An underwater photograph showing significant plastic pollution. A large, clear plastic bottle is partially submerged, with a long, thin plastic strip trailing behind it. In the foreground, a large, tangled mass of white plastic debris is visible. Several small, striped fish are swimming in the clear blue water. The scene is brightly lit, suggesting a shallow depth.

**Forslag til bruk av
jordobservasjonsdata
som nasjonal
plastindikator**

SALT RAPPORT 10163



Rapporttittel | *Report title:*
Forslag til bruk av jordobservasjonsdata som nasjonal plastindikator

Rapport nr. | *Report no.:*
10163

Dato | *Date:*
18.10.2024

Antall sider | *Number of pages:*
58

Oppdragsgiver | *Client:*
Miljødirektoratet

Oppdragsgivers rapportnummer | *Clients report number:*
M-2856|2024

Oppdragsgivers referanse | *Clients reference:*
Eivind Farmen

Prosjektleder | *Project manager:*
Johanne H. Rydsaa (SALT)

Kvalitetskontroll | *Quality control:*
Carl Højman (SALT), Regula Frauenfelder (NGI)

Forfatter(e) | *Author(s):*
Johanne Rydsaa, Marthe Larsen Haarr, Carl Højman (SALT); Nellie Sofie Body, Benjamin Allen Lange, Regula Frauenfelder (NGI)

Fotograf omslagsbilde:
Naja Bertholt Jensen, Unsplash

Sammendrag

Rapporten summerer kunnskapsstatus for eksisterende metodikk for overvåkning av flytende makroplast i marint miljø ved bruk av satellittbasert jordobservasjon. Basert på dette diskuteres det utfordringer og nødvendige tilpasninger for bruk til overvåkning i norske forhold, og et forslag til et norsk overvåkingsprogram, med et kostnadsoverslag for oppsett og drift av anbefalt overvåkingsdesign. Rapporten er produsert på oppdrag av Miljødirektoratet.

© SALT Lofoten AS, Rapporten kan kun kopieres i sin helhet. Kopiering av deler av rapporten eller gjengivelse på annen måte er kun tillatt etter skriftlig samtykke fra SALT.

INNHALDSFORTEGNELSE

Summary	6
Sammendrag.....	8
1 Introduksjon.....	10
1.1 <i>SDG Indeks 14.1.1b "Tetthet av plastavfall".....</i>	<i>11</i>
1.2 <i>Denne rapporten</i>	<i>12</i>
2 Kunnskapsstatus: overvåkning av plastansamlinger vha. fjernmåling	13
2.1 <i>Metoder for overvåkning av plast ved bruk av jordobservasjonsdata.....</i>	<i>13</i>
2.1.1 <i>Hvordan satellitter brukes til å finne flytende plast</i>	<i>14</i>
2.1.2 <i>Bakkesannheter og valideringsdata</i>	<i>18</i>
2.1.3 <i>Indekser</i>	<i>20</i>
2.1.4 <i>Metoder for bildeklassifisering og databehandling.....</i>	<i>23</i>
2.1.5 <i>Supplerende sensorer</i>	<i>24</i>
2.1.6 <i>Modellering og prediksjon</i>	<i>27</i>
2.1.7 <i>Initiativer og stor-skala programmer og fremtidig arbeid</i>	<i>28</i>
2.2 <i>Tilpasninger for norske forhold</i>	<i>30</i>
2.2.1 <i>Klimatiske forhold og deres påvirkning</i>	<i>31</i>
2.2.2 <i>Kilder og muligheter for modellering</i>	<i>33</i>
2.2.3 <i>Anbefalinger til metodikk og tilpasninger til norske forhold</i>	<i>34</i>
3 Forslag til norsk overvåkningsprogram	40
3.1 <i>Datainnsamling.....</i>	<i>40</i>
3.1.1 <i>Satellittdata.....</i>	<i>40</i>
3.1.2 <i>Overvåkingsområder</i>	<i>41</i>
3.1.3 <i>Pilotperiode</i>	<i>46</i>
3.2 <i>Prosessering av bildemateriell og data</i>	<i>47</i>
3.3 <i>Algoritmer og analyser</i>	<i>48</i>
3.3.1 <i>Alternativer for implementering av algoritmer</i>	<i>50</i>
3.3.2 <i>Eksempler på implementert arbeidsflyt</i>	<i>51</i>
3.4 <i>Kostnadsoverslag</i>	<i>55</i>
3.4.1 <i>Kostnadsoverslag for utvikling og oppsett av overvåkingssystemet.....</i>	<i>56</i>
3.4.2 <i>Kostnadsoverslag for pilotperiode</i>	<i>58</i>

3.4.3	Kostnadsoverslag for kontinuerlig drift.....	60
3.4.4	Oppsummering av kostnader	60
4	Muligheter for utvikling av et varslingsystem	62
4.1.1	Vurdering av tekniske og ressursmessige krav.....	63
4.1.2	Rent Hav.....	63
5	Konklusjoner.....	66
	Litteraturliste.....	70
	Vedlegg.....	73

SUMMARY

This report presents assessments and proposals for the design of a national indicator and monitoring program for Norwegian waters that can provide national data aligned with the UN Sustainable Development Goal 14.1.1.b. The proposals and recommendations are based on a summary of the current state of knowledge regarding methods for monitoring floating plastic debris using satellite-based remote sensing.

Earth observation data have been used to monitor environmental issues for decades. Over the past ten years, these data have also been employed to detect and quantify plastic, both on land and in marine environments. Plastic reflects weak radiation signals, making it challenging to directly monitor plastic from space using approaches similar to those used for other ocean components, such as phytoplankton or suspended sediments. Despite significant advancements in satellite-based detection over the past few years, challenges remain, particularly in detecting smaller plastic fragments and differentiating plastics from other materials under suboptimal conditions.

Currently, the most suitable and widely used satellite for monitoring marine litter is Sentinel-2, which is also recommended as the primary satellite for Norwegian waters. Data from Sentinel-2 are freely available through the Copernicus program. While direct detection of small plastic objects remains challenging due to Sentinel-2's resolution, several Sentinel-2 data indices have been developed to identify larger clusters of floating objects and differentiate plastic from other floating materials such as wood or algae. These indices provide valuable indicators of areas with a high probability of plastic presence, forming the data basis for a monitoring program along the Norwegian coast.

Technological developments in this field have largely been based on research conducted in milder climates, such as the Mediterranean. Adapting these methods to Norwegian waters is not straightforward, as the harsh climate, including wind, waves, frequent cloud cover, and seasonally low light, creates difficult conditions for satellite monitoring. Moreover, the sources and rates of plastic input differ, as do the dynamics of plastic accumulation due to ocean currents and a complex coastline with deep fjords, which all influence the likelihood of larger, detectable litter accumulations forming. To address the challenges of collecting optical data from satellites along Norway's rugged coastline, it is recommended to supplement Sentinel 2 data with data from other satellites, such as hyperspectral data or SAR data, and to integrate ocean- and hydrological modeling. Additionally, it is suggested to explore the potential of alternative remote sensing data, such as LiDAR and TIR in some areas and periods.

Describing the likelihood of accumulation areas and their overlap with vulnerable ecosystems requires a thorough understanding of distribution and dispersal dynamics. Capturing such transient phenomena as plastic accumulations will necessitate relatively high temporal resolution in satellite monitoring. Ideally, this would involve a high-resolution dynamic ocean model and a particle dispersion model with well-described plastic characteristics to pinpoint likely accumulation areas.

Currently, no data exist to evaluate and validate satellite detection methods under Norwegian conditions. It is therefore recommended to initiate a monitoring program with a pilot phase, focusing on collecting such data and testing, evaluating, and adapting existing methodologies to Norwegian conditions. To develop a monitoring system for floating plastic in Norwegian waters, it is recommended to initially select smaller geographic monitoring areas. This approach facilitates focused integration of supplementary data collection, validation, and evaluation methods. Monitoring areas should be chosen based on their potential for plastic accumulation due to ocean circulation patterns, proximity to known sources such as fisheries, shipping activities, population density, and river outlets. Additionally, areas should be selected to allow for a broad assessment of limitations in data collection related to weather and climate, as well as the potential for enhanced monitoring using supplementary sensors beyond those employed by Sentinel-2. Based on this approach, thorough evaluations can be conducted in each monitoring area to contribute to the development and further planning of broader monitoring along the entire coast.

Recent research has highlighted that the ability to measure changes in density, distribution, composition, and movements of plastic will significantly increase with the development of specialized sensors for detecting marine litter. Several new and upcoming satellite-mounted sensors will likely contribute to this progress in the next few years. Commercial digital software packages have already been developed to identify and monitor floating plastic accumulations, but these require adaptation and optimization for the unique environmental and geographical challenges in Norway.

Once a monitoring system is operational, a special event alert system could be developed, such as alerts for when larger accumulations are detected. This report provides recommendations for developing such a system.

Several international programs and initiatives are driving progress in both satellite technology and data management for monitoring floating plastic accumulations in the coming years. Through a Norwegian monitoring program, Norway can actively participate in and contribute to this important development.

SAMMENDRAG

I denne rapporten presenteres anbefalinger og forslag til utforming av nasjonal indikator og overvåkingsprogram for bruk i norske farvann som kan bidra med nasjonale data på linje med FNs bærekraftsmål 14.1.1.b. Forslag og anbefalinger i rapporten er basert på en oppsummering av kunnskapsstatus for eksisterende metodikk for overvåking av flytende plastansamlinger ved hjelp av fjernmåling fra satellitt.

Jordobservasjonsdata har blitt brukt til overvåking av miljøproblemer i flere tiår. I løpet av det siste tiåret har jordobservasjonsdata også blitt brukt til å detektere og kvantifisere plast både på land og i marine miljøer. Plast reflekterer et svakt strålingssignal og dette gjør det vanskelig å direkte overvåke plast fra verdensrommet med samme tilnærming som brukes for andre havkomponenter, som fytoplankton eller suspenderte sedimenter.

Den i dag mest egnede og brukte satellitten for overvåking av marin forurensning er Sentinel-2, som også er den anbefalte hovedkilden til satellittdata til overvåking av norske farvann. Data fra Sentinel-2 er åpent og gratis tilgjengelig under Copernicus programmet. Direkte deteksjon av små plastobjekter er fremdeles utfordrende med Sentinel-2s oppløsning, men spektrale indekser har blitt utviklet basert på Sentinel-2-data for å identifisere større ansamlinger av flytende objekter og skille plast fra andre flytende materialer som tre eller alger. Dette gir nyttige indikatorer for områder med høy sannsynlighet for plast og danner datagrunnlag for et overvåkingsprogram også langs Norskekysten. Selv om nye metoder utviklet over de siste årene har gitt betydelige fremskritt i satellittbasert deteksjon, er det fortsatt utfordringer knyttet til deteksjon av mindre plastbiter og differensiering mellom plast og andre materialer under suboptimale forhold.

Den teknologiske utviklingen over de siste årene på dette feltet har i stor grad vært basert på feltarbeid i mildere breddegrader som Middelhavet. Det er ikke rett fram å overføre metodikk til Norskekysten, hvor hardt klima, med vind og bølger, mye skyer og mørke til sammen skaper vanskelige forhold for satellittovervåking. Kilder og tilførselsrater gjør at søppeltettheten er annerledes, og havstrømmer, en kompleks kystlinje med dype fjorder påvirker sannsynligheten for at større ansamlinger vil dannes. For å imøtekomme utfordringer knyttet til datainnsamling av optiske data fra satellitt langs den værharde Norskekysten, anbefales det å supplere med data fra andre satellitter, som hyperspektrale data eller SAR data, og modellering. I tillegg anbefales det å undersøke potensialet i å bruke alternative fjernmålingsdata som LiDAR og TIR data i avgrensede områder og perioder.

Å beskrive sannsynligheten for at akkumuleringssområder kan oppstå, og om de sammenfaller med sårbare naturtyper, krever en god oversikt over utbredelse og spredningsdynamikk. Det å fange slike potensielt flyktige fenomener som plastansamlinger vil kreve en relativt høy tidsmessig oppløsning i satellittovervåkingen om mulig i kombinasjon med en dynamisk havmodell og partikkelspredningsmodell med godt beskrevne plastpartikler til å peke ut sannsynlige områder.

Det finnes per i dag ingen data for evaluering og validering av satellittdeteksjon fra norske forhold, og det anbefales å initiere et overvåkingsprogram med en pilotperiode der fokus er på innhenting av slike data, samt testing, evaluering og videreutvikling av eksisterende metodikk for å tilpasse denne til norske forhold. For å utvikle et overvåkningssystem for flytende plast i norske farvann anbefales det å først velge ut mindre geografiske overvåkingsområder som tilrettelegger for fokusert integrering av supplerende metoder for datainnhenting, validering og evaluering. Overvåkingsområdene bør velges basert på høy sannsynlighet for plastakkumulering basert på havsirkulasjonsmønstre og nærhet til kjente kilder som fiske- og skipsfartsaktiviteter samt befolkningstetthet og elveutløp. Videre bør de kunne bidra til en bred kartlegging av begrensninger i datainnhenting relatert til vær og klima, og muligheter for tilpasset overvåking med supplerende sensorer utover sensorene i Sentinel-2. Basert på dette kan det utføres en grundig evaluering i hvert overvåkingsområde som kan bidra til utvikling og planlegging av videre overvåking langs hele kysten.

Nylig forskning har påpekt at potensialet for å måle endringer i tetthet, utbredelse, sammensetning, og forflytninger vil økes betraktelig med utviklingen av spesialtilpassede sensorer for deteksjon av marin forsøpling. Flere nye og framtidige satellittmonterte sensorer vil kunne bidra til denne utviklingen over de neste årene. Kommersielle digitale programpakker er allerede utviklet for å identifisere og overvåke flytende plastansamlinger i satellittbilder, men disse krever tilpasning og optimalisering for de unike miljømessige og geografiske utfordringene i Norge.

Når et overvåkningssystem er iverksatt vil et system for varsling av særlige hendelser kunne utvikles, som f.eks. varsling av når større ansamlinger detekteres. Denne rapporten gir anbefalinger for å utvikle et slikt system.

Flere internasjonale programmer og initiativer bidrar til framgang innen både satellitt-teknologi og datahåndtering innen overvåking av flytende plastansamlinger over de neste årene. Gjennom et norsk overvåkingsprogram vil Norge kunne ta del i og bidra til denne viktige utviklingen.

1 INTRODUKSJON

Plastforurensning i marine miljøer har blitt et stadig større problem over hele verden. Det er tidligere estimert at havet mottok omlag 4.8 til 12.7 millioner tonn plast i året i 2010 (Jambeck & Johnsen, 2015). Nyere forskning modererer dette anslaget til omlag 500 000 tonn i år 2020 (med en 4% årlig økning) (Kaandorp et al., 2023). Tallene er basert på modellering som tar sikte på å forklare hvorfor estimater på mengden flytende plast på havet er så mye mindre enn estimatene på hvor mye som tilføres hvert år; Det er tidligere estimert at omlag 250 000 tonn plast flyter på havene, basert på visuelle undersøkelser og overflatetrål-undersøkelser (Eriksen et al., 2014; van Sebille et al., 2015). Studiene viser til stor usikkerhet omkring disse estimatene. Noe av grunnen til at det er vanskelig å estimere er at andelen av havoverflaten som fysisk er dekket av plast i de mest forurensede områdene er estimert til å være under 0,02 % (Cózar et al., 2024). Den totale mengden plast i havet og på strendene våre, trendene i mengder, nedbrytningsprosesser, vertikale flukser og tidsskalaer er fremdeles i stor grad ukjente (Maximenko et al., 2019).

Andelen av marint avfall som flyter på overflaten er estimert til 95 % plast, og derfor er plast hovedfokuset i de fleste overvåkningsstrategier av marin forsøpling (Cózar et al., 2024). Overvåking og kartlegging av marin forsøpling er avgjørende for å utvikle effektive strategier for å redusere og til slutt eliminere plastavfall i havene. Over hele verden iverksettes det statlige strategier for å bekjempe marin forsøpling, men effektiviteten til disse strategiene er vanskelig å estimere siden vi mangler verktøy for systematisk overvåking av marin forsøpling over brede romlige og tidsmessige skalaer.

Jordobservasjonsdata har vært brukt til overvåking av miljøproblemer i flere tiår. I løpet av det siste tiåret har også potensialet for å bruke jordobservasjonsdata til å detektere og kvantifisere plast både på land og i marine miljøer blitt studert og utviklet (Waqas et al., 2023). Plast reflekterer et svakt strålingssignal og dette gjør det vanskelig å direkte overvåke plast fra verdensrommet med samme type tilnærming som brukes for andre havkomponenter, som fytoplankton eller suspenderte sedimenter. I stedet for å detektere små plastbiter direkte, kan satellitter identifisere større ansamlinger eller former som indikerer tilstedeværelse av plast (Cózar et al., 2024). Vind, tidevann, elveutløp og havstrømmer kan lage konvergenssoner på havoverflaten, som bidrar til akkumulasjonssoner av flytende materiale. Disse arter seg ofte som lange, ofte smale bånd av flytende materiale som kan observeres fra satellitter. Slike akkumulasjonssoner kan variere fra noen få meter brede og fra titalls til tusenvis av meter lange, og viser søppeltettheter opptil 10 000 ganger høyere enn omgivelsene (Cózar et al., 2024). Akkumulasjonsområdene kan ha potensiale til å varsle episoder med alvorlig overflateforurensning.

Satellitter kan i dag med stor pålitelighet detektere ansamlinger av flytende søppel ned på én meters størrelse som er skapt av konvergenslinjer på havoverflaten. Dette danner grunnlag for å bruke

såkalte «proxyer» for flytende plast i form av ansamlinger av flytende materiale. Det er imidlertid fremdeles usikkert om disse spredte og kortvarige hendelsene er gode nok proxyer til å danne grunnlaget for overvåking av marin forsøpling. Også andre flytende materialer som ugress, drivved eller havskum, vil samles i akkumuleringssonene og skape usikkerhet i dataene fra det reflekterte strålingssignalet.

1.1 SDG Indeks 14.1.1b "Tetthet av plastavfall"

Når det kommer til FNs bærekraftsmål (SDG) 14.1.1b, så er indikatoren 14.1.1b "Tetthet av plastavfall" fokusert på målinger av plast som har blitt skylt opp på strender eller kystlinjer, flyter på vannoverflaten eller i vannsøylen, avsatt på havbunnen, samt plast som har blitt inntatt av organismer¹. Basert på avtalte retningslinjer fra «Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection» (GESAMP) er det anbefalt at SDG-rapporteringen inkluderer underindikatorer knyttet til strandsøppel, flytende plast og plast i vannsøylen, plast på havbunnen, samt ekstra valgfrie indikatorer (United Nations Environment Programme). For detaljert metodikk og oppdateringer på globalt nivå angående innsamling og behandling av data for indikatoren, kan man benytte publikasjoner fra FNs miljøprogram (UNEP) som gir veiledning for hvordan man best kan overvåke tilstanden til havene i forhold til bærekraftsmålene (UNEP Document Repository²).

For 14.1.1a og 14.1.1b er det foreslått to obligatoriske nivåer, der nivå 1 tildeles globale dataløsninger (globalt tilgjengelige data fra jordobservasjoner og modellering). Overvåkingsparametere (og metoder) for plastansamlinger større enn 10 meter tilhører nivå 1. Om måling av plastansamlinger større enn 10 meter står det at satellittbaserte globale dataløsninger utgjør statistikken for denne indikatoren. NASA og ESA bidrar begge med satellittdata for å frembringe informasjon om plastansamlinger større enn 10 meter i verdenshavene. Dataene er tilgjengelige for nedlasting gjennom flere plattformer og portaler³. ESA distribuerer data også gjennom Copernicus programmet⁴. Videre beskrives det at fjernmåling av plast i vannsøylen ved hjelp av multispektrale satellitter for tiden bare er mulig for større elementer (mer enn 10 meter) og under gode atmosfæriske forhold (uten skyer) (*Metadata-14-01-01.pdf*).

¹ <https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/Metadata-14-01-01.pdf>

² <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/35086>

³ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

⁴ <https://scihub.copernicus.eu/>

1.2 Denne rapporten

I denne rapporten presenteres en oppsummering av kunnskapsstatus i Europa for eksisterende metodikk for overvåking av plastansamlinger i havområder ved hjelp av fjernmåling, samt vurderinger og forslag til utforming av nasjonal indikator for å undersøke og overvåke ansamlingsområder av plast over tid i norske farvann.

I kapittel 2 sammenstiller vi innsikt fra relevant vitenskapelig litteratur og grå litteratur (f.eks. rapporter og prosjekter) for å belyse status i metodikk som kan brukes i dag for å overvåke flytende makroplast ved hjelp av fjernovervåking. Hovedfokus i denne sammenstillingen ligger på satellittdata, som videre danner grunnlaget for kostnadsoverslag og anbefalinger til et nasjonalt overvåkingsprogram senere i rapporten. Rapporten presenterer i begrenset grad også supplerende metoder, som er foreslått å bruke i kombinasjon med satellittdata for å forbedre identifikasjonen av flytende plast, spesielt med tanke på sammensetning, volumestimerer og kildeidentifisering.

Videre diskuteres det hvorvidt disse metodene er anvendbare i norske forhold og deres egnethet til å identifisere akkumuleringsområder for flytende makroplast er vurdert. Dette inkluderer både direkte overvåking og validering av modelleringsstudier, samt vurdering av hvorvidt modelleringsdata kan bidra til å estimere sannsynligheten for eksistens av gyrer og flytende akkumuleringsområder, og hvorvidt disse overlapper med sårbare naturområder.

