camera's van Cyclomedia of Google Street View) dan zal de prijs zeer snel tussen 33.000 en 150.000 euro vallen. Eerst zal dus afgewogen moeten worden of de pilot simplistisch gehouden moet worden (proof-of-concept) of direct getest als robuuste meetmethodiek met een hogere kwaliteitswaarde.

4.3 Monitoring van zwerfafval in de waterkolom met sonar

4.3.1 Inleiding

Hoeveel zwerfafval door de rivier wordt verplaatst hangt af van het drijfvermogen, de verhouding tussen oppervlak en het volume van het object, en de omstandigheden van de rivier en het water. Om deze redenen kan zwerfafval zich op drie verschillende manieren door een rivier verplaatsen: als permanent drijvend object, als object dat afwisselend drijft en onder het oppervlak beweegt, of als permanent verzonken object dat dieper onder het oppervlak zweeft of over de bodem rolt. Volgens enkele onderzoeken kan het aandeel verzonken zwerfafval (zwerfafval wat zich onder het wateroppervlak stroomafwaarts beweegt) meer dan 50% van het totaal zijn. Door de verschillende stromingspatronen in een rivier varieert daarnaast ook de hoeveelheid zwerfafval over de horizontale doorsnede van de rivier. Om deze reden is het van belang ook het transport van zwerfafval in het compartiment waterkolom op verschillende locaties in een rivier met verschillende hydraulische omstandigheden te monitoren. Met behulp van deze gegevens kunnen hydraulische modellen worden opgezet om te bepalen hoe verschillende typen zwerfafval zich door de rivier voortbewegen.

Monitoring van de waterkolom is enkele keren door RWS uitgevoerd middels het principe bemonstering met behulp van ankerkuilen of larvennetten. Recent is er een rapportage met de resultaten van de bemonstering t/m januari 2021 opgeleverd. Het uitvoeren van dergelijke monitoring is echter arbeidsintensief en kostbaar. Daarnaast is het vanwege de hinder voor scheepvaart onwenselijk om in de vaargeul te bemonsteren.

Er is daarom een aantal onderzoeken uitgevoerd om zwerfafval in de waterkolom als proof-of-concept te monitoren met behulp van sonar (geluidsgolven). Volgens de onderzoekers kan verzonken zwerfafval met behulp van sonar goed worden geteld en onderscheiden worden van overige verzonken levende en niet levende objecten. De proof-of-concept is dus succesvol, maar er wordt in het onderzoek wel aanbevolen om de set van testobjecten uit te breiden en te testen buiten gecontroleerde omgevingen. Ook wordt aangegeven dat andere apparatuur zoals een *side-scan sonar* of *multibeam sonar* tot andere resultaten kunnen leiden.

Er wordt aan RWS geadviseerd om te onderzoeken of monitoring met behulp van sonar toegepast kan worden om zwerfafval in de waterkolom van rivieren te monitoren.

4.3.2 Onderzoeksvragen

Hoofdvraag

Deze pilot richt zich op de monitoring van zwerfafval in de waterkolom met behulp van sonar. De hoofdvraag is als volgt:

“Wat is de meest geschikte sensor (of combinatie van sensoren) voor het monitoren van zwerfafval in de waterkolom van een rivier met behulp van sonar?”

Deelvragen

Vooronderzoek:

- Welk type sensor (single beam, een ‘keten’ van single beam, multibeam, side-scan of ADCP) is volgens de producenten het meest geschikt voor het monitoren van zwerfafval in de waterkolom?
- Zijn de resultaten afhankelijk van de diepte en richting van de sensor?
- Zijn de typen sensoren op basis van de kenmerken complementair aan elkaar?
- Hoe kan de gewonnen meetdata zo effectief mogelijk worden toegespitst (opslag en analyse) op de interne systemen bij RWS?

