



Monitoring zwerfafval in rivieren met technologie

4 juli 2023

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Colofon

Titel	Monitoring zwerfafval in rivieren met technologie	TAUW bv
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving	Handelskade 37
Projectleider	Jurgen Ooms (TAUW)	Postbus 133
Auteur(s)	Joanne van 't Zelfde (TAUW) Freek Huthoff, Carolien Wegman, Joost Stenfert (HKV) Anouk Boon (WUR)	7400 AC Deventer T +31 57 06 99 91 1 E info.deventer@tauw.com
Tweede lezer	Frans Buschman (Deltares), Jurgen Ooms (TAUW)	
Meet- en inspectiewerk	Bob van der Meij (GeoZICHT), Anouk Boon (WUR), Carolien Wegman, Paula Lambregts (HKV)	
Projectnummer	1287222	
Aantal pagina's	66	
Datum	4 juli 2023	
Handtekening	Ontbreekt in verband met digitale verwerking. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.	

Dit project wordt mede gefinancierd door de Europese Unie via het Europees fonds voor maritieme Zaken en Visserij.

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Inhoud

1	Introductie.....	8
1.1	Problematiek en aanleiding.....	8
1.2	Doel van het project.....	8
1.3	Leeswijzer.....	9
2	Resultaten en hoofdconclusies.....	10
2.1	Meettechnieken inzetten voor structurele zwerfafvalmonitoring.....	10
2.2	Vergelijking onderzochte meettechnieken met conventionele meettechniek.....	12
2.3	Voorstel heldere, robuuste meetmethodiek voor de onderzochte meettechnieken.....	13
3	Methodologie.....	16
3.1	Onderzoeksopzet.....	16
3.2	Monitoring met meetmethodieken.....	18
3.3	Beoordeling van meettechnieken.....	19
4	Spectrometrie – Stationair.....	21
4.1	Introductie.....	21
4.2	Beantwoorden deelonderzoekvragen.....	21
4.3	Conclusie.....	25
5	Spectrometrie - Niet-stationair.....	27
5.1	Introductie.....	27
5.2	Beantwoorden deelonderzoekvragen.....	27
5.3	Conclusie.....	35

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

6	Sonar	38
6.1	Introductie	38
6.2	Conclusie	42
7	Lucht- en satellietbeelden.....	44
7.1	Introductie	44
7.2	Beantwoorden deelonderzoekvragen	44
7.3	Conclusie	50
8	Samenhang van de meettechnieken.....	52
8.1	Monitoring en dataverwerking.....	52
8.2	Combinatie van meettechnieken voor beter begrip van processen	53
8.3	Conceptueel model voor een zwerfafvalbalans	53
8.4	Mechanistisch zwerfafval transportmodel	55
9	Aanbevelingen.....	61
9.1	Belangrijkste aanbevelingen	61
9.1.1	De procedure voor een centrale dataopslag voor zwerfafval dient in gang gezet te worden	61
9.1.2	Onderzoek naar operationaliseren van automatische detectie van drijvend zwerfafval vanaf een brug	61
9.1.3	Onderzoek naar operationaliseren van automatische detectie van zwerfafval in de waterkolom met sonar.....	62
9.1.4	Jaarlijks luchtbeelden invliegen na hoogwater.....	62
9.1.5	Ontwikkeling van een nationaal rivier-afvalstromenmodel.....	62
9.2	Aanbevelingen voor lager termijn.....	63
9.2.1	Algemeen.....	63

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

9.2.2	Stationaire camera's	63
9.2.3	Niet-stationaire camera's	63
9.2.4	Sonar.....	64
9.2.5	Lucht- en satellietbeelden	64
10.	Referenties	65
Bijlage 1	Detecties met stationaire camera's	
Bijlage 2	Detecties met niet-stationaire camera's	
Bijlage 3	Detecties met Sonar	
Bijlage 4	Detecties met lucht- en satellietbeelden	

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Begrip	Definitie
AI	Artificial Intelligence (Engels), kunstmatige intelligentie (Nederlands) in dit kader toegepast om zwerfafval op beelden of andere data te herkennen.
Algemene verordening gegevensbescherming (AVG)	Europese richtlijn over het beschermen van persoonlijke gegevens. Iedere organisatie die persoonsgegevens verwerkt (bv foto's waarop mensen te zien zijn) moet zorgen dat de beelden niet voor doeleinden kunnen worden gebruikt die de privacy schaden.
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler, een specifiek type sonar die al in gebruik is bij RWS voor het meten van stroomsnelheden.
Detectie van zwerfafval	Opsporing of ontdekking van zwerfafval
Flux	De hoeveelheid die per tijdseenheid door een oppervlakte heen stroomt
Ground sample distance (GSD)	De afstand tussen pixelcentra gemeten op de grond
Hotspots	Ophopingen van zwerfafval
Identificatie van zwerfafval	Vaststellen van het type zwerfafval
LiDAR	Light Detection And Ranging is een technologie die de afstand tot een object of oppervlak bepaalt door middel van het gebruik van laserpulsen.
Methodiek	In de methodiek worden de volgende onderdelen vastgesteld: <ul style="list-style-type: none"> - Meetplannen (locaties, periodes, frequenties et cetera), - Meettechniek (met veldwerkers (te voet of varend), monsternamen, beeldherkenning, met netten etc.) welke variabelen worden precies gemeten en hoe - Meetprotocollen (gedetailleerde beschrijving van procedures die moeten worden gevolgd bij het meten van een bepaalde variabele) - De manier van data-analyse
Monitoringsontwikkelprojecten	Het doel van de monitoringsontwikkelprojecten is om per compartiment van de rivier te komen tot volledige instructies die opgenomen worden in het monitoringsprogramma.
Monitoringsprogramma	Is het uitvoeren van een formele reeks instructies voor de zwerfafval rivierenmonitoring. Het monitoringsprogramma richt zich op langdurige monitoring (trendmonitoring)
Orthomozaïek	Een samengestelde foto die via een coördinatensysteem gekoppeld is aan de werkelijkheid. Hierdoor kunnen foto's van verschillende tijdstippen exact worden vergeleken.
OSPAR	Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic (OSlo-PARis agreement). In het kader van zwerfafval wordt gerefereerd aan de OSPAR-indeling van zwerfafval in 112 typen. Denk hierbij aan flesjes, wattenstaafjes, aanstekers, etc. Meer informatie op Abundance, Composition and Trends of Beach Litter (ospar.org)

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Begrip	Definitie
Observatie	Waarneming van informatie
RGB	Rood Groen Blauw, een manier om een kleur uit te drukken met behulp van een combinatie van de drie primaire kleuren Rood-Groen-Blauw. Dit gaat om met het menselijk oog zichtbaar licht.
Ruimtelijke resolutie	Het scheidend vermogen van een apparaat, meestal gaat dit om het aantal beeldpunten waarmee een voorwerp met een bepaalde afmeting in de werkelijkheid wordt weergegeven in data.
Temporele resolutie	Het scheidend vermogen in de tijd, ofwel hoe vaak iets kan worden opgenomen. Van meerdere keren per seconde voor camera's op bruggen tot één keer per jaar voor luchtbeelden.

1 Introductie

1.1 Problematiek en aanleiding

De vervuiling van onze zeeën en oceanen met zwerfafval, voornamelijk plastic, is een milieuprobleem dat kan leiden tot problemen in het ecosysteem, maar ook tot problemen met de menselijke gezondheid (Dethmers, K. et al. (2022)). Volgens de EU belandt in Europa 150 000 tot 500 000 ton plastic per jaar in de oceaan (COM, 2018). Naar verwachting komt het merendeel van deze plasticstroom door het uitstromen van plastic zwerfafval vanuit de rivieren naar de zee.

In Nederland zijn de rivieren op het oog relatief schoon. Als iemand aan de oever van een rivier naar het rivieroppervlak kijkt zal die niet veel stukken zwerfafval voorbij zien stromen. Toch is ook in de Nederlandse rivieren zwerfafval aanwezig, en is er een voortdurende uitwisseling van stuks zwerfafval tussen het wateroppervlak, de waterkolom, de oevers en de bodem van de rivier. We weten echter nog maar weinig van de hoeveelheden en de uitwisseling tussen deze compartimenten.

Rijkswaterstaat (RWS) ontwikkelt in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) een monitoringsprogramma voor zwerfafval in rivieren. Dit programma heeft als doel om inzicht te krijgen in de aanwezigheid van zwerfafval in en langs de rivieren in Nederland. Momenteel worden er 'handmatige' metingen uitgevoerd als onderdeel van de huidige meetmethodiek. Hierbij worden verschillende meettechnieken ingezet om de hoeveelheid zwerfafval in kaart te brengen. Zo brengen onderzoekers vanaf bruggen in kaart hoeveel stuks zwerfafval voorbijstromen, worden er boten ingezet om te onderzoeken hoeveel stuks zwerfafval in een gebied aanwezig

zijn en vinden er oevertellingen plaats om de hoeveelheid plastic afval in kaart te brengen. Het zwerfafval in de waterkolom wordt met behulp van netten gemeten. Daarnaast wordt er kennis verzameld over de aanwezigheid van zwerfafval uit onderzoeken van andere partijen, zoals rivierovertellingen van de stichting Schone Rivieren en diverse pilots.

Omdat het handmatig verzamelen van gegevens over zwerfafval in en rond rivieren relatief kostbaar en arbeidsintensief is, verkent RWS de mogelijkheden om dataverzameling te automatiseren. Via een voorstudie is gekeken naar verschillende mogelijkheden om de dataverzameling te automatiseren (Verstegen, E. & de Weerd, M. 2022). Vier van deze mogelijkheden wil RWS verder verkennen. Daarvoor is opdracht gegeven aan TAUW, HKV, WUR om in vier parallelle pilots de meetmethodiek verder te ontwikkelen. Het gaat hierbij om de volgende meetmethodieken:

- Stationaire spectrometrie
- Niet stationaire spectrometrie
- Sonar
- Lucht- en satellietbeelden

Deltares heeft in de klankbordgroep meegedacht en heeft een review uitgevoerd op een concept van dit rapport

1.2 Doel van het project

Doel van het project is om erachter te komen of technologische meettechnieken die potentieel geschikt lijken voor efficiënte, betrouwbare geautomatiseerde zwerfafvalmonitoring in rivieren, het ook daadwerkelijk zijn.

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Bijkomend doel is het ontwikkelen van een meetmethodiek voor deze technologische meettechnieken voor een toekomstige, structurele zwerfafvalmonitoring in rivieren.

Dit project kan, gezamenlijk met andere projecten, uiteindelijk leiden tot een structureel inzicht in de omvang, de herkomst en de samenstelling van het zwerfafval in de rivieren. Door te weten wat en hoeveel er wanneer in de rivieren drijft, waar het zich bevindt en waar het vandaan komt, kan het zwerfafvalprobleem in rivieren effectiever worden aangepakt.

Het project helpt dus om te komen tot robuuste meetmethodieken die in de toekomst kunnen worden geïmplementeerd in een structurele zwerfafvalmonitoring in rivieren.

1.3 Leeswijzer

Dit rapport is opgebouwd in piramidevorm. Het begint met de resultaten en hoofdconclusies (Hoofdstuk 2). Vervolgens wordt de methodiek van het hele project beschreven (Hoofdstuk 3) en volgen in vier aparte hoofdstukken (Hoofdstuk 4 - 7) de onderbouwing van de hoofdconclusies. Ieder van deze vier hoofdstukken richt zich op een van de vier meettechnieken. Het rapport wordt afgesloten met een discussiehoofdstuk (Hoofdstuk 8). De onderliggende gegevens voor de hoofdstukken over de verschillende meettechnieken zijn terug te vinden in de bijlagen. Per meettechniek is een aparte bijlage toegevoegd.

2 Resultaten en hoofdconclusies

In dit hoofdstuk beantwoorden we de vragen die door RWS in haar uitvraag zijn gesteld aan het projectteam. Per vraag gaan we in op de verschillende meettechnieken en waar mogelijk geven we een antwoord kijkend naar alle meettechnieken samen.

2.1 Meettechnieken inzetten voor structurele zwerfafvalmonitoring

1. Hoe realistisch is het om deze technologische meettechnieken in te zetten voor een structurele zwerfafvalmonitoring in en/of langs rivieren? Kijkend naar betrouwbaarheid, uitvoerbaarheid, kostenefficiëntie en andere aspecten die belangrijk zijn.

Stationaire spectrometrie

Stationaire camera's kunnen ingezet worden voor het in kaart brengen van drijvend zwerfafval. Om een beeld te krijgen van zwerfafvaltransport is het relevant om met grote regelmaat de hoeveelheid zwerfafval te identificeren en te kwantificeren (bijvoorbeeld om de zwerfafval transporten in de zomer en de winter te kunnen vergelijken). De inzet van deze technologie maakt het mogelijk om gedurende de dag op een locatie zwerfafval aan op wateroppervlak te monitoren. Dankzij deze opschaling verwachten we dat de betrouwbaarheid na de ontwikkeling van een robuuste geautomatiseerde data-analysemethode groter is dan die van de conventionele meetmethodiek. Dit komt vooral omdat er veel meer metingen gedaan kunnen worden dan dat er met de brugtellingen kunnen worden uitgevoerd. Inspanning en kosten zitten in het ontwikkelen en plaatsen van een meetnetwerk aan camera's en het ontwikkelen van automatische data-analysemethoden. Dit zou binnen één

tot drie jaar georganiseerd kunnen zijn. Wanneer dit op orde is neemt de benodigde inzet van personeel, en hiermee de inspanning en kosten af.

Niet stationaire camera's

Niet stationaire camera's (camera's gemonteerd op een drone of op een schip) zijn geschikt om stilliggend zwerfafval in uiterwaarden en langs oevers te monitoren. Detectie en identificatie van objecten vanaf ongeveer 5 cm is mogelijk. Kleinere objecten kunnen nog wel gedetecteerd worden, maar identificatie is niet meer mogelijk. Met een drone kan per dagdeel een gebied van orde grootte één vierkante kilometer geobserveerd worden. De identificatie van de stuks zwerfafval gebeurt door handmatig de beelden te beoordelen. De kosten schatten we op 5 000 EUR/km². Met een boot is het interessant om extra informatie van zwerfafval op de oevers te vergaren op locaties met hoge vegetatie (vanaf één à twee meter hoogte). Deze werkzaamheden zijn ook uit te voeren met een drone vanuit een vergelijkbare positie in de rivier. Het wordt aanbevolen om niet-stationaire spectrometrie te gebruiken na een hoogwaterevent. Omdat dit inzicht geeft in hotspots in de uiterwaarden en op de oevers, de oppervlakken die kunnen worden gefotografeerd binnen een dag zijn veel groter dan die met de hand kunnen worden beoordeeld. Hoogfrequente monitoring levert nauwelijks meer informatie op omdat de hoeveelheden zwerfafval op de oevers in de tijd niet sterk variëren. Deze meettechniek kan direct worden ingezet, er is geen ontwikkeling meer nodig. Alleen de opslag van data zal moeten worden georganiseerd, zodat het aansluit bij de manier van dataopslag van RWS.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Dit kan naar verwachting een jaar duren. Een nadeel van het gebruik van drones is dat vliegen met drones aan regels is gebonden en dat er op sommige locaties toestemming gevraagd moet worden om te vliegen. Door een goed vlieg-protocol op te stellen en alleen te vliegen met partijen met de 'juiste papieren' kan dit nadeel worden geminimaliseerd.

Sonar

Deze technologie maakt gebruik van akoestische reflectie en is gericht op het monitoren van zwerfafval dat zich in de waterkolom bevindt. Doel is bepalen van afvalconcentratie in de waterkolom. Voor het zien van trends in het afvaltransport zijn metingen op een vast punt over langere perioden nodig. Wegens logistieke beperkingen (in verband met scheepvaartroutes) kan de conventionele meettechniek met meetnetten slechts beperkt worden toegepast. De meetmethodiek gebaseerd op sonar is nog volop in ontwikkeling, maar heeft potentie voor structurele monitoring. Ontwikkeling van een meetmethodiek wordt mogelijk door sonars die al gebruikt worden door RWS te combineren met netmetingen. Gelijktijdig fundamenteel onderzoek kan de methodiek, en daarmee de betrouwbaarheid van de resultaten, verbeteren. Ook is fundamenteel onderzoek nodig voor herkenning van zwerfafvalitems. Als de huidige sonarmetingen gebruikt kunnen worden zijn de inspanning en kosten beperkt tot het ontwikkelen van een meetmethodiek en uitvoeren van fundamenteel onderzoek. Hierna zijn de verwachte kosten laag.

Lucht- en satellietbeelden

De meettechniek kan hotspots detecteren met een grootte van enkele meters en geeft een beeld van de ruimtelijke omvang van hotspots. Dit geldt voor luchtbeelden, vrij beschikbare satellietbeelden zijn op dit moment nog niet beschikbaar in voldoende ruimtelijke resolutie om zwerfafvalhotspots langs

de Nederlandse rivieren in beeld te brengen. Door de lage frequentie en ruimtelijke resolutie is de meettechniek geschikt voor het monitoren van stilliggende hotspots van zwerfafval op een grote ruimtelijke schaal. Ervaring leert dat die situaties zich met name voordoen na hoogwaters. De kosten van het uitvoeren van één extra inspectievlucht voor de Maas met resolutie van 10-25 cm is ongeveer 30 000 euro (persoonlijke Communicatie RWS, 18-4-2023). Nota bene Deze kosten zijn gemaakt om de overstroming in beeld te brengen en niet specifiek voor zwerfafvalmonitoring. Daarnaast is het samenwerkingsverband van overheidspartijen dat gecoördineerd wordt door het Waterschapshuis bezig met een inkoopstelsel voor luchtbeelden. Hier zou RWS mogelijk gebruik van kunnen maken als extra luchtbeelden gewenst zijn na een hoogwater. Een ander idee is dat ook Wageningen Universiteit een vliegtuig (via NWO) heeft om beelden te maken (persoonlijke Communicatie RWS, 11-05-2023).

Integratie van zwerfafvalmetingen via transportmodel

Binnen dit project was de expliciete wens om de meettechnieken in samenhang te bekijken. Daarom is een eerste versie van een zwerfafvaltransportmodel (afvalbalansmodel) opgesteld dat afzonderlijke metingen van zwerfafval met elkaar verbindt. Dit model is toegelicht in hoofdstuk 9. Een vergelijking tussen modelresultaten en geïdentificeerde zwerfafvalhotspots op de Maas toont dat het model de dominante processen voor afvaltransport goed beschrijft. Door het model te combineren met de metingen ontstaat een beter inzicht in de oorsprong, ophopingen en verplaatsingen van zwerfafval. Op basis van het model kunnen vervolgens gerichtere keuzes gemaakt worden over noodzaak, locatie, frequentie en type van monitoring. Voor verdere specificering van een meetprotocol en meetnet van zwerfafval wordt daarom aanbevolen om dat in combinatie te doen met verdere ontwikkeling van het afvalbalansmodel.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Het model kan vervolgens ook bijdragen aan ontwerp van mogelijke oplossingen voor verwijderen van zwerfafval uit de rivieren en uiterwaarden.

2.2 Vergelijking onderzochte meettechnieken met conventionele meettechniek

2. Hoe goed is elke technologische meettechniek in vergelijking met de corresponderende conventionele meettechniek? Of in ieder geval: wordt de betrouwbaarheid, uitvoerbaarheid, kostenefficiëntie als goed genoeg geacht?

Stationaire spectrometrie

De conventionele brugtellingen kunnen in principe volledig vervangen worden met deze technologie. De meeste macro-items (vanaf enkele centimeters grootte, afhankelijk van omstandigheden en camerakwaliteit) kunnen gedetecteerd worden op beeldmateriaal. Deze technologie biedt verder de kans om met grotere regelmaat te monitoren, wat de betrouwbaarheid van resultaten verbeterd ten opzichte van de huidige meetmethodiek. Het meetnetwerk, en de frequentie en duur van metingen kunnen afgestemd worden op de conventionele meetmethodiek, of verbeterd worden naar aanleiding van een aantal verdiepende tests kijkend naar de benodigde hoeveelheid camera's en meetperiode per brug.

Niet - stationaire spectrometrie

Afval op de oever wordt nu op twee manieren in kaart gebracht. Er worden oeverschouwen uitgevoerd vanaf een vaartuig waarbij steeds 100 meter oever een beoordeling krijgt. Daarnaast worden oevertellingen uitgevoerd waarbij een persoon in het veld de aantallen deeltjes op de oever telt en indeelt in OSPAR-categorieën. Alleen bij hoge vegetatie over een groot deel van de oever zijn conventionele oeverschouwen nog echt nodig. Daarnaast is indelen in zwerfafvaltypen niet in alle gevallen mogelijk vanaf beelden. In

overige gebieden lijkt het mogelijk om oeverschouwen volledig te vervangen door detectie met drones om een goede inschatting te krijgen van het zwerfafval. Bij hoge vegetatie direct langs de oever (bomen, riet), kunnen vaartuigen of drones worden ingezet voor detectie vanaf de richting van het water. In een experiment zijn tot 50 % van de aanwezige objecten gedetecteerd met dronebeelden. Op deze locatie was zwerfafval op stukken met lage begroeiing zeer goed te identificeren. Daarnaast zijn vooral objecten met contrasterende kleuren goed te detecteren.

Sonar

De eerste verkenningen met sonar, in dit geval de Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), die zijn uitgevoerd tegelijk met netmetingen, laten zien dat deze meettechniek potentie heeft. De meettechniek is echter nog volop in ontwikkeling. Hoewel identificatie van itemsoort vooralsnog buiten bereik is met deze technologie, heeft de technologie wel de potentie voor het leveren van continue zwerfafvaltellingen in de waterkolom. Netmetingen geven wel de mogelijkheid voor het classificeren van itemsoort, maar zijn ook relatief kostbaar (EUR 2 000 - 4 000 per dag) en zeer arbeidsintensief, waardoor continu meten niet haalbaar is. Netmetingen kunnen gebruikt worden voor kalibratie van sonarmetingen, waardoor de technologie de gaten in tijd en ruimte tussen netmetingen kan opvullen. Het wordt aanbevolen om nog regelmatig netmetingen uit te voeren en de ervaring met sonar in parallel verder op te bouwen. Op langer termijn kunnen wellicht sonarapparaten worden ontwikkeld waarmee zwerfafval tot een bepaalde hoogte ook geïdentificeerd kan worden.

Lucht- en satellietbeelden

Stilliggende hotspots van zwerfafval van enkele meters kunnen gedetecteerd worden met luchtbeelden.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Satellietbeelden hebben (nog) een te lage resolutie. De detectie van zwerfafval m.b.v. luchtbeelden is relatief goedkoop maar ook onnauwkeurig (individuele stukken zwerfafval kunnen niet worden onderscheiden) en bovendien is het niet mogelijk om verschillende typen zwerfafval te onderscheiden. Veldvalidaties blijven dus nodig om de ruimtelijke omvang te vertalen naar volumes of een geschat aantal objecten en voor de identificatie van typen zwerfafval¹.

2.3 Voorstel heldere, robuuste meetmethodiek voor de onderzochte meettechnieken

3. Hoe ziet een heldere, robuuste meetmethodiek voor de verschillende technologische meettechnieken eruit? En hoe kan deze worden geïntegreerd in een structurele zwerfafvalmonitoring (kijkend naar infasering, vervanging en versterking)?

Stationaire spectrometrie

Deze technologie kan op korter termijn de bestaande conventionele brugtellingen vervangen. Hiervoor kan in principe op de huidige locaties gemeten worden en kan een deel van de uitgangspunten uit het huidige meetprotocol overgenomen worden (eventueel verbeterd n.a.v. verdiepende pilots). Gebaseerd op de huidige kennis adviseren we:

- Metingen bovenstrooms en benedenstrooms in alle riviertakken (meetnetwerk conventionele methodiek)
- Camera: Zichtbaar licht, rood/groen/blauw (RGB), Ground sample distance (GSD)<0,5 cm (per brug)
- Camera loodrecht op wateroppervlak

- Uitzoeken hoeveel camera's per brug nodig zijn ten opzichte van de rivierbreedte
- Dagelijks gedurende 20 minuten langstromende water in beeld brengen (gemiddeld iedere 5 seconden een foto)
- Bepaling van aantal items met behulp van een te ontwikkelen automatische detectietechniek
- Resultaten extrapoleren naar gehele rivierbreedte

Voor het uitrollen van deze techniek over alle grote rivieren is het noodzakelijk om de ontwikkeling van een geautomatiseerde data-analysetechniek voort te zetten. Hiervoor is het verzamelen van een grote dataset van belang. Benodigde stappen zijn; (1) ontwikkeling en aankoop geschikte camera's, (2) aanvraag dataopslag bij RWS, (3) installeren apparatuur, (4) inwinnen data, (5) ontwikkelen robuuste geautomatiseerde data-analysetechniek, (6) landsdekkend uitrollen.

Niet-stationaire spectrometrie

Deze technologie heeft de potentie om voor en na hoogwater een goed beeld te creëren van de aanwezigheid van zwerfafval op oevers. Met één vlucht kan het gehele stroomgebied van een rivier in kaart worden gebracht, iets wat vanaf de grond onmogelijk is. We adviseren de volgende stappen:

1. Identificatie van locaties van orde grootte vierkante kilometer in alle individuele riviertakken, waar drone monitoring geschikt is: afhankelijk van vegetatie
2. Bepaling meetmomenten: idealiter wordt voorafgaand aan en na een hoogwater een meting uitgevoerd. Zwerfafval op oevers verplaatst zich namelijk vooral tijdens hoogwater

¹ Mogelijk dat in de toekomst met behulp van hoogtemetingen met LIDAR voor en na hoogwaters de dikte van de hotspot en daarmee een volume-inschatting kunnen maken.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

3. Beelden verzamelen: inwinnen van dronebeelden waarbij rekening gehouden moet worden met eventuele vergunningen, weersomstandigheden en bereikbaarheid oever. De voorwaarden waaraan de beelden moeten voldoen zijn: Grondresolutie kleiner dan 0,5 cm, resultaten als TIFF-bestand beschikbaar, oplevering in orthomosaïek
 4. Identificatie zwerfafval: Taggen van objecten op orthomosaïek in GIS-software. Later kan dit werk over worden genomen door een algoritme.
 5. Vergelijking: door de orthomosaïek kan de exacte locatie worden geïdentificeerd. Daardoor is het mogelijk veranderingen te monitoren. Daarnaast kan het nuttig zijn (zeker in de beginfase) om dit type monitoring aan te vullen met oevermetingen door inspecteurs in het veld
- Voor grootschalige inzet is het noodzakelijk om meer onderzoek te doen naar de kwaliteit van deze meettechniek door op verschillende type oevers experimenten uit te voeren. Efficiënt gebruik van deze meettechniek is mogelijk als automatische detectie van objecten verder is ontwikkeld. Uitgangspunt is dat visuele inspectie van foto's vervangen kan worden en dat een vergelijkbare detectiegrens kan worden bereikt als bij de overtellingen. De haalbaarheid van een geschikt beeldherkenningsalgoritme is niet bekend en was geen onderdeel van dit project.

Sonar

De sonar heeft de potentie om structureel tijdreeksen van zwerfafvalconcentraties in de waterkolom te leveren. Dit is niet mogelijk met de netmetingen. Netmetingen geven een momentopname, maar geven wel inzicht in de samenstelling van het zwerfafval in de waterkolom. Met sonar kan dus de tijd en ruimte tussen conventionele netmetingen worden opgevuld. Hiervoor is nodig:

1. Continue horizontale en regelmatige verticale metingen. Combinatie mogelijk van continue metingen van een gedeelte van de waterkolom en regelmatige dwarsdoersnedemetingen, om inzicht te verkrijgen in trends én verdeling van zwerfafval
 2. Bovenstreams en benedenstreams in alle individuele riviertakken (of gebruik huidige ADCP-metingen uitgevoerd door RWS)
 3. Netmetingen gebruiken voor kalibratie van sonarmetingen (verhouding zwerfafval en 'natuurlijk' materiaal in waterkolom)
 4. Dagelijks gedurende 20-minuten langsstromende water in beeld brengen (gemiddeld twee akoestische signalen per seconde)
 5. Bepaling van aantal items met behulp van te ontwikkelen geautomatiseerde data-analysetechniek
 6. Resultaten extrapoleren naar gehele rivierbreedte
- Voor het kunnen uitrollen van deze technologie moet eerst nog een robuuste meettechniek ontwikkeld worden. Hiervoor moet een dataset worden verzameld waarin verschillende variabelen zijn meegenomen zoals afvoeren, perioden en weersomstandigheden. Voor deze dataset moeten sonarmetingen gelijktijdig met netmetingen worden uitgevoerd omdat deze moet worden gebruikt voor het ijken van de sonars. Benodigde stappen zijn; (1) gelijktijdige net- en sonarmetingen pilot, (2) ontwikkelen robuuste geautomatiseerde data-analysetechniek, (3) uitrollen van de meetmethode.