Dette legges til grunn for forslaget til utforming av et nasjonalt overvåkingsprogram, i Kapittel 3. Her beskrives hvordan vi anbefaler at et overvåkingsprogram legges opp, inkludert datainnhenting og -håndtering. To eksempler på prosessen med datainnhenting, -bearbeiding og presentasjon er presentert, gjennom praktiske tester av en selv-utviklet data pipeline og et kommersielt tilgjengelig verktøy. Videre presenteres et kostnadsoverslag for foreslått overvåkingsprogram. I kapittel 4 presenteres en vurdering om hvordan overvåkingsprogrammet kan utvides til å inkludere en varslingstjeneste og hvorvidt Rent Hav vil være et egnet verktøy for dette.

Avslutningsvis oppsummeres anbefalingene i rapporten, sammen med en diskusjon omkring modenheten til teknologien når det kommer til å måle endringer i tetthet og størrelse på akkumuleringsområder, forflytninger av slike områder, og sammensetningen. Metodikk for kildeidentifisering er også vurdert, samt om det er mulig å bruke disse for å forstå opprinnelsen til plastforurensningen som ledd i et nasjonalt overvåkingsprogram.

2 KUNNSKAPSSTATUS: OVERVÅKNING AV PLASTANSAMLINGER VHA. FJERNMÅLING

Hovedfokus for denne sammenstillingen er å undersøke de ulike metodene som per i dag anvendes for identifikasjon av flytende marin forurensning (FMF) ved hjelp av jordobservasjonsdata, inkludert datagrunnlag og databehandling. Sammenstillingen er basert på nye vitenskapelige publikasjoner, rapporter og publiserte offisielle retningslinjer, samt innhentet informasjon om nylig avsluttede eller pågående forskningsprosjekter og internasjonale initiativer. Videre presenteres det utfordringer knyttet til å overføre metodikk til norske forhold, samt vurderinger om det kan måles endringer i tetthet og størrelse, forflytninger av akkumuleringsområder, og søppelsammensetning. Vi vil samtidig vurdere metodikk for kildeidentifisering.

2.1 Metoder for overvåking av plast ved bruk av jordobservasjonsdata

Det finnes flere metoder for overvåking av plastforurensning ved hjelp av jordobservasjonsdata. Hvilken metode som er mest hensiktsmessig vil avhenge av typen data som brukes og formålet med overvåkingen, geografisk region og tilhørende klima. Metodene inkluderer sensorer montert på satellitter, fly, droner eller skip i kombinasjon med in-situ-data, og har til sammen vist stort potensiale når det gjelder å detektere og overvåke FMF, samt sammensetning av materialer. De fleste metoder for å oppdage, klassifisere, kvantifisere og spore FMF bruker i stor grad fjernmålingsdata fra flere kilder kombinert (Figur 1).



Figur 1. Fjernmåling av flytende plast ved hjelp av flere metoder kombinert. (Illustrasjon produsert v.h.a. AI-verktøyet DALL-E)

Her vil fokuset være på gjeldende metodikk innen satellitt- basert overvåking av flytende plastansamlinger, begrensninger og muligheter basert på dette. Satellitter med moderat til høy oppløsning har blitt vist å kunne detektere og identifisere fasong og størrelse på ansamlinger av flytende marin forsøpling (f.eks. Biermann et al., 2020; Cózar et al., 2024; K. Kikaki et al., 2022; Sannigrahi et al., 2022). Andre, supplerende sensorer blir presentert kort i kap. 2.1.5.

2.1.1 Hvordan satellitter brukes til å finne flytende plast

Det er de siste årene gjort store framskritt innen satellittbasert fjernmåling for å oppdage og overvåke FMF, spesielt plast. Den nyeste utviklingen innen spektral fjernmåling bruker bølgelengder i den synlige (VIS), nær-infrarøde (NIR) og kortbølgete infrarøde (SWIR) delen av strålingsspekteret for å identifisere og oppdage flytende plast på havoverflaten. I motsetning til sjøvann, som effektivt absorberer stråling i NIR og SWIR delene av spekteret, reflekterer de fleste flytende materialer (inkludert plastflasker, fiskegarn og plastposer) slik stråling (f.eks. Biermann et al., 2020; Topouzelis et al., 2019). Denne egenskapen gjør at ansamlinger av flytende plast er synlige fra satellitt. Intensiteten til refleksjonen og dermed signalet som kan måles av satellitten, er avhengig av hvor stor andel av en piksel som er dekket av flytende plast og hvilket materiale den består av. I tillegg vil det avhenge av hvor mye signalet «forstyrres» av andre materialer, som flytende treverk, alger, skum, og atmosfæren over. Deteksjon av plast fra satellitt forutsetter at sensoren har høy nok romlig

oppløsning i forhold til størrelsen på gjenstandene, og høy nok spektral oppløsning i den relevante delen av det elektromagnetiske spekteret.

På havet vil ansamlinger av flytende materiale ofte aggregeres sammen. Det vil inkludere plast og annet søppel med naturlig flytende materiale. Utfordringen ligger derfor i å ikke bare detektere ansamlinger av flytende materiale på havoverflaten men også å skille materialene fra hverandre for å anslå hvor stor andel av det som er plast.

2.1.1.1 Oppløsning

Tidligere har grov romlig og temporal oppløsning i tillegg til sensorer med få spektrale bånd og begrenset tilgjengelighet på data begrenset bruken av satellittdata for å finne FMF (Waqas et al., 2023). Når det kommer til satellittovervåking så er det tre aspekter ved oppløsning som er viktige:

1. Romlig oppløsning: sier noe om hvor store hver enkel piksel med data er ved jordens overflate, og dermed hvor store gjenstandene/ansamlingene må være for å være synlig for satellitten. Nylig utvikling innen høyoppløselige satellittbilder har gjort det mulig å identifisere flytende marint søppel med en oppløsning på 10 meter ved hjelp av spektralindeks og bildeklassifiseringsmetoder. Det er også mulig å oppskalere bildeoppløsningen ved hjelp av såkalte pan-sharpening-algoritmer⁵ som kan omberegne og oppskalere den romlige oppløsningen.
2. Temporal oppløsning: Dette sier noe om hvor ofte satellitten tar bilder på hvert enkelt sted, og kan blant annet være avhengig av satellittens bane. Oppgis ofte i «revisit»-tid, eller tilbakevendingsfrekvens.
3. Spektral oppløsning: Dette er en egenskap ved satellittens sensor(er) og beskriver hvor mange forskjellige bølgelengder eller bånd av bølgelengder satellitten kan detektere. Høy spektral oppløsning er nødvendig for å oppnå nøyaktige målinger av absorpsjon eller refleksjon fra forskjellige materialer, og på den måten kunne skille plast fra vann og andre flytende materialer.

2.1.1.2 Satellitter

Satellitter har forskjellige egenskaper når det kommer til temporal, spektral og romlig oppløsning. For eksempel har Landsat 8 (USGS/NASA) ni spektralbånd med en romlig oppløsning på 30 meter og en temporal oppløsning på 16 dager (*Landsat 8 | Landsat Science*). Kommersielle satellitter som SkySat og RapidEye har høyere romlig oppløsning på under en meter til 5 meter, men dekker kun 3 til 5 spektralbånd (*SkySat - Earth Online*).

⁵ En prosess der høyoppløste gråskala (pankromatiske) bilder og multispektrale bilder med lavere oppløsning blir slått sammen til ett enkelt høyoppløst fargebilde.

Med lanseringen av Sentinel-2A og 2B (*Sentinel-2 - an overview | ScienceDirect Topics*) fra European Space Agency (ESA) i 2015 og 2017, økte oppløsningen både temporalt og spektralt, og forbedret mulighetene til å detektere flytende makroplast. Sentinel-2-satellittene er per i dag de klart mest brukte satellittene til dette formålet (Waqas et al., 2023). Ombord på Sentinel-2-satellittene er det 12-bånds multispektrale instrumenter (MSI) som primært ble utviklet for andre målinger og tjenester, men de dekker også kyst- og havområder (Biermann et al., 2020). Sentinel-2 har fire forskjellige romlige oppløsninger, avhengig av båndet:

- 10 meter for synlige og nær-infrarøde bånd (B2, B3, B4, B8).
- 20 meter for infrarøde og kortbølgete infrarøde bånd (B5, B6, B7, B8A, B11, B12).
- 60 meter for atmosfæriske korreksjonsbånd (B1, B9, B10).

Sentinel-2 har en tilbakevendingsfrekvens på 5 dager ved ekvator med én satellitt (Sentinel-2A eller Sentinel-2B), og 2-3 dager med begge satellittene sammen. Den høye romlige oppløsningen på opptil 10 meter muliggjør deteksjon av forholdsvis små objekter.

Mange studier har over de siste årene demonstrert at Sentinel-2-satellittene også er godt egnet til å identifisere striper og ansamlinger av flytende makroplast (Biermann et al., 2020; Cózar et al., 2024; Waqas et al., 2023) til tross for at de har en moderat romlig oppløsning på 10 m, sammenlignet med andre høyoppløselige satellitter eller flyfoto. Sentinel-2-satellitten har en klar fordel med sine mange spektralbånd innen VIS, NIR, SWIR, samt en bred synoptisk synsvinkel.

Det fins også andre alternative satellitter som kan brukes til deteksjon av flytende plast, eller som et supplement i visse områder og visse oppgaver. PlanetScope⁶ er en satellitt som tilbyr daglige oppdateringer og en romlig oppløsning på 3-5 meter, men spektralområdet er mer begrenset sammenlignet med Sentinel-2. Dataene er ikke gratis, i motsetning til Sentinel-data, og kostnaden for tilgang til PlanetScope-data kan også være en begrensning for bred nasjonal bruk.

Det finnes også satellitter med enda høyere spektral oppløsning, som PRISMA (PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa)⁷, som er en italiensk hyperspektral satellitt som gir detaljerte spektrale data over et bredt spekter av bølgelengder (400-2500 nm). Den har 239 kanaler som dekker den synlige til kortbølgede infrarøde delen av spekteret (VIS-SWIR) (*PRISMA (Hyperspectral) - eoPortal*). Hyperspektrale sensorer kan fange data fra mange sammenhengende spektralbånd, noe som gir mer detaljert informasjon om materialeegenskaper (Goddijn-Murphy &

⁶ <https://developers.planet.com/docs/data/planetscope/>

⁷ <https://www.asi.it/en/earth-science/prisma/>

Dufaur, 2018). Denne satellitten har høy spektral oppløsning og kan identifisere forskjellige typer plast på grunn av sin hyperspektrale sensor, men den har en lavere romlig oppløsning (30 meter) og en lengre tilbakevendingsfrekvens, noe som gjør den mindre egnet for detaljerte og hyppige oppdateringer langs norskekysten. Det kan være hensiktsmessig å bruke PRISMA for spesifikke plastidentifikasjonsoppgaver for begrensede områder, for eksempel dersom man ønsker å identifisere eller differensiere ulike typer plast i et kjent oppsamlingsområde. Til tross for høy spektral oppløsning har den ikke veldig høy romlig oppløsning, og er på den måten mindre egnet til å estimere størrelsen eller formen på FMF (Kremezi et al., 2021; Maximenko et al., 2019). Den romlige oppløsningen er på 30 meter for hyperspektrale data, og den har en pankromatisk kanal (svart-hvitt-bilder) på 5 meter. Tilbakevendingsfrekvensen er på 7 dager.

EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program)⁸ er en annen hyperspektral satellitt som kan være relevant for overvåking av plastforurensning i kystnære områder. EnMAP har en svært høy spektral oppløsning, med over 240 spektralbånd som dekker både det synlige, NIR- og SWIR-området av spekteret. Denne detaljerte spektrale informasjonen gjør EnMAP i stand til å skille mellom et bredt spekter av materialer, inkludert ulike typer plast, mer presist enn multispektrale satellitter som Sentinel-2. Selv om EnMAP har lavere romlig oppløsning (30 meter) enn Sentinel-2, kan den høyere spektrale oppløsningen tilby en mer nøyaktig materialkarakterisering. Tilbakevendingsfrekvensen er 27 dager, men ved bruk av skråbilder kan denne reduseres noe. Med sin detaljerte spektrale oppløsning er EnMAP et verdifullt verktøy for spesialiserte overvåkingsprosjekter. Med sin lavere romlige oppløsning og lengre tilbakevendingsfrekvens sammenlignet med alternativer som Sentinel-2 og PlanetScope, kan EnMAP være mindre egnet for prosjekter som krever hyppige oppdateringer eller dekning av store områder.

SAR-systemer som Sentinel-1 kan gi informasjon om tekstur og konsistens i havoverflaten, som er nyttig for å identifisere områder med flytende plast. SAR-data fra Sentinel-1 er gratis tilgjengelig via Copernicus Data Space Ecosystem. Gjenbesøktiden er 6 dager (med begge satellittene, Sentinel-1A og Sentinel-1B). Etter tapet av Sentinel-1B i desember 2021 er tilbakevendingsfrekvensen for øyeblikket 12 dager. Den romlige oppløsningen er 5–40 m, avhengig av bildeopptaksmodus.

⁸ <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/projects-and-missions/enmap/>

INFRARØD STRÅLING OG FJERNMÅLING AV MARIN FORSØPLING

Infrarød (IR) stråling er en type elektromagnetisk stråling som har lengre bølgelengder enn synlig lys, men kortere enn mikrobølger. Den dekker et bredt spekter av bølgelengder fra omtrent 0,7 mikrometer (700 nanometer) til 1 millimeter. IR-stråling er usynlig for det menneskelige øyet, men kan føles som varme. Infrarød fjernmåling er spesielt nyttig fordi IR-stråling kan trenge gjennom skyer og atmosfæriske partikler som blokkerer synlig lys, og gir dermed mer pålitelige data under ulike værforhold. IR-stråling brukes i flere applikasjoner for overvåking og forskning på marin forsøpling, inkludert deteksjon av FMF.

IR-stråling deles ofte inn i følgende underkategorier:

- Nær-infrarød (NIR) Bølgelengder: 0,7 til 1,4 mikrometer. Bruksområder: Fjernmåling av vegetasjon, kartlegging av landbruk, overvåking av miljøforandringer. Brukes også til å oppdage og overvåke marin forsøpling, spesielt når kombinert med synlige bølgelengder i multispektrale sensorer.
- Kortbølget infrarød (SWIR): Bølgelengder: 1,4 til 3 mikrometer. Bruksområder: Deteksjon av vanninnhold i jord og planter, overvåking av vegetasjonstilstand, materialidentifikasjon, inkludert marin forsøpling. Kan brukes til å identifisere plastavfall på havoverflaten da plast har spesifikke reflektanssignaturer i SWIR-området som gjør det mulig å skille det fra naturlige materialer som vann, alger og drivved.
- Mid-infrarød (MidIR eller MIR): Bølgelengder: 3 til 8 mikrometer. Bruksområder: Overvåking av jordens overflatetemperatur, undersøkelse av geologiske formasjoner, miljø- og atmosfærisk forskning. Brukes til å overvåke endringer i havets overflatetemperatur, noe som kan påvirke strømmer og fordeling av flytende avfall.
- Langbølget infrarød (LWIR): Bølgelengder: 8 til 15 mikrometer. Bruksområder: Varmekameraer for nattobservasjon, deteksjon av varmeutslipp fra industrielle prosesser, miljøovervåking.

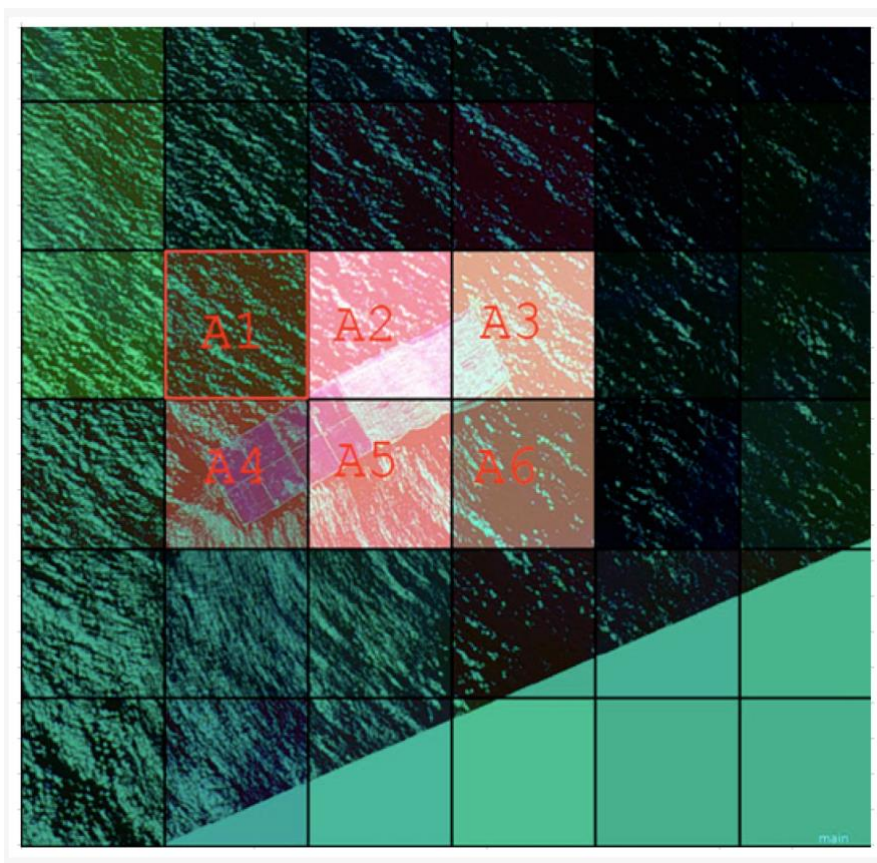
2.1.2 Bakkessannheter og valideringsdata

For å kalibrere og validere data fra fjernmåling kombineres ofte satellittdata med bakkessannheter (in-situ-målinger, gjort direkte i feltet). In-situ-data om plastkonsentrasjoner brukes til å sammenligne med satellittobservasjoner og sikre at deteksjonen er nøyaktig, samtidig som det bidrar til utviklingen av indekser for plastidentifikasjon ved å evaluere den spektrale reflektansen til plastmaterialer i laboratorier eller ved å plassere fysiske plastflåter i havet (Biermann et al., 2020).

Spektral evaluering i laboratorier kan identifisere de mest egnede bølgelengdene for å gjenkjenne plast i satellittdata. Resultatene kan så brukes til å velge de beste båndene fra multispektrale satellittdata for å identifisere FMF. I kontrollerte eksperimenter har det blitt designet plastflåter laget med ulike plastmaterialer (f.eks. plastflasker eller bæreposer) som plasseres innenfor

sensorens synsfelt for analyse. Spektralprofiler av våte og tørre plastflåter er målt og brukt som referansedata for FMF-identifikasjon fra satellitter og andre plattformen (Goddijn-Murphy & Dufaur, 2018; Moshtaghi et al., 2021; Tasseron et al., 2021). For eksempel undersøkte Hu (2022) de spektrale egenskapene til Sentinel-2-bånd innen VIS- og NIR-delene av spekteret for å undersøke effekten av blandede piksler⁹ for deteksjon av FMF.

Det er også plassert ut plastflåter i havet på spesifikke tider og steder for å samle satellittdata for trening av bildeklassifiseringsalgoritmer (Papageorgiou et al., 2022; Topouzelis et al., 2019, 2020) plasserte ut plastflåter på 10 × 10 m, 5 × 5 m, 5 × 10 m og 5 × 20 m i Egeerhavet til forskjellige tider og steder for å innhente spektralmålinger under realistiske forhold og sammenligne med Sentinel-2-data (). Tilsvarende brukte Kremezi et al. (2021) mindre mål på 0,6 m × 0,6 m og 2,4 m × 2,4 m, og mål på 5,1 m × 5,1 m, ved Lesvos, Hellas. Jamali & Mahdianpari (2021) brukte større mål på 45 m × 5 m og 21 m × 10 m i Mytilene, Hellas. Målet med å plassere ut flåter i ulike størrelser er å undersøke satellittenes evne til å detektere objekter i varierende størrelser.



Figur 2. Eksempel på tilgjengelige treningsdata fra the Plastic Litter Project i form av et Sentinel-2 satellittbilde av en utplassert plastflåte (45 x 15 m) bestående av 50% plastflasker og 50% plastposer ved Mytilene i Hellas (pikselstørrelsene til A1 til A6 er 10 m × 10 m). Kilde: Jamali og Mahdianpari (2021).

⁹ I satellittbilder kan en piksel dekke både plast, vann og andre materialer samtidig, noe som kan forvrir de spektrale målingene og gjøre det vanskeligere å skille plast fra andre materialer.

I et annet prosjekt har Kikaki et al. (2022) sammenstilt et standardisert datasett, Marine Debris Archive (MARIDA), basert på rapporterte ansamlinger av flytende søppel og Sentinel-2-data, for åpent bruk i hele forskningsmiljøet med formålet om å utvikle og evaluere maskinlæringsmodeller som oppdager FMF og skiller det fra annet flytende materiale (Figur 3).



Figur 3. Stedene (røde prikker på kartet) hvor rapporterte hendelser med marint søppel er verifisert og tilsvarende Sentinel-2 satellittbilder er innhentet og behandlet innen MARIDA prosjektet. Kilde: Kikaki et al. (2022).

2.1.3 Indekser

En viktig metodologisk fremgang har vært utviklingen av forskjellige indekser for å oppdage flytende materialer på havoverflaten. Indekser for å detektere flytende plast er basert på multispektrale data og er matematiske kombinasjoner av spektralbånd som fremhever plastens reflektanseegenskaper i forhold til vann og andre materialer. Indeksene brukes til å identifisere og kartlegge plastansamlinger på havoverflaten ved hjelp av satellittbilder. Multispektrale satellittdata (f.eks. Sentinel-2) samles inn over et spesifikt område, hvor indeksen beregnes piksel for piksel basert på spektrale verdier fra relevante bånd.