Uitvoering (Per type sensor, en per plaatsing in de waterkolom):

- Tot welk detailniveau ('resolutie', macro- of eventueel mesoniveau) kan het zwerfafval door de verschillende sensors gedetecteerd worden? In hoeverre is dit afhankelijk van de sensor en positionering?
- Is het mogelijk om (materiaal)typen op basis van de reflecties te bepalen? Is het mogelijk om de metingen te correleren met de metingen uitgevoerd met larvennetten?
- Is er een diepte-gradiënt van zwerfafval over de waterkolom zichtbaar? Is er een horizontale gradiënt (afhankelijk van omstandigheden van de rivier zoals de stroomsnelheid) over de lengte van het dwarsprofiel van de rivier zichtbaar?
- Hoe compleet zijn de meetgegevens: In hoeverre worden de geluidsgolven geblokkeerd door het zwerfafval of objecten zoals schepen, waardoor zwerfafval in de 'schaduw' hiervan niet gedetecteerd wordt?
- In hoeverre zijn de resultaten vergelijkbaar met de resultaten van de metingen met een aantal larvennetten welke achter de sensoren is gepositioneerd?
- Is het mogelijk om op basis van de diepte, omvang en oppervlak van het drijfvuil de drijfbaarheid in te schatten en vervolgens in combinatie met de stroomsnelheden een flux van de massa (en de massabalans) in te schatten?

4.3.3 Beschrijving aanpak

Stap 1) In overleg met de fabrikant en leveranciers van de verschillende sensors wordt een eerste inschatting gemaakt van welke sensors en technieken in staat zijn om zwerfafval in de waterkolom te detecteren. Vaak bieden deze fabrikanten en leveranciers een groot aantal sensors en technieken aan, en weten zij dus goed de voor- en nadelen van elke sensor en techniek. Ook weten zij wat voor elke sensor en techniek normaliter de meest optimale opstelling is. Dit resulteert in een lijst tips & tricks.

Stap 2) Uitvoer pilot, positionering van verschillende type sensoren zoals bij stap 1 aanbevolen, en larvennetten benedenstrooms van deze sensoren. Hierbij verdient het aanbeveling om de verschillende sensors tegelijkertijd te testen in een relatief gecontroleerde omgeving (een kleiner water dan een rivier, zoals een gracht of afwatering zoals de Rotte of de Schie), waardoor er weinig interferentie is van de omgeving en de resultaten van de verschillende sensoren goed met elkaar kunnen worden vergeleken. Beschrijving benodigde data-architectuur. Verwerking en interpretatie meetresultaten. Beschouwing effectiviteit verschillende sensoren en beantwoording deelvragen en hoofdvraag.

Stap 3) Beschouwing of volgens de resultaten van deze pilot de meetmethodiek als robuuste meetmethodiek bij kan dragen aan structurele monitoring van de grote rivieren.

4.3.4 Kosten

Een onderzoek naar optimale positionering van (een ballenlijn van) deeper chirp + kan waarschijnlijk onder € 33.000,-- euro worden uitgevoerd. Voor de overige sensoren geldt dat de kosten van een pilot vermoedelijk al snel binnen de range € 33.000,-- en € 150.000,-- valt. De opstelling betreft namelijk geen standaard opstelling en de metingen moeten worden uitgevoerd door een erg gespecialiseerde partij. De kosten voor het uitvoeren van deze pilot zijn afhankelijk van de meetperiode en het aantal onderzochte meetinstrumenten. Hoe langer en vaker gemeten wordt (waarbij ook eventueel meerdere locaties aangedaan worden), hoe betrouwbaarder de resultaten en de beantwoording van de hoofd- en deelvragen, maar hoe hoger de kosten.

4.4 Monitoring van zwerfafval op het wateroppervlak en de oever met behulp van satellietbeelden en luchtbeelden van inspectievluchten.

4.4.1 Inleiding

Het monitoren van zwerfafval met behulp van satellietbeelden is een meettechniek die in de maritieme omgeving al vaak is toegepast. De methodiek wordt bijvoorbeeld toegepast om de Great Pacific Garbage Patch in beeld te hebben. Er zijn verschillende onderzoeken uitgevoerd om deze meetmethodiek aan te scherpen, door gebruik te maken van verschillende bandbreedtes van verschillende satellieten. Voor verschillende typen zwerfafval zijn verschillende goed functionerende combinaties van deze bandbreedtes gevonden. De frequentie en ruimtelijke resolutie van satellietgegevens zijn echter een beperkende factor voor het monitoren van zwerfafval in stromende rivieren. Om deze reden wordt de focus gelegd op enerzijds locaties waar zwerfafval zich verzamelt, of op proxies die een relatie hebben met hoeveel plastic zich op een bepaalde locatie heeft verzameld (zoals grote hyacinten en windrows).