Lucht- en satellietbeelden

Deze technologie heeft de potentie om na hoogwater hotspots van zwerfafval in beeld te brengen:

- Maak na hoogwater luchtbeelden van het gehele riviereengebied (één week tot één maand na de hoogwaterpiek, start met één keer per jaar na hoogwater)

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

- Als binnen één maand na het hoogwater een regulier luchtbeeld wordt ingevlogen is dit voldoende, anders extra luchtbeelden invliegen voor zwerfafvalmonitoring
- Als na een aantal jaren blijkt dat alleen hoogwaters vanaf een bepaalde herhalingstijd (vijf jaar, tien jaar of 100 jaar) significant zwerfafval zichtbaar maken dan kan ervoor gekozen worden om alleen na hoogwaters vanaf deze herhalingstijd luchtbeelden in te vliegen
- Vlieg de luchtbeelden in met een resolutie van 10x10 cm of hoger, gebruik hiervoor een RGB-camera
- Op deze beelden kunnen zwerfafvalhotspots m.b.v. een GIS-programma zoals ArcGIS of QGIS handmatig in kaart worden gebracht.
 - Vanwege het geringe aantal zwerfafvalhotspots in Nederland is het haalbaar om een visuele telling te doen (~2 dagen werk per hoogwater)
- Sla de beelden langjarig op
 - Per vlucht van het hele rivierengebied resulteert dit in ~20GB aan foto's
 - Nadat van een aantal jaren luchtbeelden zijn ingewonnen kan met behulp van Artificiële Intelligentie (AI) mogelijk het proces van identificatie van zwerfafval op luchtbeelden geautomatiseerd worden

3 Methodologie

Dit hoofdstuk beschrijft de stappen die in dit project zijn gezet om te komen tot de resultaten in het vorige hoofdstuk. Daarnaast staat er in dit hoofdstuk een korte introductie om de samenhang tussen de meetmethodieken weer te geven. Deze samenhang wordt verder uitgewerkt in hoofdstuk 8.

3.1 Onderzoeksopzet

Dit onderzoek bouwt verder op de Voorstudie monitoringstechnieken zwerfafval grote rivieren². In die studie werden vier meettechnieken als kansrijk benoemd voor automatische, structurele monitoring van zwerfafval in rivieren. Het huidige onderzoek is gericht op verdere innovatie, en beschouwt in het bijzonder de mogelijke rol die deze vier meettechnieken kunnen spelen bij het in kaart brengen van de hoeveelheden zwerfafval in de Nederlandse rivieren en transporten naar zee.

Hoewel het project voor ieder van de meettechnieken er net iets anders heeft uitgezien zijn in grote lijnen de volgende stappen doorlopen tijdens dit project.

Werkpakket 1

1. Bureaustudie
2. Selectie van de pilotlocaties
3. Uitvoeren pilots
4. Evaluatie moment
5. Klankbordgroep

Werkpakket 2

1. Meetmethodiek ontwikkelen (of stappenplan om daartoe te komen)
2. Integratie van meettechnieken
3. Klankbordgroep

Ieder van deze stappen wordt hierna toegelicht

Bureaustudie

Tijdens de bureaustudie is de beschikbare informatie verzameld over de verschillende meettechnieken. Hierbij is geprobeerd om zo veel mogelijk van de hoofd- en deelonderzoeksvragen die zijn gesteld in de vraagspecificatie van dit project te beantwoorden. De vragen die niet beantwoord konden worden op basis van de beschikbare literatuur zijn als basis gebruikt om de uitvoering van de pilots te sturen.

Selectie van de pilotlocaties

De selectie van de locaties heeft plaatsgevonden op basis van de volgende uitgangspunten:

1. Waar mogelijk wordt er aansluiting gezocht bij lopende handmatige meetmethodieken (oppervlakte, waterkolom en oevers)
2. Waar mogelijk selecteren we locaties waar meerdere meettechnieken getest kunnen worden

² [Voorstudie monitoringstechnieken zwerfafval grote rivieren - Rijkswaterstaat Publicatie Platform \(Rijkswaterstaat.nl\)](#)

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

3. Er is voorkeur voor locaties met een verwachte hoge vervuiling, zodat de meettechniek ook echt kan worden getest
4. Praktische haalbaarheid: is de locatie bereikbaar, zijn vergunningen nodig en kunnen we die verkrijgen?
5. Verdeling over het gehele rivierengebied
6. Voldoende variatie in de fysische eigenschappen van de meetomgeving. (Stroomsnelheid, vegetatie, aanwezigheid brug, steilheid van de oever)

Uitvoeren pilots

Nadat de bureaustudie was afgrond zijn experimenten/pilots voorbereid en uitgevoerd. Per meetmethodiek is de pilot zo opgezet dat naar verwachting de nog openstaande vragen beantwoord kunnen worden na het uitvoeren van de pilot. De pilots zijn waar mogelijk in twee fasen uitgevoerd, zodat het geleerde uit de eerste fase kon worden toegepast in de tweede fase. Daarbij is per meetmethodiek ook op twee verschillende locaties en bij verschillende omstandigheden gemeten of getest. De pilots waren gericht op het verzamelen van kennis over inzetbaarheid van de technologie voor structurele monitoring. De verwerking/analyse van data was geen kernactiviteit in dit project en is daarom alleen voor illustratieve doeleinden uitgevoerd. De data van visuele waarnemingen is beschikbaar voor verder analyses en is onder andere ook al gedeeld met een onderzoeksteam aan de TU Delft. De onderzoekers aan de TU Delft gebruiken de beelden voor ontwikkeling van geautomatiseerde beeldherkenningstechnieken van zwerfafval.

Evaluatiemoment

Na het uitvoeren van de pilots en het beoordelen van de meetgegevens heeft met RWS een evaluatiemoment plaatsgevonden. Tijdens dit moment is gezamenlijk gekeken naar de verschillende meettechnieken en is een

afweging gemaakt over zinvolle volgende stappen op weg naar structurele monitoring van zwerfafval in de rivieren.

Eerste stappen richting een meetmethodiek In het tweede deel (Werkpakket 2) van dit project zijn de meetmethodieken nader beschouwd die in het evaluatiemoment als kansrijk zijn beoordeeld. Praktische aanbevelingen zijn gegeven voor de inzet van een meetmethodiek of voor noodzakelijke stappen op weg naar inzetbaarheid. Ook is in deze fase aandacht geschonken aan integratie van de verschillende meettechnieken. Hiervoor is een zwerfafval-transportmodel opgezet dat verschillende soorten metingen met elkaar verbindt. Op basis van het model ontstaat een beter beeld van de drijvende processen achter het zwerfafvaltransport, en het model geeft inzicht in geschikte locaties, frequenties en typen van meettechnieken.

Klankbordgroep

Aan het begin van het project is een klankbordgroep bijeengeweesd waarin diverse stakeholders vanuit RWS (regio's, Centrale Informatie Voorziening (CIV), Deltares, etc.) zijn aangesloten. In deze sessie is het plan voorgelegd en verzocht om feedback. De input vanuit de klankbordgroep is verwerkt in het plan van aanpak.

Na het uitvoeren van de pilots is een tweede klankbordgroepsessie gehouden om terug te koppelen wat de resultaten zijn uit de pilots. In die sessie is input gevraagd op de interpretatie van de opgehaalde data, en over de integratie van de verschillende pilots. De feedback van deze sessie is verwerkt in dit eindrapport.

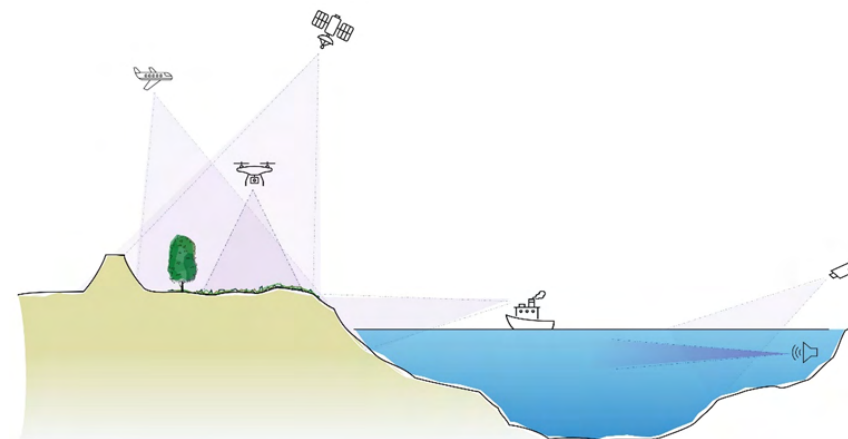
3.2 Monitoring met meetmethodieken

Binnen dit project zijn vier meettechnieken beschouwd, te weten:

- Stationaire spectrometrie
- Niet stationaire spectrometrie
- Sonar
- Lucht- en satellietbeelden

De vier meetmethodieken bieden verschillende mogelijkheden voor het observeren van zwerfafval. Om uiteindelijk een afgewogen beoordeling te kunnen maken over geschiktheid en potentie voor inzet en verdere ontwikkeling van de meetmethodieken gebruiken wij een geharmoniseerde aanpak voor de pilots, die onderlinge vergelijkingen en identificatie van kansen en lacunes mogelijk maakt. We haken daarbij zoveel mogelijk aan bij de 'Roadmap zwerfafval'³ van RWS (van Emmerik, T., & Vriend, P. 2021) waarin is beschreven welke onderdelen van zwerfafvalstromen in de Nederlands rivieren beter in beeld gebracht moeten worden, welke mogelijkheden daartoe bestaan en welke activiteiten al lopen.

De meetmethodieken richten zich op verschillende delen van de rivier, in Figuur 3.1 is dat schematisch weergegeven. De natte, stromende delen van de rivier zijn het best te observeren met statische meettechnieken: stationaire camera's voor observatie van het voorbijstromende wateroppervlak en sonar voor detectie van getransporteerd zwerfafval dieper in de waterkolom. Detectie van 'stilliggend' zwerfafval op de oevers of in de uiterwaarden vraagt om een grotere ruimtelijke dekking en is daarom beter te observeren met niet-stationaire camera's (vanaf drones, vaartuig) of met satelliet- of luchtbeelden.



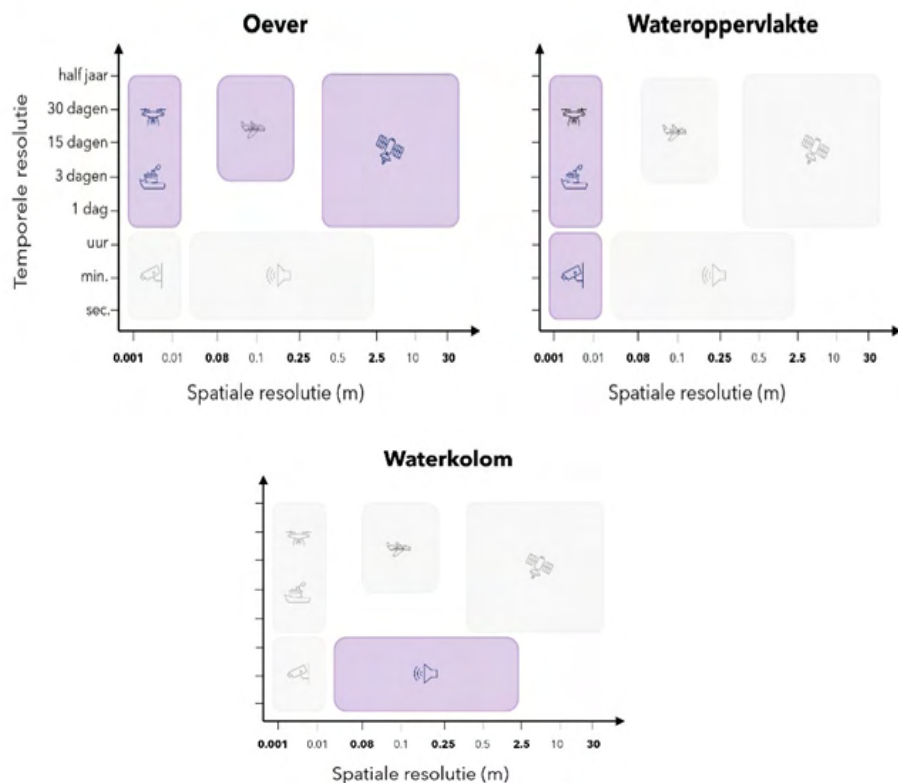
Figuur 3.1 Meetmethodieken om zwerfafval te detecteren richten zich op verschillende delen in en langs de rivieren

Getransporteerd zwerfafval in de waterkolom vraagt om een hogere monitoringsfrequentie dan stilliggend zwerfafval. Observaties van verschillende delen van de rivier dienen naast specifieke ruimteschalen dus ook plaats te vinden op specifieke tijdschalen. In Figuur 3.2 is samengevat hoe de verschillende meettechnieken gekoppeld zijn aan geschikte ruimte- en tijdschalen. Ook is weergegeven hoe dit doorwerkt naar observaties in verschillende delen van de rivier (oever, wateroppervlak, waterkolom). Merk op dat in Figuur 3.2 bij 'wateroppervlakte' ook de niet-stationaire camera's zijn genoemd. Het betreft hier de stilliggende wateren waar hotspots kunnen optreden (in plassen of andere stromingsluwe delen van de rivier).

³ [Routekaart Zwerfafvalmonitoring Nederlandse rivieren - Rijkswaterstaat Publicatie Platform \(rws.nl\)](https://www.rws.nl/publicaties/publicatie/routekaart-zwerfafvalmonitoring-nederlandse-rivieren)

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur 3.2 Geschikte technologieën voor detectie van zwerfafval in verschillende delen van de rivier

3.3 Beoordeling van meettechnieken

In de beoordeling van de meettechnieken is gekeken naar de volgende aspecten:

- Betrouwbaarheid: is het resultaat van de meting vergelijkbaar met het resultaat van een veldmetingen⁴?
- Uitvoerbaarheid: Hoe veilig kun je de meettechniek toepassen? Is iedere locatie altijd beschikbaar? Is het mogelijk het hele jaar door te meten?
- Complexiteit analyse: Hoe eenvoudig is de meetdata te interpreteren en te analyseren?
- Potentie automatisering: In hoeverre is de meettechniek geschikt om te automatiseren en zijn de beelden automatisch te interpreteren?
- Kosten materieel: kosten meetopstelling, energiegebruik, benodigheden materieel, datahoeveelheid
- Inzet betaald personeel: Hoeveel personen zijn nodig per meting per gebied (let op, vergeet sturing van veldwerkers niet)?
- Precisie van monitoring: welk type zwerfafval is te monitoren? Welke resolutie heeft de monitoring?
- Oppervlakte van monitoring: Hoe groot is het gebied wat in één keer kan worden gemonitord?
- Privacy: Hoe verhoudt deze meettechniek zich tot de Algemene verordening gegevensbescherming (AVG)?
- Representatie van de werkelijkheid: Hoe representatief is de meettechniek voor de werkelijke situatie?

⁴ Er moet gerealiseerd worden dat de huidige handmatige veldmetingen niet de absolute waarheid zijn. Deeltjes zwerfafval kunnen ook bij handmatige metingen worden gemist.

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Deze beschouwingen vormen de basis voor een afweging of de meettechnieken geschikt zijn om structureel te worden ingezet voor monitoring van zwerfafval in de Nederlandse rivieren, hoe de meettechnieken de huidige methodieken kunnen aanvullen of vervangen, en hoe deze ook mogelijk in samenhang kunnen functioneren. Daarnaast beschouwen wij ook in hoeverre de meettechniek is ontwikkeld en of er in de toekomst verbeteringen of groei te verwachten is in de bovengenoemde aspecten.

4 Spectrometrie – Stationair

4.1 Introductie

Drijvend zwerfafval wordt tot op heden gemonitord doormiddel van handmatige brugtellingen. Hierbij staat een inspecteur op een brug en die bekijkt gedurende 20 minuten een deel van het rivieroppervlak. Deze conventionele meettechniek is arbeidsintensief en geeft daarom praktische beperkingen aan de frequentie van meetcampagnes. Stationaire camera's hebben de potentie om de handmatige monitoring van drijvend zwerfafval te vervangen. Onderstaand beantwoorden we de deelonderzoeksvragen zoals geformuleerd in de vraagspecificatie en het plan van aanpak. De inzichten die we in dit hoofdstuk rapporteren zijn het resultaat van een bureaustudie en experimenten in het veld (zie Bijlage 1).

4.2 Beantwoorden deelonderzoeksvragen

a. Welke (range in) hoogte en hoek is nodig voor het monitoren van drijvend zwerfafval?

Uit de literatuurstudie blijkt dat observaties in het visuele RGB-spectrum onder loodrechte hoek op het wateroppervlak het meest geschikt zijn voor detectie van zwerfafval (Maharjan et al., 2022; Wolf et al., 2020). Onder deze hoek zijn de schitteringen van zonlicht op de golven tot een minimum beperkt, die anders bij gebruik van geautomatiseerde data-analysetechniek tot een grote hoeveelheid valse zwerfafval detecties kunnen leiden. Zonschitteringen kunnen beperkt worden door in de schaduw van de brug te observeren.

De hoogte van monitoren wordt voornamelijk bepaald door de brughoogte. Deze ligt voor de bruggen over de grote Nederlandse rivieren doorgaans tussen de 10 en 20 meter. Om detectie van zwerfafval van een bepaald

formaat op iedere meetlocatie te waarborgen, kan gezorgd worden voor een vaste resolutie voor iedere locatie. Deze resolutie kan gekwantificeerd worden met de Ground Sample Distance (GSD), een maat voor de afstand tussen twee opeenvolgende pixelcentra op het wateroppervlak. Hoe groter de GSD, hoe lager de ruimtelijke resolutie en hoe minder de zichtbare details. De formule van de GSD is hieronder weergegeven:

$$GSD = \frac{\text{brughoogte} * \text{sensorhoogte en/of} - \text{breedte}}{\text{Brandpuntsafstand} * \text{beeldhoogte en/of} - \text{breedte}}$$

De GSD wordt bepaald door de combinatie van cameraspecificaties (sensorafmetingen, brandpuntsafstand en hoeveelheid pixels) en de meethoogte. Als één soort camera wordt ingezet op alle meetlocaties (zelfde sensorafmetingen en hoeveelheid pixels) kan de brandpuntsafstand worden afgestemd op de brughoogte, zodat de GSD hetzelfde blijft. Een GSD van maximaal 0,5 cm is nodig om objecten vanaf enkele centimeter te detecteren (zie Figuur 4.1).

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur 4.1 Detectie van een wit plastic zwerfafval item vanaf een 12,5 m hoge brug (Erasmusbrug, Rotterdam) op 5.3K film (GoPro Hero 11 camera). De subfiguur links laat detectie dicht bij de brug zien, de subfiguur rechts ver van de brug

b. Welke (range in) ruimtelijke en temporele resolutie is nodig voor het monitoren van drijvend zwerfafval?

Het door één camera in beeld gebrachte oppervlak kan berekend worden aan de hand van de eerdergenoemde meethoogte en camera-specificaties. Afhankelijk van de camera kan een oppervlakte zo'n 25 tot 100 m² worden gemonitord. Het aantal in te zetten camera's is afhankelijk van de ruimtelijke variabiliteit in voorbijkomend zwerfafval. Literatuur laat zien dat de hoeveelheid zwerfafvalitems kan variëren per sectie van de rivier, beïnvloed door onder andere stroomsnelheid en wind (van Emmerik et al., 2019;

Blondel et al., 2022). Het is daarom belangrijk om eerst een zo goed mogelijk beeld te krijgen van de verdeling van items over de dwarsdoorsnede gedurende verschillende condities. Op basis daarvan kan mogelijk een deel van de dwarsdoorsnede worden geselecteerd dat representatief is voor transport over de gehele dwarsdoorsnede.

Momenteel kan de keuze van het aantal camera's het beste gebaseerd worden op de meetmethodiek dat bij RWS in gebruik is voor de visuele brugtellingen. Tijdens vooronderzoek voor dit protocol is geconcludeerd dat buitenste brugsegmenten meer afwijken van het bruggemiddelde aantal items dan de middelste segmenten (Mellink et al., 2022a) en dat op de meeste gemonitorde bruggen van RWS vijf á zes brugsegmenten nodig zijn. Voor de duur van een meetperiode bleek dat de onzekerheid van de resultaten vooral binnen de eerste 20 minuten observeren sterk afneemt (Mellink et al., 2022 a&b). Bij gebruik van camera's kan het tijdsinterval tussen beelden afgesteld worden op de stroomsnelheid en het meetoppervlak, zodat items tijdens de meetperiode niet gemist worden. Bij een in beeld gebracht wateroppervlak van vijf meter lengte (loodrecht op de brug) en een hoge stroomsnelheid van twee m/s zou er elke 2,5 seconden een foto moeten worden gemaakt. Bij een beeldlengte van tien meter en stroomsnelheid 1 m/s is slechts elke tien seconden een foto nodig. Bij een observatierun met een camera zou 20 minuten monitoren daarmee neerkomen op 120 tot 480 foto's. Bij ongeveer 10MB per foto levert dat één tot vijf GB aan data per run per camera, en vijf á 30 GB per dag per bruglocatie.

Het is aan te raden om per brug het aantal camera's en de meetperiode verder te optimaliseren op basis van ruimtelijke en temporele convergentie in zwerfafvaltellingen.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

c. Welke bruggen van RWS komen in aanmerking hiervoor?

Een selectie van bruggen voor monitoren met camera's kan gemaakt worden op basis van verdeling over het rivierstelsel, gemak van montage en aanwezig verkeer op de brug. Het is vanuit het oogpunt van ruimtelijk dekkend onderzoek aan te bevelen om bruggen over de verschillende riviertakken, bovenstrooms en benedenstroom te bemeten. Met name ook boven -en benedenstrooms bij riviersplittingsen om een beeld te krijgen over verdeling van afval over de riviertakken. De huidige monitoringslocaties die gebruikt worden voor de conventionele meetmethodiek staan in figuur 4.2.



Figuur 4.2 Locaties conventionele brugtellingen drijvend zwerfafval

Om een zo goed mogelijk beeld te krijgen van drijvend zwerfafval bij verschillende afvoercondities is het ook praktisch als er onder de brug geen brede uiterwaarden aanwezig zijn. Gemak van montage en verkeer zijn meer praktische overwegingen. Op sommige bruggen is al infrastructuur aanwezig die geschikt is voor het monteren van camera's, wat de kosten drukt en installatie vergemakkelijkt. Uit de principetest komt naar voren dat (vracht)verkeer een negatief effect heeft op beeldkwaliteit. Tijdens korte tests op verschillende bruggen door het land zien we duidelijk wanneer treinen of vrachtwagens langsrijden. De trillingen van de brug zorgen voor vervaging van het beeld en hebben hiermee een negatief effect op de detectie van zwerfafval in rivieren. Het is aan te raden om bruggen met minder zwaar verkeer uit te kiezen voor de monitoring, en/of stabilisatie/demping van camera's toe te passen.

d. Zijn de standaard camera's die aanwezig zijn op de RWS-objecten toereikend voor zwerfafvalmonitoring?

De beelden gemaakt met de camera's van RWS mogen op dit moment niet gebruikt worden in verband met AVG. De beelden van deze camera's worden om deze reden ook niet opgeslagen en zijn daarom niet getest op bruikbaarheid voor zwerfafvaldetectie. We hebben wel informatie ontvangen over de specificaties van de meest gebruikte camera's van RWS.

Voor het monitoren van zwerfafval is een camera nodig met oriëntatie in de buurt van loodrecht op het wateroppervlak en een GSD <0,5 cm. We verwachten dit met de huidige camera's niet behaald wordt. De standaard aanwezige camera's van RWS worden gebruikt voor het in beeld brengen van langskomende scheepvaart.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Hierom zal een groot deel van de tijd materiaal weggegooid moeten worden wegens AVG (schepen mogen niet in het beeld zijn) en zullen de camera's het grootste deel van de tijd tussen 0° en 45° t.o.v. het wateroppervlak georiënteerd zijn. Ook hangen de camera's alleen bij de bewegende bruggdelen. Het in beeld gebrachte deel van de dwarsdoorsnede van de rivier is hierom beperkt. Bovendien is de resolutie van de camera's maar net boven de twee megapixels en is de beeldhoek beperkt (2,3° tot 63,7°). Wel bieden de camera's mogelijkheden wat betreft het beschrijven van het wateroppervlak met infrarood- of witlicht-LED. De eigenschappen van de huidige camera's sluiten niet aan bij wat nodig is voor zwerfafvalmonitoring.

e. Is er naast de standaard camera's van RWS een geschiktere camera voor het monitoren van zwerfafval?

Voor de toepassing zwerfafvalmonitoring is een camera nodig die voldoet aan de volgende criteria; waterdicht, voldoende resolutie (GSD<0.5 cm), stroomvoorziening (zonnepaneel of kabel), timelaps functie (bij voorkeur vanaf afstand instelbaar), geschikte dataopslag/verzending (voldoende geheugen, internetaansluiting via ether of kabel). Er zijn camera's op de markt die hieraan voldoen. In samenwerking met een producent kunnen deze camera's afgesteld worden op de specifieke monitoringslocatie en wensen. Ze functioneren hierna beter dan standaard camera's die niet afgesteld kunnen worden. Er kan in de toekomst eventueel gekozen worden voor een multispectrale camera, als dit n.a.v. aanvullend onderzoek een meerwaarde blijkt (Godijn-Murphy et al., 2022).

f. In hoeverre is het mogelijk om (materiaal)typen met behulp van enkel de camerabeelden te bepalen?

Gebaseerd op resultaten van de veldtest verwachten we dat het mogelijk is om typen zwerfafval te onderscheiden en in te delen in de categorieën zoals

nu in gebruik bij de brugtellingen (zacht, hard, doorzichtig, gekleurd, multilayer en overige materialen). Grote verschillen in kleur en formaat zijn onder de geteste omstandigheden waar te nemen. Een voorbeeld uit een korte analyse uitgevoerd door de TU Delft is te zien in Figuur 4.3. Verdere ontwikkeling van deze Artificiële Intelligentie (AI) kan inzicht bieden in de mogelijkheden voor itemherkenning.



Figuur 4.3: Eerste resultaten uit het onderzoek van de TU Delft waarbij AI-technologie is ingezet voor detectie en identificatie van drijvende objecten (uit stationaire camerabeelden vanaf een brug)

Betrouwbaarheid

In principe kan na de keuze voor een bepaalde camera worden getest welke stukken zwerfafval kunnen worden gedetecteerd. Variatie in weersomstandigheden (veel zon, mist, regen, etc.) kunnen er echter voor zorgen dat items gemist worden. Een tweede onzekerheid zit in de AI zelf. Op dit moment zien we nog valse detecties voor o.a. glinsteringen van de zon, vogels en organisch materiaal.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Het specifiek trainen van een AI voor bepaalde camera's en locaties met een grote hoeveelheid beelden zal de betrouwbaarheid van de methodiek substantieel vergroten.

g. Wat zijn de kosten die verbonden zijn aan deze manier van zwerfafvalmonitoring?

De kosten voor deze vorm van monitoring zitten in aanschaf, montage en onderhoud van apparatuur en in verwerken en opslaan van data. Aanschafprijzen van camera's die voldoen aan de eerdergenoemde criteria liggen rond de 2000 EUR. Uitgaande van vijf camera's en een dag montagewerk komt dit uit op zo'n 10.000 tot 12.000 EUR per brug. Verdere kosten bestaan uit onderhoud van apparatuur en dataopslag. Het verwerken van de data zou met een algoritme geautomatiseerd kunnen worden, maar daar is nog wel onderzoek en kalibratie voor nodig.

h. Wat is het minimaal benodigd aantal metingen voordat het representatief bevonden kan worden?

Drijvend zwerfafval wordt meegevoerd met de rivier en de hoeveelheid in een bepaald oppervlak is daarom veranderlijk. Om een beeld te krijgen over zwerfafvalhoeveelheden over perioden van meerdere maanden tot jaren is het gewenst om iedere dag een representatieve meting te doen. Zoals besproken in deelvraag b stellen we voor om per brug voor vijf à zes brugsegmenten dagelijkse observaties van circa 20 minuten te maken. De duur en ruimtelijke verdeling van camera's komt daarmee overeen met de huidige visuele tellingen.

Na het verkrijgen van langere meetreeksen kan een analyse van de benodigde ruimtelijke- en temporele resolutie worden gedaan per brug. Als blijkt dat bij bepaalde locaties al eerder een stabiele flux van zwerfafval wordt

bereikt, dan kan de periode van 20 minuten worden ingekort. Net zo is per brug te bepalen hoeveel camera's voldoende zijn om een representatief beeld van het totale drijvende zwerfafval op het wateroppervlak te verkrijgen.

4.3 Conclusie

• Hoe ver is de technologie?

Het is mogelijk om met bestaande camera's zwerfafval te monitoren. Voordat de technologie grootschalig uitgerold kan worden moet nog een robuuste geautomatiseerde data-analysetechniek ontwikkeld worden. We verwachten dat met goede kwaliteit camera's en AI op termijn een vergelijkbare detectiegraad kan worden bereikt als met de visuele inspecties. De technologie biedt een consistentere systematiek (bijvoorbeeld met betrekking tot kijkhoek en tijdsduur) en kan hiermee de betrouwbaarheid van monitoring vergroten. Handmatige brugtellingen kunnen in de toekomst in principe (zo goed als) vervangen worden met deze technologie. Zolang AI de itemaantallen onder- (te klein) of overschat (bijvoorbeeld door schitteringen) is het waardevol om de visuele tellingen te behouden bij wijze van validatie.

• Welke onderdelen van de rivier kunnen worden gemonitord?

Met deze technologie kunnen macro-objecten aan het wateroppervlak worden gemonitord. In heldere wateren is onder geschikte omstandigheden een diepere blik onder het wateroppervlak mogelijk van enkele centimeters. Het lijkt echter niet realistisch om dit consistent toe te passen wegens veranderlijke omstandigheden.

• Welke ruimte- en tijdschalen zijn mogelijk voor monitoring?

De nodige hoeveelheid beelden is vooral afhankelijk van stroomsnelheid, itemformaat en meetbare wateroppervlakte.

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Als startpunt raden wij aan om per brug met ongeveer vijf camera's dagelijks 20 minuten lang elke vijf tot tien seconden een beeld te maken (volgens het conventionele meetprotocol, maar dan iedere dag i.p.v. maandelijks). Vervolgens wordt dit dagelijks herhaald om continue dag-meetreeksen te verkrijgen.