Disse indeksene bruker forskjellen i absorpsjon mellom ulike materialer i de ulike bølgelengdene for å identifisere sannsynligheten for søppelansamlinger, samt deres form og størrelse. Waqas et al. (2023) gir en god oversikt over ulike indekser beskrevet i litteraturen så langt. Noen er basert på multispektrale data (som fra Sentinel-2) og andre er basert på hyperspektrale data (som PRISMA).

Biermann et al. (2020) utviklet Floating Debris Index (FDI) ved bruk av Sentinel-2-bånd 4 (rødt), bånd 6 (Rededge2), bånd 8 (NIR), og bånd 11 (SWIR 1). Denne indeksen ble brukt for å skille flytende gjenstander fra havvann. I tillegg brukte de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) basert på Sentinel-2-bånd 4 og bånd 8 for å identifisere og klassifisere vegetasjonsdekket. FDI ble særlig nyttig for å avdekke spektrale forskjeller mellom flytende gjenstander og havvann, mens NDVI bidro til å skille plast fra vegetasjon, drivved og sjøskum. Ved å kombinere FDI og NDVI kan FMF oppdages på sub-pikselnivå (mindre enn en enkelt piksel i satellittdata), noe som øker nøyaktigheten for deteksjon av plast i havet (Biermann et al., 2020). Dette er blitt en mye brukt indeks som vi også kommer tilbake til senere i rapporten.

Andre nylig utviklede indekser inkluderer Plastic Index (PI) og Reversed Normalized Difference Vegetation Index (RNDVI) (Themistocleous et al., 2020). Ved å bruke Sentinel-2-bånd 4 og bånd 8 er begge indeksene effektive til å skille plastflåter fra vann, men PI gir bedre resultater, ettersom plastflåtene den er kalibrert mot, viser høyere verdier (fra 0 til 1) under FMF-deteksjon. Kremer et al. (2021) undersøkte de spektrale verdiene for Floating Marine Debris Index (HI), som de utviklet ved å bruke VIS- og NIR-bånd fra hyperspektral satellittdata². HI-indeksen kan skille plast fra andre flytende objekter. Khetkeere & Liangrocapt (2021) foreslo i sin studie Modified Infrared Normalized Vegetation Index (MINDVI), som brukte Sentinel-2-bånd 8, 11 og 12, og Hu (2009) utviklet Floating Algae Index (FAI) for å identifisere flytende vegetasjon og skille den fra annet søppel. Sannigrahi et al. (2022) brukte Kernel Normalized Difference Vegetation Index (kNDVI), som er spesielt effektiv for å oppdage flytende plast i åpent hav. Til slutt foreslo Booth et al. (2023) Marine Debris Map (MDM)-indeks, som estimerer sannsynligheten for at en piksel inneholder FMF. MDM-indeksen er basert på FDI og NDVI og en optimalisert maskinlæringsalgoritme og hel-automatisert databehandlingssystem som er evaluert og validert basert på publiserte datasett av bakkesannhetsdata fra MARIDA og PLP (se Kap. 2.1.1).

Nøyaktigheten til disse indeksene avhenger av den spektrale og romlige oppløsningen til sensorene. Hyperspektrale data kan gi bedre nøyaktighet for å skille plast fra andre materialer. Indeksenes effektivitet avhenger også av plastflåtenes størrelse og hvordan de oppfører seg under ulike forhold, som vær og bølger. Effektiviteten påvirkes også av konsentrasjonen av andre materialer i vannet, som alger og sedimenter.

Disse spektrale indeksene er utviklet under kunstige forhold, enten i laboratorium eller ved hjelp av kunstige flytende plastflåter. De kan ikke skille plastmaterialer fra andre flytende materialer alene, men brukes ofte for å identifisere piksler som inneholder marint søppel i satellittdataene. Flere av indeksene krever sensorer og bildemateriell utover satellittbilder for å kunne fungere optimalt, som for å skille plast fra andre materialer i en flytende ansamling som man typisk finner på havet. I tillegg gjenstår det fremdeles utfordringer knyttet til effekten av begroing på spektralsignaturer

(Papageorgiou et al., 2022) og hvordan det påvirker spektral oppløsning og prosesseringen av dataene.

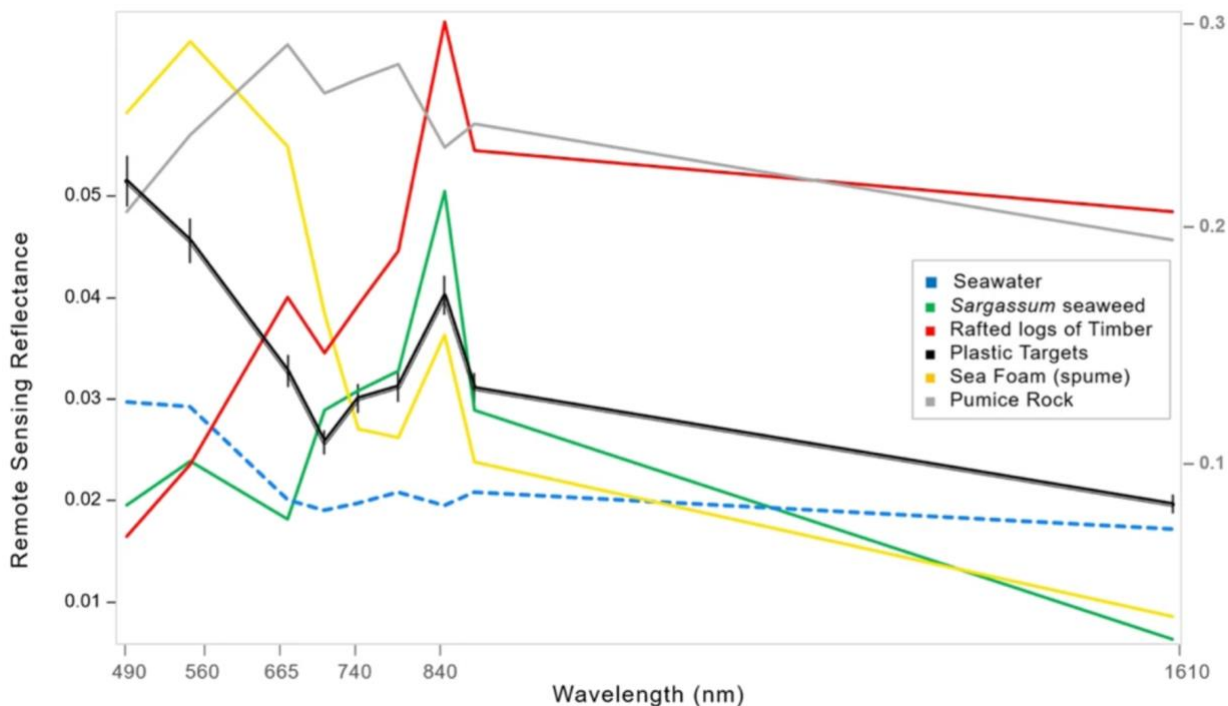
2.1.3.1 Spektrallinjer og -signaturer

Forskjellige materialer (og samlinger av objekter) har egne karakteristiske strålingsspektra, og disse brukes til å identifisere såkalte «spektrale signaturer». Når man kjenner spektralsignaturen til de forskjellige materialene, kan disse gjenkjennes i satellittbildene og brukes til å beregne sannsynligheten for at materialene er tilstede i en piksel (Biermann et al., 2020). Dette kan brukes til å beregne sannsynligheten for andelen plasttyper i ansamlinger av FMF (Hu, 2022). Dette undersøkes både i laboratorier og ved hjelp av in-situ-eksperimenter. For fjernmålingsdata har de største fremskrittene blitt gjort innen VIS-, NIR- og SWIR-spektralsensorer (Kikaki et al., 2020; Maximenko et al., 2019).

Refleksjonsintensiteten for plast er avhengig av andelen plast i en piksel. (Topouzelis et al., 2019) fant at når sjøvann dekket mer enn 50-70% av en piksel, ble refleksjonsintensiteten lav i NIR. I piksler der minst 30% av overflaten var dekket av plastflasker eller plastposer, eller minst 50% av fiskegarn, ble den spektrale signaturen til flytende plast synlig. Enkelte plastgjenstander eller små ansamlinger vil altså ikke være nok til å gi et sterkt strålingssignal, men større gjenstander eller ansamlinger vil være synlige når de utgjør en stor nok andel av en piksel.

Basert på refleksjonsmønstre fra 10 av de 12 multispektrale båndene til Sentinel-2 klarte for eksempel Biermann et al. (2020) å generere spektrale signaturer til fem vanlige materialer i FMF; tang, sjøskum, tømmer, makroplast og sjøvann (Figur 4) og brukte dem i kombinasjon med FDI for å identifisere plastansamlinger og skille materialene fra hverandre (Biermann et al. 2020). De brukte spektralsignaturer for plast basert på maskinlæringsalgoritmer trent på bilder av plastflåter som er plassert ut i havet og studert med Sentinel-2 bilder. Disse bestod av plastflasker, poser og fiskegarn, og representerer altså en blanding av plastmaterialer, og danner en representativ signatur for flytende plastmaterialer samlet.

Høyoppløste multispektrale og hyperspektrale data fra flere satellitter, inkludert Sentinel-2, WorldView-3, PlanetScope og PRISMA, har blitt brukt på denne måten for å identifisere flytende søppel i forskjellige studier (Park et al., 2021; S. Vitale et al., 2022; Topouzelis et al., 2021; Waqas et al., 2023).



Figur 4. Spektralsignaturer er estimert fra gjennomsnittsspektra fra utplasserte plastflåter (svart linje med feilstolper), tang som representerer flytende vaskulære planter (grønn linje), sjøvann fra alle teststeder (stiplet blå linje), flåtetømmer og tre som representerer ikke-fotosyntetiske plantematerialer (rød linje), pimpstein som representerer ikke-plantematerialer (lys grå linje), og skum som representerer sjøskum, bobler og skum (gullfarget linje). X-aksen viser spekteret til Sentinel-2 MSI-båndene fra synlig blått lys ved 490 nm til kortbølgete infrarødt lys ved 1610 nm. Y-aksen til venstre viser fjernmålingsrefleksjon (uten enhet) fra Sentinel-2 for sjøvann, tang, sjøskum og plastmålene. Fjernmålingsrefleksjonen (uten enhet) for tre og pimpstein var betydelig høyere. Disse ble justert ned for å illustrere relative spektrale former for alle materialene, og de tilsvarende refleksjonene vises på y-aksen til høyre i grått. Kilde: Biermann et al. (2020).

2.1.4 Metoder for bildeklassifisering og databehandling

Over de siste årene har man hatt stor fremgang i opplæring av ulike veiledede og ikke-veiledede bildeklassifiseringsmetoder for å identifisere, oppdage og kvantifisere FMF i satellittbilder. I veiledede klassifiseringsmetoder velges piksler som inneholder plast (treningsdata) manuelt for å trene algoritmen til å gjenkjenne plast i bildene, og resten av bildet klassifiseres basert på disse prøvene. Ikke-veiledede metoder grupperer data i klasser basert på mønstre og likheter i dataene, uten behov for forhåndsdefinerte treningsdata. Disse bildeklassifiseringsmetodene hjelper til med å skille plast fra vann og andre naturlige materialer i satellittbildene. Begge metodene er en del av maskinlæring, innen feltet datadrevet bildeanalyse og mønstergjenkjenning. Noen studier har brukt RGB-bilder for å identifisere plast. Andre studier bruker indekser som FDI og NDVI til å hente ut plastens form og spektrale signatur fra multispektral fjernmåling, for deretter å analysere bildene med maskinlæring for å lære mer om plastinnhold, materialer og konsentrasjoner.

For opplæring og testing har de fleste studier brukt utplasserte plastflåter, spektralverdier av plast og ulike spektrale indekser som variabler for forskjellige bildeklassifiseringsmetoder for FMF.

Ytelsen til disse bildeklassifiseringsmodellene forbedres med mer treningsdata, som ved å øke antall bilder med plastflåter. Større mengder data og mer nøyaktige treningsdata bidrar til at maskinlæringsmodellene blir enda mer pålitelige og effektive for å identifisere FMF.

Fra litteraturen ser vi at de fleste maskinlæringsmetodene utviklet over de siste årene for FMF-deteksjon er trent på Sentinel-2-data, ettersom disse dataene har vist seg effektive for dette formålet.

2.1.5 Supplerende sensorer

Indekser for plastdeteksjon er oftest basert på optiske data i NIR og SWIR, men kombinasjoner med andre sensorer har vist lovende resultater for å forbedre robusthet og dekning. Data fra andre teknikker, som Synthetic Aperture Radar (SAR) eller LiDAR, kan fremskaffe tilleggsinformasjon til indeksene nevnt tidligere. For å skille plast fra andre flytende materialer (også om natten) har termal infrarøde (TIR) sensordata vist seg å være effektive.

Radarbasert fjernmåling (SAR), som på Sentinel-1, bruker radarstråler som kan penetrere gjennom skyer og er derfor robust under varierende værforhold. Ved å kombinere disse typene fjernmålingsdata med multispektrale eller hyperspektrale satellittdata, gir man en mer komplett oversikt over innhold og volum i ansamlinger av FMF. For eksempel kan multispektrale bilder gi informasjon om farge og reflektans, mens SAR-data kan gi informasjon om objektenes fysiske egenskaper. Dette kan bidra til mer nøyaktige estimater av plastmengdene i havet. SAR-fjernmåling kan også oppdage større aggregerte ansamlinger ved å undersøke intensiteten til tilbakespredningssignalet fra plasten og det omkringliggende vannet (Topouzelis et al., 2019).

I tillegg kan LiDAR brukes til å kvantifisere store aggregerte plastflåter på vannoverflaten, på havbunnen (på grunt vann <50m) eller i vannsøylen, ved å detektere tilbakespredningsverdier fra forskjellige objekter med forskjellige spektralverdier. 3D-visualisering ved hjelp av LiDAR-data gir et volumestimat og størrelsesfordeling av det aggregerte marine plastavfallet.

Det termiske infrarøde spekteret (TIR) kan også brukes til å identifisere flytende materialer på havoverflaten, ettersom de avgir og reflekterer forskjellige temperaturer sammenlignet med omgivelsene, som undersøkt av Goddijn-Murphy & Williamson (2019). De brukte emissivitetsverdiene til plast og vann for å identifisere flytende plast i havet ved hjelp av TIR-data fra en fly-montert sensor. Den romlige oppløsningen til TIR-sensor på satellitter er for lav. Denne tilnærmingen fungerer best når temperaturforskjellen mellom luft og sjø er stor, da termiske infrarøde sensorer måler varmestråling fra objekter. Plast kan ha en annen temperatur enn vann og andre naturlige materialer, og forskjellen i temperatur, eller i «termisk signatur», mellom plasten og omgivelsene kan dermed brukes til å identifisere plastavfall, spesielt på større havoverflater (Goddijn-Murphy & Williamson, 2019). Hvor stor temperaturforskjellen mellom vannet og luften er

vil variere med sesong og lokalitet. Generelt vil flytende plast bli varmere enn vannet rundt på solrike dager. Langs Norskekysten vil havtemperaturen være høyere enn plasten på kalde dager.

Høyoppløselige sensorer montert på fly, droner eller skip kan også brukes til å identifisere plast som flyter på havoverflaten ved hjelp av visuell tolkning av bilder (Garcia-Garin et al., 2019; Kikaki et al., 2020; Lebreton et al., 2018). Foto og visuelle tolkningsmetoder er imidlertid tidkrevende, har lav synoptisk dekning, er kostbare, og krever en trent observatør. Nyere studier har også tatt i bruk spesielt tilpassede kunstig intelligens (KI)-modeller til å tolke video og bilder for å identifisere plastsøppel i bildene (De Vries et al., 2021).

Forskjellige teknikker kan ha forskjellig sensitivitet til vær- og vindforhold og kan dermed være mer eller mindre egnet i forskjellige områder og sesonger. TIR og LiDAR vil fungere godt når atmosfæriske og oseanografiske forhold er gode, det vil si ved rolig sjø uten høye bølger, og lite skyer. For å oppnå høy nok romlig oppløsning må disse monteres nærmere bakken enn satellitt, for eksempel på fly eller droner. For SAR-data derimot er ikke skyer et problem, og endringer i intensiteten av tilbakespredning påvirkes av variasjoner i « r u h e t e n » p å bølger. For lite bølger og «ruhet» vil gi lite tilbakespredning og dermed begrense signalet. For mye bølger vil kunne kamuflere plastbiter og bryte opp eventuelle ansamlinger og gjøre dem vanskelig å detektere. SAR-data kan altså prestere bedre under ulike sky- og sjøforhold, mens TIR og LiDAR kan være mer sårbare for skyer og bølger. LiDAR og TIR kan bidra i tillegg til multispektrale sensorer for robust kartlegging av flytende plast spesifikke scenarioer, men begrensningene deres gjør det ofte nødvendig å kombinere dem med andre teknologier som SAR. For videre detaljer og oversikt over de forskjellige teknikkene er relevante referanser gitt i Tabell 1.

Tabell 1. Oversikt over metoder og relevant litteratur. Basert på oppsummering i Waqas et al. (2023).

Metode	Referanser
Visuell tolkning	(Garcia-Garin et al., 2019, 2020; Kikaki et al., 2020; Topouzelis et al., 2019)
Spektralreflektans tolkning	(A. Hueni & S. Bertschi, 2020; Ciappa, 2022; Goddijn-Murphy & Dufaur, 2018; Hu, 2021, 2022; Miyazono et al., 2021; Papageorgiou et al., 2022; Tasserou et al., 2021)
Modellering	(Dasgupta et al., 2022; Kikaki et al., 2020; Lebreton et al., 2018; van Sebille et al., 2020)
Bildebasert klassifisering	(Basu et al., 2021; Biermann et al., 2020; De Vries et al., 2021; Freitas et al., 2022; Garcia-Garin et al., 2021; K. Kikaki et al., 2022) Jamali and Mahdianpari, 2021;
Multikilde fjernmåling (VIS, NIR, SWIR)	Balsi et al., 2021; Garaba et al., 2021; Garaba and Dierssen, 2018; Garcia-Garin et al., 2021; Wolf et al., 2020
Spektral radiometri	Goddijn-Murphy and Dufaur, 2018; Moshtaghi et al., 2021; Tasserou et al., 2021
Satellittbilder	Hu et al., 2022; Kikaki et al., 2022; Kremezi et al., 2022, 2021; Mifdal et al., 2021; Park et al., 2021; Taggio et al., 2022
Termisk infrarød (TIR) avbildning	Goddijn-Murphy et al., 2022; Goddijn-Murphy and Williamson, 2019
Synthetic Aperture Radar (SAR)	Aoki et al., 2013; Simpson et al., 2022; Topouzelis et al., 2019
Mikrobølge X-bånd radar	Serafino and Bianco, 2021; Simpson et al., 2023
LiDAR	Feygels et al., 2017; Lebreton et al., 2018; Mace, 2012
Videoavbildningsteknikker	Armitage et al., 2022; de Vries et al., 2021; Teng et al., 2022

2.1.6 Modellering og prediksjon

I løpet av det siste tiåret har det blitt utviklet ulike modeller for å forutsi utbredelsen og fordelingen av marint søppel på havet. Disse varierer fra statistiske observasjonsdrevne modeller til svært idealiserte to- og tredimensjonale partikkelsporingsmodeller.

Maximenko et al. (2019) påpeker at dynamisk modellering burde være en sentral del av et satellittbasert overvåkingsprogram, der utveksling av informasjon mellom modell og satellittbaserte resultater vil bedre forståelsen av fordelingen av FMF. En iterativ prosess med informasjonsutveksling mellom modell og overvåkingsprogram kan forbedre forståelsen og gi positive resultater for overvåkingen av FMF. Resultatene fra et overvåkingsprogram vil kunne brukes til å informere og forbedre modellkjøringene, og disse vil igjen gi bedre estimater på områder overvåkingen burde fokusere på, samt bidra til estimering av sannsynligheten for eksistens av gyrer og flytende akkumuleringsområder. Mens satellittobservasjoner gir øyeblikksbilder av plastforurensning, kompletterer havmodeller disse ved å forutsi plastens bevegelser over tid og i rom. Modeller kan på den måten bidra til å fokusere innsatsen på prioriterte områder, noe som sparer ressurser og forbedrer programmets effektivitet.

Kombinasjonen av sanntidsdata fra satellitter og modeller gir kontinuerlig overvåking ved å fylle inn hullene mellom satellittenes gjenbesøktider. Havmodeller kan hjelpe for å forstå hvordan plast transporteres over store avstander gjennom havstrømmer, noe som kan gi innsikt i både lokale og globale plastkilder. I tillegg kan modellene brukes til å planlegge feltarbeid for validering av satellittobservasjoner, og deres prediksjoner kan støtte forvaltningstiltak inkludert opprydding og overvåking av spesifikke områder. For å bruke hav- og havstrømsmodeller som del av et satellittovervåkingsprogram, må man velge modeller som passer til de geografiske og dynamiske kravene, og vurdere i hvilken grad man trenger høy oppløsning (som i smale fjorder og sund) eller dekke større områder med lavere oppløsning (som i større havområder med strøm og bølger).