Er wordt aan RWS geadviseerd om te onderzoeken of met behulp van deze technieken ook in de Nederlandse grote rivieren ophopingen van zwerfafval zichtbaar zijn. Hierbij kan dan gebruik worden gemaakt van zowel vrij verkrijgbare en commercieel verkrijgbare satellietgegevens als ook de luchtbeelden die bij inspectievluchten van RWS worden gegenereerd. Deze luchtbeelden hebben een hogere resolutie dan de satellietgegevens, maar het ontbreekt wellicht aan de benodigde bandbreedtes van het elektromagnetisch spectrum. Echter, ook groepen pixels of vorm van deze groepen pixels kunnen naast bandbreedtes van het elektromagnetisch spectrum al voldoende bepalend zijn.

4.4.2 Onderzoeksvraag

Hoofdvraag

Deze pilot richt zich op de monitoring van ophopingen van zwerfafval op oevers en op het wateroppervlak met behulp van satellietbeelden en luchtbeelden van inspectievluchten. De hoofdvraag is als volgt:

“Is het mogelijk om op satellietbeelden en op de luchtbeelden van inspectievluchten ophopingen van zwerfafval te identificeren?”

Deelvragen

Voorstudie

- Wat is beleidsmatig de gewenste frequentie van de monitoring?
- Welke (combinatie van) golflengten van het elektromagnetisch spectrum zijn het beste geschikt voor monitoring van drijvend plastic en van drijvend zwerfafval? Zijn deze golflengten ook aanwezig in de instrumenten van de inspectievluchten?
- Is er een mogelijkheid verschillende beeldtypes te combineren tot een gridmap om de dekking over tijd te verbeteren? Bijvoorbeeld:
 - Verschillende beelden met verschillende resoluties;
 - Multi- en hyperspectrale beelden;
 - Spectroscopie en radar.
- Zijn er trainings- en validatiedatasets voor de monitoring van zwerfafval met behulp van satellietgegevens beschikbaar? Is het noodzakelijk om veldgegevens te verzamelen op het moment van opname van het satellietbeeld of het luchtbeeld om het algoritme te trainen en valideren?
- Zijn er ‘proxies’ voor verzamelingen van zwerfafval in Nederland te bedenken die makkelijker van grote afstand te herkennen zijn?

- Zijn de vrij verkrijgbare satellietbeelden (via Satellietportaal of via de ESA (Sentinel-2)) toereikend (bandbreedtes, frequentie en ruimtelijke resolutie, kwaliteit (wolkendek)) om de analyse uit te voeren?
- Wat zijn de kosten voor het verkrijgen van commerciële satellietbeelden zoals Worldview-3? Is de hogere resolutie (35x35cm), de hogere kwaliteit (minimaal 75% wolkenloos) en de snelle beschikbaarheid van deze beelden de investeringskosten waard? Zijn de commerciële en vrij verkrijgbare satellietbeelden aan elkaar te relateren waardoor de kosten beperkt kunnen worden gehouden? Kunnen deze gegevens gezamenlijk met andere partijen (waterschappen) worden ingekocht om gezamenlijk de wateren in Nederland te monitoren? Van wie zijn de gegevens na inkoop, komen deze gegevens in het bezit van RWS of blijven deze in het bezit van de provider?
- Hoe kunnen de verzamelde satellietbeelden en de resultaten van de analyses zo effectief mogelijk worden toegesplitst (opslag en analyse) op de interne systemen bij RWS?

Uitvoering:

- Er zijn in de literatuur verschillende combinaties van bandbreedtes beschreven voor het monitoren van zwerfafval; Leveren deze methodieken dezelfde resultaten voor de Nederlandse wateren (ijking en validatie)? Zijn ophopingen (deposities) zichtbaar op de oever, en is de aanwezigheid van begroeiing hierbij een beperkende factor? Zijn ophopingen zichtbaar bovenstrooms van kunstwerken en/of in estuaria op het oppervlaktewater, en is begroeiing (algengroei) een beperkende factor? Is het gebruik van beelden op een bepaald moment in het jaar vanwege de aanwezigheid van begroeiing noodzakelijk?
- Is het mogelijk om een gridmap op te stellen van gegevens welke elkaar aanvullen? Hoe moeten deze elkaar aanvullende gegevens over elkaar heen worden gelegd? Wordt de kwaliteit van de monitoring met behulp van deze gridmap beter?
- Indien zwerfafval goed te monitoren is: Wat zijn gebieden waar zwerfafval zich volgens de analyses ophoopt? Zijn deze ophopingen zichtbaar op zowel de vrij verkrijgbare als de eventueel aangekochte satellietgegevens zichtbaar? Zijn deze ophopingen zichtbaar op de luchtbeelden van de inspectievluchten?
- Is het mogelijk om een inschatting te maken van het oppervlak van de ophoping binnen een bepaald gebied? (Bijvoorbeeld de havens in Rotterdam);
- In hoeverre is het mogelijk om (de verhouding van) de (materiaal)typen in de ophopingen te bepalen?
- In hoeverre is het mogelijk om de analyse te automatiseren en om te vormen tot een structurele monitoring?