• **Heeft de meettechniek meerwaarde voor de huidige meetmethodiek**

Ja, de meettechniek verwijdert subjectiviteit uit de metingen en maakt het mogelijk om continue tijdsreeksen op te bouwen.

5 Spectrometrie - Niet-stationair

5.1 Introductie

In dit hoofdstuk rapporteren we onze inzichten over niet-stationaire camera's. De niet-stationaire camera's zijn bedoeld om stilliggend zwerfafval in beeld te brengen, en richten zich daarom op uiterwaarden en oevers (en plassen en geulen in deze gebieden). Waar relevant benoemen we ook de mogelijkheden of beperkingen om bewegend (drijvend) zwerfafval te monitoren.

We beschouwen twee typen niet-stationaire camera's: camera's die loodrecht naar beneden observeren (met gebruik van drones) en camera's die vanaf het water de oever observeren. Oeverobservaties zijn in principe uit te voeren vanaf een boot. Wij hebben echter beide typen observaties uitgevoerd met drones omdat dit tijdens de veldbezoeken praktische voordelen gaf. De camera vanaf de boot is nagebootst met een drone vanuit een vergelijkbaar perspectief naar de oever kijkend.

Onderstaand beantwoorden we de deelonderzoeksvragen zoals geformuleerd in de vraagspecificatie en het plan van aanpak. De antwoorden volgen uit een combinatie van bureaustudie en aanvullend uitgevoerde experimenten (zie bijlage 2 voor een beschrijving van de experimenten). Op vier oevers op verschillende locaties in Nederland is met drones ervaring opgedaan met niet-stationaire camera's.

5.2 Beantwoorden deelonderzoeksvragen

Op dit moment monitort RWS het zwerfafval door visuele inspectie van de hoeveelheid zwerfafval op de oevers. Dit gebeurt ofwel lopend door het

gebied of door zijwaarts naar de oever te kijken vanaf een boot. Met de beantwoording van de deelonderzoeksvragen proberen we te achterhalen of deze handmatige tellingen beter of efficiënter mogelijk zijn met niet-stationaire camera's. We beantwoorden de deelonderzoeksvragen volgens de vraagspecificatie.

a. Welke (range in) hoogte en hoek van de camera is nodig voor het monitoren van drijvend zwerfafval en zwerfafval op de oevers?

De range van hoogtes (of afstanden) waarbinnen het mogelijk is zwerfafval te monitoren hangt net als bij stationaire camera's vanaf een brug af van een aantal aspecten: sensorafmetingen, aspect ratio, brandpuntsafstand van camera en de afstand tot het object. Samen levert dit een Ground Sample Distance (GSD): de afstand tussen twee opeenvolgende pixelcentra gemeten op de grond (of bij het object). Hoe groter de GSD hoe lager de ruimtelijke resolutie en hoe minder de zichtbare details. Een camera met een lagere resolutie, kleinere lens of een lagere brandpuntsafstand moet over het algemeen een kortere afstand tot een object bewaren om een vergelijkbare GSD te behouden ten opzichte van camera's met een hogere kwaliteit. Bovenstaande geldt voor camera's die loodrecht naar beneden observeren als bij camera's die vanaf het water de oever observeren.

Bij de stationaire camera's is voor de detectie van drijvend zwerfafval een GSD van 0,5 cm aanbevolen. Voor stilliggend afval is minimaal dezelfde resolutie nodig voor vergelijkbare detectie van individuele stukken zwerfafval. In het geval van afvalophoppingen (hotspots) kan ook volstaan worden met lagere resolutie.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

In het door ons uitgevoerde experiment (met een drone van het type Matrice 300 RTK) is daarom gevlogen op drie verschillende hoogtes, met als gevolg drie GSD's:

- 36 meter hoogte: 0,5 centimeter/pixel
- 62 meter hoogte: 1,0 centimeter/pixel
- 88 meter hoogte: 1,5 centimeter/pixel

De resultaten hiervan zijn beschikbaar in Bijlage 2.

In het experiment is gebleken dat zwerfafval dat in hogere begroeiing aanwezig is, goed te detecteren is met behulp van beelden vanuit het perspectief van een boot. Zwerfafval dat op de grond ligt is het beste te detecteren met camera's die loodrecht naar beneden kijken. Loodrecht naar beneden kijken heeft daarnaast nog het voordeel dat er weinig tot geen last is van reflecties (van bv. zonlicht of een heldere lucht). Onder een hoek kan dit een probleem zijn, afhankelijk van de zonstand en de ingemeten locatie.

b. Welke (range in) ruimtelijke en temporele resolutie van de camera is nodig voor het monitoren van drijvend zwerfafval en zwerfafval op de oevers?

Ruimtelijke resolutie

Voor detectie van individuele macro voorwerpen en fragmenten groter dan 2,5 cm adviseren wij een minimale GSD van 0,5 cm. Uit onze detecties blijkt dat een te detecteren object ten minste enkele pixels moet bevatten om tot een robuust model voor detectie van zwerfafval te komen. Onderstaand in Figuur 5.1 tonen we zes resultaten met van links naar rechts het beeld van een paars blikje met een GSD van 1,5 cm (hoogte 88 NAP+m), 1,0 cm (hoogte 62 NAP+m) en 0,5 cm (hoogte 36 NAP+m). Bij een resolutie van 0,5 cm zijn kleinere objecten goed te detecteren. Grotere objecten, zoals de gele smileys van 10x10, 30x30 en 50x50 cm, zijn bij alle drie de resoluties goed te herkennen. Dit geldt zowel voor camera's die loodrecht naar beneden observeren als bij camera's die vanaf het water de oever observeren.

Als de detectie van bovenaf wordt uitgevoerd is de kans klein dat mensen herkend kunnen worden op de beelden (gezichten niet in beeld). Zeker in de winter is dit het geval. Als mensen echter op de oevers liggend recreëren is hier wel risico op. Bij het maken van beelden in de wintermaanden is de kans hierop klein. Bij beelden die vanaf de zijkant (boten) worden gemaakt is de kans op herkenning van personen groter omdat men mogelijk direct in de camera kijkt tijdens het wandelen.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur 5.1 Vergelijking van beelden met verschillende resoluties gevlogen op respectievelijk van links naar rechts 88, 62 en 36 meter

Betrouwbare detectie is naast de grootte van het object ook afhankelijk van de kleur van het object ten opzichte van de kleur van de achtergrond. Als zwerfafval kleuren heeft die vergelijkbaar zijn met de omgeving of met natuurlijke materialen, is de resolutie van 0,5 cm niet altijd genoeg om de

aard van het object te herkennen. Onderstaand (Figuur 5.2) geven we een voorbeeld met van links naar rechts: 1,5 cm, 1,0 cm, 0,5 cm en een ter plekke handgenomen foto. Op de foto ter plekke (samen met meetlint) is te zien dat het om een stuk doorzichtig plastic gaat met afmeting van circa 10 cm.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Op de drone foto's met laagste resoluties (de twee linker foto's) is niet met zekerheid te zeggen of het om een steen gaat of om een stuk plastic.



Figuur 5.2 Een plastic object ingemeten met vanaf links naar rechts een camera vanaf 88 meter, een camera vanaf 62 meter, een camera vanaf 36 meter en een ter plekke handgenomen foto

De grootte van een gebied dat redelijkerwijs te monitoren is met niet-stationaire camera's wordt beperkt door de beschikbare data-opslag en dataverwerkingscapaciteit. Bij een gewenste resolutie (GSD) van 0,5 cm levert elk geobserveerd hectare (100x100m) een beeld op van ca. 400 Mb. Bij een vierkante kilometer (1000x1000m) gaat het al om ca. 40 Gb. Met huidige technische middelen lijkt een detectiegebied van orde-grootte vierkante kilometer realistisch.

Temporele resolutie

De kracht van niet-stationaire camera's is dat een groot gebied kan worden afgedekt en dus dat monitoring zich moet richten op het verkrijgen van een betekenisvolle ruimtelijke momentopname van stilliggend zwerfafval. Bij een beschouwing van een geschikte temporele resolutie gaat het om tussenperiodes tussen deze momentopnamen.

- Zwerfafval op oevers en uiterwaarden: zwerfafval kan ophopen op de oever gedurende normale en hoogwatercondities in de rivier, en op de

uiterwaarden gedurende hoogwater gebeurtenissen. Detectie van zwerfafval moet daarom plaatsvinden na recente afname van rivierwaterstanden, bij voorkeur enkele dagen na hoogwater. Daarnaast verwachten we dat detectie van zwerfafval in de winter/lentemaanden effectiever is, doordat er dan minder begroeiing aanwezig is

- Drijvend zwerfafval: Stilliggend drijvend zwerfafval is te verwachten bij kunstwerken (sluizen, stuwen), rondom kribben en in plassen of strangen. Bij meetcampagnes met niet-stationaire camera's wordt daarom aanbevolen om kunstwerken, kribben, plassen en strangen extra aandacht te geven. Hiervoor geldt dezelfde timing als voor oevers en uiterwaarden (bij dalende rivierwaterstanden, na hoogwater)

Voor een mogelijke koppeling tussen afvoercondities in de rivier en opgehoopte zwerfafvalhoeveelheden is het van belang om niet-stationaire observaties in een gebied meermaals te herhalen. Idealiter een meting vóór en na elk hoogwater.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Betrouwbaarheid

Om een eerste beeld te krijgen van de betrouwbaarheid is een experiment uitgevoerd waarin dronemetingen zijn vergeleken met veldtellingen lopend op de oever. De dronemeting geeft een afwijking van ca. 50-100 % ten opzichte van de veldtelling (62 objecten met drone en circa 100 objecten gesignaleerd met veldtelling). Ondanks de afwijking verwachten we dat met deze metingen toch een goede inschatting gemaakt kan worden van de aanwezigheid van zwerfafval. De gegevens van de overschouwen kregen we te laat om nog een vergelijking te kunnen maken.

c. Welke oevers en wateroppervlakken mogen gemonitord worden met behulp van drones (en op welke hoogten mag gevlogen worden) en welke met behulp van vaartuigen?

Vaartuigen mogen in principe op alle locaties ingezet worden zolang ze niet voor anker liggen. Voor monitoringsdoeleinden is het echter niet op alle plekken veilig om te varen bijvoorbeeld door hoge stroomsnelheden of aanwezig verkeer op het water. Drones maken gebruik van het Nederlandse luchtruim en daar zijn enkele regelgevingen voor opgesteld. Drie aspecten leggen beperkingen aan mogelijke vlieglocaties:

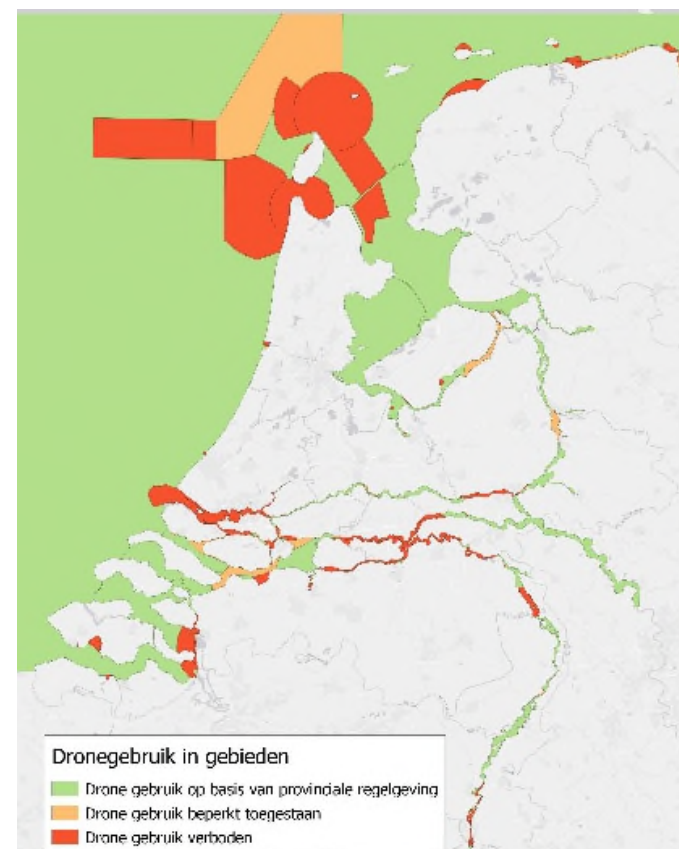
- Luchtruim: verboden om te vliegen, behalve voor calamiteiten.
- Laagvliegroute: beperkt toegestaan om te vliegen
- Natura2000: toegestaan na vergunning.

In Figuur 5.3 tonen we een overzicht waar wel en niet gevlogen mag worden met een drone. Dit figuur is gemaakt op basis van de drie bovengenoemde regels. In Bijlage 2 is een gedetailleerd overzicht van de vliegbeperkingen gegeven.

Het is van belang om te weten dat er verschillende regels gelden voor

verschillende type drones, en dat niet iedereen een drone mag besturen.

Meer informatie hierover is te vinden op: [Regels voor vliegen met drones | Drone | Rijksoverheid.nl](#)



Figuur 5.3 Overzicht van de plaatsen waar wel en niet mag worden gevlogen met drones

d. Wat voor soort camera is het meest geschikt voor deze manier van monitoren?

Voor een drone of vaartuig beschouwen we de volgende type sensoren (camera's): Infrarood, LiDAR⁵ en RGB.

Infrarood (oftewel, een thermische camera): is geschikt voor het detecteren van temperatuurverschillen. De bruikbaarheid van het infraroodsignaal hangt sterk af van de condities.

- Het wateroppervlak heeft over het algemeen een gelijkwaardige temperatuurverdeling. Een drijvend object op het water zal hierdoor kunnen uitlichten. Echter, is het afhankelijk van het moment op de dag of dit object warmer of juist kouder dan de omgeving is. Dit maakt het lastig een geautomatiseerde analyse mogelijk te maken
- Op oevers zijn veel temperatuurverschillen aanwezig, deze kunnen zijn veroorzaakt door flora en fauna, schaduwwerking, kunstwerken, leidingen, menselijk handelen en meer. Een typerende relatieve temperatuur-afdruk van zwerfafval ten opzichte van zijn omgeving is daarom ook niet eenduidig te maken. Detectie van zwerfafval is hierdoor niet eenvoudig op basis van een infrarood signaal

LiDAR: is geschikt voor het detecteren van hoogteverschillen met nauwkeurigheid van enkele cm.

- In wateren zijn de natuurlijke variaties in wateroppervlak (golven) veelal groter dan de meetnauwkeurigheid van LiDAR. LiDAR is daardoor ongeschikt om drijvend zwerfafval te meten
- Bij zwerfafval op de oever of in de uiterwaarden kunnen in principe grotere objecten of zwerfafvalhotspots (>10cm) met LiDAR gedetecteerd

worden. Er is dan ook een referentiemeting zonder zwerfafval nodig. Bij een ruimtelijke resolutie van orde centimeter gaat het per vierkante kilometer om ongeveer 10 GB aan data (zowel voor referentie als voor zwerfafvaldetectie). Er is op basis van LiDAR echter niet vast te stellen om welk type afzetting het gaat (sediment, zwerfafval of iets anders). Daar zijn aanvullende analyses op basis van luchtbeelden of veldonderzoek voor nodig

RGB: met een RGB-camera is het mogelijk objecten te detecteren op basis van vorm en kleur. Wij zien dit als de meest geschikte sensor voor detectie van zwerfafval omdat deze meettechniek de beste mogelijkheden geeft voor validatie van de aard van het gedetecteerde object.

- Een RGB-camera zit standaard op drones gemonteerd en zijn eenvoudig uit breiden naar hogere kwaliteit sensoren. In de markt zijn veel mogelijkheden voor de montage van RGB-camera's. Ook op vaartuigen is het eenvoudig om een RGB-camera te plaatsen
- RWS heeft ervaring met plaatsen van RGB-camera's op schepen en drones

Voor de ontwikkeling van automatische detectie van zwerfafval voor typische condities in Nederland adviseren wij het gebruik van RGB-camera's.

Voor grote zwerfafvalhotspots zou LiDAR meerwaarde kunnen bieden voor de inschatting van de volumes van het zwerfafval. Voor RGB-camera's geldt, net als voor stationaire camera's (zie hoofdstuk 4.2), dat er een camera van voldoende kwaliteit nodig (GSD <0,5 cm) is.

⁵ LiDAR is technisch gezien geen camera maar meer een radar techniek. Omdat deze sensoren ook worden gebruikt onder drones is de LiDAR ook onder het kopje camera's opgenomen.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Er vindt momenteel op verschillende plaatsen wereldwijd onderzoek plaats naar geschikte spectrale karakteristieken van zwerfafval, met name voor plastic. Mogelijk zijn er in de toekomst specifieke combinaties van spectraallijnen bekend om zwerfafval effectiever te detecteren.

e. Wat is de kwaliteit van de monitoring of wordt het beeld van de oever of het wateroppervlak regelmatig geblokkeerd door bijvoorbeeld begroeiing?

Observaties van stilliggend zwerfafval kunnen in principe het beste worden gedaan loodrecht vanaf boven omdat onder een schuinere kijkhoek vegetatie of ander variaties in het landschap het zichtveld kunnen belemmeren. Er zijn echter een aantal situaties waarbij detecties vanaf de zijkant voordelen bieden:

- Bij steile, natuurvriendelijke oevers. Door de begroeiing vangen deze oevers makkelijk drijvend zwerfafval en dat is vanaf boven niet eenvoudig te zien.
- Zwerfafval onder bomen of struiken. Zwerfafval is bij aanwezigheid van een bladerdek soms (gedeeltelijk) onzichtbaar bij een kijkhoek recht vanaf boven
 - Met name bij hogere begroeiing langs de oevers is detectie vanaf het water aan te bevelen omdat dit bij uitstek locaties zijn waar zwerfafval zich kan ophopen.
- Een extra detectie met schuine kijkhoek vergroot het gecombineerde zichtveld (in combinatie met detecties loodrecht vanaf boven) en kan dienen als validatiemiddel voor de automatische detectie van de loodrechte detecties

- Detecties van de zijkant kunnen in combinatie met detecties vanaf boven een indruk geven van de aard en het volume van het zwerfafval.
- Bij regenval of harde wind kan niet met drones gevlogen worden, maar zijn detecties vanaf een boot op het water vermoedelijk nog wel mogelijk.

In het pilot-experiment (zie Bijlage 2) hebben we waargenomen dat in lang gras veel zwerfafval aanwezig kan zijn. Dit is ter plekke niet altijd eenvoudig te detecteren door begroeiing. Onderstaand Figuur 5.4 toont een aantal voorbeelden (met een resolutie van 0,5 cm). Ook hier is te zien dat zwerfafval niet eenvoudig is te detecteren, onder ander als gevolg van schaduw, lichtinval, zichthoek en de begroeiing dat zicht blokkeert. Op basis van het experiment lijkt het relevant om op monitoringslocaties regelmatig lokale tellingen met veldwerkers uit te voeren om een goed beeld te krijgen van de hoeveelheid en typen zwerfafval op deze locaties.

f. In hoeverre is het mogelijk om (materiaal) typen met behulp van enkel de camerabeelden te bepalen?

De basis hiervoor ligt in verschil in kleur, vorm en structuur. Als er genoeg onderscheid zit in kleur en structuur of als de vorm karakteristiek is, dan is het mogelijk dit te onderscheiden. Onderstaande Figuur 5.4 geeft voorbeelden waarbij in dronebeelden nog net wel/net niet visueel is afleiden welke type zwerfafval aanwezig is.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur 5.4 Vier verschillende waarnemingen waarbij het meer of minder duidelijk is wat voor type zwerfval aanwezig is. Links- en rechtsonder is op basis van kleur en vorm waar te nemen dat het om blikjes gaat. Linksboven lijkt om een plastic verpakking te gaan. Rechtsboven is niet goed in te schatten wat voor type zwerfval het is

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

In de subfiguren rechts- en linksonder is waar te nemen op basis van kleur en vorm dat het blikjes zijn. De subfiguur linksboven lijkt op een plasticverpakking. Rechtsboven is niet goed in te schatten wat voor type zwerfafval dit is. Om op basis van de camerabeelden zo goed mogelijk in te schatten wat voor type zwerfafval het is, raden we aan om tenminste met een GSD van 0,5 cm te vliegen (wellicht nog lager). Op algemener niveau is het mogelijk op basis van een combinatie van vorm en kleur in te schatten of het gaat om een hard materiaal (blikjes, bakken, etc.) of om een flexibel materiaal (plastic, papier, etc.). Echter zal dit niet sluitend zijn voor alle OSPAR-categorieën.

g. Wat zijn de kosten die verbonden zitten aan deze manier van zwerfafvalmonitoring?

De kosten hangen af van het in te zetten materieel, het benodigd aantal arbeidsuren om beelden op te halen en het benodigd aantal arbeidsuren om de data te verwerken.

Figuur 5.4 is afkomstig van de meetcampagne in de Loenensche Buitenpolder (zie Bijlage2) waar een gebied van 300 x 100 meter is geïnspecteerd. Hiervoor was het volgende nodig:

- Een drone met een camera met de juiste resolutie
- Een piloot die de drone bestuurt
- Een waarnemer die de data en de omgeving in de gaten houdt

Voor het monitoren van deze locatie was ongeveer twee uur nodig. Deze tijd werd besteed om het gebied te verkennen, herkenningspunten neer te leggen en met de drone te vliegen. Na het vliegen was het nog nodig om de data te verwerken tot een orthomosaïek om zo de exacte locatie te kunnen herleiden.

Voor metingen vanaf bovenaf (loodrechte beelden of kleine invalshoek) komt dit uit op een kostenpost van circa 5 000 EUR/km², inclusief huurkosten van het te gebruiken materiaal. Voor metingen vanaf de het water naar de oever gericht schatten wij circa 500 EUR/km. Bij inwinning van grotere gebieden zijn er optimalisaties mogelijk om de kosten te reduceren.

h. Wat is het minimaal benodigd aantal metingen voordat het representatief bevonden kan worden?

In principe is één meting genoeg voor en na een hoogwater om inzicht te krijgen van het zwerfafval in een gebied langs een rivier. Bij hoge begroeiing langs de oever is een aanvullende meting vanaf het water aan te bevelen.

5.3 Conclusie

Op twee locaties is op verschillende hoogtes de oever in beeld gebracht met behulp van een drone (Loenensche Buitenpolder langs de Waal en bij Borgharen langs de Maas). Na inspectie van de ingewonnen beelden is gebleken dat met een GSD van 0,5 cm een goed beeld verkregen kan worden van zwerfafval dat zichtbaar is loodrecht van boven. In hoeverre zwerfafval ook te categoriseren is met de OSPAR-categorieën hangt af van het weer, de grootte, de kleur en vorm van het object. De verwachting is dat met behulp van drones een goed algemeen beeld te verkrijgen is van zwerfafval op een oever. In hoeverre het representatief is voor de totaalhoeveelheid op die locatie zal moeten blijken uit een vervolgonderzoek waarin in-situ metingen worden vergeleken met drone-metingen op een variëteit aan oevers.

Daarnaast bleek ook zwerfafval aanwezig te zijn in bomen en struiken. Dit zwerfafval was met dronebeelden vanuit het perspectief van een vaartuig beter te zien dan loodrecht vanuit de lucht.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

In de pilot zijn zowel losse beelden ingewonnen als een orthomozaïek. Een orthomozaïek is een samengesteld beeld van de losse foto's. Het voordeel van deze nabewerking is dat de exacte locatie van de beelden bekend zijn, waardoor het ook mogelijk is beelden van verschillende momenten goed te vergelijken en is het mogelijk de mate van zwerfafval goed te documenteren.

Een beperking voor deze meetmethodiek is de hoeveelheid data die via deze technologie wordt verzameld. Dit is zeer belangrijk om mee te nemen in een overweging voor ingebruikname een grootschalige inzet van deze meettechniek. Dit type monitoring creëert veel data en dat moet goed verwerkt en gebruikt kunnen worden om deze monitoring doeltreffend te laten zijn.

• Hoe ver is de technologie?

Een RGB-meting met grondresolutie van 0,5 cm werkt naar behoren bij een loodrechte meting naar beneden. Het is daarnaast mogelijk om gerichte observaties langs een oever te doen vanaf het water. Bijvoorbeeld op een locatie waar bekend is dat veel bomen en struiken aanwezig zijn dicht bij het wateroppervlak. We adviseren deze monitoring vooral in de wintermaanden uit te voeren omdat dan de begroeiing zo min mogelijk aanwezig is.

In de toekomst kan een automatische detectie uitkomst bieden om zwerfafval wat zichtbaar is op deze beelden te detecteren. Op dit moment is de meettechniek nog niet ver genoeg om dat te kunnen doen. Nu zullen de beelden met handwerk beoordeeld moeten worden. Hiervoor wordt een GIS-applicatie aangeraden.

De uitvoerbaarheid en gebruik van deze meettechniek hangt sterk af van de mogelijkheid tot dataopslag en de eenvoud van werken met grote hoeveelheden data. Doordat op hoge ruimtelijke resolutie een groot gebied

wordt ingemeten wordt zeer veel data geproduceerd. Per locatie is in deze pilot 50 GB aan data geproduceerd. Dit zijn metingen op verschillende resoluties met verschillende nabewerkingen. Een orthomozaïek per gebied neemt circa vijf GB ruimte in beslag.

• Welke onderdelen van de rivier kunnen worden gemonitord?

Met niet-stationaire camera's is het effectief om uiterwaarden en oevers te monitoren. Niet-stationaire camera's zijn niet het meest geschikt om bewegend zwerfafval op het wateroppervlak te monitoren, daarvoor zijn stationaire camera's een betere oplossing.

Oevers en uiterwaarden met lage begroeiing kunnen het best worden gemonitord met camera's vanuit de lucht, loodrecht naar beneden. Oevers en uiterwaarden tot 30 m vanaf het water met hogere begroeiing kunnen als extra nog gemonitord worden met camera's vanaf het wateroppervlak. Dit laatste kan leiden tot aanvullende informatie over hoeveelheden zwerfafval.

• Welke ruimte- en tijdschalen zijn mogelijk voor monitoring?

Met een drone is het mogelijk om per dagdeel een gebied van ordegrootte één vierkante kilometer te observeren. Daarna is het nodig batterijen op te laden en data te transporteren vanaf de drone. De kosten schatten we op 5.000 EUR/km². Dit is inclusief het huren van materieel en het verkrijgen van data. Met een GSD van 0,5 cm/pixel is het goed mogelijk om objecten vanaf ongeveer 2,5 cm te detecteren en objecten vanaf ongeveer 5 cm te identificeren in globale klassen.

Uit een eerste vergelijking tussen automatische detectie in luchtbeelden en oevertellingen blijkt dat de technologie ongeveer 50 % van de stuks zwerfafval detecteert.

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

De beste momenten om monitoring uit te voeren zijn voor en na hoogwater. Daarnaast adviseren we om gedurende de wintermaanden te monitoren, om te voorkomen dat bloeiende begroeiing het zwerfafval bedekt. Beperking is dat weersomstandigheden ervoor kunnen zorgen dat niet altijd gevlogen kan worden.

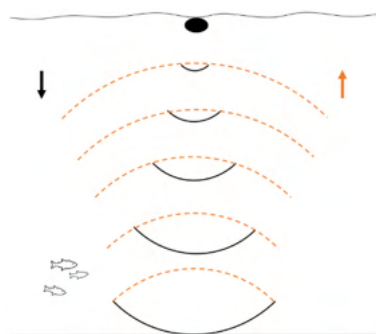
• **Heeft de meettechniek meerwaarde voor de huidige meetmethodiek**

Ja, de meettechniek verwijdert subjectiviteit uit de metingen, heeft minder mankrachten nodig en maakt het mogelijk om in gebieden van orde-grootte één km² reproduceerbare tellingen uit te voeren. Echter, afhankelijk van de methode van veldtellingen (met vrijwilligers of betaalde krachten) is de meettechniek mogelijk wel duurder dan veldtellingen en worden er minder stuks afval geteld.

6 Sonar

6.1 Introductie

In dit hoofdstuk rapporteren we onze inzichten over sonar. Sonar (**S**ound **N**avigation and **R**anging) is een meettechniek die via weerkaatsing van geluidssignalen onder water afstanden inschat of voorwerpen detecteert. Deze vorm van monitoring is in principe ook geschikt voor het in kaart brengen van zwerfafval in de waterkolom. We beschouwen sonars die al in bezit zijn bij RWS en sonars die aanvullende potentie lijken te hebben. Onderstaand beantwoorden we de deelonderzoeksvragen zoals geformuleerd in de vraagspecificatie en het plan van aanpak. De inzichten die we in dit hoofdstuk rapporteren zijn het resultaat van een bureaustudie en experimenten in de praktijk (zie Bijlage 3).



Figuur 6.1 Sonar (Sound Navigation and Ranging) toegepast in een waterkolom. Het apparaat zendt een akoestisch signaal uit (zwart) dat via reflectie teruggekaatst wordt (oranje). Met dit teruggekaatste signaal kunnen schattingen van stroomsnelheden en objectdetectie worden gemaakt

Welk type sonar sensor is het meest geschikt voor het monitoren van zwerfafval in de waterkolom?