Slik kan man danne et bilde av hvor gyrer og fronter i overflaten er, og koble resultatene med faste kilder eller utslippshendelser ved partikkelmodellering. Dette er verktøy som kan øke prediktabiliteten og i noen tilfeller treffsikkerheten til plastdeteksjon. Noen utfordringer med partikkelmodellering er at det fremdeles foreligger mye usikkerhet omkring egenskapene til plast på havet, og hvordan den eventuelt endrer seg med tiden. Egenskapene og endringene i dem er viktige å representere riktig i modellen siden de vil påvirke resultatene gjennom prosesser som fragmentering, begroing og endrede synkehastigheter, noe som vil påvirke dynamikken til partiklene og dermed resultatene for transport og tetthet i stor grad (Kaandorp et al., 2023).

2.1.7 Initiativer og stor-skala programmer og fremtidig arbeid

Det er flere pågående og kommende prosjekter i samarbeid med forskningsmiljøer rundt om i verden for å fremme bruken av fjernmålingsdata til kartlegging og overvåking av marin forsøpling.

European Space Agency (ESA) har lansert flere prosjekter under “Discovery Campaign on Remote Sensing of Plastic Marine Litter”¹⁰. Disse prosjektene inkluderer blant annet *Remote Sensing of Plastic Marine Litter*, *AIDMAP* (Artificial Intelligence and drones supporting the detection and mapping of floating aquatic plastic litter), *Plastic Litter Project* (PLP), *FRONTAL*, *SPOTS*, *HyperDrone*, og *TRACE*. Alle disse initiativene er en del av ESAs Open Space Innovation Platform (OSIP) finansieringskampanje, som støtter innovative ideer for å detektere plastforurensning i havet ved hjelp av fjernmåling.

Det er blitt gjort store fremskritt gjennom Plastic Litter Project 2018-2022 (Papageorgiou et al., 2022; PLP, 2023; K. Topouzelis et al., 2019; Topouzelis et al., 2020a) og MARIDA (K. Kikaki et al., 2022) som begge fokuserte på tilgjengeliggjøring av trenings- og valideringsdata for å hjelpe andre forskere med å utforske mulighetene for satellittbasert deteksjon og kvantifisering av plastavfall i havet. The Ocean Cleanup¹¹ har gjennomført flere forskningsprosjekter for å utvikle og skalere fjernmålingsbaserte teknologier for overvåking og kartlegging av plastforurensning i havet (De Vries et al., 2021).

Et partnerskap av internasjonale romfartsorganisasjoner og forskningsinstitusjoner fra seks europeiske land resulterte i et nylig publisert «proof-of-concept» studie av Cózar et al. (2024), finansiert av ESA, der historiske satellittdata fra Sentinel-2 (>300 000 bilder) over Middelhavet ble analysert for flytende makroplast. Tidsserien med data dekker hver tredje dag i en periode på seks år, med oppløsning på 10 meter. Tusentalls flytende akkumuleringer med marin forsøpling ble detektert, og disse ble koblet til hydrologiske modelldata for Middelhavet fra JRC for å prøve å forklare mønster i akkumuleringer. Forskningsgruppen konkluderer i studien med at satellittbasert overvåking kan identifisere akkumuleringsområder («hot spots»), påvise sesongvariasjoner i utbredelse av flytende marin forsøpling, og at det muliggjør en ikke tidligere tilgjengelig visualisering av kilder til marin forsøpling. Dette står i sterk kontrast til konklusjonene fra JRCs tekniske rapport fra 2023 om overvåking av marin forsøpling (Galgani et al., 2023) som viser til at satellittbasert overvåking av flytende makroplast ikke er modent for bruk til standardisert og systematisk overvåkningsprogram. JRC viste til studien fra Cozar et al. 2024 og kommenterte at studien har

¹⁰https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/The_Discovery_Campaign_on_Remote_Sensing_of_Plastic_Marine_Litter

¹¹ <https://theoceancleanup.com/projects/>

kunnet produsere det mest detaljerte kartet av marin forsøpling til dags dato (*Surveilling Marine Litter from Space Becomes Reality - European Commission, 2024*).

Integrated Marine Debris Observing System (IMDOS) (Maximenko et al., 2019) er et initiativ sprunget ut fra Ocean Obs' 19 Community White Paper, som mytter Myte et kontinuerlig og langsiktig overvåkningssystem av marin forsøpling på global skala. IMDOS har derfor som mål å koordinere og harmonisere globale overvåkningsmetoder for marint avfall. Initiativet støttes av flere internasjonale forskningsorganisasjoner og observasjonssystemer, som GEO Blue Planet og Global Ocean Observing System (GOOS), men også av statlige organisasjoner og myndigheter. Blant de viktigste partnerne og brukerne av IMDOS er forskningsinstitusjoner som Ifremer i Frankrike og University of Hawaii, i tillegg til støtte fra FN for å møte bærekraftsmålene for reduksjon av marint avfall ([Blue Planet SOS](#)).

IMDOS strategiske plan ble vedtatt i november 2023 og gjennomføringen ledes av en ny styringskomité som møtes for første gang i januar 2025. IMDOS hadde frem til 1. okt 2024 en åpen utlysning med invitasjon om å melde interesse for samarbeid innenfor 14 utvalgte tematiske områder. Flytende ansamlinger med søppel (såkalte «windrows») vil inngå i de tematiske gruppene nr. 1 («Remote sensing»); 2 («Sea surface microplastics»); 8 («Technical innovations»), men også i IMDOS generelle policyrelaterte aktiviteter. Satellittovervåkning er en viktig komponent i IMDOS, og retningslinjene inkluderer bruk av multispektrale og hyperspektrale sensorer, SAR, og høyoppløselige optiske bilder for å oppdage og spore marint avfall. IMDOS oppfordrer til integrering av data fra forskjellige kilder, for å forbedre nøyaktigheten og dekningen av overvåkingen. Havmodeller skal brukes for å optimalisere utformingen av overvåkingen, og de vil gradvis bli forbedret ved å bruke produktene fra overvåkingen. Optiske sensorer, inkludert høyoppløselige bilder, multi- og hyperspektrale sensorer, fluorescens og Raman-teknologier, samt SAR vil bli brukt til å måle ulike typer avfall. Disse teknologiene vil bli implementert på en rekke plattformer, fra håndholdte verktøy til sensorer basert på skip, bøyer, fly og satellitter (Maximenko et al., 2019). Også et nettverk av in-situ observasjoner, inkludert citizen-science og "ships of opportunity", er tenkte bidrag for å gi data til kalibrering/validering av fjernmålingssensorer og for å overvåke spredningen av plastforurensning og annet marint søppel.

IMDOS er blitt kontaktet som del av denne rapporten. Representant for IMDOS melder at denne ikke har kjennskap til at noen nasjonal eller internasjonal organisasjon per i dag har iverksatt noe overvåkningssystem av flytende ansamlinger av marin forsøpling. Representanten mener at slike

¹² <https://www.pmel.noaa.gov/gtmba/featured-publication/oceanobs19-community-white-papers>

systemer ikke er modne til å gå lenger enn å beregne sannsynlighet for tilstedeværelse av marin forsøpling, grunnet at satellittenes sensorer ikke har høy nok oppløsning for å skille plast fra andre former gjenstander eller fra sjøsprøyt.

Japans regjering, ved Ministry of Environment, publiserte den 19.juli 2024 en pressemelding¹³ med «Guidelines for Harmonizing Marine Litter Monitoring Methods Using Remote Sensing». Disse retningslinjer («Guidelines») er ifølge pressemeldingen tatt frem basert på involvering av japanske og utenlandske eksperter for å utvikle og forbedre overvåkningen av marin forsøpling ved bruk av fjernmåling. Den japanske regjeringen er blitt kontaktet som del av denne utredningen for å innhente mere informasjon om innholdet i de omtalte retningslinjene, men uten å få svar. Offentlig innhold på nettsiden til den japanske regjeringen er ellers skrevet på japansk, og forfatterne har derfor ikke funnet noen videre informasjon til bruk i denne rapporten.

I Sør-Korea er en nasjonal handlingsplan utviklet for perioden 2021-2030 for marin forsøpling og forurenset marine sedimenter. Planen oppdatertes sist 4. juli 2024. Under seksjonen i handlingsplanen som går på overvåkning av marin forsøpling («Monitoring & Scientific research on marine plastic litter») var et tiltak beskrevet for bruk av informasjonsteknologi (ICT), inkludert satellitt, for overvåkning av kystnær forsøpling («Coastal Garbage Monitoring»).

2.2 Tilpasninger for norske forhold

Mange studier presenterer imponerende resultater med hensyn til treffsikkerhet og oppløsning på FMF deteksjon fra satellitt. Men disse må betraktes i lys av sensitiviteten til lokale forhold som vær, sesong, miljø og geografisk region. Dette er spesielt viktig langs Norges lange og værharde kyst.

Det finnes (til vår kjennskap) ingen studier av satellittovervåking av flytende plast med fokus på våre havområder. Overføring av utprøvd metodikk og erfaring fra andre kyst- og havområder vil kreve en rekke tilpasninger. Svært mange studier som har bidratt til de nyeste teknologiske framskrittene innen validering med in-situ-data har vært fokusert på Middelhavet (se Kap. 2.1.2). Det er også naturlig å sammenligne mulighetene i metodikk som presentert i Cózar et al. (2024), som legger frem et *proof of concept* (bevis på konsept) for plastovervåking med satellitt. I Cózar et al. (2024) ble det presentert en metodikk for å detektere og estimere akkumulasjonsområder for flytende søppel basert på Sentinel-2-data i hele Middelhavet. Mye av den foreslåtte metodikken, retningslinjer og anbefalinger er basert på denne typen forskning og det vil være en naturlig start å ta utgangspunkt i

¹³ Ministry of Environment, Japan: Pressemelding 19.07.2024 (besøksdato: 04.09.24):

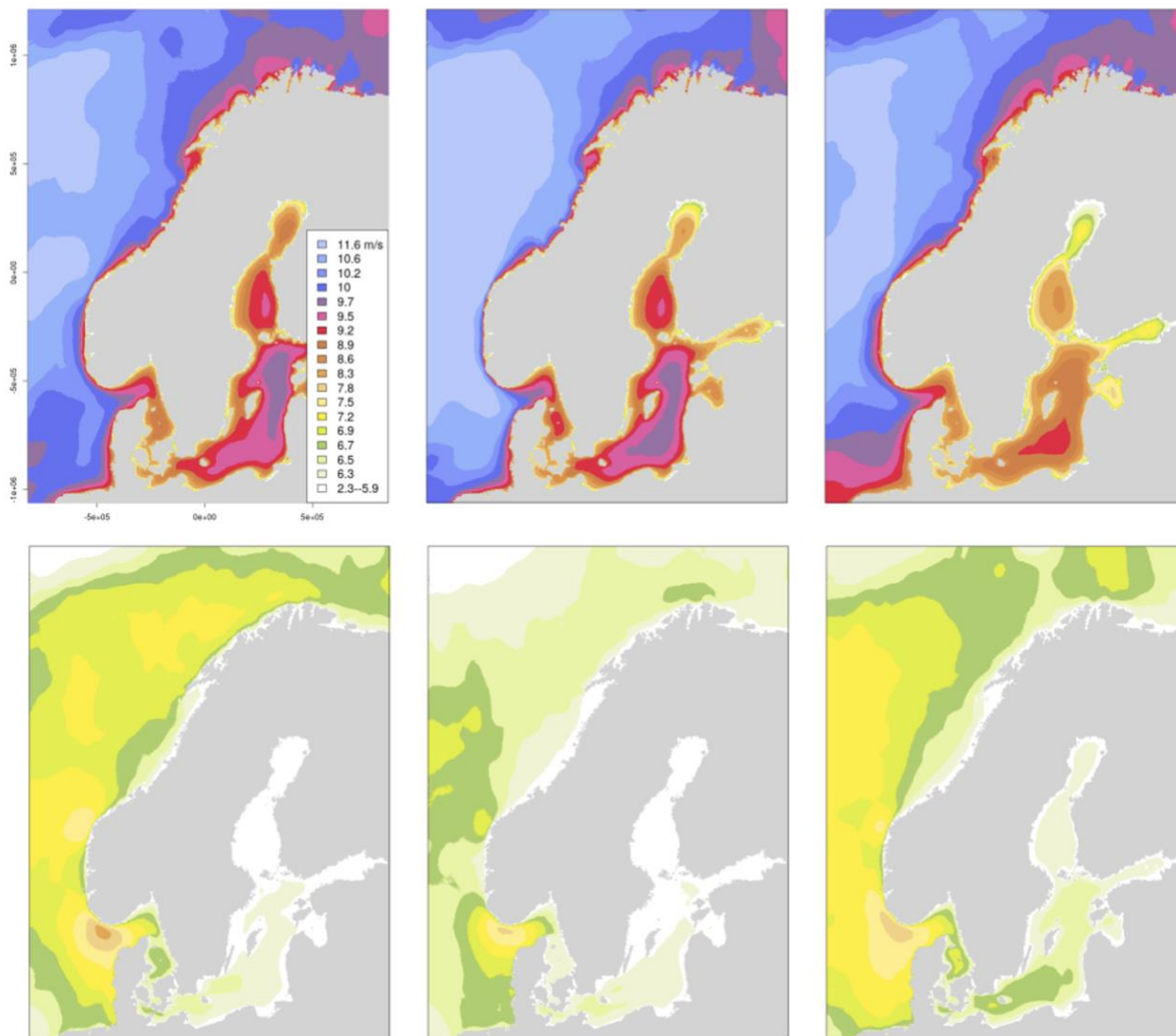
https://www.env.go.jp/en/press/press_03054.html

en sammenligning med konkrete eksempler fra nylige studier i disse områdene ved vurdering av tilpasninger til norske forhold. Hovedutfordringene ved satellittovervåking av flytende plastansamlinger langs norskekysten sammenlignet med overvåkningsstudier i andre områder, og spesielt i Middelhavet, er knyttet til flere faktorer, som geografiske, klimatiske og miljømessige forskjeller.

Norskekysten er preget av et komplekst nettverk av fjorder, øyer og en lang og ujevn kystlinje, med smale fjorder og skjærgård som kan skape blindsoner for satellittenes synsfelt. I tillegg er det kraftige havstrømmer langs Norskekysten, med komplekse forgreininger og malstrømmer eller virvelstrømmer (gyrer) som kan spre, transportere og samle søppel i uforutsigbare mønstre (Haarr et al., 2024). I Middelhavet derimot, er kystlinjen jevnere, og området representerer et mer lukket havbasseng med en sirkulær kyststrøm (Cózar et al., 2024) som er mer forutsigbar sammenlignet med den mer åpne og dynamiske kyststrømmen langs Norges kyst. Dette medfører enklere forhold for overvåking av plastansamlinger som kan forbli innenfor begrensede områder.

2.2.1 Klimatiske forhold og deres påvirkning

Bølger, skumtopper og refleksjon fra sol gjør det vanskelig å oppdage mindre plastansamlinger da de vil skape mye støy i bilder av havoverflaten og vanskeliggjør identifikasjon av plast da de hindrer pålitelig deteksjon på grunn av overflateblanding (Arinaga & Cheung, 2012; Cózar et al., 2024). For å kvalitetssikre datainnhenting i Cózar et al. (2024), ekskluderte de av denne grunnen bilder innhentet under mindre optimale vindforhold, dvs. vindstyrke som oversteg 5 m/s. Langs norskekysten kan man forvente at et lignende kriterium vil medføre en svært kraftig filtrering av data som vil føre strenge begrensninger på datainnhenting, da gjennomsnittlig vindhastighet langs deler av norskekysten overstiger 5 m/s store deler av året. Dette representerer et potensielt problem som kan skape hull i datagrunnlaget til et overvåkingsprogram. Langs norskekysten vil dette problemet variere både geografisk og med sesonger, som vist i Figur 5. Middelhavet har generelt roligere vær- og sjøforhold, og mindre bølger i Middelhavet gjør det lettere å skille mellom plast og havoverflaten i satellittbilder.



Figur 5. Gjennomsnittlig vindhastighet på 10 meter for månedlige normaler i perioden 1991–2020. Vintermånedene er vist i øverste rad (fra venstre til høyre): desember, januar, februar (eller DJF). Sommermånedene vises i andre rad (JJA). Kilde: MET-rapport nr. 04/2022 (Cristian Lussana et al., 2022).

Nåværende satellitt-teknologi kan detektere FMF som inneholder plast, men dette krever en svært høy tetthet av plast i de observerte områdene. Bølger og vind bryter opp lange filamenter og større ansamlinger av FMF, og fører til at plastavfall ofte opptrer mer spredt, noe som gjør det vanskeligere å oppdage med satellitter. I Cózar et al. (2024) ble det derfor lagt til et strengt sannsynlighetsbasert filter (tilstede/ikke tilstede) på piksler som sannsynligvis inneholdt plast, som inkluderte et krav om at piksler med søppel måtte være del av en filamentform med lengde på over 70 meter. Kun identifikasjoner av plastansamlinger som i bildene var del av et minst 70 meter langt filamentlignende objekt («windrows») ble ansett som sikre identifikasjoner. Disse ble brukt for å kartlegge "hotspots" og fange opp trender, noe som kan gi god oversikt over livsløpet til marin forurensning, fra kilde til endepunkt (Cózar et al., 2021, 2024). I Middelhavet, på grunn av roligere

vindforhold i større deler av året, kan flytende søppel samle seg i større konsentrerte ansamlinger, spesielt i kystnære områder og i havstrømmene, som gjør det lettere å oppdage ved hjelp av satellitter. Å bare bruke filamenter som er over 70 meter lange er et kriterium som potensielt sett ville representere et strengt krav i norske farvann. I visuell overvåking av flytende plast i våre farvann er det ikke blitt rapportert om ansamlinger av denne størrelsen (Bergmann et al., 2017; Tekman et al., 2022).

JRC (2022) oppsummerer at piksler med 10 m × 10 m oppløsning må fylles med minst 30–50 % av piksel-størrelsen av plastflasker eller fiskeredskaper for å kunne oppdages med Sentinel-2-satellitten. I ansamlinger av flytende søppel kan det oppstå tetthet opp til 30-50 % av en 10 m x 10 m stor piksel, vanligvis formet som striper eller filamenter opptil noen få kilometer lange, som følge av overflatestrømmer og frontdannelser i vannmassene. Andre fronter som dannes etter alvorlige forurensningshendelser (f.eks. oversvømmelser), legger også til rette for at man kan bruke satellitt (eller sensorer på andre plattformer). Cózar et al. (2024) klarte å redusere deteksjonsgrensen til 20 %, men bare under ideelle værforhold og optimale forhold mellom signal og støy.

Langs Norskekysten er det også relativt ofte skydekke, regn, og tåke gjennom året, sammenlignet med Middelhavet. Dette hindrer optiske sensorer fra å fange klare bilder, noe som reduserer effektiviteten til satellittovervåking. I tillegg kompliserer de langvarige periodene med mørketid og vedvarende skydekke bildeinnhenting, noe som gjør det vanskelig å opprettholde konsistente satellittdata gjennom hele året.

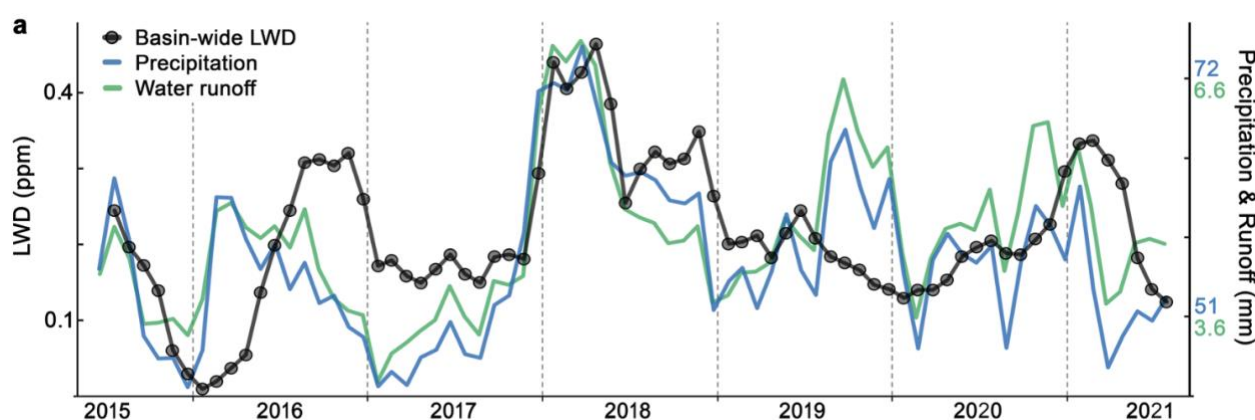
Noe av problemet med skydekke kan imøtekommes ved å bruke TIR bilder eller SAR, som nevnt i Kap. 2.1.4. TIR er foreslått som et supplement for å bedre skille plast fra andre materialer i flytende ansamlinger (Kap. 2.1.5). TIR-overvåking er avhengig av temperaturforskjeller mellom plast og vann. Temperaturforskjellen vil variere med sesong, tid på døgnet og lokasjon og kan være vanskelig i deler av året langs Norskekysten fordi både vann- og lufttemperaturen er relativt kald. Dette kan gjøre det vanskeligere å oppnå tilstrekkelige strålingsforskjeller for effektiv plastdeteksjon. I Middelhavet er temperaturforskjellene mellom plast og vann ofte større på grunn av solinnstrålingen, noe som i mange tilfeller vil gjøre TIR-teknologi mer effektiv for å skille plast fra havoverflaten.

Alle disse klimatiske faktorene vil potensielt påvirke effektiviteten og kontinuiteten i datainnsamlingen langs Norskekysten.