4.4.3 Beschrijving aanpak

Stap 1) Vooronderzoek om te bepalen welke specificaties (bandbreedtes) optimaal zijn voor de satellieten en luchtbeelden, of de luchtbeelden aan deze specificaties voldoen en welke vrij verkrijgbare en commerciële satellietbeelden aan deze specificaties voldoen. Keuze van het te beschouwen gebied, waar eventueel samengewerkt kan worden met een meer lokale partner zoals een havenbedrijf of een waterschap die met hetzelfde vraagstuk zitten om kosten te spreiden en om lokale trainingsdata te verzamelen (de aanwezigheid van zwerfafval op bij voorkeur een locatie waar een ophoping verwacht wordt, zoals een estuaria, een kunstwerk zoals een sluis of de havens in Rotterdam).

Stap 2) Uitvoer (ijking en validatie) en eventuele aanscherping van de analyses welke in de literatuur beschikbaar zijn. Beschouwing of met de satellietbeelden en luchtbeelden inderdaad ophopingen van zwerfafval aan te tonen zijn, en of de beelden complementair zijn aan elkaar of dat beelden ten opzichte van andere beelden weinig extra informatie bevatten. Beantwoording van de overige deelvragen en hoofdvraag. Beschrijving data-architectuur.

Stap 3) Beschouwing of volgens de resultaten van deze pilot deze meetmethodieken bij kunnen dragen aan structurele monitoring en het beheer en onderhoud van de grote rivieren en aangelegen wateren.

4.4.4 Kosten

De pilot betreft met name een bureaustudie. Als enkel vrij verkrijgbare satellietbeelden en de al beschikbare luchtbeelden van de inspectievluchten worden gebruikt, dan zal een drietal analyses van een gebied waarschijnlijk onder de €33.000 uitgevoerd kunnen worden. Aangezien het een pilot betreft wordt hierbij aangenomen dat eventuele hostingkosten, kosten voor eventuele benodigde software en kosten van berekeningen in bijvoorbeeld een cloud-service beperkt zijn. Indien ook commerciële satellietbeelden worden gebruikt voor de analyse, dan zal de pilot door de aankoopkosten en aanvullende analyses boven 33.000 uitkomen en afhankelijk zijn van het aantal te analyseren momenten en de oppervlakte van het gebied.