Er bestaan veel soorten sonars, die ingezet worden voor verschillende doeleinden. Deze sonars hebben ieder hun voor- en nadelen. In Tabel 6.1 geven we een overzicht van sonars die RWS bezit, aangevuld met sonars die in de toekomst ingezet zouden kunnen worden. Bij de keuze van het type akoestische apparaat is aan de ene kant het detailniveau van detectie, maar aan de andere kant ook toepasbaarheid van de meettechniek van belang. RWS bezit al een aantal soorten akoestische apparaten die regelmatig worden ingezet (ADCP, multibeam, SSS en Echoscope). De implementatiekosten voor zwerfafvaldetectie zijn voor deze sonars relatief laag en eventueel kunnen zelfs bestaande metingen met terugwerkende kracht op aanwezigheid van zwerfafval geanalyseerd worden. Nieuwere, preciezere sonars kunnen echter meer potentie tonen en hiermee interessant zijn voor toekomstig onderzoek (ARIS en Aquascap), waarna RWS eventueel kan besluiten deze sonars aan te schaffen voor zwerfafvalmonitoring.

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Tabel 6.1 Overzicht van aangetoonde en/of verwachte potentie van verschillende soorten sonars, al dan niet in bezit van RWS

Apparaat	Bevindingen/potentie
Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)	<ul style="list-style-type: none"> Gemiddelde resolutie (5-50 cm), smal meetoppervlak (<1m, 2 tot 5 bundels), typische range van 15 m, ontworpen voor stroomsnelheidschattingen in de waterkolom. In bezit van RWS. Er bestaat een meetnetwerk van horizontaal gemonteerde ADCP's die continu een deel van de waterkolom bemeten. Regelmatige metingen met verticaal gemonteerde ADCP's waarmee dwarsdoorsnedes worden gevaren die de gehele waterkolom op een moment in de tijd in beeld brengen. Items zijn detecteerbaar in een bassin en in stilstaand natuurlijk water (Boon et al., 2021; Buschman et al., 2021; Lotcheris et al., 2021). De principetest laat zien dat dit ook geldt net buiten de vaargeul in de Neder-Rijn. Onderscheiden van items is nog niet mogelijk (geen significante relaties tussen object grootte, rotatie en materiaal). In de veldtesten lijkt organisch materiaal een iets lagere reflectie te geven, in de labtest niet. De recent uitgevoerde principetest zal het mogelijk maken om de kalibratie van ADCP-metingen met netmetingen te beschrijven.
Fishfinder	<ul style="list-style-type: none"> Precieze resolutie (<5 cm), gemiddeld meetoppervlak (~1-10 m), ontworpen voor detecties obstakels (vissen of bodem). Niet in bezit van RWS. Items zijn detecteerbaar in een bassin, stilstaand natuurlijk water en een rivier (Broere et al., 2021). Grootte van objecten kan ingeschat worden, maar effecten van stroomsnelheid, oriëntatie en deformatie moeten nog verder worden onderzocht. Onderscheiden van items is nog niet mogelijk. Opslaan van data alleen mogelijk voor geavanceerdere typen fishfinders.
Adaptive Resolution Imaging Sonar (ARIS)	<ul style="list-style-type: none"> Precieze resolutie (<5 cm), gemiddeld meetoppervlak (~1-10 m), ontworpen voor detecties obstakels (vissen of bodem). Niet in bezit van RWS. Items zijn detecteerbaar in stilstaand water (Toro et al., 2019), de meeste items ook in een rivier (Flores et al., 2022). De relatief grote verschillend in gemiddelde reflectiesterkte tussen de verschillende soorten items maakt de potentie voor onderscheiden van items met dit instrument groot. 2D beeld, dus twee instrumenten nodig om zowel oppervlakte als diepte van items in te schatten. Onderzoek naar deze sonars gebuikt als onderwaterdrones zou in de toekomst uitgevoerd kunnen worden.
Side Scan Sonar (SSS)	<ul style="list-style-type: none"> Precieze resolutie (<5 cm), groot meetoppervlak (>10 m), ontworpen voor detecties obstakels (bodem). In bezit van RWS. Items zijn detecteerbaar in stilstaand water (Flores et al., 2022). Potentieel geschikt voor onderscheiden objecten op basis van ruwheid (gebruikt voor bepalen bodemhardheid), vissen zijn bijvoorbeeld ook herkenbaar in data.
Multibeam	<ul style="list-style-type: none"> Grove resolutie (1 m), groot meetoppervlak (>10 m), ontworpen voor detecties obstakels (bodem). In bezit van RWS.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Apparaat	Bevindingen/potentie
	<ul style="list-style-type: none"> Geen uitgevoerd onderzoek. Groot meetoppervlak en in bezit van RWS, echter ook grove resolutie en huidige metingen alleen in stroomrichting. Hiermee lage kans van itemdetectie. Bovendien worden in de nabewerking verstoringen in de waterkolom weggehaald, deze zijn echter juist nodig voor itemdetectie. Potentie voor monitoring over gehele rivierdwarsdoorsnede als (1) apparaat ingesteld wordt op waterkolommeting (Simmons et al., 2017). (2) stationair geplaatst/gevaren wordt op één locatie om zwerfafval transport vast te leggen en (3) resolutie preciezer wordt ingesteld. Items in de waterkolom worden verwijderd voor het huidige gebruik van Multibeams (bepalen bodemdiepte).
Echoscope	<ul style="list-style-type: none"> Precieze resolutie (<5 cm), groot meetoppervlak (>10 m), ontworpen voor detecties obstakels (bodem). In bezit van RWS. Geen uitgevoerd onderzoek. Geen constante meting (alleen handmatig gemaakte 'foto's'), hierom lage potentie voor monitoring.
Aquascap	<ul style="list-style-type: none"> Precieze resolutie (<5 cm), smal meetoppervlak (<1 m, 4 bundels), ontworpen voor sediment in waterkolom. Niet in bezit van RWS. Geen uitgevoerd onderzoek. Potentie voor plasticdetectie wegens meerdere multi-frequentie gebruik en precieze resolutie.

Het is een te vroeg stadium in de ontwikkeling van meetmethodieken om uitsluitel te geven over welke sonar het meest geschikt is voor monitoren van zwerfafval. Een combinatie van een veel ingezet apparaat waarbij monitoring 'low risk, high gain' is (zoals de ADCP) en een apparaat dat potentie heeft voor het gedetailleerder in kaart brengen van soorten items (zoals de ARIS) zou de meeste potentie geven voor de ontwikkeling van een succesvolle meetmethodiek. De apparaten die ontwikkeld zijn voor detectie binnen de waterkolom (zoals stoomsnelheidsmetingen), zijn doorgaans meer geschikt voor zwerfafvaldetectie.

b. Zijn verschillende typen sonar sensoren op basis van de kenmerken complementair aan elkaar?

Verschillende typen sonars kunnen complementair zijn. Sonars die objecten gedetailleerder in beeld brengen en sonars die standaard meer ingezet worden of grotere breedte/diepte in kaart kunnen brengen kunnen gecombineerd worden. Het ene type apparaten kan een nauwkeurigere

schatting te maken van zwerfafvalhoeveelheden en -typen, het andere type is meer gericht op een continue ordegrootteschattingen. In principe kunnen sonars tegelijkertijd ingezet worden. Als de frequentie dusdanig dicht bij elkaar in de buurt ligt dat er ruis ontstaat, moet hooguit wat meer afstand tussen de apparaten worden behouden.

c. Zijn de resultaten afhankelijk van de diepte van de rivier? Zo ja, wat is de (range in) diepte waarvoor deze meettechniek het beste werkt?

Zwerfafval kan op verschillende afstanden van een sonar gedetecteerd worden. De maximale meetbare afstand is verschillend per sonar. De gerapporteerde onderzoeken met fishfinder, ADCP en ARIS zijn succesvol tot 3-5 meter, met voor de eerste twee sonars de verwachting dat grotere afstanden mogelijk zijn (al bewezen voor visdetectie en sedimentmetingen). De precieze range in diepte verschilt per sonartype, maar er kan rekening worden gehouden met een bereik tussen 0,5 m onder het wateroppervlak en vanaf 0,5 m boven de bodem.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Door sonars verticaal, of juist horizontaal te plaatsen kunnen verschillende delen van de waterkolom in kaart worden gebracht.

d. Zijn de resultaten afhankelijk van de richting/hoek van de sensor?

Zo ja, wat is de (range in) richting/hoek van de sensor waarvoor deze meettechniek het beste werkt?

Het principe van zwerfafvaldetectie met sonar verandert naar verwachting niet met de richting/hoek van de sensor. Door een andere richting/hoek te kiezen voor de montage wordt een ander deel van de waterkolom in beeld gebracht. Een combinatie van horizontale en verticale metingen kan inzichten geven in de verdeling van items over de complete dwarsdoorsnede van de rivier.

e. Hoe compleet zijn de meetgegevens: In hoeverre worden de geluidsgolven geblokkeerd door het zwerfafval, waardoor ander zwerfafval in de 'schaduw' van dit zwerfafval niet gedetecteerd wordt?

Dit verschilt per sensor. Onderzoek heeft voor de ADCP uitgewezen dat items achter elkaar gedetecteerd kunnen worden (Boon et al., 2022). Het wordt echter aanbevolen om per sensor validatiestudies met netten en fundamenteel onderzoek uit te voeren om te zien in hoeverre schaduwwerking de resultaten beïnvloedt.

f. In hoeverre is het mogelijk om materiaaltypen met behulp van enkel de reflecties te bepalen? Kan plastic bijvoorbeeld worden onderscheiden van organisch materiaal?

Op dit moment is het nog niet mogelijk om de grote range aan zwerfafval te onderscheiden met behulp van sonarmetingen. Voor de eventuele ontwikkeling van item classificatie is uitgebreider fundamenteel onderzoek nodig. De potentie voor classificatie van items verschilt per sonar, afhankelijk

van eigenschappen (zie tabel 6.1). In tegenstelling tot herkenning van items via visuele methoden, ligt bij sonar waarschijnlijk meer nadruk op verschillen in bijvoorbeeld dichtheid en formaat van objecten. De verwachting is dat met behulp van sommige sonars een grove classificatie mogelijk zal zijn, vergelijkbaar met de ongeveer vijf categorieën die onderscheiden worden tijdens de huidige visuele brugtellingen. Bij andere sonars kan een schatting van de itemsamenstelling worden gemaakt gebaseerd op netmetingen. Het wordt daarom aanbevolen om aanvullend metingen met netten te blijven uitvoeren om de samenstelling van zwerfafval te analyseren.

g. Wat zijn de kosten die verbonden zitten aan deze manier van zwerfafvalmonitoring?

De kosten zijn sterk afhankelijk van de in te zetten soort sonar. Zowel stationaire als varende ADCP-metingen worden al uitgevoerd op verschillende locaties in Nederland (Figuur 6.1), wat de extra kosten van deze sonar voor monitoren van zwerfafval beperkt tot het opslaan en verwerken van data. De multibeam en SSS zouden op een andere manier dan huidig gebruik ingezet moeten worden. Dit betekent dat er kosten zijn voor zowel de inzet van een van de apparaten die RWS bezit, als dataopslag en verwerking. Hetzelfde, plus aanschafkosten geldt voor de andere soorten sonars. Aanschafprijzen van sonars kunnen variëren van zo'n 1.000 EUR tot (ruim) 50.000 EUR. Als sonars stationair worden ingezet zijn de kosten na montage relatief laag, wegens de kleine hoeveelheid vereiste personeelsuren.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur 6.2 Locaties van horizontale continue- en verticale dwarsdoorsnedemetingen in opdracht van RWS, verspreid over de grote Nederlandse rivieren.

h. Wat is het minimaal benodigd aantal metingen voordat het representatief bevonden kan worden?

Zwerfafval in de waterkolom is niet stationair. Het is hierom van belang met regelmaat op meerdere locaties te meten (vergelijkbaar met het drijvende zwerfafval). Gedurende welke tijdsduur per dag en op welke plekken in de dwarsdoorsnede er gemeten zou moeten worden voor een representatief beeld, is nog nauwelijks onderzocht. Vooralsnog kan dit gebaseerd worden op de conclusies die zullen volgen uit de netmetingen die parallel aan dit project worden uitgevoerd bij Tolkamer en werk zoals dat van Blondel et al. (2022). Continue horizontale metingen geven constant inzicht in een beperkt deel van de waterkolom. Net als bij de cameramonitoring van drijvend zwerfafval kan geëxtrapoleerd worden tussen de bemeten segmenten. Varende metingen geven inzicht in de gehele dwarsdoorsnede op een

moment in de tijd. Een combinatie van beide soorten metingen geeft het beste inzicht in de trends én verdeling van zwerfafval in de waterkolom. Een relatief gedetailleerde ruimtelijke en temporele resolutie is het meest geschikt voor zwerfafvaldetectie (< 25 x 25 cm, 2 metingen/s)

6.2 Conclusie

Doel is bepalen van een representatieve concentratie van zwerfafval-objecten bij een specifieke rivierafvoer. ADCP of sonar is daarom in te zetten om in een (deel van) het dwarsprofiel van de rivier de voorbijkomende zwerfafval objecten te tellen.

• Hoe ver is de technologie?

De technologie is nog volop in ontwikkeling. Eerste verkenningen in zowel gecontroleerde als natuurlijke omstandigheden, gecombineerd met nettellingen, laten zien dat de technologie potentie heeft. Er is nog fundamenteel onderzoek nodig om de robuustheid van de methodiek te testen en bijvoorbeeld itemclassificatie te ontwikkelen. Vooralsnog is hierom de aanbeveling om nog regelmatig netmetingen uit te voeren en de ervaring met sonars in parallel verder op te bouwen.

• Welke onderdelen van de rivier kunnen worden gemonitord?

In principe kan de volledige waterkolom (maximale diepte verschillend per sonar), behalve ongeveer 0,5 m boven de bodem en 0,5 m onder het wateroppervlak, gemonitord worden.

• Welke ruimte- en tijdschalen zijn mogelijk voor monitoring?

Netmetingen kunnen wegens logistieke beperkingen niet op grote ruimtelijke en temporele schaal uitgevoerd worden. Sonarmetingen maken dit wel mogelijk.

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Vast gemonteerde sonars kunnen continu een deel van de waterkolom in beeld brengen. Gebaseerd op onderzoek dat laat zien hoe zwerfafval verdeeld is over de waterkolom (Blondel et al., 2022), kunnen deze metingen geëxtrapoleerd worden naar de gehele dwarsdoorsnede. Met varende metingen kan de gehele waterkolom in beeld worden gebracht op een specifiek moment. Dit geeft inzicht in de verdeling van items over de kolom.

- **Heeft de meettechniek meerwaarde voor de huidige meetmethodiek**

Ja, de meettechniek vraagt minder inspanning dan de netmetingen en maakt het mogelijk om continue tijdsreeksen op te bouwen. Voor identificatie van afvaltype zullen netmetingen (voorlopig) nodig blijven.

7 Lucht- en satellietbeelden

7.1 Introductie

In dit hoofdstuk rapporteren we onze inzichten over lucht- en satellietbeelden op basis van een bureaustudie en pilots in de praktijk (zie Bijlage 4). In de pilots is gekeken naar luchtbeelden van de overstromingen op de Maas van juli en augustus 2021, en daarbij zijn 23 zwerfafval-hotspotlocaties geïdentificeerd. De hotspotlocaties zijn vervolgens bekeken op vrij-beschikbare satellietbeelden in het visuele spectrum (RGB). Hiermee is specifiek gekeken naar detectiemogelijkheden bij verschillende ruimtelijke en temporele resoluties. Daarnaast is voor de luchtbeelden van augustus 2021 onderzocht in welke mate hoeveelheden en grote van zwerfafval kunnen worden gedetecteerd door deze te vergelijken met veldtellingen uit die periode (Emmerik et al., 2022, preprint). Onderstaand beantwoorden we de deelonderzoeksvragen zoals geformuleerd in de vraagspecificatie en het Plan van Aanpak.

7.2 Beantwoorden deelonderzoeksvragen

a. Welke (combinatie van) golflengten van het elektromagnetisch spectrum zijn het beste geschikt voor monitoring van zwerfafval? Zijn deze golflengten ook aanwezig in de instrumenten van de inspectievluchten?

Voor de monitoring van zwerfafval worden verschillende golflengtes gebruikt. Veel onderzoek dat is gedaan naar de detectie van zwerfafval is gericht op drijvend zwerfafval in plassen en zeeën, en richt zich op relatief grote hotspots (grote hoeveelheden zwerfafval geconcentreerd op één locatie) van

meer dan tien meter in omvang. Hieronder geven wij een overzicht van studies in verschillende delen van het elektromagnetisch spectrum.

Infrarood Verschillende studies tonen aan dat met vrij-beschikbare satellietdata detectie van een relatief grote drijvende zwerfafvalhotspot (min. 10x30 m) mogelijk is met Near Infrared (NIR) en Short Wave Infrared (SWIR) banden (Themistocleous et al., 2020; Martinez-Vicente et al., 2019; Jakovljevi et al., 2019). In de studie van Themistocleous et al. (2020) is een specifieke combinatie van golflengtes voorgesteld die geschikt is voor detectie van plastic, de Plastic Index (PI):

$PI = B08 / (B08 + B04)$, waarin

B08 = 842 nm (NIR, bandbreedte = 115 nm)

B04 = 665 nm (visible red, bandbreedte = 30 nm)

Radar. Het gebruik van Synthetic Aperture Radar (SAR) satellieten voor zwerfafvaldetectie staat nog in de kinderschoenen. Dit komt met name doordat de combinatie van compositie en grootte van zwerfafval moeilijk detecteerbaar is in het water. Er zijn nog maar weinig testcases beschikbaar voor het gebruik van SAR-data voor zwerfafvaldetectie (Simpson et al., 2022) maar ook hier geldt weer dat deze met name gericht zijn op relatief grote drijvende hotspots.

RGB Detectie van zwerfafval in het visuele spectrum gebruikmakend van de Red-Green-Blue (RGB) biedt vergelijkbare mogelijkheden en beperkingen als eerder genoemd bij niet stationaire spectrometrie (zie Hoofdstuk 4).

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Succesvolle detectie van zwerfafval hangt af van de kleur van het zwerfafval ten opzichte van de omgeving en de grootte van de zwerfafvalhotspot in relatie tot de beeldresolutie. De samenstelling van het zwerfafval bepalen is ook hier een uitdaging, al zijn er pogingen om via (multi)spectrale analyse meer inzicht te krijgen.

In de pilots uit bijlage 4 hebben we gebruikgemaakt van RGB-banden aangezien deze banden in alle beelden beschikbaar waren en dus goed vergeleken konden worden (luchtbeelden juli en augustus 2021 Maas, Sentinel-2 en Landsat-8). Satellietbeelden leveren vaak de optie voor analyse van een breed spectrum aan golflengtes, zowel binnen als buiten het visuele gebied. Voor de ruimtelijk meest gedetailleerde beelden, de luchtbeelden van RWS, zijn echter alleen de RGB-banden beschikbaar.

b. Zijn vrij-verkrijgbare satellietbeelden toereikend (bandbreedtes, temporele en ruimtelijke resolutie, kwaliteit (wolkendek) om de analyse uit te voeren?)

Voor Nederland zijn twee vrij-verkrijgbare satellietbeelden in principe geschikt voor zwerfafvaldetectie. Dit zijn Landsatbeelden en Sentinel-2 beelden. Zij hebben beiden de hiervoor genoemde RGB, NIR en SWIR-banden beschikbaar. Landsat 8 en Landsat 9 beelden zijn ongeveer iedere 15 dagen beschikbaar voor elke plek in Nederland. Sentinel-2 beelden hebben een hogere temporele resolutie en zijn over het algemeen iedere twee of drie dagen beschikbaar. Daarnaast zijn ook de Sentinel-1 beelden (SAR) vrij beschikbaar.

Tabel 7.1 Kenmerken van verschillende vrij verkrijgbare satellieten in Nederland

	Landsat	Sentinel-2	Sentinel-1
Type satelliet	Multispectraal	Multispectraal	SAR
Ruimtelijke resolutie	30 m	10 - 60 m	10 m
Temporele resolutie	~15 dagen	~3 dagen	~3 dagen

Zowel de Landsat als de Sentinel 2 zijn multispectrale satellieten, er zijn echter geen golflengtes beschikbaar die door wolken heen kunnen kijken. Dit betekent dat vanwege bewolking de bruikbare temporele resolutie lager kan zijn dan in Tabel 7.1 aangegeven.

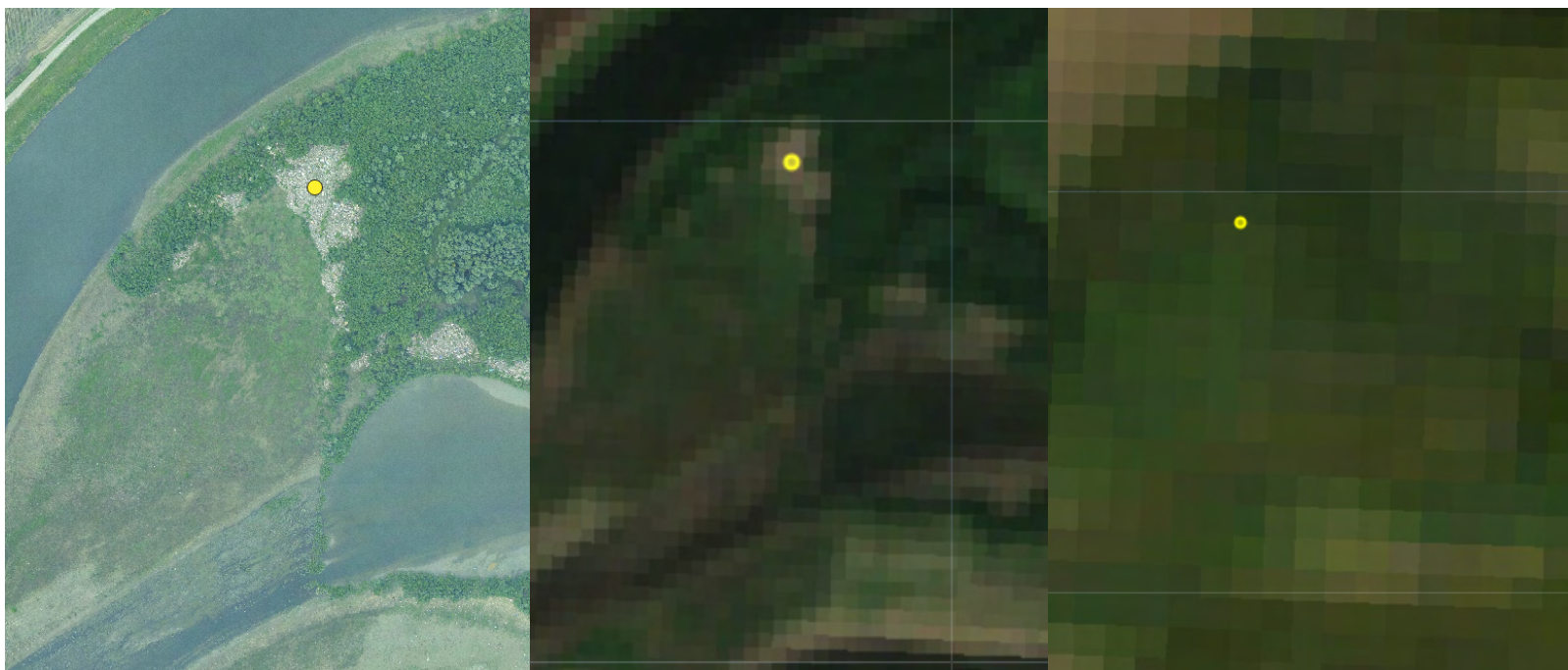
De ruimtelijke resoluties van de satellieten uit Tabel 7.1 zijn 10 m of meer en dat betekent dat enkel zeer grote zwerfafvalhotspots kunnen worden geïdentificeerd. Alleen als deze hotspots voldoende groot zijn (~>30x30 m) zouden ze geïdentificeerd kunnen worden op de RGB-banden van Sentinel-2 of Landsat. Uit de beschouwde pilots blijkt echter dat zelfs een zwerfafvalhotspot van 50x50 m niet goed gedetecteerd kan worden (Figuur 7.1). Door de onregelmatige vorm van de zwerfafvalhotspot bevatten de afzonderlijke pixels een vermenging van gebieden met zwerfafval en zonder zwerfafval, en daardoor is de zwerfafvalhotspot niet meer voldoende onderscheidend ten opzichte van de achtergrond. Wij concluderen dat huidige vrij-beschikbare satellietbeelden niet geschikt zijn voor zwerfafvaldetectie in Nederland.

Naast vrij-beschikbare satellietbeelden bestaat ook de mogelijkheid om beelden af te nemen van commerciële satellieten, waarvan soms hogere resoluties beschikbaar zijn. Zo bieden de multispectrale WorldView-satellieten een ruimtelijke resolutie van 30x30 cm in het visuele bereik.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

De kosten voor een momentopname van het rivierengebied in Nederland zijn circa EUR 200 000 tot 400 000. Hiermee zijn hotspots te detecteren vanaf ongeveer 1 m in grootte.



Figuur 7.1 Beelden van de Maas bij Meerssen in augustus 2021 op luchtbeeld (links), Sentinel-2 beeld (midden) en Landsat-8 beeld (rechts)

c. Zijn luchtbeelden van inspectievluchten toereikend (temporele en ruimtelijke resolutie) om de analyse uit te voeren?

Binnen het programma Beeldmateriaal van de Nederlandse overheid wordt standaard twee keer per jaar een landsdekkende inspectievlucht uitgevoerd. Dit betreft een hoge ruimtelijke resolutie (7,5 cm) vlucht in de winter en een

lage resolutie (25 cm) vlucht in de zomer. Deze beide resoluties zijn voldoende om relatief grote stilliggende zwerfafvalhotspots te identificeren met afmeting van 1 m of meer. Echter, in Nederland komen in reguliere omstandigheden dit soort zwerfafvalhotspots nauwelijks voor.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Uit de pilots in bijlage 4 blijkt dat tijdens en ná een hoogwater dit soort zwerfafvalhotspots zichtbaar zijn. Met name in het bovenstroomse gedeelte van de Maas (de Limburgse Maas) zijn verschillende zwerfafvalhotspots geïdentificeerd op de luchtbeelden die gevlogen zijn in augustus 2021 (resolutie 10x10 cm, ~20 hotspots). Zie de voorbeelden in figuren 7.2 en 7.3. De temporele resolutie van lucht- of satellietbeelden is laag (in de orde van weken tot maanden). Zwerfafvalmonitoring doormiddel van deze beelden is dan ook niet geschikt voor het bepalen van zwerfafvalfluxen in het Nederlandse rivierengebied.

De tweemaal-jaarlijkse inspectievluchten zijn in principe geschikt voor detectie van zwerfafval hotspots, maar de inspectievluchten moeten dan wel het beeld geven van de situatie relatief kort na een hoogwater. Als er tussen hoogwater en inspectievlucht meerdere weken of maanden ligt dan heeft het zwerfafval zich mogelijk verder verspreid (door wind en andere invloeden van buitenaf) of is het opgeruimd en is een duidelijk afgebakende detectie niet meer mogelijk. Het wordt aanbevolen om naast de reguliere inspectievluchten een extra inspectievlucht na hoogwater uit te voeren, en dan gericht op die gebieden die onder water hebben gestaan.

Het hoogwater in de Maas van 2021 was vrij extreem. De herhalingstijd van de veroorzakende regenbui is geschat op ongeveer 350 jaar (Asselman et al., 2022). Het wordt aanbevolen zwerfafvaldetectievluchten initieel gemiddeld eens per jaar uit te voeren na rivierafvoeren met ca. 1 jaar herhalingstijd. Als blijkt dat bij hoogwaters met een herhalingstijd van één per jaar geen hotspots worden gedetecteerd dan kan de zwerfafvaldetectie worden verschoven naar extremere hoogwaters, bijvoorbeeld vanaf herhalingstijd vijf of tien jaar. Wereldwijd wordt geschat dat bij hoogwaters met herhalingstijden

van 1:10 jaar 10x meer mobilisatie van zwerfafval optreedt ten opzichte van normale waterstanden (Emmerik et al., 2022, preprint).

d. Zijn op satelliet- en luchtbeelden hotspots zichtbaar op de oever en/of op het wateroppervlak, en is begroeiing een beperkende factor?

Op zowel de satelliet- als de luchtbeelden zijn hotspots gemakkelijk visueel te detecteren, mits de hotspots meerdere malen groter zijn dan de pixelgrootte van de betreffende beelden. Voor de identificatie van stilliggende hotspots in vegetatie of op de oever kunnen deze beelden gebruikt worden. In de beschouwde pilots (bijlage 4) is duidelijk geworden dat vegetatie veel zwerfafval kan vasthouden waardoor daar vaak een zwerfafvalhotspot ontstaat. Bovendien is een zwerfafvalhotspot omringd door vegetatie makkelijk identificeerbaar vanwege het duidelijke verschil in kleur (groen ten opzichte van wit). Omdat het hoogwater van 2021 zich voordeed in de zomer was relatief veel vegetatie aanwezig in het rivierengebied. Dit heeft het ontstaan van zwerfafvalhotspots mogelijk bevorderd. Voor de detectie van hotspots op de oever of in vegetatie in de rivier is begroeiing dan ook geen beperkende factor maar waarschijnlijk juist een voordeel bij de identificatie van zwerfafval op luchtbeelden.

e. Tot welk detailniveau kan het zwerfafval op de verschillende satelliet- en luchtbeelden gedetecteerd worden?