2.2.2 Kilder og muligheter for modellering

Cózar et al. (2024) viste i sin studie at proxyen flytende søppel >10 m i størrelse, hovedsakelig var knyttet til nylig tilførsel av plast fra landbaserte avfallskilder i Middelhavet. I studieområdet deres,

(som dekket hele Middelhavet) var kraftig regnvær den enkeltfaktoren som i størst grad påvirket tilførselen av marint søppel (Figur 6), mens kyststrømmer og vinddrevne overflatestrømmer fremstod som nøkkelfaktorer for fordelingen av søppelet over havet. I kystnære områder, som i fjorder med elveutløp eller befolkningstette strøk, kan disse kildene påvirkes av nedbør og avrenning også i Norge. Men studier og kildeanalyser basert på strandsøppel langs norskekysten viser at marine kilder som fiskeri og havbruk står for mesteparten av forsøplingen langs Norskekysten (Haarr et al., 2019, 2020, 2024; Strand et al., 2021), og avrenning vil antageligvis ikke ha en like predikerende effekt på disse tilførselskildene.



Figur 6. Flerårig trend i LWD for Middelhavet som helhet (sort linje) med nedbør (blå) og avrenning (grønn) fra nedslagsfeltet hentet fra ERA 5 data. Kilde: Cózar et al. (2024).

2.2.3 Anbefalinger til metodikk og tilpasninger til norske forhold

Det finnes flere usikkerhetsmomenter ved bruk av satellittdata for observasjon av flytende plast, i tillegg til spesifikke utfordringer ved norske forhold. På bakgrunn av kunnskapsstatus, anbefalinger fra internasjonale ekspertgrupper og vurderingene av norske forhold, gis det her forslag og anbefalinger for tilpasninger som kan gjøres for at et norsk overvåkingsprogram skal kunne bidra med nasjonale data til SDG 14.1.1.B.

En fordel ved å likevel bruke satellittbaserte fjernmålingsdata i et overvåkingsprogram er at det gir tilgang til sammenlignbare datasett over tid, med kjent kvalitet og oppløsning. Til tross for begrensninger har satellittbasert FMF-deteksjon potensial til å være en kostnadseffektiv løsning for systematisk overvåking av store områder, som kan supplere tradisjonelle in-situ observasjoner (Topouzelis et al., 2021; Waqas et al., 2023). I forhold til kartlegging med droner eller fly, kan satellittbilder dekke større områder til lavere kostnad. Bruk av satellittbilder gir også tilgang til historiske data, slik at man også kan studere historiske hendelser.

R a p p o r t e n « G u i d e l i n e s f o r t h e M o n i t o r i n g a n d A s s e s s m e n t o f M a r i n e P l a s t i c P o l l u t i o n » (GESAMP, 2019) gir retningslinjer for oppbyggingen av et mulig overvåkingssystem for plast i havet. Den beskriver ulike metoder for å overvåke flytende plast, og satellittbasert overvåking nevnes som en mulighet for å observere større objekter og ansamlinger. Rapporten gir generelle retningslinjer for overvåking av plast i havet, men klargjør også at ulike nasjoner har stor fleksibilitet i å tilpasse dette til sitt eget ambisjonsnivå. Hva angår norsk ambisjonsnivå, foreligger det ikke nok data fra norske farvann til å slå fast hva som er en realistisk forventning til effektiviteten og detaljnivå til et overvåkingsprogram. Et passende ambisjonsnivå er dermed vanskelig å slå fast annet enn at man i første omgang må legge vekt på kartlegging og utvikling av eksisterende metodikk. Tidligere i kapitlet er det løftet frem potensielle utfordringer ved overføring av metodikk fra midlere breddegrader. Før sensitiviteten til disse utfordringene er testet, er det ikke mulig å slå fast om overvåkingen vil oppnå ambisjonene eller ikke; vi vet ikke hva vi kan se før vi har sett etter.

2.2.3.1 Multisensorsystem

European Commission: Joint Research Centre et al., (2022) konkluderte med at teknologien ennå ikke er klar for standardiserte og systematiske FMF overvåkningsprogrammer, men de kan være nyttige for eksempel i utformingen av overvåkningsprogrammer i kombinasjon med andre datainnhentingsmetoder. Mange av utfordringene ved et satellittbasert overvåkningsprogram langs kysten skyldes mindre optimale vær- og vindforhold. Indekser for plastdeteksjon er oftest basert på optiske data i NIR og SWIR, men kombinasjoner med andre sensorer som SAR, TIR, og LiDAR har vist gode resultater for å forbedre robusthet og dekning, spesielt i utfordrende miljøer som Norskekysten. For å skape et effektivt overvåkningsprogram langs norskekysten anbefales det derfor å bruke en multisensor-tilnærming.

Basert på kunnskapssammenstillingen i Kap. 2.1 vil vi anbefale at man som første fase i overvåkningsprogrammet undersøker og vurderer å supplere multispektrale satellittdata med SAR, og i avgrensede områder og tidsperioder LiDAR og TIR. SAR fungerer i mikrobølgeområdet av det elektromagnetiske spekteret og trenger gjennom skyer uten problem. Derfor påvirkes ikke SAR direkte av skydekke, i motsetning til optiske sensorer. SAR-data fra Sentinel-1 er gratis og godt egnet for overvåking av store plastansamlinger på havoverflaten, men har begrenset romlig oppløsning. Hvis man trenger oppløsning på 10 m eller bedre, er det nødvendig å bruke høyoppløselige SAR-

¹⁴ Rapporten er utarbeidet av en arbeidsgruppe (GESAMP Working group WG40 «Sources, Fate and Effects of plastics and microplastics in the marine environment») ledet av FNs miljøprogram og UNESCOs Mellomstatlige Oseanografiske kommisjon.

satellitter som TerraSAR-X¹⁵ eller ICEYE¹⁶, men disse innebærer høyere kostnader. SAR-data fungerer dag og natt, uavhengig av skydekke.

Dataprosessering og algoritmer må tilpasses norske forhold, ved vurdering av datafiltrering og optimalisering med tanke på terskelverdier for bølger og vindforhold. Dette må gjøres ved å trene maskinlæringsmodeller på data fra norske farvann og i så stor grad det er mulig, validere med bakkessannheter og multisensor data.

For predikering vil havmodellering kunne tilføre en mer målrettet datainnhenting og brukes i sannsynlighetsestimater, samt kildeidentifisering. Denne må tilpasses lokale forhold; havmodeller med lavere oppløsning i områder der havstrømmer og bølger er hovedvirkning, og mer finskala modeller i områder hvor det er trangt, som i fjorder og smale sund. I nærheten av elveutløp kan også hydrologiske modeller som predikerer avrenning på samme måte kunne tilføre nyttig informasjon.

Ved å bruke en kombinasjon av multisensordata og optimaliserte bildebehandlingsalgoritmer kan man etablere regelmessig innhenting av bilder og deteksjoner av FMF. Dette vil danne grunnlaget for å måle endringer i tetthet og størrelse av FMF, samt forflytninger av akkumuleringsområder. For å vurdere søppelsammensetningen av søppel og identifisere eventuelle endringer eller trender i den, trengs det svært detaljerte multispektrale bilder eller hyperspektrale bilder. Multispektrale sensorer som Sentinel-2 kan bruke spektralsignaturer til å skille plast fra andre flytende materialer, men nøyaktigheten avhenger som nevnt av en rekke miljøforhold. For optimal plastdeteksjon anbefales en kombinasjon av multispektrale sensorer, indekser som FDI, og maskinlæringsmetoder, med støtte fra hyperspektrale data der det er mulig. I tillegg er treningsdata og valideringsdata, inkludert bakkessannheter, avgjørende. Det anbefales at slike undersøkelser avgrenses til spesielt utvalgte områder etter at et overvåkingsdesign er etablert og testet, i en senere fase av programmet.

Når det kommer til kildeidentifisering, vil jevnlige kampanjer med innsamling av identifiserte ansamlinger og analyser av disse kunne bidra med informasjon om kilder. Havstrømsmodellering i kombinasjon med partikkelmodeller vil kunne bidra med tilbakesporing av detekterte ansamlinger eller gjenstander og bidra til kildeidentifisering.

¹⁵https://apollomapping.com/terrasax-satellite?utm_source=Google&utm_medium=cpc&utm_campaign=21089804310&utm_term=terrasar-x&utm_content=163951281042&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA6aW6BhBqEiwA6KzDc_Xf9J9JjuRsm14M9Ngt-pe9HKV5ywZwrrmVkvFeWGmd_JLx_pzuphoC5dcQAvD_BwE

¹⁶ <https://www.iceye.com/>

2.2.3.2 Pilotperiode

Det finnes per i dag ikke noe datasett over plastansamlinger i norske farvann fra satellittbasert overvåking (som vi vet om). Dette innebærer at det mangler grunnlag for å beregne optimal hyppighet av datainnhenting eller direkte designe et overvåkingsprogram. Videre er det store usikkerheter knyttet til å overføre metodikk og erfaringer fra andre havområder og geografiske regioner til norske områder, som beskrevet over, slik at datagrunnlag innhentet fra andre overvåkingsprogram eller studier ikke kan anvendes direkte på norske forhold. Uten en grundig pilotperiode kan man altså ikke vite hvor mye flytende makroplast man faktisk kan detektere i norske farvann.

For å sikre at overvåkingsprogrammet er godt fundamentert og iverksettes på en effektiv og kunnskapsbasert måte, vil vi derfor anbefale en pilotperiode med en minstetid på ett år, der fokuset er å innhente representative data fra norskekysten under forskjellige forhold og sesonger for å teste, utbedre og validere anbefalt metodikk under et bredt spekter av forhold. Siden satellittdata er lagret kan pilotperioden i tillegg strekke seg tilbake i tid. Historiske data kan brukes i analyser for å tilpasse algoritmer og fylle ut datagrunnlag for statistikk.

Pilotperioden burde avsluttes med en grundig evaluering som legges til grunn for justeringer av metodikk og filtreringsmetoder, og datainnhenting med tanke på overvåkingsområder og -sesonger, og temporal oppløsning.

2.2.3.3 Overvåkingsområder

For å kunne måle en pålitelig utvikling av forekomsten av flytende plast, inkludert temporale og romlige trender, trengs det en konsistent arbeidsflyt for datainnsamling. Det anbefales å overvåke mindre fokusområder før det utvikles og testes et landsdekkende program av flere grunner:

Ved å starte med mindre geografiske overvåkingsområder kan systemet forbedres og optimaliseres for norske forhold med begrenset ressursbruk. Først når det er validert og testet bør systemet oppskaleres til å dekke utvidet område. Med Norges havområder på omtrent 2 millioner kvadratkilometer, kreves betydelig utvikling for å sikre en konsistent og pålitelig overvåking for alle norske havområder. Overvåking av mindre fokusområder er en mer realistisk og håndterbar tilnærming, gitt disse begrensningene. Fokus på mindre regioner vil legge til rette for integrering av in-situ valideringsdata, noe som er avgjørende for å validere deteksjonsmetoder og forbedre nøyaktigheten til fjernmålingsteknologier før de utvides til landsdekkende.

Det bør benyttes satellittdata fra samme satellitt og sensor for alle områdene, og dersom det gjøres en endring på dette bør det undersøkes om og hvordan dette kan føre til skjevheter i resultatene. Det

er imidlertid anbefalt at supplerende sensorer testes og implementeres spesifikt for hvert område for å veie opp for det enkeltes områdes begrensninger og utfordringer ved innhenting av optisk satellittdata.

Siden det per i dag ikke foreligger tilstrekkelig datagrunnlag for å beregne størrelsen eller antallet områder for slik overvåking, anbefales det å basere valgene av overvåkingsområder på andre kriterier og evaluere disse etter en pilotperiode. Ettersom satellittdata også er tilgjengelig tilbake i tid, vil det være mulig å oppdatere og eventuelt utvide disse områdene på et senere tidspunkt. Følgende kriterier er lagt til grunn for forslagene til overvåkingsområder presentert i denne rapporten:

Nærhet til kilder til marin forsøpling

For å øke sannsynligheten for å observere ansamlinger av flytende søppel i pilotperioden, bør overvåkingen rettes mot områder med høy risiko for opphoping av søppel. Basert på funn i denne perioden, kan man vurdere å oppskalere til å inkludere et mer randomisert sampling-design i overvåkingsprogrammet eller velge å oppskalere til hele kysten.

- Områder med sjøbaserte kilder til marin forsøpling (f.eks. områder med høy aktivitet fra fiskerinæring eller skipsfart)
- Områder med landbaserte kilder til marin forsøpling (f.eks. områder med store elveutløp eller høy befolkningstetthet).
- Akkumuleringsområder på havet, der havstrømmer og andre forhold tilsier at man kan få en opphoping av søppel

Variasjon i testing av innsamlingsmetodikk

Da målet er å avdekke svakheter og å tilpasse en metodikk til norske forhold, burde de utvalgte områdene representere et bredt spekter av naturgitte forhold som vil påvirke datainnsamlingen og danne et godt bilde av styrker og utfordringer ved eksisterende metodikk langs norskekysten. Disse inkluderer

- spesielle vær- og klimaforhold (vindutsatthet, bølger)
- sesonger (avhengig av breddegrad, spesielt mørketid)
- geografiske egenskaper (fjorder versus åpent hav med sterke havstrømmer)
- muligheter for datavalidering og in-situ observasjoner

De forskjellige utfordringene knyttet til forskjellige områder vil også avsløre hvor det vil være fordelaktig å eventuelt innføre forskjellige typer tilpassede supplerende datainnsamlingsmetoder. Hvilken kombinasjon av datasett som vil være optimal kan variere med overvåkingsområdenes spesifikke utfordringer. Vi anbefaler at hvert områdes multisensorsystem tilpasses basert på testing og validering innhentet under pilotperioden.

Videre konkretisering av foreslåtte områder, typer data, spesifikasjoner av dataprosessering og -pipeline og eksempler på resultater presenteres i neste kapittel.

3 FORSLAG TIL NORSK OVERVÅKNINGSPROGRAM

Hovedfokus for dette kapittelet å presentere våre anbefalinger og forslag til utforming av et satellittbasert overvåkingssystem som kan følge opp FNs bærekraftsmålindikator 14.1.1b for plastansamlinger større enn 10 meter. Minstekravet for et overvåkingssystem for subindikator 14.1.1b er å identifisere plastobjekter og ansamlinger over 10 meter og måle endringer i disse over tid. Denne rapporten beskriver et mulig overvåkingssystem som baserer seg kun på satellittdata, men kvalitetskontroll og forbedringer ved hjelp av tilleggsdata er anbefalt (Kap. 2.1.5).

Begrensinger med å anvende eksisterende metoder på norske forhold er vurdert, og mulige tilpasninger for å kunne innfri Miljødirektoratets mål for plastovervåking er inkludert. Forslaget som er presentert i dette kapitlet er basert på anbefalingene til metodikk som er gitt i Kapittel 2. Det beskriver den praktiske utformingen av et norsk overvåkingssystem, inkludert datainnsamling (type satellittdata, overvåkingsområder og temporal oppløsning), databehandling (preprosessering og analyser) og avsluttes med et fullstendig kostnadsoverslag.

3.1 Datainnsamling

Et overvåkingssystem bør ha en tydelig datahåndteringsprosedyre. Dette inkluderer tydelige standarder for hvilke data som skal benyttes, kvalitetskontroll, datalagring og -deling, samt rapportering. Systemet bør også evalueres regelmessig for å sikre at det oppfyller sine formål og fungerer som tiltenkt. Til dette formålet anbefales det å bruke utprøvde metoder fra andre områder, som kan videreutvikles og tilpasses norske forhold basert på pilotperioden..

3.1.1 Satellittdata

For nasjonal overvåking av marin forsøpling i norske farvann anbefales det å bruke data fra Sentinel-2 på L2A-nivå. Dette skyldes flere faktorer:

- *Spektral oppløsning:* Sentinel-2 har 13 spektralbånd, inkludert bånd i det kortbølgete infrarøde (SWIR) området. Dette gjør den i stand til å identifisere og skille mellom ulike typer materialer, inkludert plast, på en mer detaljert måte enn mange andre satellitter.
- *Romlig oppløsning:* Med en romlig oppløsning på opptil 10 meter kan Sentinel-2 oppdage mindre objekter i kystnære områder, noe som er viktig for å identifisere flytende plastavfall.
- *Tilbakevendingsfrekvens:* Sentinel-2 har en tilbakevendingsfrekvens på 2-5 dager, noe som gir hyppige oppdateringer og gjør det mulig å spore forandringer over tid, noe som er avgjørende for å overvåke marin forsøpling.

- *Gratis og åpen tilgang:* Dataene fra Sentinel-2 er gratis tilgjengelige via Copernicus-programmet, noe som gjør det mulig for forskere, myndigheter og andre interessenter å få tilgang til og bruke data uten store kostnader.
- *Preprosessering:* Det er allerede utført atmosfærisk korreksjon på Sentinel-2 bilder på L2A-nivå, slik at videre bildebehandling trenger mindre prosesseringskraft.

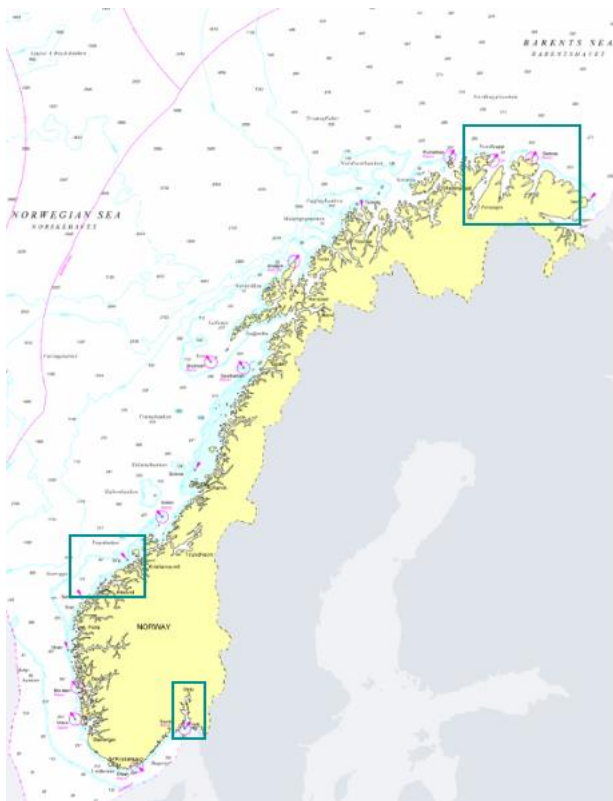
Sentinel-2 er det mest balanserte valget for nasjonal overvåkning av marin forsøpling langs norskekysten. Den tilbyr en god kombinasjon av høy spektral og romlig oppløsning, hyppig tilbakevendingsfrekvens, og kostnadseffektivitet, noe som gjør den svært egnet for dette formålet. Mange studier har nyttiggjort data fra Sentinel-2, og det er den satellitten som har blitt oftest brukt til dette formålet (Biermann et al., 2020; Cózar et al., 2024; K. Kikaki et al., 2022; Topouzelis et al., 2021).

Sentinel-data er lett tilgjengelig via API-er, noe som muliggjør automatisert datatilgang, prosessering og visualisering av data. For utvalgte områder med spesielle behov eller med krav til mer detaljert overvåking, kan det være aktuelt å kombinere Sentinel-2 med data fra andre satellitter som SAR data fra Sentinel-1. Med andre høyoppløselige data, som Worldview-3, PlanetScope eller hyperspektralbilder, krever arbeidsflyten bestilling eller manuell navigering i kataloger som per dags dato har begrenset API-funksjonalitet.

Norges marine områder, inkludert Norges økonomiske sone og kontinentalsokkel dekker omtrent 2 millioner kvadratkilometer. Et grovt estimat tilsier at for å dekke dette området med Sentinel-2 på Nivå 2, vil kreves ~150 GB lagringsplass per tidsstegtid steg. Dette medfører over 10 TB årlig *for* dataprosessering. Prosessering av bildene vil generere ytterligere datasett, og vil gjøre det nødvendig å lagre enorme mengder data dersom man ønsker å kontinuerlig overvåke alle norske marine områder. I tillegg den store mengden satellittdata, er det som nevnt tidligere, også anbefalt å samle inn valideringsdata i pilotperioden, noe som krever en viss fysisk tilstedeværelse i området. Basert på disse faktorene er det derfor hensiktsmessig å innskrenke omfanget til strategisk utvalgte områder, og basert på erfaringer fra pilotperioden bør man vurdere om disse skal utvides.