5 References

- [1] T. v. Emmerik en P. Vriend, „Roadmap Litter Monitoring in Dutch Rivers,” p. 44, 2021.
- [2] T. v. Emmerik en P. Vriend, „Routekaart Zwerfafvalmonitoring Nederlandse rivieren,” 2021.
- [3] United Nations Environment Programme, „Monitoring Plastics in Rivers and Lakes: Guidelines for the Harmonization of Methodologies,” Nairobi, 2020.
- [4] SACEP, „PLEASE - Project Website,” 2020. [Online]. Available: <http://www.sacep.org/programmes/plastic-free-rivers-and-seas-for-south-asia>. [Geopend January 2022].
- [5] Sustainable Seas Trust, „African Marine Waste Network - Project Website,” [Online]. Available: <https://sst.org.za/projects/african-marine-waste-network/>. [Geopend January 2022].
- [6] D. González-Fernández, A. Cózar en G. e. a. Hanke, „Floating macrolitter leaked from Europe into the ocean.,” *Nat Sustain*, 2021.
- [7] Lives, „Litter free rIvERs and Streams - Project Website,” [Online]. Available: <https://litterfreeriversandstreams.eu/nl/>. [Geopend January 2022].
- [8] BLASTIC, „Plastic Waste Pathways into the Baltic Sea - Project Website,” [Online]. Available: <https://www.blastic.eu/>. [Geopend January 2022].
- [9] T. Vlachogianni, A. Anastasopoulou, T. Fortibuoni en F. Ronchi, „Marine Litter Assessment In the Adriatic & Ionian Seas. IPA-Adriatic. DeFishGear Project, MIO-ECSDE, HCMR and ISPRA,” 2017.
- [10] Marine Litter Lab, „MIDaS - Project Website,” [Online]. Available: <https://www.marinelitterlab.eu/projects/9-projects/26-midas>. [Geopend January 2022].
- [11] T. Barnardo en A. J. Ribbink, „African Marine Litter Monitoring Manual,” Port Elizabeth, South Africa, 2020.
- [12] D. González-Fernández en G. Hanke, „Toward a Harmonized Approach for Monitoring of Riverine Floating Macro Litter Inputs to the Marine Environment.,” *Front. Mar. Sci.* 4:86.
- [13] E. Hadders en M. Wilhelm, „Monitoring Strategy 2022-2027 for The Litter Free Rivers and Streams (LIVES),” 2022.
- [14] T. Vlachogianni, „Methodology for Monitoring Marine Litter on the Sea Surface - Visual Observation,” 2014.
- [15] P. Vriend, C. Roebroek en T. v. Emmerik, „Same but Different: A Framework to Design and Compare Riverbank Plastic Monitoring Strategies,” *Strategies. Front. Water* 2:563791, 2020.
- [16] T. v. Emmerik en A. Schwarz, „Plastic debris in rivers,” *WIREs Water*, 2020.
- [17] D. González, G. Hanke, G. Tweehuysen, B. Bellert, M. Holzhauer, A. Palatinus, P. Hohenblum en L. Oosterbaan, „Riverine Litter Monitoring - Options and Recommendations. MSFD GES TG Marine Litter,” 2016.
- [18] J. Miliute-Plepiene, A. Frâne, K. Haikonen en L. Youhanan, „Overview of available methods to monitor marine plastic litter - Incl. method for riverine litter monitoring developed within BLASTIC,” 2018.
- [19] „Plastic Network,” 2018. [Online]. Available: <https://www.plastic-network.org/>. [Geopend January 2022].
- [20] „Climate Scan,” [Online]. Available: <https://www.climatescan.nl/>. [Geopend January 2022].
- [21] „ESA Open Space Innovation Platform (OSIP) Campaign website,” 2020. [Online]. Available: https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/The_Discovery_Campaign_on_Remote_Sensing_of_Plastic_Marine_Litter. [Geopend February 2022].
- [22] T. v. Emmerik, P. Vriend en C. Roebroek, „An evaluation of the River-OSPAR method for quantifying macrolitter on Dutch riverbanks,” Wageningen, 2020.
- [23] P. Vriend, v. C. Calcar, M. Kooi, H. Landman, R. Pikaar en T. v. Emmerik, „Rapid Assessment of Floating Macroplastic Transport in the Rhine,” *Front. Mar. Sci.* 7:10., 2020.
- [24] R. I. Schöneich-Argent, K. Dau en H. Freund, „Wasting the North Sea? - A field-based assessment of anthropogenic macrolitter loads and emission rates of three German tributaries,” *Environmental Pollution*, 18 March 2020.
- [25] T. v. Emmerik, J. Seibert, B. Strobl, S. Etter, T. d. Oudendammer, M. Rutten, M. b. Ab Razak en I. v. Meerveld, „Crowd-Based Observations of Riverine Macroplastic Pollution,” *Pollution. Front. Earth Sci.* 8:298., 2020.