Afhankelijk van de grootte en de vorm van het zwerfafval kunnen op luchtbeelden hotspots en individuele stukken zwerfafval vanaf ongeveer één meter grootte gedetecteerd worden. Voor individuele objecten is het wel nodig dat meerdere stukken zwerfafval zich bij elkaar bevinden om het losse object ook met genoeg zekerheid als zwerfafval te kunnen identificeren.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur 7.2 Luchtbeelden (10 cm ruimtelijke resolutie) in de Limburgse Maas augustus 2021

Het is niet mogelijk om het aantal stukken zwerfafval te bepalen op basis van luchtbeelden omdat de resolutie te laag is om overlap en kleinere objecten te onderscheiden. Wij hebben een analyse uitgevoerd op de luchtbeelden van augustus 2021 na de overstromingen van de Maas en deze vergeleken met de zwerfafvaltellingen langs de oevers die door de WUR uitgevoerd zijn op 25 locaties vlak na het hoogwater van 2021 (Emmerik et al., 2022, preprint). De tellingen op basis van de luchtbeelden verschillen tot een factor vier met de tellingen in het veld van de WUR. Op sommige locaties waar zwerfafval geteld is in het veld hebben wij zelfs geen zwerfafval kunnen detecteren op de luchtbeelden (op vijf locaties). Wij verwachten dat dit komt omdat relatief klein zwerfafval (<10 cm) niet te zien is op de luchtbeelden met een resolutie van 10x10 cm. Daarnaast is het op sommige locaties lastig te zien of het stenen (bijvoorbeeld bekleding van de dijk) betreft of zwerfafval.

f. Zijn de satelliet- en luchtbeelden complementair aan elkaar? Kan er bijvoorbeeld een gridmap worden opgesteld waarbij de uitkomsten van

de verschillende beeldanalyses over elkaar heen kunnen worden gelegd?

Een eerste vereiste voor combinatie van bronnen is dat de verschillende bronnen in staat zijn om zwerfafval te detecteren. Voor condities in Nederland is dat met vrij-beschikbare satellietdata niet mogelijk. Enkele commerciële satellietbeelden hebben hogere resoluties en zouden dat wel geschikt kunnen zijn, mits geen bewolking aanwezig is. Commerciële satellietbeelden zijn daarmee complementair aan de luchtbeelden van RWS. Beide zijn geschikt voor de identificatie van zwerfafvalhotspots, met name na hoogwater, en kunnen gecombineerd worden in detectie-analyses.

g. Wat zijn de gebieden waar zwerfafval zich volgens de analyses ophoopt? Hebben deze gebieden typische kenmerken?

Zwerfafval hoopt zich met name op tijdens een hoogwater. Door de hoge waterstand en het snelstromende water worden tijdens een hoogwater of overstroming veel objecten meegenomen en getransporteerd naar locaties waar zwerfafval blijft steken of door dalende stroomsnelheid neerslaat.

Typische locaties zijn:

- Langs de vloedlijn (veekranden)
- Langs de oever
- Bij hydraulische kunstwerken of andere rivierkundige werken (dammen, dijken, kribben, sluisen, vistrappen)
- Lokale ophogingen in het landschap (wegen)
- Hoge vegetatie (riet, struiken, bomen)
- Nevengeulen en strangen

In dit project is ook een afvaltransportmodel opgezet om samenhang tussen afvalmetingen te creëren.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Het bleek uit dat model dat afval zich met name ophoopt in oeversecties waar tijdens hoogwater stroming van de hoofdgeul naar de uiterwaard plaatsvindt. Dit zijn met name riviertrajecten met sterke bochten of waar de uiterwaarden langs één of beide oevers abrupt breder worden.



Figuur 7.3 Zwerfafval blijft hangen in vegetatie en aan de oever (Maas juli 2021, tijdens hoogwater)

h. Is het mogelijk om een inschatting te maken van het oppervlak van de zwerfafvalhotspot binnen een bepaald gebied?

Het is mogelijk een inschatting te maken van het oppervlak van de zwerfafvalhotspot in een bepaald gebied door de luchtbeelden in te lezen in een GIS-programma (bijvoorbeeld QGIS en ArcGIS) en daarmee de grootte van de hotspots te bepalen. In combinatie met een dikte-inschatting (expert-inschatting, via LiDAR of uit veldbezoek) kan zo ook een volumeschatting aan het zwerfafval worden gegeven. Dit is echter alleen het geval als het een zwerfafvalhotspot met grote dichtheid aan zwerfafval betreft. Individuele stukken zwerfafval zijn lastig te identificeren (zie ook het antwoord op vraag e. hierboven).

i. In hoeverre is het mogelijk om met de analyses van satelliet- en luchtbeelden een inschatting te maken van (de verhouding van) de (materiaal)typen in de zwerfafvalhotspot?

Het is met huidige meettechnieken nog niet mogelijk om met satelliet- of luchtbeelden een inschatting te maken van de (verhouding van) de materiaaltypen in de zwerfafvalhotspot.

Soms is het wel mogelijk om een kwalitatief beeld te geven van de hoeveelheid organisch materiaal in de zwerfafvalhotspot op basis van kleur en vorm van objecten (groen en veel staafvormen wat duidt op takken/bomen). In enkele gevallen kunnen grote individuele objecten worden geïdentificeerd (objecten groter dan enkele meters, bijvoorbeeld een caravan). Echter, in zijn algemeenheid is een luchtbeeld met een resolutie van 7,5 tot 25 centimeter te grof om specifieke materiaaltypen te onderscheiden. Dit is in nog grotere mate het geval bij satellietbeelden.

Als met commerciële satellieten met hoge ruimtelijk resolutie wordt gewerkt (bijvoorbeeld WorldView met resolutie 30 cm) óf met camera's aan vliegtuigen waarbij bijvoorbeeld NIR en SWIR-banden worden ingewonnen is er potentie om meer inzicht te krijgen in de samenstelling van de zwerfafvalhotspot via spectrale analyse (zie vraag a). Daarnaast zouden na detectie van hotspots op de luchtbeelden specifiek drones of veldtellingen ingezet kunnen worden om de (verhouding van) de materialen in de zwerfafvalhotspot te bepalen. Het voordeel van eerst de hotspots in beeld brengen met luchtbeelden is dat drone-detecties of veldtellingen gericht en dus efficiënter kunnen worden ingezet. Bovendien zijn luchtbeelden nauwelijks privacygevoelig vanwege de lage resolutie (gezichten/personen kunnen er niet op herkend worden).

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

j. Wat zijn de kosten die verbonden zijn aan deze manier van zwerfafvalmonitoring?

Op dit moment vliegt RWS twee keer per jaar luchtbeelden in. De informatie uit deze luchtbeelden kan direct gebruikt worden voor monitoring van zwerfafvalhotspots. Echter, als deze luchtbeelden niet vlak na een hoogwater of overstroming worden gevlogen (binnen -1 maand) is de kans groot dat niet veel zwerfafvalhotspots worden gevonden. Wij raden daarom aan om na een hoogwater een extra keer luchtbeelden op hoge ruimtelijke resolutie (7,5 of 10 cm) in te winnen van het door hoogwater getroffen rivierengebied. Na een aantal hoogwaters in verschillende seizoenen kunnen hieruit conclusies getrokken worden op welke locaties tijdens hoogwater vaak zwerfafvalhoppingen ontstaan en of er trends in zwerfafvalhoeveelheden zijn. Ook kan dan inzicht worden verkregen vanaf welke terugkeertijden van hoogwaters zwerfafvalhotspots ontstaan langs de Nederlandse rivieren.

De geschatte kosten per hoogwater zijn (ongeveer één keer per jaar):

- Het laten vliegen van een vliegtuig over het rivierengebied - kosten EUR 30.000,00 (alleen de Maas, persoonlijke communicatie RWS), inschatting voor het gehele rivierengebied - EUR 50 000 tot EUR 80.000,00
- Detectie van hotspots (visueel) - kosten ongeveer EUR 3.000,00 per keer (1 persoon 2 à 2,5 dag werk)

Het opslaan van luchtbeelden na een hoogwater van het gehele rivierengebied neemt ongeveer 20 GB aan data in beslag. Wij raden aan om de beelden langjarig op te slaan om in de toekomst automatische analyse met behulp van AI mogelijk te maken. Voor het voeden van de algoritmes is een grote hoeveelheid gelabelde data nodig. Dit komt ook doordat de

hotspots veel verschillende karakteristieken hebben (hoge dichtheid, lage dichtheid, met en zonder veel organisch materiaal etc.) waardoor de hotspots door AI lastig te detecteren zijn.

7.3 Conclusie

Het doel is om te bepalen wat een representatieve hoeveelheid zwerfafvalobjecten in de uiterwaarden en oeverzones voor het gehele rivierengebied is, na recent optreden van een overstroming met een hoge afvoer. De methodiek geeft een schatting van ruimtelijke omvang van hotspots en deze kunnen vertaald worden naar volumes of een geschat aantal objecten op basis van veldvalidaties. Dit is mogelijk met hoge ruimtelijke resolutie luchtbeelden (tot tien cm) en mogelijk ook met minder hoge ruimtelijke resolutie luchtbeelden of hoge ruimtelijke resolutie commerciële satellietdata (25 tot 30 cm resolutie). Met vrij beschikbare satellietdata is het met de huidige ruimtelijke resolutie (vanaf tien meter) niet mogelijk om zwerfafval hotspots in Nederland te detecteren.

• Hoe ver is de technologie?

- Satellietbeelden en luchtbeelden zijn geschikt voor het detecteren van grote hotspots met een grootte vanaf enkele meters. In Nederland doen deze zich met name voor na hoogwater, en zijn dan na het wegtrekken van het water zichtbaar als residu in de uiterwaarden en langs de oevers. Detecties langs de Maas tonen aan dat door de hoge ruimtelijke resolutie RGB-luchtbeelden goed in staat zijn om visueel in Nederlandse uiterwaarden hotspots te detecteren na een hoogwater
- Aanvullende veldmetingen zijn nodig om omvang van hotspots te kunnen vertalen naar volumes of aantallen objecten. Bovendien zijn veldmetingen ook nodig om de samenstelling van het zwerfafval te bepalen

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

- Als vrij-beschikbare satellietbeelden in de toekomst een voldoende hoge ruimtelijke resolutie hebben (< 25 cm) dan kunnen deze mogelijk de functie van de luchtbeelden vervangen. Dan zou ook gebruik kunnen worden gemaakt van andere spectrale banden zoals NIR en SWIR. Dit zou ook kunnen door andere camera's onder de vliegtuigen te hangen. Deze camera's zijn echter nog erg duur en de analysetechnieken met voorgenoemde banden zijn nog niet in een TRL-fase dat het direct toegepast kan worden door RWS
- **Welke onderdelen van de rivier kunnen worden gemonitord?**
Met behulp van luchtbeelden kunnen stilliggende hotspots worden gemonitord aan het wateroppervlak, langs de oevers in vegetatie of in uiterwaarden, na wegtrekken van hoogwater.
- **Welke ruimte- en tijdschalen zijn mogelijk voor monitoring?**
 - Door de lage temporele frequentie en ruimtelijke resolutie is de meettechniek met name goed inzetbaar voor het monitoren van hotspots van zwerfafval op een grote ruimtelijke schaal (heel Nederland bijvoorbeeld) en als een momentopname. Het automatisch detecteren van zwerfafval met behulp van AI zou uitkomst kunnen bieden maar dit is voor luchtbeelden nog niet ontwikkeld. Bovendien vereist dit in eerste instantie veldvalidatie op meerdere locaties voor meerdere jaren
 - Omdat de meerwaarde van deze meettechniek ligt in het detecteren van hotspots van enkele meters of meer is het alleen zinvol om dit te doen na hoogwaters als er kans is op detecteren van hotspots. Een referentiebeeld van vóór het hoogwater is nodig om detecties te valideren (niet nodig bij elk hoogwater)
- Standaard inspectievluchten door RWS vinden twee keer per jaar plaats. Als na een hoogwater (herhalingstijd > 1/jaar) niet binnen enkele weken een vlucht plaatsvindt dan wordt aanbevolen om een extra keer te vliegen. We raden aan om eerst gemiddeld eens per jaar voor het hele door hoogwater getroffen rivierengebied beelden in te winnen. Beelden van commerciële satellieten leveren vergelijkbare ruimtelijke resolutie als de luchtbeelden van RWS en kunnen eventueel dienen als alternatief. Echter, de aanschaf van deze beelden is op dit moment duurder dan het zelf invliegen van luchtbeelden (- EUR 200.000,00 tot EUR 400.000,00 versus EUR 50.000,00 tot EUR 80.000,00). Vereiste is dan wel een lage wolkendichtheid op de beelden
- **Heeft de meettechniek meerwaarde voor de huidige meetmethodiek**
 - Ja, de luchtbeelden, na een hoogwater, hebben meerwaarde voor de huidige meetmethodiek. Door deze luchtbeelden kan geïnventariseerd worden waar hotspots ontstaan en kunnen veldtellingen en het opruimen van zwerfafval gericht in deze gebieden plaatsvinden. Bovendien kan de inventarisatie van de locatie en grootte van deze hotspots bijdragen aan het invullen van een zwerfafvalbalans van Nederland

8 Samenhang van de meettechnieken

Waar we in de voorgaande vier hoofdstukken de (on)mogelijkheden van de aparte meettechnieken hebben verkend zoomen we in dit hoofdstuk uit en bekijken we de meettechnieken in samenhang. Dit was een opdracht vanuit de uitvraag van dit project. Door in samenhang te kijken wordt duidelijk wat iedere meettechniek bijdraagt aan het algehele inzicht in de aanwezigheid van zwerfafval in rivieren. Een gemene deler die alle meettechnieken hebben is de opslag van de data die vrijkomt bij het uitvoeren van de monitoring met de meettechniek. Daarover gaat de volgende paragraaf. Paragrafen 8.2 tot en met 8.4 gaan over het samenvoegen van de data die uit verschillende meettechnieken beschikbaar (gaan) komen tot een integraal beeld van alle zwerfafvalstromen die in de Nederlandse rivieren aanwezig zijn.

8.1 Monitoring en dataverwerking

Een vraag die bij alle meetmethodieken aan bod komt is de wijze van dataopslag en delen van informatie. Dit geldt zowel voor de moderne meetmethodieken met technologieën als voor de conventionele handmatige tellingen.

Om deze vraag te beantwoorden is eerst inzicht en overzicht nodig van de interne systemen bij RWS. Daarna is het nodig te achterhalen op welke manier de informatie gebruikt gaat worden. In de volgende paragrafen gaan wij in op hoe verschillende meettechnieken het beste in combinatie kunnen worden gebruikt. Die beschouwing geeft ook inzicht in het noodzakelijke materieel en in geschikte procedures. Vervolgens is het mogelijk om op verschillende manieren de meetdata effectief toe te spitsen op het gebruik bij RWS. Onderstaand geven we suggesties:

- Ontwikkeling hoeveelheid zwerfafval in de tijd: Met dronebeelden kunnen tellingen worden uitgevoerd in hetzelfde gebied. Ieder jaar voor en na hoogwater. De ingewonnen beelden hoeven niet met exacte gps-data ingewonnen te worden en alleen de resultaten van de tellingen zijn nodig om te bewaren
- Ontwikkeling zwerfafval op exacte locatie: Voor het verkrijgen van gedetailleerde informatie over zwerfafval op één locatie is het nodig om via orthomosaïeken de exacte locatie van de ingewonnen beelden te bewaren. Deze bestanden (GeoTIFF-bestanden) zijn te openen in een GIS-applicatie
- De luchtbeelden die RWS op dit moment inwint worden al opgeslagen en ontsloten op de eigen systemen. De luchtbeelden die extra worden ingewonnen na hoogwater/overstroming zouden op dezelfde manier kunnen worden opgeslagen. De analyse zou in de GIS-programma's die RWS op dit moment al gebruikt kunnen plaatsvinden. Eventueel kunnen de hotspots als shapefile worden opgeslagen. Als verder wordt gegaan met de ontwikkeling van een AI-model voor de identificatie van zwerfafvalhotspots zal hier een eigen vorm van opslag en analyse voor gevonden moeten worden
- Sonardata wordt al verwerkt via de interne systemen van RWS. Nieuwe meettechnieken voor plastic kunnen toegevoegd worden aan de bestaande data-analysetechnieken
- Voor monitoring van het wateroppervlak volstaat het om de beelden via een AI-systeem te laten bekijken waarna alleen het aantal stuks zwerfafval (per type) wordt opgeslagen in een tijdreeks per locatie. De originele beelden kunnen worden verwijderd.

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

- Omdat het AI-systeem de komende jaren waarschijnlijk nog verbeterd kan er ook voor gekozen worden om (een deel van) de beelden van een eerste periode op te slaan zodat die nog eens door het AI-systeem kan worden beoordeeld nadat het systeem beter getraind is

8.2 Combinatie van meettechnieken voor beter begrip van processen

Voor een doelmatige aanpak in monitoring van zwerfafval is het van belang om aan te sturen op vragen die richting geven aan mogelijke oplossingen. In essentie zijn deze:

- Hoe groot is de vervuiling?
 - Hoeveel zwerfafval ligt er in het riviereengebied?
 - Hoeveel zwerfafval gaat er naar zee?
 - Wordt het erger, wordt het beter?
 - Waar liggen de hotspots?
- Wat zijn de belangrijkste bronnen?
 - Wat is de samenstelling van het zwerfafval?
 - Wat zijn de transportroutes?

Om antwoord te geven op deze vragen zijn verschillende informatiebronnen en monitoringstechnieken nodig. Deels kunnen dat handmatige tellingen (oever en brugtellingen en netmetingen) zijn en deels kunnen deze worden aangevuld of vervangen met geavanceerdere technologieën. De essentie is echter dat er een duidelijk beeld ontstaat van de leidende processen. Bijvoorbeeld een massabalans van zwerfafvalstromen die weergeeft waar zwerfafval vandaan komt, hoe het zich verplaatst, waar het zich ophoopt, en hoeveel we verliezen naar zee. Dit kan vervolgens gebruikt worden om de vervuiling effectief aan te pakken. Voor een globale zwerfafvalbalans is de volgende informatie nodig:

1. De zwerfafvalconcentratie in de rivierafvoer (op het wateroppervlak en in de waterkolom) op verschillende locaties.

Inzicht in deze concentraties in de rivierafvoer volgt uit netmetingen, sonar en wateroppervlak-detecties (brugtellingen en stationaire camera's) en is nodig bij verschillende afvoeren en in verschillende riviertakken. Daarnaast zijn er mogelijke lokale bronnen waardoor zwerfafval in het systeem toeneemt, of lokale 'putten' waardoor zwerfafval in het systeem afneemt. Er is dus een schatting nodig van *lokale* invoer en uitvoer van zwerfafval in de hoofdgeul en in de uiterwaard. Zwerfafvalinvoer zou bijvoorbeeld kunnen toenemen nabij stedelijk gebied of op drukbevaren scheepvaartroutes.

2. De locaties en groottes van afzettingen van zwerfafval

Hiervoor is een beeld nodig van het aantal zwerfafval-objecten in de uiterwaard, langs oevers, bij kunstwerken en op de rivierbodem. Dit volgt uit oevertellingen, inzichten van niet-stationaire camera's en lucht/satellietbeelden. Het is van belang dat deze inzichten op verschillende plekken in de rivier (kilometer-vakken) en bij verschillende afvoeren worden opgedaan.

Bovenstaande beschouwingen geven een globaal beeld hoe de verschillende meetmethodieken kunnen bijdragen aan opbouw van een zwerfafvalbalans.

8.3 Conceptueel model voor een zwerfafvalbalans

Op basis van de beschreven noodzaak voor combineren van monitoringsdata hebben wij een eenvoudige massabalans voor zwerfafval opgesteld (Huthoff et al. 2023), zie Figuur 8.1.

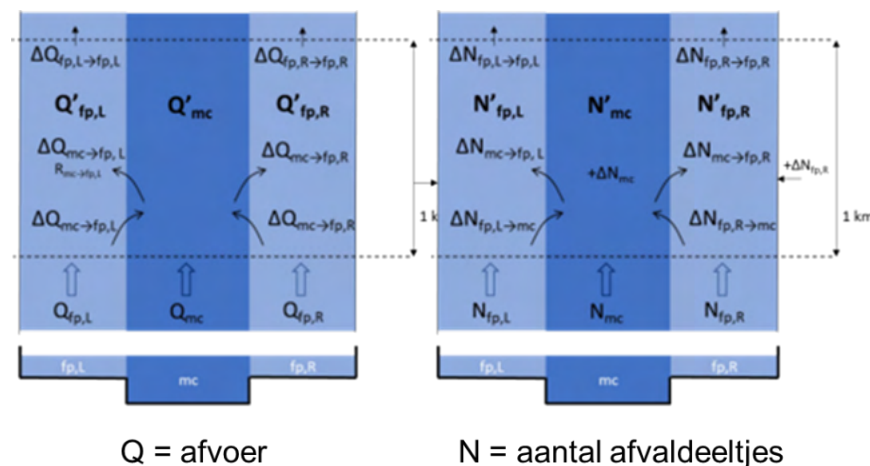
Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Uitgangspunt van deze massabalans is dat in elke riviersectie (hier: één km rivierlengte) de stromingsuitwisselingen tussen de hoofdgeul en de oevers en uiterwaard de drijvende kracht zijn achter zwerfafvalverplaatsingen. In de linker afbeelding van Figuur 8.1 is dit schematisch weergegeven met verschillende bijdragen in 'Q'. Hierbij staat 'mc' voor 'main channel' (hoofdgeul) en 'fp' voor 'floodplain' (oever + uiterwaard). Er wordt expliciet onderscheidt gemaakt tussen uitwisselingen met de linker- en rechteroever ('fp,L' en 'fp,R' respectievelijk). Vervolgens is elke uitwisseling in Q te koppelen aan een verplaatsing van stuks zwerfafval. Per uitwisseling gaan we bovendien uit van een bepaald % aan 'verlies/achterblijven', of ophoping, van stuks zwerfafval. In de volgende paragraaf gaan wij verder in op geschikte parameters voor een dergelijk model.

Een globale zwerfafvalbalans geeft inzicht in de verplaatsingen van zwerfafval en kan bijdragen aan het ontwerpen van oplossingen. Uitgangspunten bij de zwerfafval-massabalans zijn dat (i) zwerfafval-objecten worden vervoerd met de afvoer van de rivier en dat (ii) er via stromingsuitwisseling tussen hoofdgeul en de oevers/uiterwaarden zwerfafval-objecten worden uitgewisseld. Afhankelijk van lokale stroomsnelheden en aanwezige obstructies of vegetatie kan zwerfafval zich dan lokaal ophopen.

Op basis van lokale stromingscondities kan vervolgens per afvoerniveau een beeld worden geschetst hoe het zwerfafval zich langs de rivier verdeelt. Dit geeft duiding aan zwerfafvaldetecties in het veld en geeft inzicht in de verhouding getransporteerd versus afgezet zwerfafval. Met het oog op ontwerp van een meetplan kunnen hiermee gericht de geschikte locaties worden aangewezen voor het meten van getransporteerd zwerfafval (in de hoofdgeul: via ADCP, of via stationaire camera's van drijvende objecten) en

afgezet zwerfafval (in de uiterwaarden/oeverzone: luchtbeelden, niet stationaire camera's).



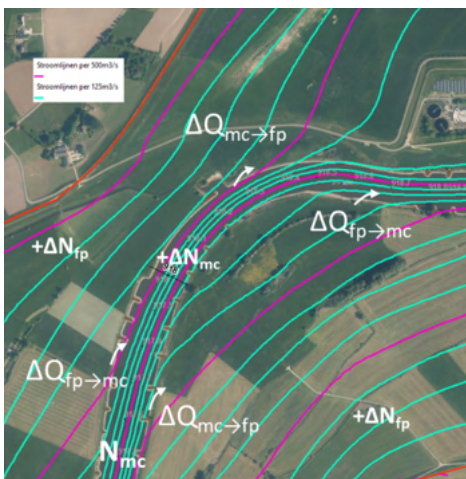
Figuur 8.1 Afvoeruitwisseling binnen een riviertraject (links) en de daaruit volgende zwerfafvalbewegingen (rechts)

Het zwerfafvalbalansmodel verandert bij verschillende rivierafvoeren. Dit omdat afhankelijk van de afvoer de uiterwaarden al dan niet meestromen en stroombanen veranderen bij andere afvoeren. Een stuk zwerfafval zal daarom bij het ene afvoerniveau in de hoofdgeul blijven waar het bij een andere (hogere) afvoer in de uiterwaard zou kunnen belanden. Kennis van hoe de rivier zich gedraagt bij verschillende afvoeren is dan ook essentieel voor het zwerfafvalbalansmodel.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

In Nederland hebben we uitgebreide kennis van onze riviersystemen en zijn er gegevens beschikbaar over de stroombeelden in de rivieren onder verschillende omstandigheden. Zo zijn er voor een reeks aan rivierafvoeren modelberekeningen (2D WAQUA) beschikbaar waarin de uitwisseling van stroming tussen hoofdgeul en uiterwaard gedetailleerd wordt weergegeven. Een voorbeeld van dergelijke modelberekeningen is te zien in Figuur 8.2 voor een deeltraject op de Maas. De blauwe en paarse lijnen geven stroombanen weer voor een specifiek afvoerniveau in de rivier. Aangezien zwerfafval door het rivierwater getransporteerd wordt kan met deze modellen een inschatting worden gemaakt van de uitwisseling van zwerfafval tussen de hoofdgeul en de uiterwaard én van mogelijke hotspotlocaties.



Figuur 8.2 Stroomlijnen in een deel van de Maas, afkomstig uit 2D Waqua-berekeningen bij een scenario met hoogwaterafvoer. Stromingsuitwisseling (Q) tussen riviersecties (mc = main channel, fp = floodplain) drijft van zwerfafvalverplaatsingen (N)

8.4 Mechanistisch zwerfafval transportmodel

De principes zoals beschreven in voorgaande paragraaf hebben wij vertaald in een eenvoudig rekenmodel dat inzicht geeft in afvalstromen bij een specifiek afvoerniveau. Daarbij gelden de volgende aannames:

- De rivier is opgeknipt in riviertrajecten van één km
 - Wij onderscheiden drie secties per riviertraject: linkeroever, hoofdgeul en rechteroever
- Aan de bovenrand van het model wordt een invoer van een aantal stuks zwerfafval opgelegd
 - Een gepaste waarde volgt uit stationaire observaties van wateroppervlak (camera's) en observaties in waterkolom (sonar)
- Per riviertraject en per sectie is er ruimte voor een lokale toe-of afname in stuks zwerfafval
 - Dit representeert lokale toevoer of onttrekking van zwerfafval in het systeem, bijvoorbeeld gerelateerd aan aanwezigheid van steden, bruggen, scheepvaart, et cetera
 - Een gepaste waarde zou kunnen volgen uit monitoringsactiviteiten tijdens situaties waarbij waterbewegingen van de rivier geen rol spelen
- Per stromings- en zwerfafval-uitwisseling wordt uitgegaan van een % retentie: de hoeveelheid stuks zwerfafval in de stroming die lokaal achterblijven (ophopen)
 - Uitgangspunt is dat er in de oever en uiterwaard meer stuks zwerfafval achterblijven dan in de hoofdgeul. Dit vanwege de kleinere stromingsdiepte en de grotere aanwezigheid van obstakels (kribben, vegetatie, et cetera)

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

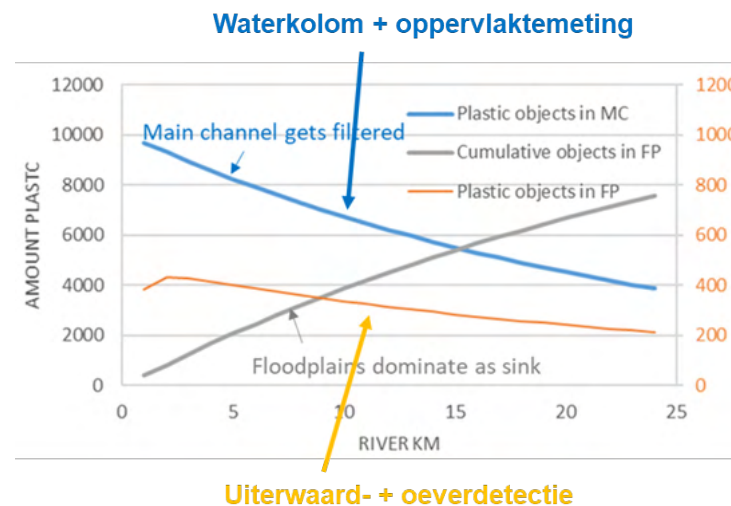
- Retentiewaarden zouden gekoppeld kunnen worden aan de plaatselijke hydraulische ruwheid (koppeling met vegetatietypen of andere aanwezige landbedekkingen)

Het model berekent vervolgens op basis van de stromingsuitwisselingen en de retentiefactoren per riviersectie en per riviertraject hoeveel stuks zwerfafval er achterblijven en hoeveel stuks zwerfafval ernaar benedenstrooms worden getransporteerd. De rekenresultaten kunnen vervolgens vergeleken worden met metingen in het veld:

- Metingen van stuks zwerfafval in de stroming van de hoofdgeul: van de waterkolom met sonar en aan het wateroppervlak met stationaire camera's (of uit netmetingen en brugtellingen)
- Metingen in de oevers/uiterwaarden: met niet-stationaire camera's en met luchtbeelden (of veldtellingen)

De vergelijking tussen veldmetingen en rekenresultaten laten toe dat de gebruikte %-retentiefactoren beter afgeregeld worden. Het model geeft vervolgens inzicht in zwerfafvalprocessen tussen de gemonitorde locaties. Figuur 8.3 geeft een voorbeeld van de werking van het model voor een hypothetisch riviertraject van 25 km. Er is hierbij uitgegaan van een instroom van 10.000 stuks zwerfafval aan de bovenrand van het model, en een lokale toename van 75 stuks zwerfafval per km riviertraject (25 stuks zwerfafval in elke uiterwaard en 25 stuks zwerfafval in de hoofdgeul). Vervolgens is aangenomen dat er per km 20 % stroming wordt uitgewisseld tussen hoofdgeul en uiterwaarden en dat in de meegevoerde stukken zwerfafval 80% achterblijft als de stroming gaat van hoofdgeul naar uiterwaard en 20 % als de stroming gaat van uiterwaard naar hoofdgeul. In Figuur 8.3 is te zien hoe de afvalhoeveelheden zich verplaatsen in de rivier. De blauwe lijn geeft

de hoeveelheden zwerfafval in de hoofdgeul (main channel). Deze begint bovenstrooms bij 10.000 stuks zwerfafval (zoals opgelegd aan bovenrand) en neemt geleidelijk af naar 4.000 stuks zwerfafval bij 25 km verder benedenstrooms. De cumulatieve hoeveelheden in de oevers/uiterwaarden (floodplains) zijn weergegeven in de grijze lijn en gaan van 0 aan de bovenrand tot bijna 8.000 stuks zwerfafval aan de onderrand. De oranje lijn toont wat er in de uiterwaarden (linker- en rechteroever samen) is opgehoopt. Waarden nemen gestaag af van ongeveer 400 stuks zwerfafval bovenstrooms tot ongeveer 200 stuks zwerfafval benedenstrooms. Het is hier te zien dat bij de gekozen instellingen (in relatie tot waterbewegingen en retentiefactoren) de uiterwaarden effectief als filter werken: zwerfafval wordt aan de hoofdgeul onttrokken en hoopt zich op langs de oevers.