3.1.2 Overvåkingsområder

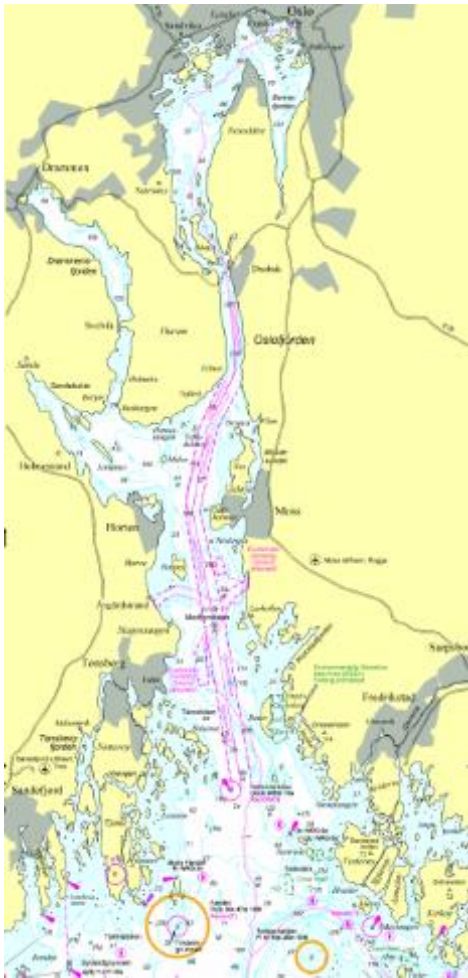
Basert på kriteriene i Kap. 2.2.3.3 anbefales det tre overvåkingsområder (Figur 7). De geografiske områdene foreslått her burde inngå i datainnsamling og -validering under pilotperioden og re-evalueres etter pilotperioden. De tre områdene som er utvalgt er 1. Oslofjorden, 2. Mørekysten og 3. Barentshavet. Dette er tre områder med mye marin forsøpling på strendene (SALT, 2022), de representerer både landbaserte og havbaserte kilder, samt langveistransport. I tillegg representerer de et bredt spekter av geografiske landskapstyper og klimamessige utfordringer som vil danne et



godt grunnlag for testing av metodikk, validering og utvikling for et videre overvåkingsprogram representativt for alle norske havområder. Mer detaljert beskrivelse av hvert enkelt område er presentert under.

Figur 7. Anbefalte overvåkingsområder til pilotperioden; Oslofjorden, Mørekysten og Barentshavet.. (Sjøkart fra Kartverket)

Område 1: Oslofjorden



Figur 8. Anbefalt overvåkingsområde Oslofjorden. (Sjøkart fra Kartverket)

Oslofjorden er et relativt tett befolket område, med mange landbaserte kilder til marin forsøpling. Undersøkelser av strandsøppel i dette området viser en større andel av små plastbiter og gjenstander i forhold til resten av kysten (SALT, 2022). Det er i tillegg større elver som renner ut i Oslofjorden og som er potensielle kilder til mer landbasert søppel.

Værmessig representerer dette et relativt rolig område med mer stabile vind- og vær forhold enn kysten ellers. Innlandsklima er forbundet med mer klarvær, relativt sjelden nedbør, og dette er forhold som legger til rette for stabil datainnhenting.

Utfordringer: Dette er et tett befolket område med relativt mye trafikk til sjøs og faste installasjoner (fortøyninger etc.) som kan gi opphav til feildeteksjoner og falske positive.

Forslag til supplerende metoder: I dette området vil det ligge til rette for både fastmonterte sensorer og kamera på rutegående skipstrafikk for in-situ validering av data. Relativt stabile værforhold gir gode forhold for supplerende informasjon i form av TIR-, LiDAR og andre optiske sensorer

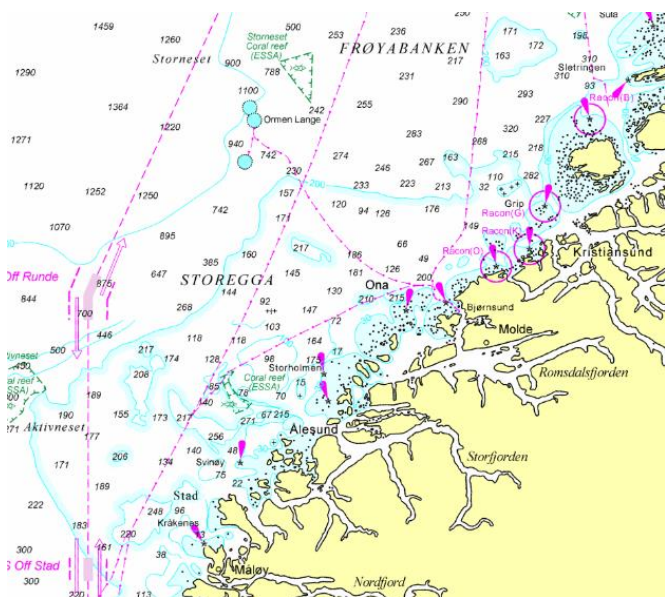
fra fly eller droner, samt droner for validering.

Sporadisk store nedbørsmengder vil kunne gi stor elveavrenning i dette området, noe som potensielt sett har en predikerende verdi. En avrenningsmodell vil kunne benyttes til å gi gode estimater på variasjonen i avrenningen. Slike resultater kan eventuelt i tillegg kobles til finskala regional strømmodellering med en høyoppløst havmodell, som Nordfjords 160 (Albretsen, Jon, 2021) koblet med partikkelmodellering. Dette vil potensielt kunne bidra til en mer fokusert datainnhenting i perioder med spesielle værhendelser og utslippshendelser, samt kildeoppsporing.

Område 2: Mørkekysten

Havområdet utenfor Mørkekysten er karakteriseres av mye vind, konvergerende havstrømmer (Figur 10a.), og mye fiskeriaktivitet (Figur 10b.). Oppdrettsnæring og fiskeriaktivitet gir høy risiko for plast fra næringsavfall, og begge deler representerer derfor mulige kilder til flytende søppel til havs.

Mørekysten er derfor et interessant område å overvåke med tanke på ansamlinger og mulige filamenter av flytende søppel fra havbaserte kilder.



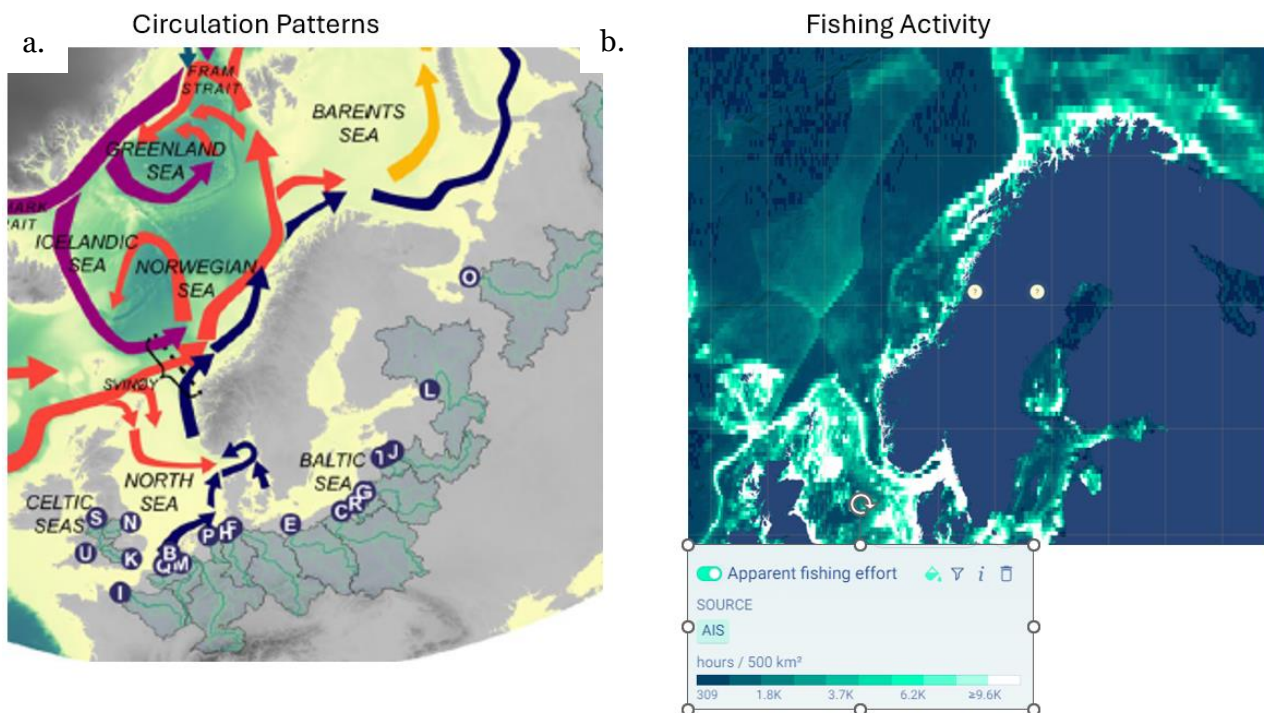
Figur 9. Havområdet utenfor Mørekysten er anbefalt overvåkingsområde til pilotperioden. (Sjøkart fra Kartverket)

Utfordringer: Mørekysten er kjent for å være et værhardt område som ligger utsatt til for lavtrykkssystemer som treffer Norskekysten og bringer med seg nedbør, skyer og vind. Dette kan periodevis gi datahull for optiske satellittdata pga. manglende skyfrie bilder.

Forslag til supplerende metoder: I perioder med mye skydekke kan SAR data være aktuelle å bruke for å øke presisjon i deteksjon av flytende søppelansamlinger under dårlige værforhold. Mye skipsaktivitet og fiskeri gir muligheter for skipsmonterte kamera. I dette området er fokuset på havbaserte kilder, tilførsel via havstrømmer, bølger og vind. Dette

er et område der havmodellering kan ha en god predikerende effekt og evt. mulighet til å spore detekterte plastansamlinger over tid. I dette området kan det også være mulig å simulere strøm og bølgedrift på relativt grov oppløsning. For eksempel vil data fra NordKyst 800, en operasjonell havmodell driftet av Meteorologisk Institutt og Havforskningsinstituttet (Albretsen et al., 2011) kunne brukes inn i en «open source» partikkelmodell (for eksempel Open Drift¹⁷) for å gi en sannsynlighet til spesielt aktuelle områder.

¹⁷ <https://opendrift.github.io/index.html>



Figur 10. Sirkulasjonsmønstre viser et område med konvergens av vannmasser utenfor Mørkekysten, og kan også indikere akkumuleringssoner av flytende plastforsøpling (tilpasset fra (Huserbråten et al., 2022) (a.). b. Fiskeaktiviteten er høy i samme område, noe som også kan indikere tap av fiskeutstyr og opphopning av flytende søppel. Kilde: Global Fishing Watch globalfishingwatch.org.

Område 3: Barentshavet

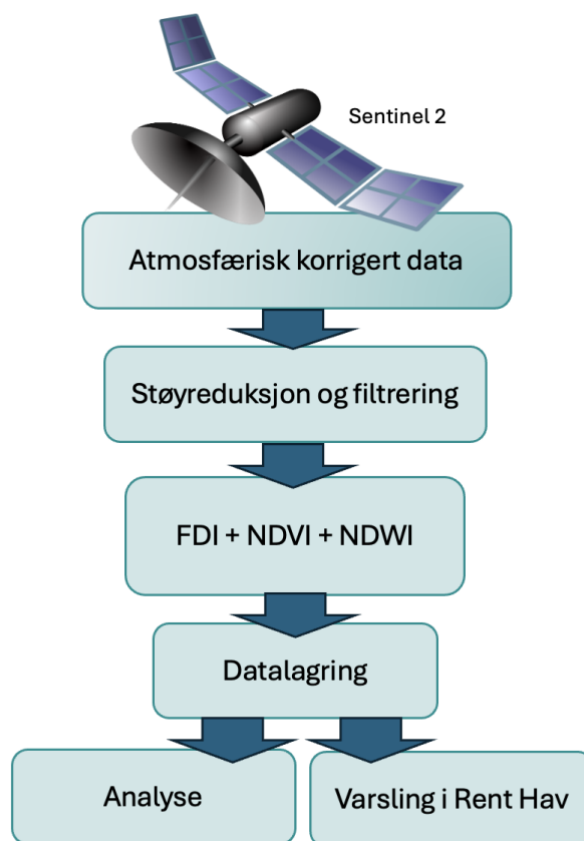
Finnmarkskysten er utsatt for store mengder fiskerirelatert avfall, og er et område med stor andel store gjenstander (SALT, 2022). Store flytende plastgjenstander kan detekteres fra satellitter, uten å være del av en oppsamling av søppel. Dette er i så måte et overvåkingsområde som egner seg til å teste denne typen deteksjoner. Deteksjon og varsling om store flytende gjenstander hadde vært gunstig i et område med mye skipstrafikk og fiskeriaktivitet.

- Fase 1: Pilotprosjekt i Oslofjorden med Sentinel-2, modellbasert prediksjon samt droner og andre bakkesannhetsdata for validering.
- Fase 2: Utvidelse til Mørkekysten og Barentshavet. Testing hyperspektrale satellittdata, SAR data og skipsmonterte validerings-systemer.
- Fase 3: Fullskala implementering med reviderte overvåkingsområder (alternativt langs hele Norskekysten), med sanntidsvarsling og modellbasert prediksjon.

3.2 Prosessering av bildemateriell og data

Preprosesseringen av optiske bilder begynner med atmosfærisk korreksjon for å fjerne forstyrrelser forårsaket av skyer, dis og vanndamp. Dette er være spesielt verdifulle i norske havområder som er utsatt for hyppig skydekke, spesielt i vintermånedene (Hu, 2021). Sentinel-2 sine L2A-produkter er allerede prosessert for atmosfæriske korreksjoner, og dette betyr at man ikke selv må utføre atmosfæriske korreksjoner ved bruk av disse produktene.

Den videre analysene gjøres ved bruk av algoritmer og er beskrevet i avsnittene under. Hele prosessen med datainnhenting og prosessering er illustrert i Figur 12.



Figur 12. Illustrasjon av data pipeline for Sentinel-2-dataprosessering.

3.3 Algoritmer og analyser

Til behandling av Sentinel-2 bildene anbefales det å begynne med en velutprøvd og godt dokumentert metodikk. For å detektere flytende plast anbefales det å beregne FDI (Floating Debris Index) (Biermann et al., 2020; Waqas et al., 2023) i tillegg til NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) og bruke en vannmaske basert på NDWI (Normalized Difference Water Index). Metoden maskerer landområder og fokuserer på å oppdage flytende søppel på havet.

Spektral dekomponering er spesielt nyttig for å skille de spektrale signaturene til plast fra ikke-plastiske materialer som tang og skum (Biermann et al., 2020; Papageorgiou et al., 2022). Dette blir spesielt aktuelt langs Norskekysten der vind og høye bølger (Kap 2.2.1) og blanding av de øvre vannlagene gir ytterligere deteksjonsutfordringer (Arinaga & Cheung, 2012; Kukulka et al., 2012). Å filtrere ut støy som skykanter, skipsspor (linjer av skyer dannet av utslipp fra skip) og bygg og installasjoner, er også viktig, siden alle kan produsere falske positive.

Proessen kan deles inn i følgende arbeidstrinn:

1. Definer AOI: Definer ditt interesseområde (AOI) ved å bruke en polygon i WGS84-format og re-projiser det for å samsvare med satellittbildenes koordinatsystem (CRS).
2. Pakk ut Sentinel-data: Se etter Sentinel-2.SAFE-filer og pakk dem ut om nødvendig.
3. Last inn bånd: Hent ut rødt, grønt, blått, NIR, rødkant («Red Edge»; spektralområdet i overgangen mellom synlig rødt lys og NIR) og SWIR-bånd fra hvert bilde. Avgrens båndene til AOI og resample bånd med 20 m oppløsning til 10 m der det er nødvendig.
4. Beregn indekser:
 - Beregning av NDVI bruker røde og NIR-bånd for å beregne vegetasjonsindeksen
 - FDI-beregning bruker NIR-, rødkant- og SWIR-bånd for å oppdage flytende søppel
 - NDWI-beregning: Beregn vannmasken ved hjelp av grønne og NIR-bånd for å skille land fra vann.
5. Terskelverdi beregning og plastdeteksjon: Bruk terskelverdier på FDI (f.eks. $FDI > 0.15$) og NDVI (f.eks. $NDVI < 0.1$) for å identifisere flytende plastansamlinger, og sørg for at bare områder maskert som vann blir vurdert (Figur 13c).
6. Visualisering og lagring av resultater: Lag en visuell framstilling av resultater for FDI, NDVI og avfallsdeteksjon med vannmaske og RGB-komposittbilder (Figur 13c og d.). Lagre resultater som GeoTIFF-filer (NDVI, FDI) og PNG-filer (plastdeteksjon og RGB-kompositt).
7. Eksporter resultater: Eksporter oppdagede ansamlinger som shapefiler for videre analyse og integrasjon med andre GIS-verktøy (f.eks. Rent Hav).

Ytterligere behandlingstrinn, bør også inkluderes for nøyaktige og pålitelige resultater. Disse er:

- Filtrering av satellittbilder er avgjørende for nøyaktig å oppdage og klassifisere FMF. Den tar for seg viktige utfordringer som skydekke, bølgepåvirkning og interferens fra andre materialer som vegetasjon og drivved (Goddijn-Murphy et al., 2024; Topouzelis et al., 2021). Dette bør inkluderes i enhver behandlingsarbeidsflyt for å forbedre nøyaktigheten av FMF-deteksjon. Filtreringen bør gjøres i kombinasjon med bakkesannhetsdata for å få gode resultater.
- Skydatabehandling: Bruk skydatabehandlingsressurser for å behandle store mengder med data effektivt uten behov for å laste ned og prosessere data lokalt.
- Integrering av en separat, men sammenkoblet prosesseringsarbeidsflyt for satellittbilder fra flere kilder (f.eks. SAR eller hyperspektrale data), ved bruk av samme algoritme og indekser, i områder der man ser et behov for dette.

Som diskutert i Kap.2.2, vil valg av terskelverdier som vindhastighet eller bølgehøyder kunne påvirke datautvalget betraktelig og er ikke åpenbart overførbare mellom regioner. Valg av filtreringsmetoder bør tilpasses til lokale forhold ved hjelp av bakkesannhetsdata, og vi anbefaler at dette gjøres for å forbedre algoritmen under og etter pilotperioden. Dette vil inngå i (videre)utvikling av en tilpasset algoritme for norske forhold.

Den nyligste utviklingen innen slike algoritmer har inkludert å utvikle maskinlæringsmodeller ved hjelp av spektrale signaturer. For eksempel har metoder som CNN (Convolutional Neural Networks), naive Bayes, Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF), Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), og U-Net blitt brukt til FMF-deteksjon (Waqas et al., 2023). Man har også brukt ikke-veiledede metoder som K-Means og Fuzzy C-Means Clustering for å identifisere FMF. Det er nødvendig med tilgang på trenings- og valideringsdata for å vurdere hvilken modell som vil fungere best for dette formålet under norske forhold.

Hvis det ikke finnes eksisterende satellittdata fra området eller åpne data for trening og validering, vil det være utfordrende å bruke en fullt overvåket metode i et overvåkingsprogram basert på Sentinel-2-data. I slike situasjoner anbefales det å bruke en kombinasjon av ikke-veiledede metoder og semi-veiledede tilnærminger for å etablere et grunnlag for videre overvåking.

Man kan trene modellen i tre faser;

1. ikke-veiledet metode for å identifisere mønstre og generere innledende kart.
2. feltdata til å trene en semi-veiledet algoritme og forbedre modellens nøyaktighet.

3. Når flere data blir tilgjengelig over tid, oppdater algoritmen og bytt gradvis til en veiledet modell med økende nøyaktighet.

Det anbefales å starte med en ikke-overvåket metode. Forslag til algoritme til dette er K-Means clustering eller ISODATA. Fordelen er at ikke-veiledede metoder ikke krever forhåndstrening og kan dele spektrale data inn i klasser basert på likhet, og man lar algoritmen oppdage naturlige klynger i dataene. Når man har en grunnleggende forståelse av dataene fra ikke-veiledet klassifisering, kan man manuelt velge treningsområder fra Sentinel-2-bildene og bruke disse til å trene en veiledet algoritme. Anbefalt algoritme til dette er Random Forest eller Support Vector Machines (SVM). Disse algoritmene kan trenes på små datasett og har høy generaliseringsevne. Generelt kan man si at semi-veiledede metoder tillater iterativ forbedring når mer valideringsdata blir tilgjengelig.

Siden det ikke finnes eksisterende trenings- eller valideringsdata, må man samle feltdata fra området. Dette kan inkludere observasjoner fra båter eller droner eller andre feltkampanjer. Feltdata kan brukes til å forbedre både treningsgrunnlaget og til å validere klassifiseringene fra satellittdataene.

3.3.1 Alternativer for implementering av algoritmer

Det finnes to hovedalternativer for å samle inn og analysere satellittdataene som er nødvendige for å implementere et norsk overvåkingssystem. Det første alternativet er å utvikle hele arbeidsflyten selv gjennom kodebaserte verktøy. Det andre alternativet er å benytte seg av et eksternt verktøy eller tjeneste der hovedparten av denne utviklingen allerede er på plass. Det siste vil kunne spare mye tid på utvikling av verktøy som allerede fins, men samtidig begrense egen kontroll over verktøyets utvikling.

Utviklingen av kommersielle verktøy for prosessering av satellittdata er et felt hvor det for tiden foregår mye, og der noen verktøy er utviklet spesifikt for å detektere plast (f.eks. Plastic-I¹⁸ og Digital Earth Solutions¹⁹), mens andre har blitt benyttet til andre typer overvåking der det kan være naturlig å tilpasse metoden til overvåking av plast (f.eks. oljesøl eller algeoppblomstring).

Begge alternativer, både en kodebasert arbeidsflyt og et eksternt kommersielt verktøy, er i teorien mulige å implementere i et fremtidig overvåkingssystem. Ingen av de kommersielle verktøyene vi har sett på er per dags dato klare for operativ bruk, men alle er under aktiv utvikling og viser framtidig potensiale. Dersom slike blir klare før implementering, er et alternativ å benytte et ferdig

¹⁸ <https://www.plastic-i.com/>

¹⁹ <https://digital-earth-solutions.com/>

utviklet kommersielt produkt i pilot-perioden, og vurdere å utvikle et eget kodebasert system for videre overvåking. Vår anbefaling er å gjøre en grundig evaluering av alle tilgjengelige kommersielle produkter tilgjengelige, og sammenligne tilbud på kostnader med kostnadsoverslaget for et kodebasert selvutviklet system som presentert i denne rapporten. Dette er for å unngå å bruke ressurser på å utvikle verktøy som allerede eksisterer.