- [26] T. d. Oudendammer, „Impetus - Innovative Measurement Tool towards Urban Environmental Awareness,” 2021.
- [27] T. d. Oudendammer, „Citizen Science Plastics Monitoring - Een verkenning naar meetmethoden en tools voor oevermetingen Rotterdam en Haringvliet,” 2019.
- [28] J. d. Vos, „Plastic Identification Anywhere,” Delft, 2021.
- [29] The Great Bubble Barrier Team, „The Great Bubble Barrier - Project website,” 2019. [Online]. Available: <https://thegreatbubblebarrier.com/team/>.
- [30] A. d. Fockert en F. Buschman, „Afvangen plastic zwerfafval - vergelijking resultaten pilots,” Delft, 2021.
- [31] F. Collas, S. Oswald en W. Verberk, „Plastic in de waterkolom van de Boven-Rijn, Waal en IJssel,” 2021.
- [32] Edited by Houma Bachari Fouzia, Monitoring of Marine Pollution, London: IntechOpen, 2019.
- [33] K. Themistocleous, C. Papoutsas, S. Michaelides en D. Hadjimitsis, „Investigating Detection of Floating Plastic Litter from Space Using Sentinel-2 Imagery,” *remote sensing*, vol. 12, nr. 2648, 2020.
- [34] V. Martínez-Vicente en anderen, „Measuring Marine Plastic Debris from Space: Initial Assessment of Observation Requirements”.
- [35] P. Tasserou, T. van Emmerik, J. Peller, L. Schreyers en L. Biermann, „Advancing Floating Macroplastic Detection from Space Using Experimental Hyperspectral Imagery,” *Remote Sens.* 13, 2021.
- [36] A. Cózar, S. Aliani, O. C. Basurko, M. Arias, A. Isobe, K. Topouzelis, A. Rubio en C. Morales-Caselles, „Marine Litter Windrows: A Strategic Target to Understand and Manage the Ocean Plastic Pollution,” 2021.
- [37] L. Schreyers, T. v. Emmerik, T. Nguyen, P. N.-A., T.-C. Kieu-Le, E. Castrop, B. T.-KL., E. Strady, S. Kosten, L. Biermann, S. v. d. Berg en M. v. d. Ploeg, „A Field Guide for Monitoring Riverine Macroplastic Entrapment in Water Hyacinths,” 2021.
- [38] L. Schreyers, T. v. Emmerik, T. Nguyen, E. Castrop, P. N.-A., T.-C. Kieu-Le, B. T.-KL., E. Strady, S. Kosten, L. Biermann, S. v. d. Berg en M. v. d. Ploeg, „Plastic Plants: The Role of Water Hyacinths in Plastic Transport in Tropical Rivers,” 2021.
- [39] M. Geraeds, T. v. Emmerik, R. d. Vries en A. M. S. b. Razak, „Riverine Plastic Litter Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV's),” *Remote Sens.* 2019, vol. 11, nr. 2045, 2019.
- [40] Rijkswaterstaat, „Monitoring van zwerfafval in de openbare ruimte,” [Online]. Available: <https://zwerfafval.rijkswaterstaat.nl/actueel/nieuws/nieuws/2020/monitoring-zwerf-afval-camera/>. [Geopend 02 2022].
- [41] C. v. Lieshout, K. v. Oeveren, T. v. Emmerik en E. Postma, „Automated River Plastic Monitoring Using Deep Learning and Cameras,” *Earth and Space Science*, vol. 7, 2020.
- [42] the Ocean Cleanup, „Using Artificial Intelligence to Monitor Plastic Density in the Ocean,” 26 January 2022. [Online]. Available: <https://theoceancleanup.com/updates/using-artificial-intelligence-to-monitor-plastic-density-in-the-ocean/>. [Geopend January 2022].
- [43] D. F. Honingh, „Riverine debris: interactions between waste and hydrodynamics - Field Measurements and Laboratory Experiments For the Cikapundung River,” Delft, 2018.
- [44] C. Y. Toe, W. Uijtewaal en D. Wütricht, „Predicting the flow and transport of plastic debris in open waters,” in *NCR Day*, 2022.
- [45] G. Utrecht, „Visdeurbel,” 2021. [Online]. Available: <https://visdeurbel.nl/>.
- [46] S. Broere, T. v. Emmerik, D. González-Fernández, W. Luxemburg, M. d. Schipper, A. Cózar en N. v. d. Giesen, „Towards Underwater Macroplastic Monitoring Using Echo Sounding,” *Front. Earth Sci.* 9:628704., 2021.
- [47] S. Broere, R. d. Vries, A. v. d. Vaart en F. Buschman, „Verkenning akoestisch monitoren plastic afval in de waterkolom - Projectrapport voor Rijkswaterstaat WVL (concept),” Delft, 2021.
- [48] M. Valdenegro, „Submerged marine debris detection with autonomous underwater vehicles,” 2016.
- [49] N. Flores en F. Collas, „Detection of plastic litter using an ARIS sonar,” Nijmegen, 2021.
- [50] A. Boon, „Towards automated estimation of underwater macroplastic concentration using acoustic backscatter,” Delft, 2022.

- [51] R. L. Pedroso de Lima, F. C. Boogaard en R. E. Graaf-van Dinther, „Innovative Water Quality and Ecology Monitoring Using Underwater Unmanned Vehicles: Field Applications, Challenges and Feedback from Water Managers,” vol. 12, nr. 1196, 2020.
- [52] K. a. Q. Technology, „Fifish underwater robot,” 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=xSDCXMviEzw>. [Geopend February 2022].