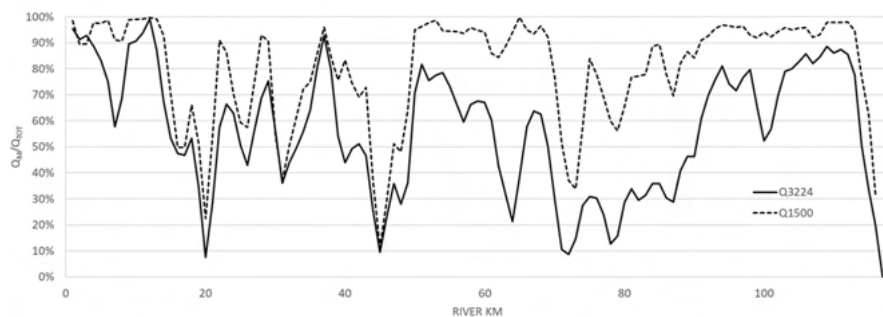


Figuur 8.3 Zwerfafval transportmodel toegepast op een hypothetische rivier van 25 km

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

De volgende stap is om het transportmodel in te richten op een realistische situatie. Wij hebben daarvoor beschikbare modelgegevens voor de Maas gebruikt. Figuur 8.4 toont de afvoerverdelingen tussen de hoofdgeul van de rivier (Q_{mc}) en de gezamenlijke uiterwaarden (Q_{fp}). De weergegeven fractie Q_{mc}/Q_{tot} toont het deel van de stroming dat door de hoofdgeul van de rivier gaat. In dit geval betekent '100 %' dat alle stroming door de hoofdgeul gaat en dat de oevers droog staan. Bij een percentage lager dan 100 % stromen de uiterwaarden mee en gaat het verminderde percentage door de uiterwaarden. De dalen in de grafieken geven dus de locaties waar veel stroming naar de uiterwaarden gaat. Dit is in Figuur 8.4 weergegeven bij twee rivier-afvoerniveaus ($Q = 1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ en $Q = 3\,224\text{ m}^3/\text{s}$).



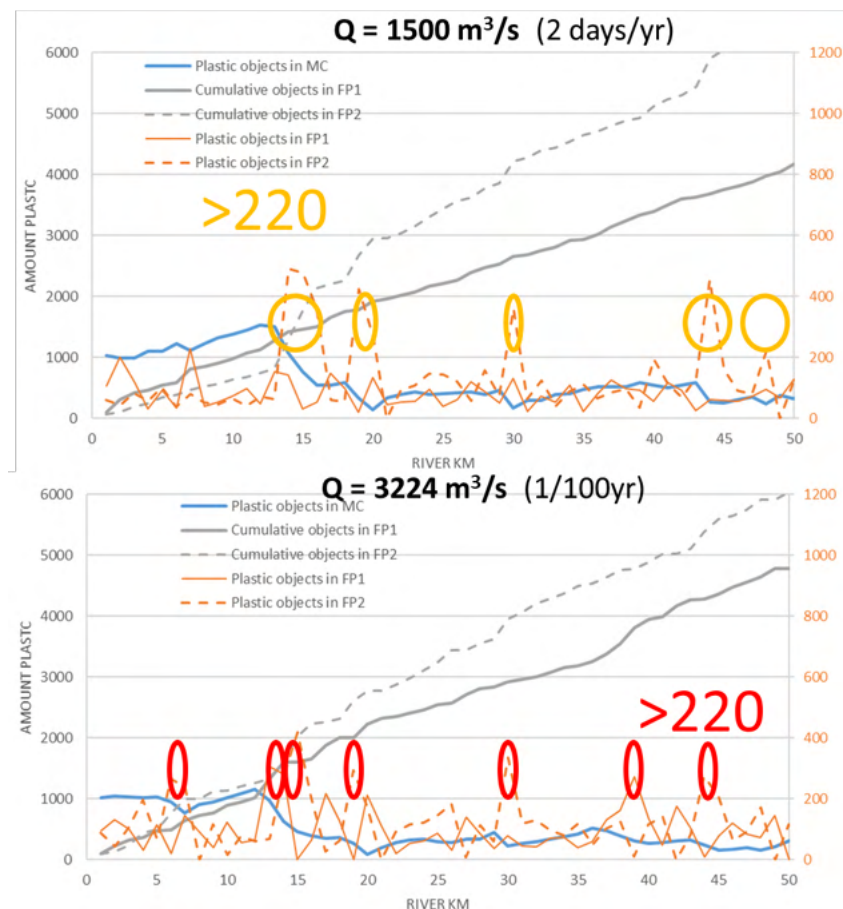
Figuur 8.4 Afvoerverdeling tussen hoofdgeul (Q_{mc}) en totale afvoer ($Q_{tot} = Q_{mc} + Q_{fp}$) voor de Maas bij twee afvoerniveaus (Q_{3224} en Q_{1500}). Resultaten zijn berekend met 2D stromingsmodel Waqua

De afvoerverdelingen uit Figuur 8.4 zijn vervolgens gevoed aan het zwerfafval-transportmodel en dat geeft de resultaten van Figuur 8.5. Hierbij is een bovenstroomse invoer van 1000 stuks zwerfafval gekozen en is een lokale toename van 60 stuks zwerfafval per km opgelegd. Het model geeft

vervolgens weer waar langs de rivier in de uiterwaarden ophopingen worden verwacht (de pieken in de oranje lijnen). De absolute waarden van deze lijnen hebben niet veel betekenis, omdat de invoerhoeveelheden nu nog arbitrair zijn gekozen. Op basis van monitoringsdata zou dit realistischer afgesteld moeten worden. Het blijkt echter dat de locaties van de pieken robuust zijn, dus niet beïnvloed worden door het aantal deeltjes zwerfafval dat wordt ingevoerd en de retentiepercentages, en ook terugkomen bij andere keuzes voor zwerfafval-invoer en retentie-percentages (resultaten hier niet getoond).

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



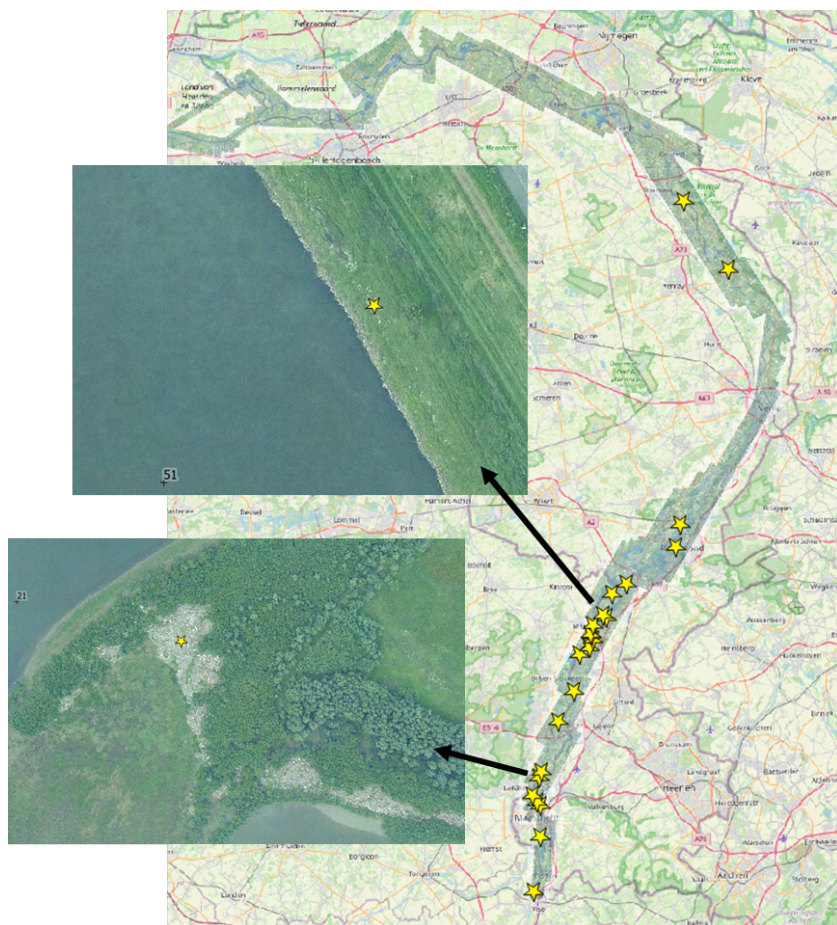
Figuur 8.5 Resultaten van het zwerfafval transportmodel toegepast op de Maas bij twee afvoerniveaus. Boven: bij $Q = 1\,500\text{ m}^3/\text{s}$. Beneden: bij $Q = 3\,224\text{ m}^3/\text{s}$

De volgende stap is om te kijken of deze pieken inderdaad in het veld ophooplocaties, of 'hotspots', blijken. Hiervoor hebben wij in Figuur 8.5 locaties geselecteerd die in het model ophopingen boven (het arbitraire getal van) 220 uitkomen. Deze locaties hebben wij vergeleken met de zwerfafval hotspots die zijn opgetreden ten gevolge van het hoogwater op de Maas van 2021. Dit hoogwater had een piekafvoer dat in de buurt kwam van het $Q=3\,224\text{ m}^3/\text{s}$ scenario. Figuur 8.6 toont in de gele sterretjes waar op luchtfoto's van kort na het hoogwater hotspots of verspreide stuks zwerfafval te zien waren.

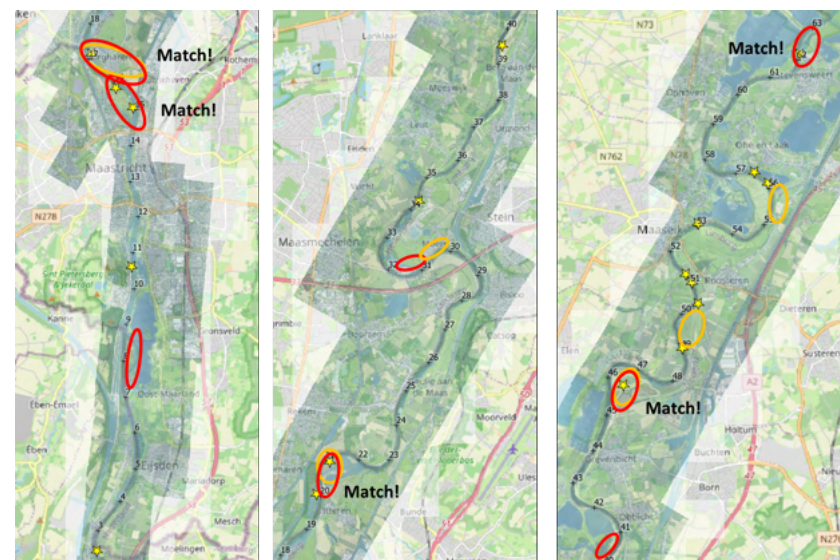
In Figuur 8.7 wordt verder ingezoomd op de hotspotlocaties en tonen wij ook de voorspelde pieken uit Figuur 8.5. Het blijkt dat er over het algemeen een goede overeenkomst is tussen observaties en voorspellingen. De belangrijkste hotspots worden goed voorspeld door het model, er zijn echter ook locaties waar de overeenkomst ontbreekt. Dit kan het gevolg zijn van processen die niet in het model zijn meegenomen (invloed van wind, bochtstroming, lokale obstakels), of omdat zwerfafval tussen de vegetatie niet zichtbaar was of omdat er misschien ook al opruimactiviteiten waren ingezet. Nadere afregeling van het model en een nauwkeuriger studie is nodig om de overeenkomsten en verschillen nader te verklaren en om de significantie van het model t.o.v. tellingen te duiden in verschillende situaties

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur 8.6 Zwerfafval hotspots die te zien waren op luchtbeelden opgenomen kort na het hoogwater op de Maas in 2021 ($Q \sim 3\,224\text{ m}^3/\text{s}$)



Figuur 8.7 Geobserveerde (sterretjes) en voorspelde hotspotlocaties (oranje en rode ellipsen) op de Maas

Deze eerste poging om zwerfafvalbeweging op een mechanistische manier weer te geven lijkt veelbelovend. Meerdere hotspots worden voorspeld (locatie langs rivier en linker- of rechteroever), en afvalhoeveelheden in de rivier en in de oevers worden met elkaar in verband gebracht. Verdere monitoringactiviteiten in de stroming kunnen nu gebruikt worden om de hoeveelheden in de hoofdgeul (blauwe lijn in Figuur 8.5) af te regelen. De oeverstellingen dienen voor validatie en mogelijke afregeling van de pieken in de uiterwaarden (oranje lijnen in Figuur 8.5). Vervolgens is het zinvol om het transportmodel in te zetten voor een grotere reeks aan rivierafvoeren zodat een beter inzicht wordt verkregen hoe zwerfafval zich gedraagt onder verschillende hydrologische omstandigheden.

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Op basis daarvan kan dan ook beter ingeschat worden wat er op jaarbasis in de rivier aan zwerfafval ophoopt en hoeveel er wordt getransporteerd naar zee.

Verder lijkt het zinnig om ook te kijken of zwerfafval dat zich op de bodem van de rivier bevindt meegenomen kan worden in het model. Om dat goed in het model op te nemen zal dit ook in het veld moeten worden gemeten. Dit is op dit moment nog geen onderdeel van de routekaart Zwerfafvalmonitoring in Nederlandse rivieren.

9 Aanbevelingen

In dit hoofdstuk geven wij in paragraaf 9.1 onze aanbevelingen voor de korte termijn weer waar RWS volgens de onderzoekers nú mee moet starten, inclusief benoeming van kosten en projectduur. Deze acties zijn kostenefficiënt ten opzichte van de huidige methode, dan wel nodig om de zwerfafvalmonitoring te vervolmaken. Daarna gaan wij in paragraaf 9.2 in op aanbevelingen voor de toekomst. Omdat de meeste meettechnieken in ontwikkeling zijn is het belangrijk voor RWS om de ontwikkeling van bepaalde technieken en dataverwerking (AI) in de gaten te houden omdat deze op termijn de monitoring mogelijk kunnen vereenvoudigen (kostenefficiëntie verhogen) of verbeteren.

9.1 Belangrijkste aanbevelingen

Wij bevelen aan om de volgende prioritaire acties in gang te zetten:

9.1.1 De procedure voor een centrale dataopslag voor zwerfafval dient in gang gezet te worden

De verschillende metingen van zwerfafval zijn nu nog verspreid over verschillende opslaglocaties. Het bij elkaar brengen van de informatie uit deze metingen op één locatie met een duidelijke indicatie van welke meettechniek de data heeft verzameld, wanneer en door wie kan toekomstige analyses vergemakkelijken (zowel handmatig als met AI). Deze en de bijbehorende infrastructuur voor opslag en delen met derden moet gecreëerd worden via een aanvraag bij CIV.

Kostenschatting: geen out of pocket kosten. Interne procedure bij RWS.

Projectduur: 1 tot 1,5 jaar.

9.1.2 Onderzoek naar operationaliseren van automatische detectie van drijvend zwerfafval vanaf een brug.

Om uiteindelijk op meerdere bruggen in het riviersysteem continue automatische detectie van drijvend zwerfafval te realiseren is als eerste een detailonderzoek nodig bij twee pilotlocaties. We raden aan ruim voor de start van toekomstige pilots contact op te nemen met een cameraproductent voor het ontwikkelen van een geschikte camera (RGB, GSD van 0,5 cm). Verder raden we aan de camera's op ruime afstand van de reling met een loodrechte hoek t.o.v. het water te bevestigen. Het wordt aanbevolen om met meerdere camera's een volledig dwarstransect (haaks op de rivierstroming) te observeren. Te beantwoorden onderzoeksvragen:

- Kunnen we een representatief beeld van de totale zwerfafvalstroom aan het wateroppervlak krijgen?
- Welke tijdsduur is nodig voor een observatie voor een representatief dagelijks beeld?
- Welk tijdstip van de dag is het meest geschikt voor observatie?

Bovenstaande vragen dienen beschouwd te worden bij verschillende rivierafvoeren. Binnen dit project dient ook expliciet aandacht besteed te worden aan operationaliseren van automatische afvaldetectie voor de gekozen locatie. Het gebruik van eenzelfde resolutie voor alle locaties kan het trainen van algoritmes versnellen.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Kostenschatting: EUR 50.000,00 - EUR 100.000,00 per brug +
materiaalkosten (EUR 15.000,00 - EUR 30.000,00 per brug)

Projectduur: 1 tot 1,5 jaar.

9.1.3 Onderzoek naar operationaliseren van automatische detectie van zwerfafval in de waterkolom met sonar.

Observaties van het wateroppervlak geven slechts een beperkt beeld van de totale zwerfvalhoeveelheden in de stroming van de rivier. Aanvullend is er daarom onderzoek nodig naar automatische detectie in de waterkolom. We bevelen aan om te onderzoeken of het bestaande sonar-meetprotocol van RWS voor afvoermetingen ook kan dienen voor detectie van zwerfafval. We raden aan om hiervoor de sonars te gebruiken met een hoge temporele en ruimtelijke resolutie (<25x25 cm, twee metingen/s). Om inzicht te krijgen in de mogelijkheden van inzet van de bestaande sonars van RWS zijn aanvullende studies nodig waarbij sonarmetingen in de rivier worden vergeleken met netmetingen. Het is cruciaal om de planning van sonar- en netmetingen goed op elkaar af te stemmen voordat gestart wordt met een vervolgpilot.

Te beantwoorden onderzoeksvragen zijn:

- Zijn horizontale en/of verticale sonar metingen zoals beschikbaar bij RWS geschikt om afvalhoeveelheden in de waterkolom weer te geven?
- Als ja, hoe zijn deze metingen te ijken op basis van netmetingen?
- Als ja, hoe zijn deze metingen te extrapoleren om een representatief beeld te krijgen van afvalhoeveelheden in het dwarstransect van de rivier

Bovenstaande vragen dienen beschouwd te worden bij verschillende rivierafvoeren. Binnen dit project dient ook expliciet aandacht besteed te worden aan operationaliseren van automatische afvaldetectie met AI/scripts

voor de gekozen locatie. Als beginpunt voor het beantwoorden van deze vragen kunnen huidige larven- (getest) en kornetmetingen (RWS-ON) die gecombineerd zijn met ADCP-metingen gebruikt worden. Beiden zijn relevant, omdat andere delen van dwarsdoorsnede bemeten worden.

Kostenschatting: EUR 50.000,00 - EUR 100.000,00

Projectduur: zes maanden tot 1,5 jaar.

9.1.4 Jaarlijks luchtbeelden invliegen na hoogwater

Wij raden aan om na een hoogwater met behulp van een vliegtuig (zoals na het hoogwater van de Maas in augustus 2021) over de rivieren te vliegen om de hotspots in kaart te brengen (RGB-camera, resolutie tien cm, start met één keer per jaar na hoogwater). Wij raden aan deze beelden in te vliegen als het hoogwater gezakt is maar het zwerfafval nog niet opgeruimd of verplaatst is (in de periode van ongeveer één week tot maximaal één maand na de hoogwaterpiek). Om bruikbare luchtbeelden te verkrijgen is een onbewolkte dag of de mogelijkheid tot vliegen onder het wolkendek nodig. Een handmatige analyse met behulp van GIS kost relatief weinig tijd (twee-drie dagen). Sla de beelden langjarig op.

Kostenschatting: EUR 50.000,00 - EUR 80.000,00 per jaar om het gehele rivierengebied in beeld te brengen inclusief visuele detectie van hotspots

Projectduur: twee weken per jaar

9.1.5 Ontwikkeling van een nationaal rivier-afvalstromenmodel.

Voor het verbinden van metingen op specifieke locaties onder specifieke condities is inzet van een model nodig om uitspraken te doen over

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

hoeveelheden en bewegingen van zwerfafval in tussenliggende gebieden en/of tussenliggende momenten.

Daarnaast kan het model inzicht geven in geaggregeerde zwerfafvalhoeveelheden per tijdsperiode (jaar, seizoen) of per deelgebied (riviertak, regio, etc.). We raden aan om de beschreven opzet van een zwerfafval transportmodel uit paragraaf 8.4 verder uit werken voor de Maas en de Rijnakken zodat het de situaties bij verschillende waterstanden en stromingen kan simuleren. Het model dient te worden afgeregeld op bestaande zwerfafvalmetingen (veldtellingen) om betrouwbare absolute getallen te produceren. Gebruik vervolgens het model voor heroverweging van geschikte monitoringslocaties, identificatie van aanvullende belangrijke processen in transporten van zwerfafval en voor ontwikkeling van geschikte oplossingen voor bestrijding van zwerfafval.

Kostenschattting: EUR 50.000,00 - EUR 100.000,00

Projectduur: zes maanden

9.2 Aanbevelingen voor lager termijn

Het uitvoeren van de aanbevelingen in de voorgaande paragraaf biedt de mogelijkheid tot het uitrollen en verder ontwikkelen van de zwerfafvalmonitoring in rivieren op de langere termijn. Deze paragraaf geeft adviezen voor de langere termijn.

9.2.1 Algemeen

Andere golflengtes

Het gebruik van andere resoluties zoals SWIR, NIR en TIR kan in de toekomst de detectie verbeteren (voor stationaire en niet stationaire camera's en luchtbeelden). Met name classificatie van typen zwerfafval zou door het

gebruik van andere banden kunnen verbeteren. Echter, deze meettechnieken zijn op dit moment nog onvoldoende gevalideerd om direct in te zetten. Wij raden aan het fundamentele onderzoek op dit vlak in de gaten te houden.

Zwerfafvalherkenning met AI-software

Onze verwachting is ook dat de inzet van AI voor alle monitoringstechnieken een vlucht zal nemen in de toekomst. Wij adviseren Rijkswaterstaat deze ontwikkelingen in de gaten te houden.

9.2.2 Stationaire camera's

Wanneer de pilots bevredigende resultaten opleveren kan de inzet van camera's op bruggen landsdekkend uitgerold worden. Dat wil zeggen, op alle bruggen waar nu de handmatige brugtellingen worden uitgevoerd, kan dit vervangen worden door automatische systemen met camera's.

9.2.3 Niet-stationaire camera's

Het gebruik van niet-stationaire camera's is nog niet dusdanig kostenefficiënt dat we de vervanging van veldtellingen door bijvoorbeeld drones aanbevelen. Dit komt door de relatief geringe oppervlakte die een drone per dagdeel kan bekijken (~1 km²) en het feit dat er in ieder geval een dronepiloot bij aanwezig moet zijn. Als deze kosten in de toekomst veel lager worden kunnen ze wel de veldtellingen vervangen. Er zitten namelijk voordelen aan drones t.o.v. veldtellingen zoals de herleidbaarheid van tellingen, het trainen van AI met de beelden (automatiseren op termijn) en het makkelijk 'naar de overkant kunnen vliegen'.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

9.2.4 Sonar

Landsdekkend uitrollen van de technologie

Na het doorlopen van de aanbevelingen op de korte termijn kan de technologie naar verwachting grootschalig ingezet worden.

Met behulp van het bestaande netwerk van sonars in bezit van RWS kan in principe de monitoring worden uitgevoerd waardoor de kostenefficiëntie hoog is. Enkel voor extra netmetingen en kalibratie van ADCP's en het uitvoeren van de AI-analyses moet extra betaald worden. Netmetingen blijven naar verwachting nodig om een beeld te vormen van de soorten zwerfafval die zich in de waterkolom bevinden. De verdeling van itemsoorten kan toegepast worden op de sonarmetingen, die vervolgens de gaten in de tijd tussen netmetingen kunnen opvullen.

Ontwikkeling van andere sonartechnieken

Aanvullend, kan onderzocht worden welke meerwaarde andere typen sonars bieden die eventueel naast het bestaande metingen kunnen worden ingezet specifiek voor zwerfafvalmonitoring⁶. Enkele sonartechnieken bieden in potentie de mogelijkheid om zwerfafval niet alleen te detecteren maar tot op bepaalde hoogte ook te identificeren. Dit is echter allemaal nog in de prille ontwikkelfase. RWS kan ervoor kiezen deze ontwikkeling te volgen of te stimuleren.

9.2.5 Lucht- en satellietbeelden

Evalueren of jaarlijkse frequentie omlaag kan

Als na een aantal jaren blijkt dat alleen hoogwaters vanaf een bepaalde herhalingstijd (vijf jaar, tien jaar of 100 jaar bijvoorbeeld) significant zwerfafval zichtbaar maken, dan kan ervoor gekozen worden om alleen na hoogwater vanaf deze herhalingstijd luchtbeelden in te vliegen, dit zal de kostenefficiëntie verhogen.

Volgen ontwikkelingen satellietbeelden

Op termijn zijn satellietbeelden mogelijk ook geschikt voor het detecteren van hotspots na hoogwater, wij adviseren RWS dit in de gaten te houden. Satellietbeelden zijn te overwegen als zij een hogere resolutie dan 25 x 25 cm hebben, vlak na een hoogwater gemaakt worden en de kosten lager zijn dan ongeveer EUR 50.000,00 voor het hele Nederlandse rivierengebied. Het zelf invliegen van luchtbeelden zal flexibeler (moment en locatie) blijven en daarom een voordeel behouden ten opzichte van satellietbeelden.

⁶ Er is door de WUR een NWO-voorstel ingediend voor onderzoek aan alternatieve sonarapparatuur die mogelijk in staat is in de toekomst zwerfafval te detecteren en te identificeren. RWS heeft hier een toezegging gedaan voor cofinanciering.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

10. Referenties

- Asselman, N.; van Heeringen, K. J.; de Jong, J.; Geertsema, T. (2022) *Juli 2021 overstroming en wateroverlast in Zuid-Limburg, Eerste bevindingen voor Valkenburg, Geulmonding, Roermonding en Eyselshoven*. 11207700-000-ZWS-0019
- Blondel, E. en Buschman, F. (2022). *Vertical and Horizontal Plastic Litter Distribution in a Bend of a Tidal River*. *Front. Environ. Sci.* 10:861457.
- Boon, A., Buschman, F., van Emmerik, T., Vermeulen, B. (2021). *Revealing underwater plastics: Detection of suspended macroplastics using acoustic backscatter*. EGU-presentatie over stageverslag.
- Broere, S., et al. (2021). *Towards Underwater Macroplastic Monitoring Using Echo Sounding*. *Frontiers in Earth Science* 9.
- Buschman, F. en Broere, S. (2021). *Detecting plastic items in the water column using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)*. EGU-presentatie.
- COM (2018). A European Strategy for plastics in a circular economy. Geraadpleegd op 17-3-2023 via <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy-brochure.pdf>
- Dethmers, K. Spek, H. Thompson, R. Melgert, B. Mauad, T. Davidson, E. Díaz Sánchez, L. (2022) *DO CLOTHES MAKE US SICK? Plastic soup foundation*
- Emmerik, T. van en Schwarz, A. (2019). *Plastic debris in rivers*. *WIREs Water*, 7(1).
- Emmerik, T. van, Vriend, P. (2021). *Routekaart Zwerfafvalmonitoring Nederlandse rivieren*. Rijkswaterstaat
- Emmerik, T. van, Frings, R., Schreyers, L., Hauk, R., Lange, S. van en Mellink, Y. (2022) *PREPRINT River plastic during floods: Increased mobilization, limited river-scale dispersion*. Research square.
- Flores, N., Oswald S., Leuven R., and Collas F. (2022). *Underwater Macroplastic Detection Using Imaging Sonars*. *Front. Environ. Sci.*
- G. Jakovljević, M. Govedarica, F.Á. Taboada (2019). *Remote sensing data in mapping plastics at surface water bodies*. Conference: FIG Working Week
- Goddijn-Murphy, L. et al. (2022). *Using a UAV thermal infrared camera for monitoring floating marine plastic litter*. *Remote Sensing*, 14(13), p. 3179.
- Huthoff, F., C. Wegman and J. Vieira da Silva (2023). *A mass balance model for transported waste in rivers*. In Book of abstracts of 'Towards 2048: The next 25 years of river studies: NCR DAYS 2023 Proceedings'. Netherlands Centre for River Studies publication 51-2023. pp 11.
- Martínez-Vicente, V.; Clark, J.R.; Corradi, P.; Aliani, S.; Arias, M.; Bochow, M.; Bonnerly, G.; Cole, M.; Cózar, A.; Donnelly, R.; Echevarría, F.; Galgani, F.; Garaba, S.P.; Goddijn-Murphy, L.; Lebreton, L.; Leslie, H.A.; Lindeque, P.K.; Maximenko, N.; Martin-Lauzer, F.-R.; Moller, D.; Murphy, P.; Palombi, L.; Raimondi, V.; Reisser, J.; Romero, L.; Simis, S.G.H.; Sterckx, S.; Thompson, R.C.; Topouzelis, K.N.; van Sebille, E.; Veiga, J.M.; Vethaak, A.D. (2019) *Measuring Marine Plastic Debris from Space: Initial Assessment of Observation Requirements*. *Remote Sens.* 11, 2443. <https://doi.org/10.3390/rs11202443>
- Mellink, Y., van Emmerik, T., van Langen, S., de Weme, A. (2022a). *Memo onderzoeksresultaten van het brugsegment-experiment*. Rijkswaterstaat pilot.