For å illustrere potensialet i et slikt ferdig kommersielt produkt, er det inkludert ett i eksemplene på arbeidsflyt under, og sammenlignet med den kodebaserte metoden som kun delvis er utviklet til denne rapporten for å illustrere arbeidsflyten. Det kommersielle verktøyet vi har sett på kombinerer Sentinel-2 satellittdata med modeller for sirkulasjon i havet, slik at man også kan spore forflytningen av objekter på havoverflaten.

3.3.2 Eksempler på implementert arbeidsflyt

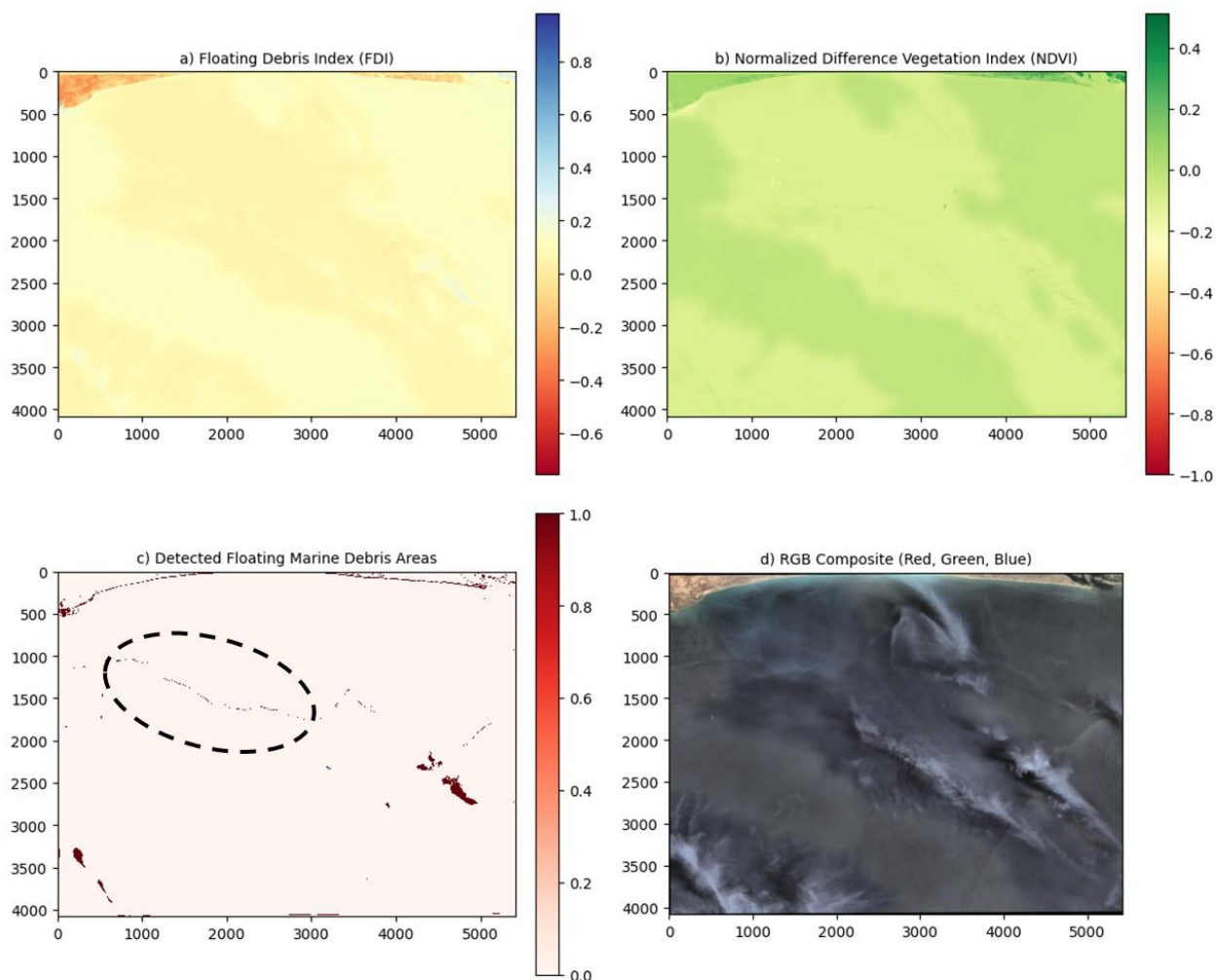
For å illustrere hvordan en analyse kan fungere i praksis, er det inkludert to eksempler på praktisk utprøving av dataanalysen beskrevet over. Et eksempel baserer seg på en selvutviklet kodebasert algoritme, og den andre tar i bruk et eksisterende kommersielt verktøy; Plastic-i. Begge baserer seg på Sentinel-2 bilder og tar i bruk de anbefalte indeksene for å identifisere plastansamlinger.

I mangel på en dokumentert identifikasjon av plastansamlinger utenfor norskekysten, brukes en kjent hendelse utenfor kysten av Ghana den 14. mars 2022. Dette området ble valgt siden det er et av få områder som dekkes av test-data av høy kvalitet hvor tilstedeværelsen av plast har blitt validert. Området har også blitt brukt av Plastic-i til å validere sin egen kode, og dette ga oss også muligheten til å sammenlikne våre resultater med deres. Optimalt sett skulle det vært presentert et eksempel fra norske havområder, men dette var ikke mulig å undersøke innenfor rammen av dette oppdraget.

3.3.2.1 Kodebasert metode

For å identifisere flytende makroplast ut ifra satellittbilder kan man utvikle en kodebasert arbeidsflyt. For å gjøre denne mest mulig brukervennlig, anbefaler vi at den utvikles med Python i Jupyter Notebooks. Python er et av de mest brukte programmeringsspråkene, og Jupyter Notebooks gir muligheten til å dokumentere og kjøre koden på en enkelt forståelig og intuitiv måte. Analysen kan kjøres på nedlastet satellittdata som er lagret lokalt, men man kan også analysere satellittbilder direkte i skyen, og kun eksportere resultater lokalt. Python-kode kan enkelt integreres med brukervennlige og gratis verktøy, som Jupyter-notatbøker, for å dokumentere kode, visualisere data

og for GIS-integrasjon²⁰. Resultatet bør lagres i et format som kan integreres i eksisterende systemer, som for eksempel GeoTIFF eller shape-filer (.shp). Som et eksempel på en slik metode er det utviklet en enkel test-kode for dette (tilsvarende arbeidstrinn 1-7 beskrevet i Kap. 3.3), og resultater av analysen vises i Figur 13. Koden er lagt ved i vedlegg.



Figur 13. Resultater fra den kodebasert arbeidsflyten på et område utenfor kysten av Ghana. a) Indeksen for flytende avfall (FDI), b) Den normaliserte vegetasjonsindeksen (NDVI), c) Identifisert FMF over terskelverdi (stiplet ellipse), d) RGB-komposittbilde.

²⁰ Et eksempel på GIS-integrasjon og visualisering, som også inkluderer verifiseringsdata, kan finnes her: https://docs.digitalearthafrika.org/en/latest/sandbox/notebooks/Real_world_examples/Floating_marine_debris.html#

3.3.2.2 Kommersielle verktøy; Plastic-I

Plastic-i Observatory er et av flere kommersielle verktøy for identifisering og sporing av FMF for tiden under utvikling. Det er designet for å detektere, spore og visuelt fremvise FMF. Verktøyet er i bruker-test stadiet av utviklingen og vi fikk tilgang til en beta-versjon for testing til denne rapporten. Plastic-i-observatory bruker satellittbilder fra Sentinel-2 kombinert med andre data fra havsirkulasjonsmodeller, for å detektere og visualisere FMF og tilbyr en rekke alternativer for brukere å analysere denne informasjonen, for eksempel å generere varmekart, bilder av søppelakkumulering og interaktive kartfremvisninger.

Plastic-I er fremdeles på utviklingsstadiet, og de implementerer fortsatt oppdateringer basert på brukertesting og er åpne for ytterligere tilpasninger basert på brukernes behov. Plastic-i-observatoriet fremstår som et lovende, kraftig og intuitivt verktøy for å overvåke marint søppel i sanntid, noe som gjør det enkelt for brukere å spore, visualisere og rapportere FMF i bestemte områder av havet.

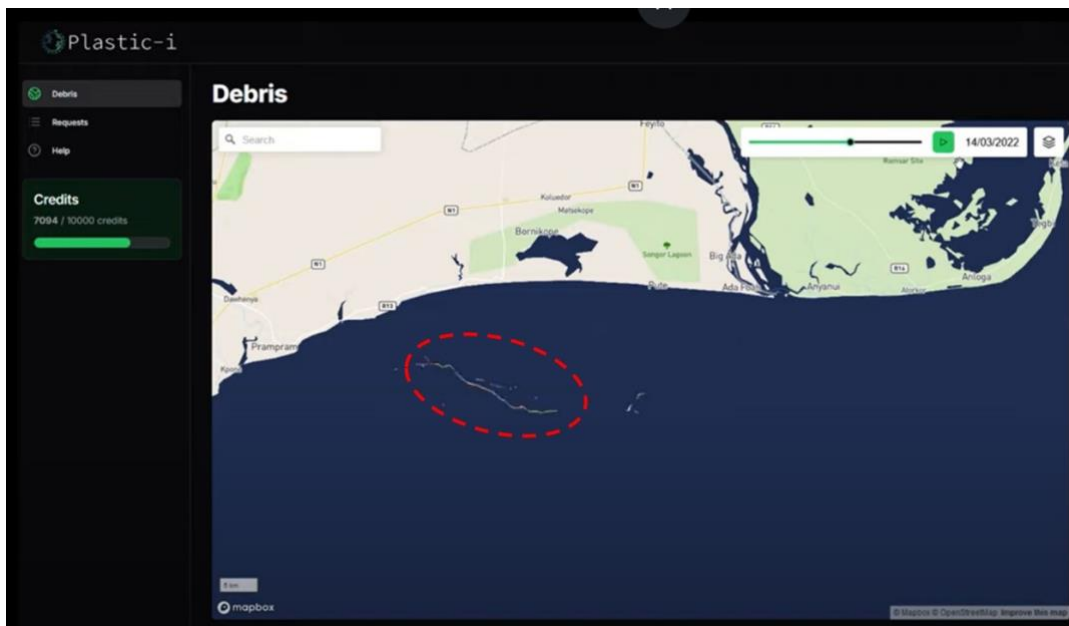
Noen hovedtrekk ved programvaren:

Kartgrensesnitt: Fungerer på samme måte som Google Maps, slik at brukere kan visualisere flytende plastansamlinger i bestemte regioner.

Kreditsystem: Brukere tildeles kreditt som brukes for å behandle dataforespørsler.

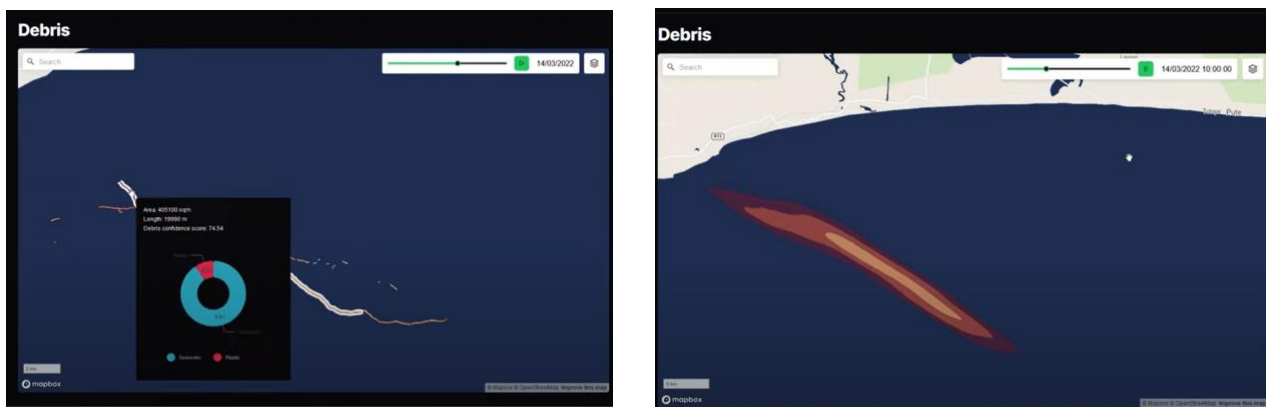
Man kan komme med tre typer forespørsler:

1. Forespørsel om FMF (Debris Request): Gir statiske bilder av ansamlinger av FMF.
2. Forespørsel om varmekart (Heatmap Request): Viser tidsseriedata for hotspots for FMF.
3. Interaktive deteksjoner (Interactive Detections): Genererer klikkbare søppelansamlinger for bestemte regioner.



Figur 14. Resultatene fra en heatmap-forespørsel i Plastic-I Observatory. Resultatene er fra samme sted og dato som i fra python-behandlingsarbeidsflyten over (Figur 13). Identifisert FMF skissert av rød ellipse er samme FMF som er identifisert i python-eksemplet. Kilde: Plastic-i observatory.

Sporing av FMF (Debris Tracking): Dashbordet vil bruke gyldig strøm- og vinddata for den forespurte datoen og regionen for å forutsi forflytningen de neste tre dagene. Brukere kan legge til satellittbilder og justere gjennomsiktighet for å sammenligne med FMF deteksjonsdata.

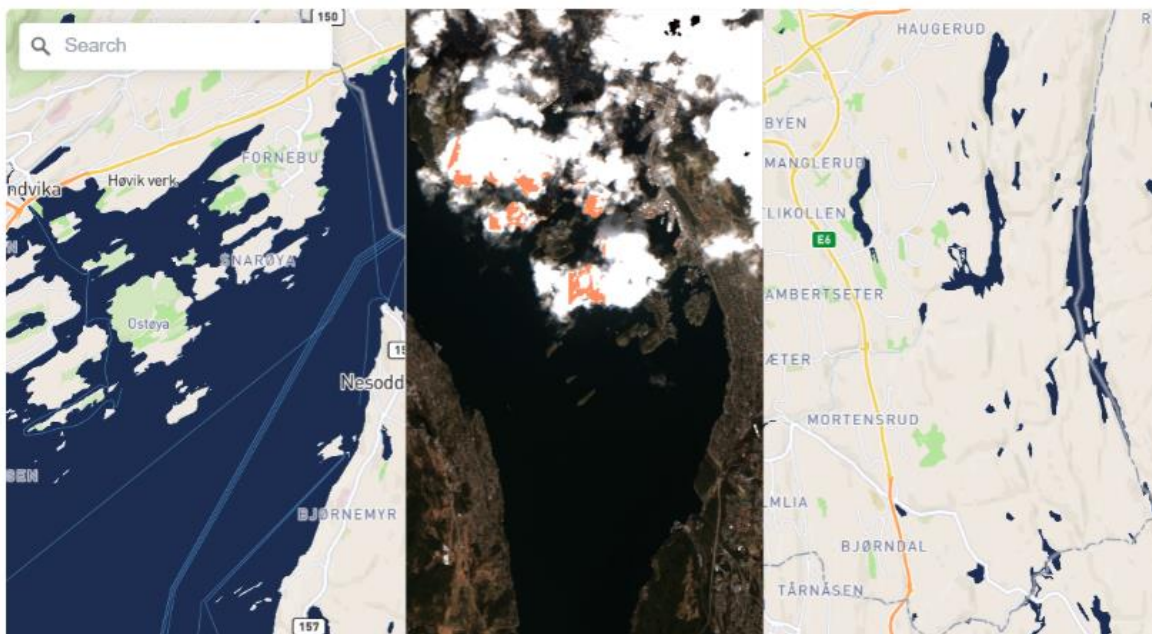


Figur 15. Eksempel på sporing av FMF fra Plastic-I Observatory (samme som ovenfor, utenfor kysten av Ghana) som viser sannsynligheten for FMF (venstre panel) og projeksjonen med konfidensintervaller (forskjellige farger) vist i høyre panel. Kilde: Plastic-i observatory.

3.3.2.3 Eksempel på begrensninger under norske forhold

Den nåværende versjonen av verktøyet mangler testdatasett og tilpasninger til norske forhold (skyer, sterk vind- og bølgepåvirkning, plasttyper, etc.), derav eksemplet fra Ghana. Under vises et resultat av et forsøk på plast-deteksjonen for Oslofjorden. Dette eksempelet vider en falsk positiv, altså et

tilfelle der algoritmen «oppdaget» en plastansamling, som egentlig er en sky. Dette eksemplet illustrerer en vanlig feil som utviklerne av verktøyet jobber med å forbedre (Figur 16).



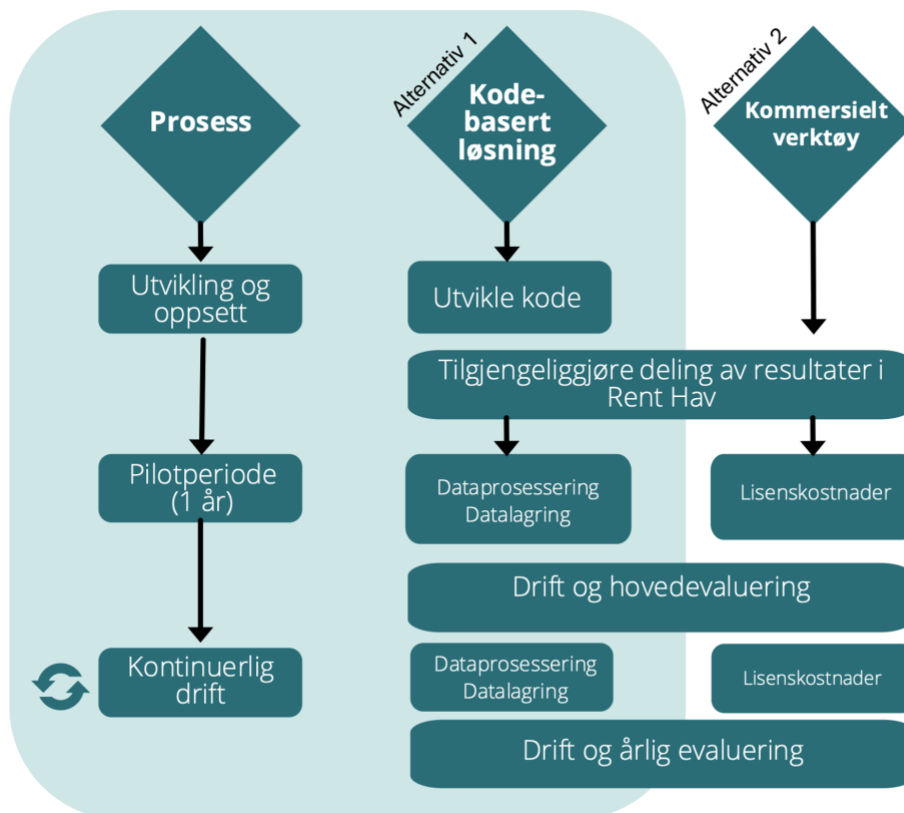
Figur 16. Resultater fra en plastforespørsel for Oslofjorden som viser at skyer fortsatt kan feil-identifiseres som FMF i denne algoritmen. Identifiserte FMF er vist som oransje polygoner på RGB-bildet (midten). Kilde: Plastic-i observatory.

3.4 Kostnadsoverslag

Her presenterer vi et estimert kostnadsoverslag for etablering og drift av et overvåkingssystem over plastansamlinger i norske farvann. Kostnadsoverslaget er fordelt på kostnader for (1) teknisk utvikling og oppsett av et overvåkingssystem, (2) kostnader for en pilotperiode på ett år, og (3) kostnader for kontinuerlig drift. Kostnadsestimatet baserer seg på overvåking av tre overvåkingssområder, og gir to alternativer basert på enten egen kodeutvikling eller bruk av et preeksisterende kommersielt verktøy, som beskrevet tidligere. En oversikt over de viktigste kostnadselementene og hvordan de fordeler seg over utviklingsperioden er presentert i Figur 17. Til slutt presenteres en oppsummering og et totalt kostnadsestimat for de to alternativene.

Etter ønske fra Miljødirektoratet, er det for kostnadsestimater for konsulenttenester lagt til grunn en timepris på 1427 kr, basert på NFR sin timepris for en «forsker 1».

Denne analysen vil gi et solid grunnlag for utvikling og drift av et satellittbasert overvåkingssystem og bidra til å sikre at systemet kan implementeres innenfor realistiske økonomiske rammer.



Figur 17 - Kostnadselementer for et overvåkingsystem. Kostnadsoverslaget er utviklet for Alternativ 1.

3.4.1 Kostnadsoverslag for utvikling og oppsett av overvåkingssystemet

3.4.1.1 Innkjøp av satellittbilder

Sentinel-2 tilbyr gratis bilder gjennom Copernicus-programmet som drives av den europeiske romfartsorganisasjonen (ESA), og er derfor den mest kostnadseffektive løsningen. Dataene kan lastes ned uten kostnad fra ulike plattformer, som Copernicus Open Access Hub, eller man kan gjøre analyser direkte på bildene uten nedlastning ved hjelp av verktøy som f.eks. Google Earth Engine eller Microsoft Planetary computer. Ved tilgang direkte i skyen vil det påløpe kostnader for lisens, databehandling og lagring av data. I forhold til andre satellitter er Sentinel-2 et svært kostnadseffektivt valg for overvåkingsprosjekter.