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

- Mellink, Y., van Emmerik, T., van Langen, S., de Weme, A. (2022b). *Memo onderzoeksresultaten van het tijdsresolutie-experiment*. Rijkswaterstaat pilot.
- Simpson, M. D.; Marino, A.; de Maagt, P.; Gandini, E.; Hunter, P.; Spyrakos, E.; Tyler, A. and Telfer, T. (2022) *Monitoring of Plastic Islands in River Environment Using Sentinel-1 SAR Data*. Remote Sensing 14(19):4473
- Tasseron, P. et al. (2022). *Towards robust river plastic detection: Combining lab and field-based hyperspectral imagery*. Preprint.
- Themistocleous, K., Papoutsas, C., Michaelides, S. and Hadjimitsis, D. (2020) *Investigating Detection of Floating Plastic Litter from Space Using Sentinel-2 Imagery*. Remote Sensing 12(16):2648
- Valdenegro-Toro, M. (2019). *Submerged marine debris detection with autonomous underwater vehicles*.
- Verstegen, E., Weerd, M. de. (2022). *Voorstudie monitoringstechnieken zwerfafval grote rivieren*. In opdracht van rijkswaterstaat.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Bijlage 1 Detecties met stationaire camera's

Opzet

Tijdens deze pilot hebben we met twee camera's op verschillende locaties een principetest uitgevoerd. Om een vergelijk te kunnen maken tussen camera's met verschillende eigenschappen is gekozen voor een spiegelreflex (Canon EOS 1100D) en GoPro (Hero 11). Beide camera's werken met het RGB-spectrum. Specificaties kunnen worden gevonden in Tabel B1.1. De bezochte locaties zijn onderdeel van de brugtellingen die uitgevoerd worden in opdracht van RWS. Een aantal korte opnames zijn gemaakt op verscheidene bruggen door het land, om voor- en nadelen per brug te ontdekken. Langere metingen zijn uitgevoerd op twee vaste locaties. Er is hiervoor gekozen voor de Maasbrug in Venlo en de Erasmusbrug in Rotterdam. Op deze locaties worden doorgaans grotere hoeveelheden items geteld. Dit helpt om de technologie op basis van de gemaakte beelden zo goed mogelijk te kunnen beoordelen.

Tabel B1.1 Eigenschappen van de gebruikte camera's

Spiegelreflex	GoPro
Canon EOS 1100D	Hero 11
12 megapixel foto's	27 megapixel foto's
720p film	5.3K film
Niet waterdicht	Wel waterdicht
Relatief zwaar	Lichtgewicht
Geen internetverbinding	4G-internetverbinding
Kleinere beeldhoek	Grotere beeldhoek

De camera's zijn naast elkaar op een driepoot gemonteerd, welke aan de binnenkant van de brugreling is geplaatst (zie Figuur B1.1). Tegelijkertijd is er op dezelfde locatie een visuele telling uitgevoerd. De tijd en geschatte locatie van waarneming is per item genoteerd en naderhand opgezocht op de beelden. Dit maakt het mogelijk om te vergelijken wat er met het oog (gemiddeld 130 megapixels) waargenomen kan worden vanaf de brug en op de beelden.



Figuur B1.1 Principetest met twee camera's op de Erasmusbrug in Rotterdam

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Resultaten

De korte testen op verschillende bruggen laten zien dat camerabeelden zelfs over een vrij grote range aan hoogtes van voldoende kwaliteit zijn om macro-items (enkele centimeters) te detecteren. De technologie is bruikbaar bij verschillende rivier- (afvoer, sedimentconcentratie, golfslag, et cetera) en weersomstandigheden (zon, regen, et cetera). Wel kunnen druppels die op het scherm terecht vallen door sterke wind tijdens regen de monitoring belemmeren. Hier moet rekening mee worden gehouden bij het plaatsen van de camera's. Ook kunnen beelden vervagen door trillingen van de brug.

In Venlo zijn ruim 150 items geteld tijdens de visuele telling. Ongeveer 75 % van deze items is ook met het oog terug te vinden op de gemaakte beelden van de GoPro. Vooral witte meso-items worden niet gedetecteerd. We concluderen dat de Spiegelreflexcamera onvoldoende resolutie biedt. Ook zijn de onder andere niet waterbestendigheid, het grote gewicht en het handmatig schepstellen (wat regelmatig mislukte door zonlicht op het scherm) belemmeringen bij de monitoring. Een waterdichte camera van kleiner formaat en gewicht is makkelijker en minder opvallen aan een brug te monteren (gunstig wegens mogelijke diefstal of vandalisme). Dit laat zien dat een camera met geschikte eigenschappen en van voldoende kwaliteit noodzakelijk is.

Toekomst

In de toekomst ligt het voor de hand om de beelden te analyseren met behulp van AI. Visueel natellen van beelden is niet kosten efficiënt en bovendien minder nauwkeurig dan visuele tellingen in het veld. Een verdiepende pilot met AI-analyse kan inzicht geven in wat er op dit moment wel en niet

gedetecteerd zou kunnen worden met een realistische geautomatiseerde data-analysetechniek.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Bijlage 2 Detecties met niet-stationaire camera's

Vliegbeperkingen drones

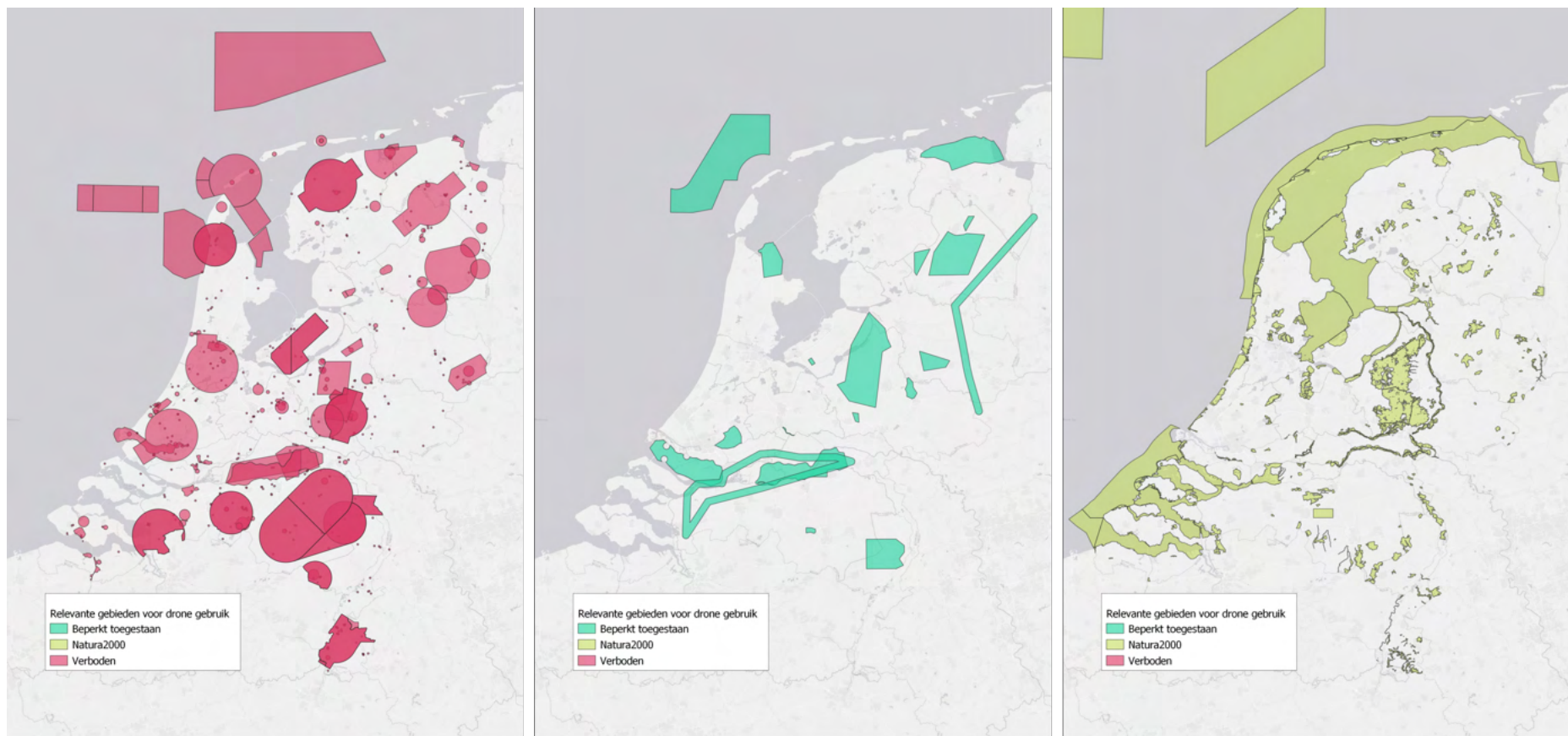
Drones maken gebruik van het Nederlandse luchtruim en kunnen overlast veroorzaken voor de omgeving. Om deze redenen zijn er drie zaken waar tijdens een drone vlucht rekening mee moet worden gehouden:

- Luchtruim: verboden om te vliegen (figuur links)
- Laagvliegroute: beperkt toegestaan om te vliegen (figuur midden)
- Natura2000: toegestaan na vergunning, of voldaan aan eisen (figuur rechts)

In onderstaand figuur is een vergelijking gemaakt tussen het luchtruim en de wateroppervlaktes en oevers (winterbed Nederland) in heel Nederland. In het rood zijn gebieden getoond waar een verbod geldt op dronevluchten, door de aanwezigheid van een luchtruim andere luchtvaart. In het oranje zijn gebieden getoond waar een dronevlucht beperkt is toegestaan, afhankelijk van de noodzaak. In het groen zijn gebieden getoond waar Natura 2000-gebieden aanwezig zijn en waar provinciale regelgeving van kracht is. In deze gebieden mag over het algemeen gevlogen worden wanneer aan de Wet natuurbescherming (Wnb) wordt voldaan volgens de Habitat- en vogelrichtlijnen. Deze wetten zijn provinciaal vormgegeven en kunnen daardoor verschillen per provincie.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B2.1 Overzichtskartjes van locaties waar wel en niet met drones mag worden gevolgen

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B2.2 Geïntegreerd kaartje met rivieren en locaties waar met drones kan worden gevlogen

Locaties voor velddetecties

Op twee verschillende dagen heeft monitoring plaatsgevonden op locaties die in een eerder stadium geschikt bevonden zijn voor de pilot:

- Borgharen: een locatie op de Grensmaas
- Loenensche Buitenpolder: een locatie op de Waal vlakbij Nijmegen

Deze twee locaties zijn uitgekozen vanwege het verschil in type oever en vegetatie. Onderstaand tonen we een foto van beide locaties. Ze verschillen in steilheid en daarmee ook in interactie met het water en ze verschillen in type vegetatie op de oever. Dit zijn allebei locaties die eenvoudig te betreden waren. Dat is belangrijk om in het achterhoofd te houden als deze meettechniek wordt vergeleken met in-situ metingen. Daarnaast bleken de weersomstandigheden grote invloed te hebben op de planning. Door slecht weer (regen en wind) konden de geplande werkzaamheden niet altijd doorgang vinden op het gewenste moment.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B2.3 Twee foto's van beide experiment locaties met (links) de locatie Borgharen met een steilere oever en hogere begroeiing en (rechts) de locatie Loenensche Buitenpolder met een zandiger flauwe oever en bomen en struikgewas

Op beide locaties zijn op een lengte van ongeveer 300 meter, vijf soorten metingen gedaan:

- Loodrecht naar beneden: drie vluchten met een GSD van resp. 0,5, 1,0 en 1,5 cm
- Schuin vanaf het wateroppervlak: twee vluchten om het perspectief van een vaartuig na te bootsen

De metingen zijn uitgevoerd door de drone-experts van GeoZICHT. Zij hebben de volgende stappen doorlopen: (1) vluchtvoorbereiding, (2) Veldwerk en vluchtuitvoering, (3) Dataverwerking en (4) Oplevering.

De oplevering ziet er als volgt uit:

- De losse fotobeelden
- RGB orthomosaïeken (GeoTIFF)
- Kwaliteitsrapportage van de beelden

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B2.4 De orthomozaïek resultaten voor de twee locaties met links de orthomozaïek voor de Loenensche buitenpolder, in het midden de eerste locatie bij Borgharen, vlakbij Baron de Rosenstraat en rechts de tweede locatie bij Borgharen nabij de Sluisdijk

Resultaten

Op beide locaties is met een resolutie van 0,5 centimeter zwerfafval in beeld te brengen, mits het loodrecht van boven zichtbaar is. De pilot die is uitgevoerd op de bovengenoemde locatie heeft de volgende inzichten opgeleverd:

Manier van vliegen

- Een drone meting loodrecht naar beneden is effectiever dan een dronemeting vanuit het vaarttuig perspectief
- Een drone meting vanuit het vaarttuig perspectief kan extra informatie opleveren over zwerfafval in hogere begroeiing

Type detectie:

- De hoeveelheid zonlicht heeft effect op hoe goed objecten te signaleren zijn
- Schaduw heeft veel effect op het te signaleren object
- Objecten die qua kleur en vorm afwijken van de omgeving vallen beter op

Algemeen:

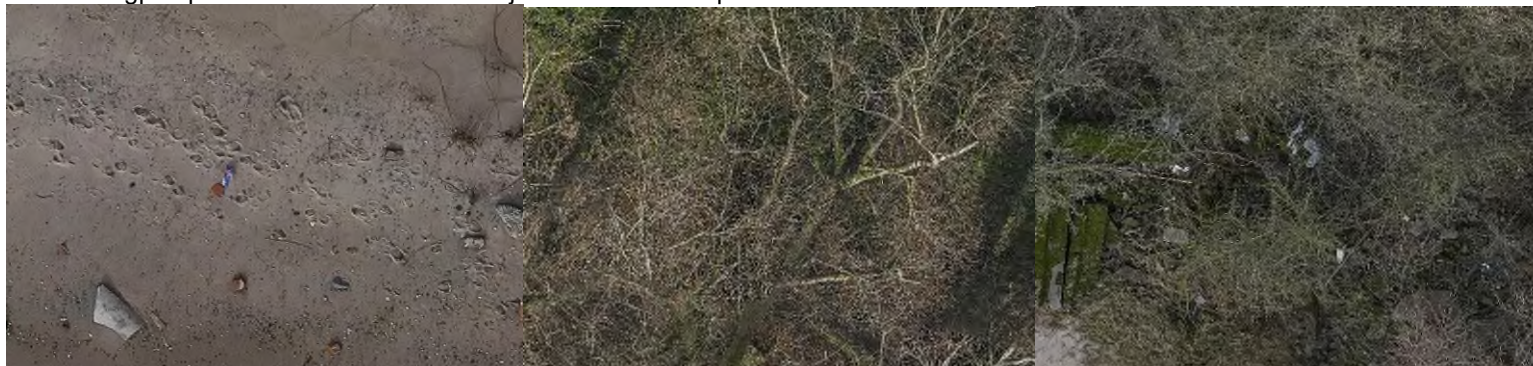
- Met drones is zwerfafval goed te detecteren, mits het zicht niet wordt geblokkeerd door schaduw of hoogstaande begroeiing
- Een in-situ meting geeft een gedetailleerder beeld van het aanwezige zwerfafval. Het is niet onderzocht of de drone metingen representatief kunnen zijn
- We verwachten dat een inschatting op basis van dronebeelden geschikt is om een beeld te krijgen van totaal aantal stuks zwerfafval op de oever, mits je corrigeert voor ongeziene locaties
- Doordat de metingen in de winter zijn uitgevoerd is zwerfafval tussen begroeiing beter waar te nemen

Onderstaand tonen we verschillende voorbeelden van detecties. Steeds drie detecties vanuit de verschillende pilots. Met allen een beeld van een ander stukje oever, in andere weersomstandigheden of met andere begroeiing.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Ook is onderstaand een voorbeeld opgenomen van de dronebeelden vanuit het vaartuigperspectief. Voor alle foto's verwijzen we naar het opleverdossier.



Figuur B2.5 Drie voorbeelden van dronebeelden loodrecht naar beneden bij de Loenensche buitenpolder, met links plasticpapier, in het midden een voorbeeld van een detectie boven een boom en rechts zwerfafval tussen hoger gras



Figuur B2.6 Drie voorbeelden van dronebeelden loodrecht naar beneden bij Borgharen op locatie 2, met links zwerfafval in zonlicht, in het midden een voorbeeld van een detectie waarin schaduw een belangrijk rol speelt en rechts papier of plastic in laag gras

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B2.7 Drie voorbeelden van dronebeelden loodrecht naar beneden bij Borgharen op locatie 1, met links zwerfafval in tussen stenen dichtbij water, in het midden een voorbeeld van een detectie met plastic op een steile oever en rechts een groot stuk zwerfafval en een zwerfafvalhotspot van verschillende stukken zwerfafval

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B2.8 Een voorbeeld van een zijaanzicht van de oever, vanuit het perspectief van een vaartuig bij Borgharen. De drone hangt op een hoogte van (boven naar beneden van resp.) drie, vijf en tien meter. Rechts in het beeld is op drie en vijf meter een blauwe plastic tas waar te nemen en op tien meter in de boom zwerfafval waar te nemen. Op tien meter blokkeert het voetstatief van de drone het zicht van de camera

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B2.9 Een voorbeeld van een zijaanzicht van de oever, vanuit het perspectief van een vaartuig bij de Loenensche Buitenpolder. De drone hangt op een hoogte van (boven naar beneden van resp.) 3,6, 5,2 en 10 meter. Op alle beelden is hetzelfde zwerfafval waar te nemen. Op de lagere beelden is meer detail waar te nemen

Beoordeling kwaliteit in de praktijk

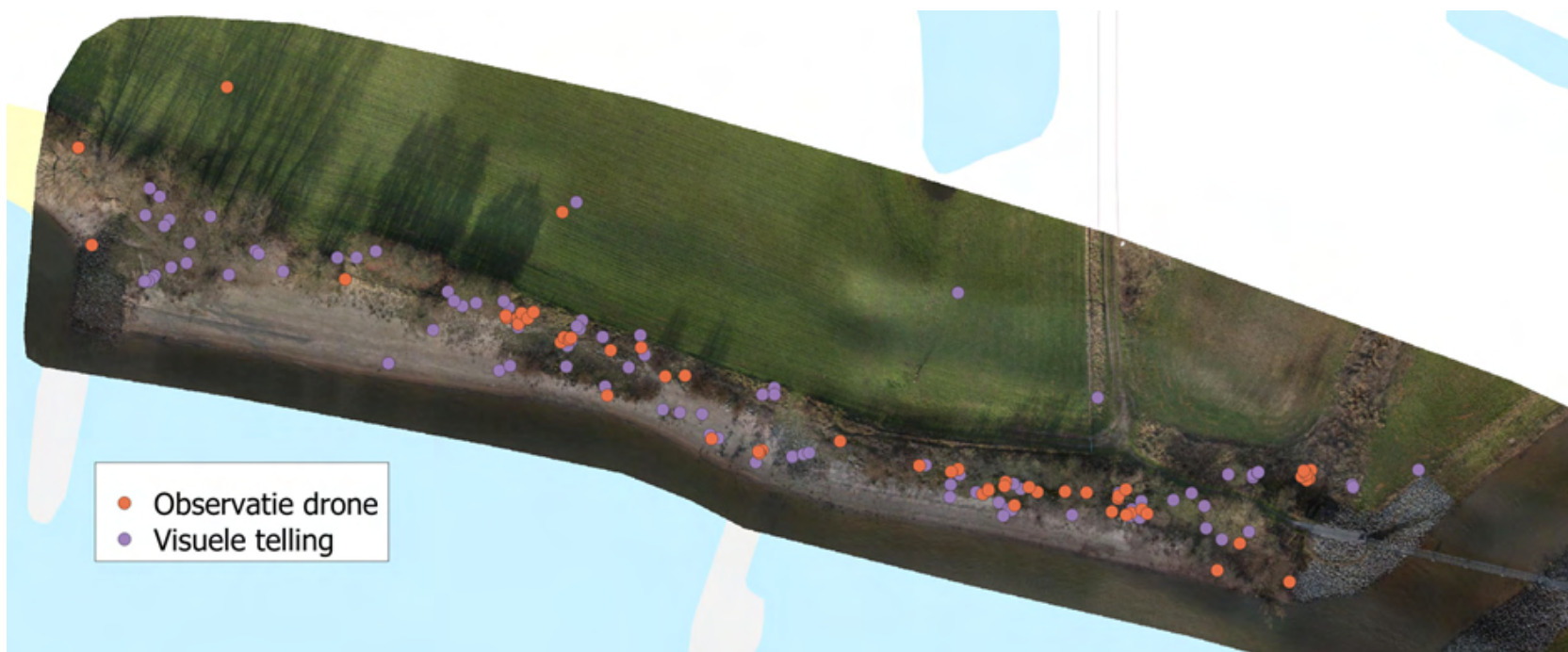
Bij de Loenensche Buitenpolder en Borgharen is met een drone een experiment gedaan voor detectie van zwerfafval. Op beide locaties is ook een visuele telling uitgevoerd. Om te achterhalen of met een drone een representatief beeld te behalen is van de hoeveelheid zwerfafval is de visuele telling vergeleken met de telling via de drone. Onderstaand vergelijken we op beide locaties de aantallen.

Loenensche Buitenpolder

Onderstaand tonen we een overzicht van de observaties met de drone en de visuele tellingen. De visuele tellingen zijn gelokaliseerd met behulp van het GPS-sigitaal van een telefoon. Dit signaal kan er enkele meters naast zitten. De locaties van de visuele tellingen zijn dus indicatief.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B2.10 Overzichtsbeeld van ingewonnen drone beelden met daarbij de visuele tellingen en de observaties via de drone. Let op: de exacte locaties van de visuele tellingen is niet bekend. Dit is de GPS-locatie van de bijbehorende foto's

We hebben hierbij de volgende opmerkingen:

- Met de visuele tellingen zijn 88 foto's genomen, waarop soms meerdere objecten zijn gesignaleerd. De verwachting is dat er ongeveer 100 stukken zwerfafval aanwezig waren op dit stuk
- Met de drone observaties zijn 62 stukken zwerfafval gedetecteerd
 - Het verschil is te verklaren zijn door de grootte van het zwerfafval of door de locatie:
 - Te klein zwerfafval is op de drone beelden niet te detecteren
 - Zwerfafval wat verscholen zit onder hogere vegetatie is met dronebeelden loodrecht naar beneden niet te detecteren (zie onderstaand)

Kenmerk R003-1287222JUO-V02-prr-NL

- Alle grotere objecten (minimaal 10 cm) zijn met een drone goed te detecteren
- Kleinere stukjes plastic en papier zijn zelden goed te detecteren
- Als de kleur van het zwerfafval niet veel afwijkt ten opzichte van de omgeving, is dit in situ beter te detecteren dan via een drone beeld

Op de overzichtsfoto vallen twee locaties op waar wel visuele tellingen zijn geweest maar geen observaties met de drone. Dit zijn de locaties aan de linker- en rechterkant van het gebied. Op deze locaties zijn bomen en struikgewas aanwezig. Met deze drone positie (loodrecht naar beneden) is dit zwerfafval niet te detecteren.

Onderstaand hebben we op de locaties waar veel bomen aanwezig zijn de drone beelden vergeleken die loodrecht naar beneden zijn gemaakt en vanuit het perspectief van een vaartuig. De meeste grote objecten zijn in de bovenstaande analyse geanalyseerd. Enkele objecten zijn niet gedetecteerd. De beelden lijken complementair aan elkaar. Vanuit het perspectief van het vaartuigen worden enkele objecten wel waargenomen die loodrecht van boven niet worden waargenomen en andersom.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B2.11 Vergelijking tussen drone beelden vanuit het vaartuig perspectief (boven) en loodrecht naar beneden (onder). Na bestuderen van beide foto's is een groot deel van het zwerfafval op beide locaties waar te nemen. Enkele objecten zijn loodrecht naar beneden niet waar te nemen en vanuit het vaartuig perspectief wel waar te nemen

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Bijlage 3 Detecties met Sonar

Tijdens dit project hebben we de focus gelegd op het testen van de potentie van sonarapparatuur die al in bezit is van RWS. Dit geeft inzicht in de benodigde stappen voor het ontwikkelen van een zo snel mogelijk toepasbare meetmethodiek. Naar aanleiding van de literatuurstudie hebben we gekozen voor de Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). Gedurende meerdere dagen is met dit apparaat gelijktijdig met onderwaternetmetingen getest. In deze sectie beschrijven we de opzet en resultaten van de uitgevoerde test.

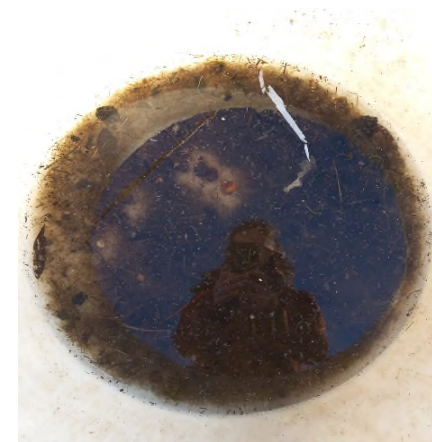
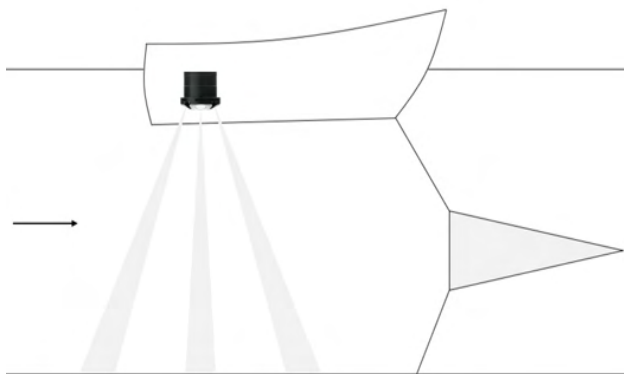
Opzet

Gedurende meerdere dagen is met de ADCP een test uitgevoerd, gelijktijdig met onderwaternetmetingen. De metingen hebben plaatsgevonden in de Rijn

(nabij Tolkamer). De opstelling bestond uit een boot vastgelegd aan de zijkant van de rivier, met daaraan een onderwaternet en een ADCP (RDI StreamPro) (zie Figuur B3.1). De afstand tussen de ADCP en het net was ongeveer 2 meter. Het net heeft een diameter van 1 m, waarvan het midden op een diepte van ongeveer 2.2 m hangt. Voor dit project zijn 10 metingen van 40 minuten geanalyseerd. Voor ieder van deze metingen is de inhoud van de netten verzameld, waaruit het aantal stuks zwerfafval geteld is. Voor identificatie van zwerfafvalitems vanuit sonar data is meer fundamenteel onderzoek nodig, maar items kunnen in deze beginfase van de ontwikkeling van de meetmethodiek al wel gedetecteerd worden. We gebruiken hierom de netten om de ADCP-data te kalibreren en valideren.

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B3.1 Links: Schematisch weergave van ADCP- en netmetingen (alleen het gebruikte net op de middelste diepte weergegeven), midden: meetopstelling aan een ponton in de Rijn bij Tolkamer, met aan de achterkant van de boot de ADCP aan een rode drijver en netten aan een kraan aan de voorkant van de boot, rechts: voorbeeld van de inhoud bestaande uit organisch materiaal en zwerfafval uit een net na een meetperiode

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Analyse

ADCP's zenden een akoestisch signaal uit dat teruggekaatst wordt. We gebruiken voor het schatten van het aantal items de sterkte van dit teruggekaatste signaal. De data waar we mee werken is dus een tijdserie van de signaalsterkte (zie Figuur B3.2). De eerste stap die we nemen in de analyse is het bepalen van een achtergrondwaarde, of een signaalsterkte die 'normaal' is voor de specifieke rivier en omstandigheden. In de simpele methodiek die we nu toepassen gebruiken we hier de mediaan van de tijdserie voor. Vervolgens passen we een drempelwaarde toe. Een signaalsterkte die deze drempelwaarde overschrijdt wordt beschouwd als een item. Hoe dichterbij deze drempelwaarde bij de achtergrondwaarde ligt, hoe hoger de schatting van het aantal items is. Hoe verder van de achtergrondwaarde, hoe lager het aantal items. We kalibreren de ADCP-data dus op een drempelwaarde met een afstand tot de achtergrondwaarde, dusdanig dat het aantal uit ADCP-data geschatte items overeenkomt met de telling van de netinhoud. Om tot een robuuste meetmethodiek te komen, moet de drempelwaarde te kalibreren zijn voor verschillende metingen en omstandigheden. We gebruiken hierom de standaarddeviatie vanaf de achtergrondwaarde van het signaal.

Kenmerk

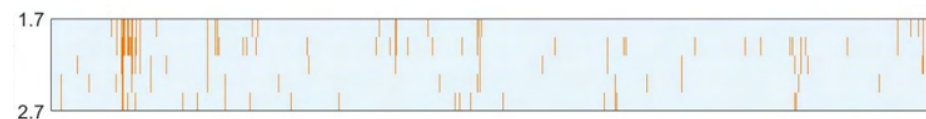
R003-1287222JUO-V02-prr-NL



Figuur B3.2 Bepaling van itemaantal met behulp van sonardata. Boven een drempelwaarde (stippellijn) wordt een bepaalde signaalsterkte die de sonar heeft ontvangen beschouwd als een item (oranje cirkel)

Resultaten

Tijdens iedere meetronde van 40 minuten zijn zo'n 15-35 items in het net gevangen. De gebruikte simpele methodiek kan gekalibreerd worden tot een juiste orde grote schatting van het aantal stukken zwerfafval. Een nauwkeurigere schatting van het aantal of soorten items kan met deze simpele methode nog niet gemaakt worden. We zien binnen de orde grote schatting geen correlatie tussen hogere aantallen items in het net en geschat met de ADCP. Wel zien we dat de kalibratie van de verschillende herhaling met dezelfde methode en waarden gedaan kan worden. De kalibratie lijkt hiermee redelijk robuust te zijn voor de geanalyseerde metingen. Dit laat potentie voor de toepassing van de meettechniek in het veld zien.



Figuur B3.3 Voorbeeld van zwerfafvaldetectie met behulp van sonar (ADCP); blauw=geen item, oranje=item. De x- en y-as tonen diepte en tijd

Toekomst

De robuustheid van de kalibratie moet onderzocht worden onder meer verschillende omstandigheden. Hierom zouden metingen in alle Nederlandse riviertakken onder andere afvoer omstandigheden waardevol zijn voor het ontwikkelen van een geschikte meetmethodiek.

Bijlage 4 Detecties met lucht- en satellietbeelden

In het onderzoek naar de mogelijkheden voor zwerfafvaldetectie met lucht- en satellietbeelden hebben we de volgende stappen doorlopen:


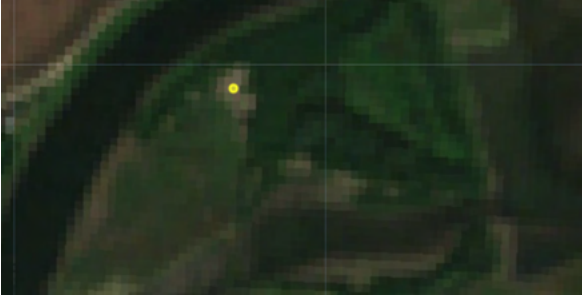

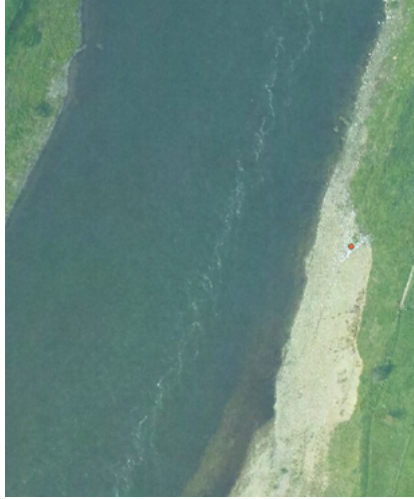
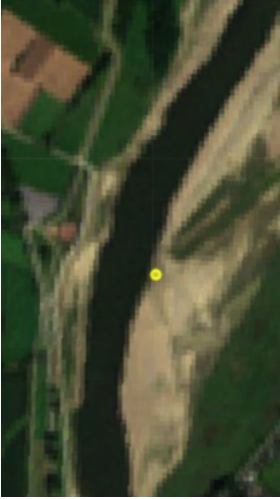

1. Onderzoek of op lucht- en satellietbeelden zwerfafval gedetecteerd kan worden
2. Onderzoek of bij beschikbare beelden met de hoogste ruimtelijke resolutie (7,5-10 cm) op een moment in de tijd met de grootste kans op grote hoeveelheden zwerfafval dit ook gedetecteerd kan worden
3. Op 6 locaties hebben we bepaald of het gedetecteerde zwerfafval uit stap 2 bij lagere ruimtelijke resoluties en andere temporele resoluties detecteerbaar is
4. We hebben de overtellingen van de WUR in augustus 2021 (Emmerik et al, 2022, preprint) vergeleken met de luchtbeelden van augustus 2021.

Uit stap 1 bleek dat zelfs op luchtbeelden met de hoogste resolutie (7,5 cm) op een willekeurig moment geen zwerfafval gedetecteerd kon worden. Van RWS kregen wij luchtbeelden toegestuurd tijdens (juli 2021) en vlak na (augustus 2021) de overstromingen van de Maas. Daarmee konden wij stap 2 uitvoeren. Op de luchtbeelden na de overstromingen van de Maas konden wij op 23 locaties hotspots van zwerfafval visueel detecteren. Van deze hotspots konden we met behulp van GIS-applicaties (QGIS of ArcGIS) de omvang bepalen. De samenstelling van het zwerfafval was niet te bepalen, alleen als er takken/bomen in voorkwamen waren deze aan de vorm te herkennen.

De detectie van deze hotspots ging het beste op de luchtbeelden na de overstroming. Tijdens de overstroming waren op dat moment veel oevers nog ondergelopen. In stap 3 hebben we onderzocht of de hotspots uit de luchtbeelden ook herkenbaar zijn op verschillende satellietbeelden. Dit hebben we gedaan voor Sentinel-2 (10x10 m resolutie) en Landsat-8 (30 x 30 m resolutie) beelden. De resultaten hiervan zijn in onderstaande figuren te vinden. Uit de figuren blijkt duidelijk dat de hotspots niet te detecteren zijn op de satellietbeelden.

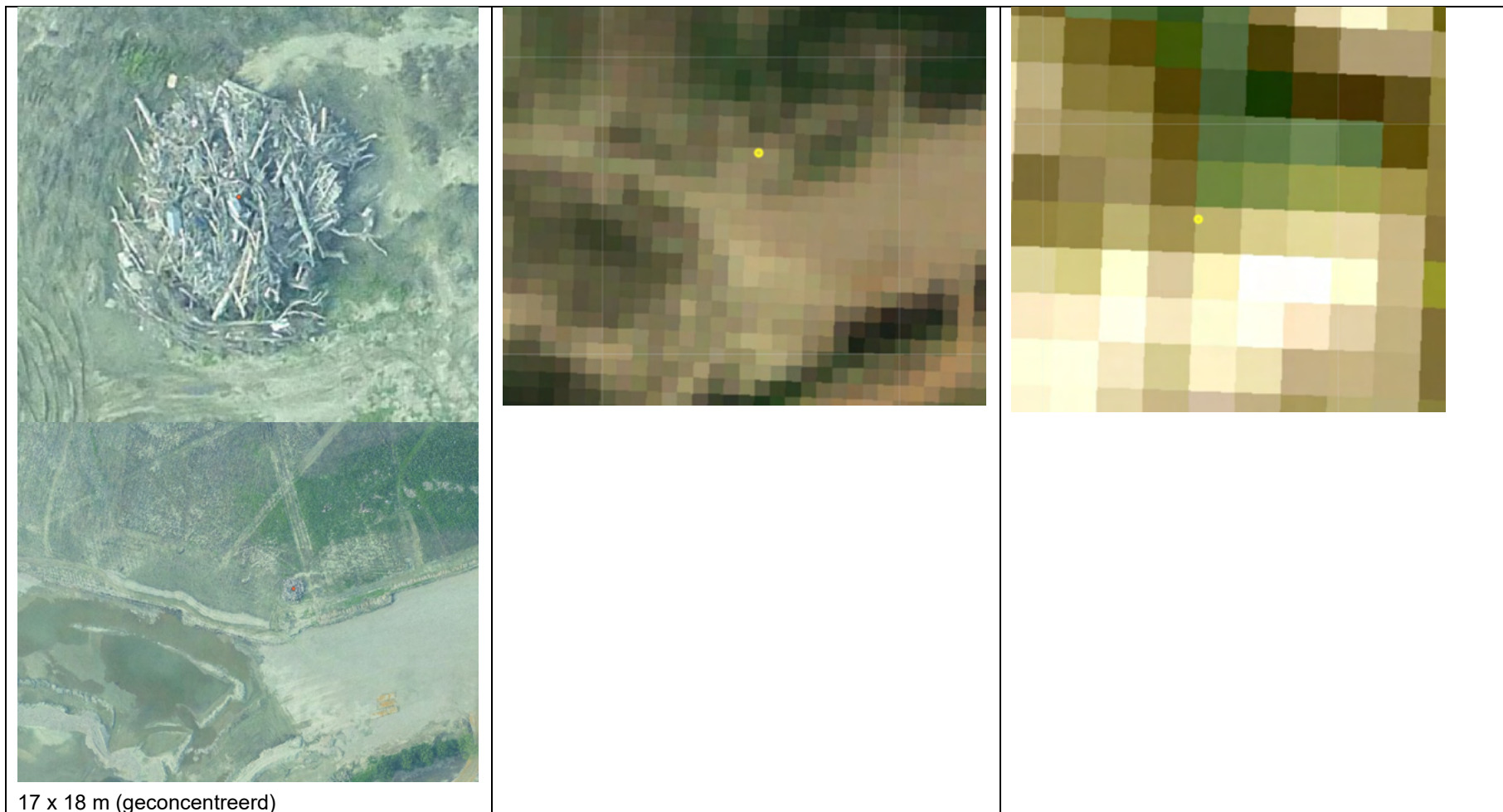
Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Luchtbeeld (0,1x0,1 m)	Sentinel-2 (10x10 m)	Landsat-8 (30x30 m)
		
<p>50 x 30 m (geconcentreerd)</p>		
		
<p>40 x 40 m (verspreid)</p>		

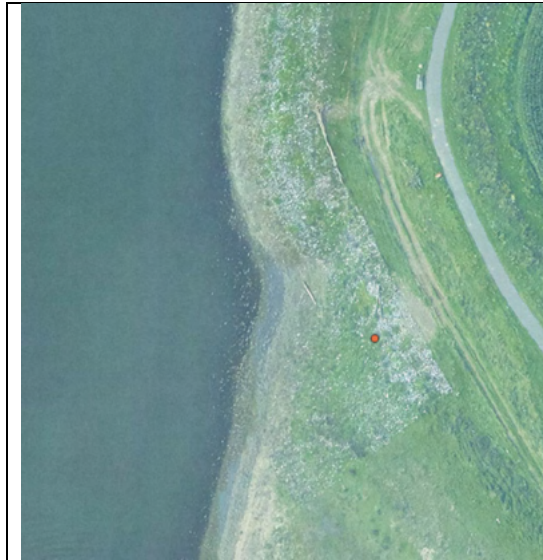
Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

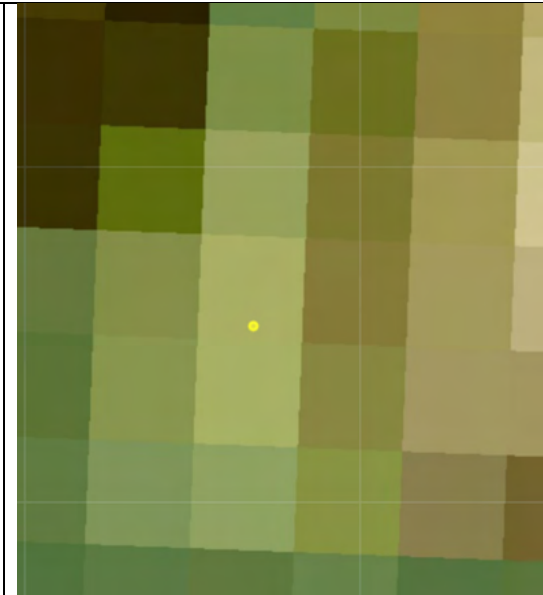
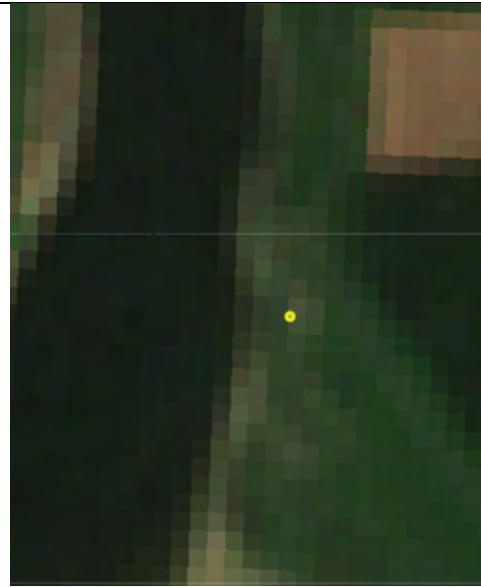


Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL



100 x 30 m (verspreid)

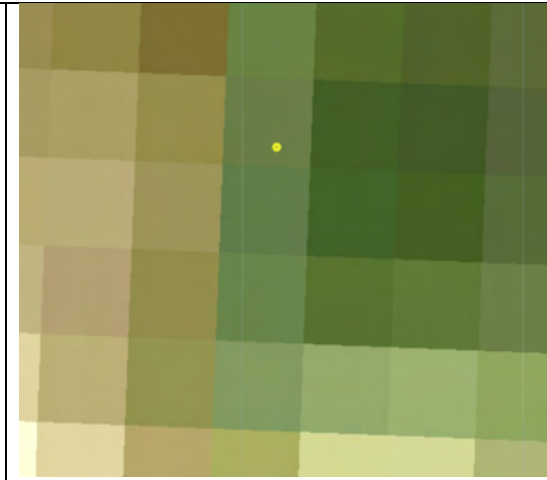
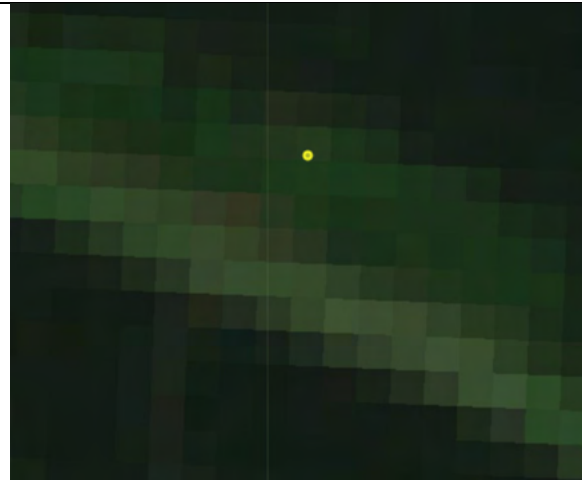


Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

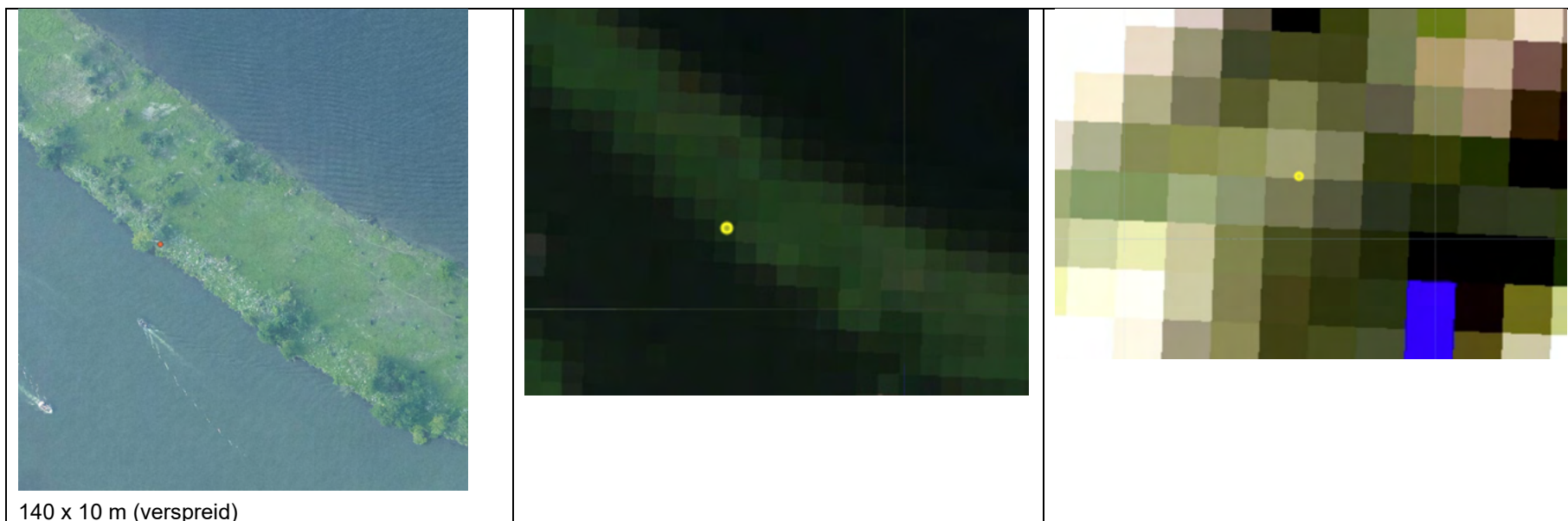


12 x 20 m (geconcentreerd)



Kenmerk


R003-1287222JUO-V02-prr-NL




Uit stap 4 (Het vergelijken van de overtellingen van de studie van de WUR in augustus 2021 (25 locaties, Emmerik et al, 2022, preprint) met de luchtbeelden van augustus 2021) blijkt dat de tellingen op basis van de luchtbeelden verschillen tot een factor vier met de tellingen in het veld van de WUR. Op sommige locaties waar zwerfafval geteld is in het veld hebben wij zelfs geen zwerfafval kunnen detecteren op de luchtbeelden (op vijf locaties). Wij verwachten dat dit komt omdat relatief klein zwerfafval (<10 cm) niet te zien is op de luchtbeelden met een resolutie van 10x10 cm. Daarnaast is het op sommige locaties lastig te zien of het stenen (bijvoorbeeld bekleding van de dijk) betreft of zwerfafval. De resultaten per locatie staan hieronder afgebeeld.

Kenmerk


R003-1287222JUO-V02-prr-NL


Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	50.7554
	Lon	5.6817
	RKM	2
	Plastic items count	167
	Estimate based on imagery	?
	Description	No larger waste seen, only some white parts that could be interpreted as small waste. Hard to count individual pieces.

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	50.7823
	Lon	5.7001
	RKM	5,5
	Plastic items count	41
	Estimate based on imagery	25-75
	Description	Only smaller litter seen, no bigger waste.

Kenmerk

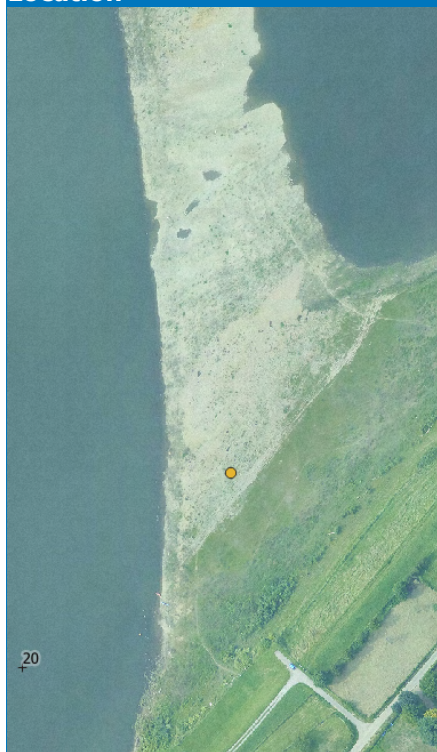
R003-1287222JUO-V02-prr-NL


Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	50.7959
	Lon	5.6953
	RKM	7
	Plastic items count	92
	Estimate based on imagery	~50
	Description	Both big and small litter visible. Many bushes and trees, only visible pieces count. Likely to be more.

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	50.8747
	Lon	5.686
	RKM	16,5
	Plastic items count	34
	Estimate based on imagery	50-100
	Description	Both bigger and smaller waste visible. Mainly along the banks.

Kenmerk


R003-1287222JUO-V02-prr-NL


Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	50.9022
	Lon	5.698
	RKM	20
	Plastic items count	165
	Estimate based on imagery	>100
	Description	Pieces hard to identify visually due to bare sandy bank. Only smaller pieces seen, no bigger ones.

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.1622
	Lon	5.9527
	RKM	71
	Plastic items count	95
	Estimate based on imagery	~20
	Description	Bushes and trees, not much seen. Probably much more pieces than visually seen.

Kenmerk

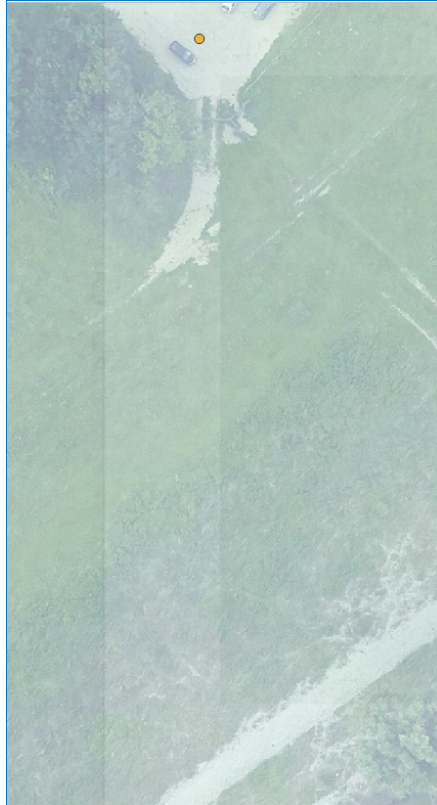
R003-1287222JUO-V02-prr-NL


Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.188
	Lon	5.9321
	RKM	75
	Plastic items count	119
	Estimate based on imagery	25-75
	Description	Expected that most plastic is in captured by bushes along the bank. Pieces hard to see. Mainly small litter. Also fallen public dustbin fallen over with pieces next to it. This does not count.

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.3424
	Lon	6.1192
	RKM	103,5
	Plastic items count	77
	Estimate based on imagery	50-100
	Description	Pieces hard to identify due to bank being grass-sand mixed, so waste does not stand out. In the grass, small litter seen (lots of it).

Kenmerk


R003-1287222JUO-V02-prr-NL

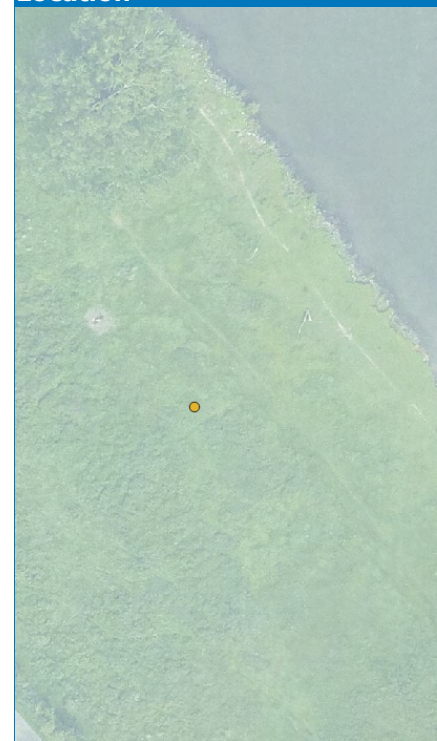
Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.3565
	Lon	6.1435
	RKM	106
	Plastic items count	72
	Estimate based on imagery	20-40
	Description	Pieces hard to identify due to bank being grass-sand mixed, so waste does not stand out.

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.3963
	Lon	6.1547
	RKM	111
	Plastic items count	8
	Estimate based on imagery	~10
	Description	Only small pieces that could be litter, mostly directly along the bank.

Kenmerk

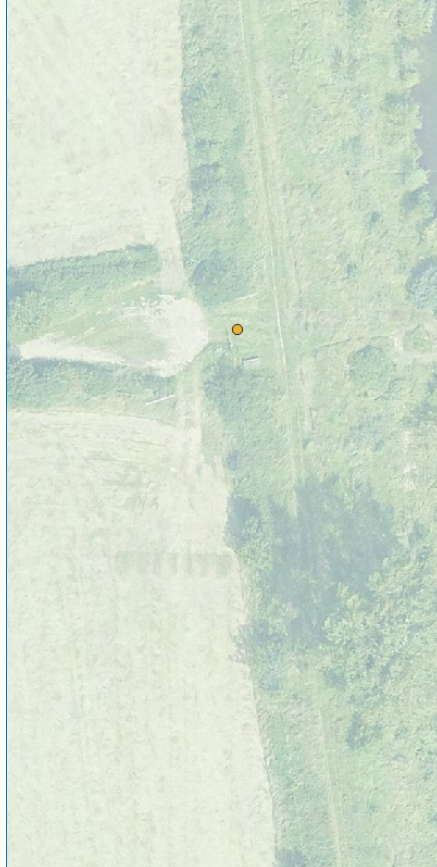
R003-1287222JUO-V02-prr-NL


Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.648
	Lon	5.971
	RKM	148 (right bank)
	Plastic items count	24
	Estimate based on imagery	~10
	Description	Bushes and trees, hard to identify litter here. Sandy-grassy bank also make it harder to differentiate.

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.6475
	Lon	5.9679
	RKM	148 (left bank)
	Plastic items count	8
	Estimate based on imagery	?
	Description	Hard to make difference between rocks along the banks and waste. Not possible to differentiate.

Kenmerk


R003-1287222JUO-V02-prr-NL

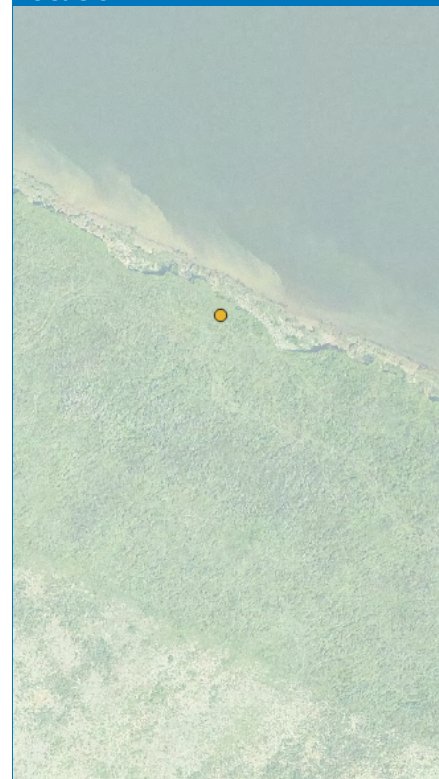
Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.6574
	Lon	5.9622
	RKM	150,5
	Plastic items count	26
	Estimate based on imagery	~5
	Description	Many bushes > hard to identify litter. Probably more pieces than visible on imagery.

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7555
	Lon	5.7507
	RKM	174
	Plastic items count	14
	Estimate based on imagery	~10
	Description	Some trees, so that more waste might be present than visible. Only small pieces.

Kenmerk


R003-1287222JUO-V02-prr-NL


Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7763
	Lon	5.71
	RKM	178 (right bank)
	Plastic items count	14
	Estimate based on imagery	~5 visible
	Description	Probably small waste, not clearly identifiable

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7752
	Lon	5.7066
	RKM	178 (left bank)
	Plastic items count	12
	Estimate based on imagery	?
	Description	Probably small waste, not clearly identifiable

Kenmerk


R003-1287222JUO-V02-prr-NL


Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7464
	Lon	5.3254
	RKM	215,5
	Plastic items count	3
	Estimate based on imagery	?
	Description	No waste clearly visible

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7361
	Lon	5.2972
	RKM	218
	Plastic items count	18
	Estimate based on imagery	5-10
	Description	Not able to differentiate between rocks and waste. Many bushes and trees.

Kenmerk


R003-1287222JUO-V02-prr-NL


Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7389
	Lon	5.2817
	RKM	219 (left bank)
	Plastic items count	14
	Estimate based on imagery	1-5
	Description	Almost no waste clearly identifiable

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7411
	Lon	5.2795
	RKM	219 (right bank)
	Plastic items count	7
	Estimate based on imagery	?
	Description	No waste clearly identifiable

Kenmerk

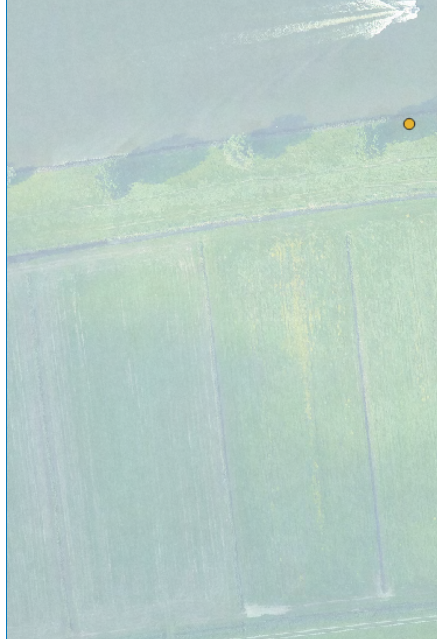
R003-1287222JUO-V02-prr-NL


Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7139
	Lon	5.009
	RKM	239,5
	Plastic items count	8
	Estimate based on imagery	2
	Description	Trees and shadows decrea

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7178
	Lon	4.9804
	RKM	241,5
	Plastic items count	5
	Estimate based on imagery	3
	Description	-

Kenmerk

R003-1287222JUO-V02-prr-NL

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7216
	Lon	4.9388
	RKM	244,5 (left bank)
	Plastic items count	7
	Estimate based on imagery	?
	Description	No waste clearly visible.

Location	Relevant information	
	Unit	Value
	Lat	51.7239
	Lon	4.938
	RKM	244,5 (right bank)
	Plastic items count	11
	Estimate based on imagery	~5
	Description	-