Innkjøp av andre satellittbilder enn Sentinel-2 vil trolig være hensiktsmessig for å fylle viktige datahull (f.eks. på grunn av skyer, bølger, mangel på data) og for å forbedre tidsdekningen i viktige overvåkingsområder som diskutert i Kap. 2.2.3.3. Kostnader for innkjøp av andre satellittbilder enn Sentinel-2 er ikke inkludert i kostnadsestimater, siden man må vurdere behovet for disse for hvert enkelt overvåkingsområde, noe som er utenfor omfanget av denne rapporten. Priser og tilgang til disse er likevel nevnt i Vedlegget, slik at man kan danne seg et bilde over tilleggskostnaden av å inkludere slike bilder. Denne kostnaden vil sannsynligvis være inkludert i lisenskostnaden for kommersielle verktøy (f.eks. som beskrevet for Plastic-i-observatory).

3.4.1.2 Utvikling av kode

Kodeutviklingen og implementeringen av test-koden beskrevet i avsnitt 3.3.2.1 krevde 16 timer, og analyserte ett bilde. Å teste og utvikle koden videre vil kreve mer tid, og på sikt bør man også inkludere bakkesannhetsdata for å kalibrere og validere. Tilleggsoperasjoner som må implementeres som del av videre kodeutvikling inkluderer tilpasning til overvåkingsområder, automatisert datanedlasting og -prosessering, skyfiltrering (og evt. annen filtrering), visualisering og validering av resultater. Hvert eksisterende steg og tilleggssteg bør valideres og sjekkes underveis, og koden bør optimaliseres underveis.

Skydatabehandling, for eksempel gjennom utvikling av en docker eller liknende arbeidsflyt, vil være nødvendig for å implementere kontinuerlig nedlastning og behandling av bilder over norske farvann slik at man kan opprettholde et oppdatert datasett med nær-skyfrie bilder, og måle så nøyaktige endringer i mengden FMF som mulig. Man vil også måtte sette opp en database eller liknende for å lagre resultatene av prosesseringen, og deretter utvikle en arbeidsflyt for å beregne nødvendig statistikk basert på disse.

Estimerte kostnader for utvikling av en slik arbeidsflyt, inkl. en automatisert arbeidsflyt for skydatabehandling og generering av relevante statistikker, samt oppsett av en database for datalagring estimeres til et halvt årsverk (848 timer). Av dette er det estimert at ca. 700 timer brukes på kodeutvikling og optimalisering, mens resten er for å utvikle statistikker (~2 uker) og å sette opp en database (~2 uker). Dette er for en standardalgoritme som kan kjøres med kun Sentinel-2-data.

Vi anbefaler at man også undersøker hvilke digitale verktøy som allerede finnes på markedet, inkludert løsninger fra andre leverandører. Videre bør det innhentes pristilbud, samtidig som man vurderer nåværende muligheter, begrensninger og potensial for videreutvikling i de ulike verktøyene. Målet er å vurdere om det kan være kostnadsbesparelser knyttet til å velge en eksisterende løsning fremfor å utvikle dette internt og/eller om man kan få en høyere kvalitet på resultatene.

For å få pålitelige resultater ut av en slik automatisert arbeidsflyt, bør man også inkludere bakkesannhetsdata fra norske farvann, noe som det per i dag er lite av. Det anbefales at valideringsdata samles inn fra norske farvann før eller parallelt med utviklingen av et slikt overvåkingssystem. Dette kan oppnås ved å gjennomføre feltkampanjer for prøvetaking og/eller samarbeide med andre forsknings- eller overvåkingsprogram for å dele FMF-data (dato, klokkeslett, posisjon, størrelse, type og bilder). Omfanget av arbeidet med å innhente bakkesannheter avhenger av flere faktorer som ikke nødvendigvis er direkte knyttet til satellittovervåkingen og er derfor ikke inkludert i kostnadsoverslaget.

3.4.1.3 Kostnader for å integrere resultater i et overvåkingssystem, f.eks. Rent Hav

Dersom man ønsker å dele resultatene med flere aktører gjennom et brukervennlig grensesnitt, kan man laste dem opp til f.eks. Rent Hav. I Kapittel 4.1.2 vurderer vi potensialet for å benytte Rent Hav som en plattform for disse resultatene. Plattformen administreres i dag av Asplan Viak, og det er derfor nødvendig å kontakte dem for å få et prisestimat på tilpasning av plattformen til opplasting av nye datasett.

3.4.2 Kostnadsoverslag for pilotperiode

3.4.2.1 Kostnader for dataprosessering og datalagring

Selv om Sentinel-2 bilder er gratis, vil det med tanke på de store datamengdene også påløpe kostnader for prosessering i skyen. Den totale kostnaden vil inkludere kostnader for Compute Units (et mål på hvor mye datakraft man bruker), datalagring, og en månedlig plattformavgift. De fleste plattformer kommer med rabatterte priser dersom man kjøper et abonnement med bindingstid utover et år. Kostnadsestimatet for dataprosessering og datalagring er basert på de foreslåtte overvåkingsområdene.

De mest brukte skyprosesseringsløsningene er bruk av virtuelle maskiner gjennom Azure, eller med Google Earth Engine eller Microsoft Planetary computer.

Norge tilbyr også en egen nasjonal infrastruktur for høy-ytelses databehandling (HPC-ressurser) og datalagring gjennom Sigma2. Sigma2 støtter forskningsmiljøer og institusjoner ved å gi tilgang til kraftige datamaskiner og lagringssystemer som kan håndtere komplekse beregninger og store mengder data, og de kan også tilby støtte og opplæring for bruk av deres systemer. Selv om Sigma2 hovedsakelig er rettet mot forskningsmiljøer, kan også offentlige aktører, som arbeider med samfunnskritiske oppgaver eller store datamengder, dra nytte av dens infrastruktur innenfor visse rammer, blant annet et høyere bidrag til å dekke kostnader enn det som er nødvendig fra et forskningsprosjekt. For den anbefalte arbeidsflyten vil det trolig ikke være nødvendig med så kraftige ressurser, men dersom man ønsker å oppskalere på et senere tidspunkt, eller man synes det er viktig å lagre data i Norge, kan dette være et mulig alternativ.

For kostnadsestimatet bruker vi priser for én virtuell maskin i Azure, og tilhørende datalagring av resultatlaget som viser tilstedeværelsen av plast. Vi baserer estimatet på at det vil ta 0.5 timer å kjøre koden på hvert Sentinel-2 bilde, og at det gjennom året må prosesseres 582 bilder per år for å dekke de tre foreslåtte overvåkingsområdene. Det er da tatt bort bilder for perioder med mørketid eller med ikke-tilstrekkelige mengder lys for optiske satellitter i Område 3 Barentshavet.

Dette gir en estimert kostnad på 200-300 kr per måned, og vi ser derfor at kostnader for prosessering og datalagring er små i forhold til de andre kostnadene. Dersom man ønsker å videreutvikle overvåkingssystemet, f.eks. ved å bruke andre algoritmer, legge til sirkulasjonsmodeller eller andre bilder, kan det medføre økte kostnader på sikt. Noen algoritmer kan trenge eksponentielt mer prosesseringskraft, og dette vil påvirke kostnader for prosessering.

3.4.2.2 Lisenskostnader ved bruk av et kommersielt verktøy

Et alternativ til å utvikle et kodebasert verktøy selv, er å ta i bruk et eksternt, kommersielt verktøy. Ved en slik løsning vil det påløpe løpende lisenskostnader. Lisenspriser vil hovedsakelig avhenge av antall brukere og hvor mye prosesseringskraft som trengs (hovedsakelig avhengig av størrelsen på områdene som skal overvåkes, og om det ønskes å gjøre tilleggsanalyser).

På etterspørsel har Plastic-i estimert at den månedlige lisensavgiften for det høyeste lisensnivået, som forventes basert på behovene til dette overvåkingssystemet, vil være på ca. 10 000 GBP (ca. 140 K NOK). Dette vil også inkludere kostnadene for ekstra bilder utover Sentinel-2. Det understrekes at dette estimatet er *svært tentativt* og har en meget høy grad av usikkerhet, og at Plastic-i ikke har gjort noen tilpasset analyse for å komme fram til estimatet. Det er også ikke spesifisert i hvor stor grad utviklings- og tilpasningskostnader og kostnader til evaluering etter pilotperioden og underveis i overvåkingssystemet er inkludert i denne lisenskostnaden. På bakgrunn av dette tar vi ikke med kostnader for bruk av et kommersielt verktøy med i det videre kostnadsestimater.

3.4.2.3 Drift og evaluering av pilotperioden

Det er viktig at man delegerer både tid og ansvar for å drifte og evaluere pilotperioden. For dette har vi estimert 1.5 årsverk (2542 timer), der én person er hovedansvarlig for drift av programmet i én 100% stilling, og 0.5 årsverk er til at flere kan (og bør) involveres i evalueringsfasen.

I dette estimatet er det inkludert utvikling av dataprosesseringsmetoder og algoritmer basert på resultater datainnsamlingen (både resultater fra Sentinel-2, og fra eventuelle andre samarbeidsprosjekter der man får mulighet til å samle inn bakkesannheter). Omfanget av dette arbeidet vil avhenge av resultatene fra datainnsamlingen, og det er derfor grad av usikkerhet i estimatet. Vi estimerer 1 årsverk til dette arbeidet under pilotperioden (1695 timer), men omfanget av dette kan tilpasses basert på ambisjonsnivå.

3.4.3 Kostnadsoverslag for kontinuerlig drift

Løpende kostnader for den kodebaserte arbeidsflyten inneholder løpende kostnader for datalagring og prosessering, drift av overvåkingsprogrammet og årlige evalueringer. Disse elementene er diskutert i avsnittene over.

For årlig drift og evaluering av overvåkingsprogrammet beregner vi ett årsverk (1695 timer). I tillegg vil det forekomme engangskostnader for eventuelle nye tilpassinger man gjør på metodikken for å utvide eller forbedre overvåkingsprogrammet, noe som f.eks. kan inkludere videre utvikling av algoritmer etter hvert som mer grunnsannhetsdata blir samlet inn. Gitt at man følger metoden som er beskrevet i denne rapporten, og ikke bruker algoritmer som krever mye høyere prosesseringskraft eller kjøper data fra andre satellitter eller fjernmålingsmetoder, vil det ikke være store forskjeller i kostnader for de ulike foreslåtte overvåkingsområdene.

3.4.4 Oppsummering av kostnader

Et helhetlig kostnadsestimat er presentert i Tabell 2, der kostnadselementene for Alternativ 1: Kodebasert arbeidsflyt er lagt til grunn (Figur 17).

Følgende kostnader er ikke inkludert i kostnadsestimatet:

- Tilrettelegging av Rent Hav (Avsnitt 4.1.2).
- Kostnader ved bruk av et kommersielt verktøy er ikke inkludert på bakgrunn av en svært høy grad av usikkerhet i estimatet for lisens, samt manglende informasjon om hva som er inkludert i dette estimatet.
- Andre tilpasninger med bakgrunn av bakkesannheter i pilotperioden.
- Kostnader knyttet til metoder som ikke er satellittbaserte.
- Det er tatt utgangspunkt i priser fra 2024, og framtidige prisendringer er ikke hensyntatt.

Tabell 2 – Kostnadsoverslag for et mulig overvåkingssystem

Kostnadskomponent	Enhet	Antall (timer)	Enhetspris (NOK)	Total kostnad (kNOK)
Utviklingsfase				
Utvikling av kodebasert arbeidsflyt	NOK/Time	700	1 427	<u>999</u>
Utvikle statistikker	NOK/Time	75	1 427	<u>107</u>
Utvikle database	NOK/Time	75	1 427	<u>107</u>
Sum for pilotperiode:				<u>1213</u>
Pilotperiode				
Dataprosessering og datalagring (Kap. 3.4.2.3)	NOK/Måned	12	300	4
Drift og hovedevaluering, (Kap. 3.4.2.3)	NOK/Time	2543	1 427	3 628
Videreutvikling av algoritmer basert på erfaringer i pilotperioden (Kap. 3.4.2.3)	NOK/Time	1695	1427	2 418
Sum for pilotperiode:				<u>6 051</u>
Kontinuerlig drift				
Dataprosessering og datalagring (Kap. 3.4.3)	NOK/Måned	12	300	4
Årlig drift og evaluering (Kap. 3.4.4)	NOK/Time	1 695	1 427	2 419
Sum for kontinuerlig overvåking (per år)				<u>2 423</u>

Oppsummering av kostnader

Hovedkostnadene for et mulig overvåkingssystem vil være konsulentkostnader for oppsett av en automatisert arbeidsflyt, samt for drift og evaluering av overvåkingssystemet.

Dataprosessering og datalagring står for en neglisjerbar del av kostnadene. Kostnadene vil øke dersom man øker det overvåkede arealet, eller dersom man ønsker å inkludere flere datatyper enn bilder fra Sentinel-2 (f.eks. havsirkulasjonsmodeller eller andre satelittbilder).

4 MULIGHETER FOR UTVIKLING AV ET VARSLINGSSYSTEM

Her vil det presenteres mulighetene innenfor den foreslåtte overvåkingen for å forbedre koordinert opprydning, som Rydd i tide-programmet og andre storskala prosjekter, samt vurdere om Rent Hav kan være et egnet verktøy for dette. Hovedforskjellen mellom et overvåkings- og varslingssystem, er at overvåkingssystemer hovedsakelig samler inn informasjon, mens et varslingssystem også må kunne gi varsler eller alarmer når det oppdages spesifikke hendelser. Et varslingssystem vil som regel brukes til å informere relevante parter om at noe krever umiddelbar handling, for eksempel iverksetting av en opprydningsaksjon.

For å utforme et mulig varslingsprogram er det nødvendig å gjennomføre en grundig behovsanalyse for varslingssystemet. Analysen må omfatte flere viktige punkter for å sikre at systemet fungerer effektivt og oppfyller målene for varsling.

Det første steget i utviklingen av et varslingssystem er å tydelig definere hva systemet skal varsle om. I dette tilfellet handler det om å varsle forekomster av flytende makroplast som er oppdaget ved satellittovervåkingen. Det kan dreie seg om større ansamlinger eller gjenstander. Det er viktig å avklare hvem som skal motta varsler for å kunne handle på informasjonen. Det bør vurderes om varsler sendes via for eksempel e-post, tekstmeldinger, eller via en app. Varselet må utformes slik at det når ut til alle relevante aktører. Dette kan være myndigheter, miljøorganisasjoner, eller aktører som har ansvar for opprydding, som Rydd i Tide-programmet. Det kan alternativt dreie seg om skipstrafikk i området dersom varselet dreier seg om større gjenstander eller typer søppel som kan utgjøre en trussel for skip og fartøy. Det må også spesifiseres hvilke handlinger som bør igangsettes etter mottak av varsler, som for eksempel å sende ut oppryddingsteam eller utføre videre undersøkelser. Et varsel kan også gå ut til miljøer som kan bidra med verifisering, spesielt under en pilotperiode. Vår anbefaling vil være å basere dette på brukergrupper der hver gruppe får tilpassede varsler via app eller SMS, avhengig av hvor tidssensitivt varselet er.

For strandrydding vil et varsel om flytende søppel til havs bare ha begrenset verdi, da det er mange forskjellige faktorer som avgjør hvor og når en eventuell stranding vil skje. Dersom det dreier seg om en søppelansamling knyttet direkte til en spesiell hendelse eller et spesielt utslipp derimot, som befinner seg i nærheten av land, vil en undersøkelse av strender i nærheten kunne effektivisere opprydning og i beste fall kunne forhindre strandet søppel å skylles ut til havs igjen, og et varsel vil i så måte kunne være verdifullt. Dersom varselet dreier seg om større gjenstander som kan være til

fare for skipstrafikk eller fritidsfartøy, vil et varsel mot aktuelle aktører være viktig og nyttig uavhengig av nærhet til kystlinjen.

Det er derfor å anbefale at varsel mot forskjellige grupper knyttes til kriterier som tar hensyn sannsynlighet for stranding, faregrad for trafikk og eventuelle andre spesielle hensyn. Det er avgjørende å involvere ulike interessenter tidlig i prosessen. Involvering av interessenter er viktig for å sikre at varslingsystemet dekker relevante behov, får aksept og fungerer i praksis. Interessenter bidrar med spesialisert kunnskap, identifiserer mulige utfordringer, og fremmer samarbeid om ressurser.

4.1.1 Vurdering av tekniske og ressursmessige krav

Et operasjonelt varslingsystem krever høy temporær oppløsning, det vil si hyppige dataoppdateringer, for å spore plasten i sanntid. Hvis hensikten er å fjerne plasten, må systemet kunne gi nøyaktige posisjoner på hvor plasten befinner seg til enhver tid. Innenfor overvåkingsprogrammet som anbefales her, er Sentinel-2-data lagt til grunn. Den høyeste temporære oppløsningen er en gjenbesøks tid på 2-3 dager. En flyktig plastansamling kan både flytte på seg eller gå i oppløsning på den tiden. Det er dermed viktig at et varsel sendes ut umiddelbart når et aktuelt funn er gjort.

Det bør vurderes om varslingsystemet skal kobles mot en havmodell for å spore plast som beveger seg med havstrømmene og forutsi hvor den vil flytte seg. Dette vil kreve avanserte modeller som tar hensyn til havstrømmer, værforhold og andre faktorer. Når det kommer til økonomiske midler, bemanning, infrastruktur og teknisk støtte, så må også planlegges for vedlikehold og drift av systemet over tid og det er mange fordeler ved å bruke et eksisterende verktøy til dette.

4.1.2 Rent Hav

Rent hav er et verktøy som primært brukes til å registrere ryddeaksjoner og samle data fra profesjonell strandrydding. Den nye versjonen av Rent hav ble lansert i juni 2024 og er utviklet av Asplan Viak for Miljødirektoratet. Det er hovedverktøy for registrering og overvåking i Rydd i tideprogrammet, finansiert av Handelens Miljøfond (HMF). I tillegg samler den inn noe data fra «Rydde», som er nettportalen for frivillig rydding.

Det finnes også muligheter i Rent hav til å registre akkumulasjonsområder og «hotspots», som områder som burde ryddes, hentepunkter for depoter som må hentes med båt av for eksempel profesjonelle aktører, og båtvrak og andre store gjenstander, farlig avfall, og områder som ikke kan ryddes, strender som inngår i OSPAR-overvåking og mer. Rent hav er derfor et verktøy som fungerer som samling av ryddedata for hele landet, på tvers av programmer og aktører. Det hadde

derfor også vært et naturlig sted å registrere og formidle informasjon om eventuelle ansamlinger av flytende plast som ble oppdaget ved jordobservasjon, og et godt sted å legge inn et varsel om slike ansamlinger.

Rent hav har per i dag et brukergrensesnitt som primært er rettet mot å registrere opprydningsaksjoner. Hvis man skulle bruke portalen til å også registrere ansamlinger av flytende plast, krever det tilpasninger av funksjonaliteten for å effektivt ha mulighet til å innføre dette. Vår vurdering er at dette kan gjøres på flere måter:

1. Å legge til rette for manuelle oppføringer av observasjoner med lokasjon, sted og dato, evt. areal og beregnet volum/vekt.
 - Tiltak: Det vil kreve relativt små endringer for å tilrettelegge for registreringer av observasjoner av jordobservasjonsdata som en egen type registreringer med obligatoriske felter som plassering, dato, vekt eller volum (estimert) og areal (estimert), samt bilder.
2. Automatisk innlesing av funn av ansamlinger fra bildebehandling. Dette vil kreve en større tilpasning der automatisk innhenting av bildemateriell og beregninger blir lest inn og registrert i kartløsningen direkte fra en server eller skylagringstjeneste.
 - Tiltak: Hvorvidt dette er en løsning som er kompatibel med karttjenestens oppsett per i dag er et spørsmål for Asplan Viak, som drifter plattformen, og avhenger også av rammen for avtalen de jobber under allerede når det kommer til drift og utvikling av plattformen. Denne løsningen ville kunne være mer kompatibel med en varslingstjeneste.

Fordeler ved å bruke Rent hav er at det er en plattform som når et bredt miljø med relevante brukere, og at det ville kunne bidra til et mer komplett datasett av marin forsøpling langs Norges kyst. Det å ha flere typer data og observasjoner samlet gir gode muligheter for kartlegging, uavhengig av mulighetene for oppdaterte varsler. For kartlegging av utbredelsen av marin forsøpling, og analyse for overvåking over tid, er det en klar fordel å ha mye data samlet i ett verktøy. Rent hav kan også være et svært nyttig verktøy for folkeforskningsbaserte («citizen science») bidrag og andre marine forsøplingsundersøkelser som skal inkluderes i ett datasystem for bruk for grunninformasjon og validering av overvåkingssystemet.

Begrensninger når det gjelder denne løsningen, er at registreringene må være kompatible med et eksisterende oppsett, som kan legge føringer for registreringer både manuelt og automatisk, og som i visse tilfeller kan gi uønskede effekter på hvordan data kan registreres og brukes. Hvorvidt Rent hav er et godt verktøy for denne typen registreringer er i stor grad også sensitivt til kapasitet hos tredjepart som drifter systemet.

Anbefalinger til varslingsystem

Det anbefales at Rent hav tilpasses for å automatisk lese inn lokasjon og størrelse på detekterte plastansamlinger eller -gjenstander når slike detekteres i overvåkingssystemet og sender varsler til bestemte brukergrupper.

Det anbefales å definere type varsel og målgruppe som skal motta varsel på bagrunn av ønsket tiltak

5 KONKLUSJONER

Her presenteres en oppsummering av anbefalinger til hvordan jordobservasjonsdata kan brukes til en nasjonal indikator og bidra med nasjonale data til FNs bærekraftsmål 14.1.1.b. Videre presenteres noen vurderinger om identifikasjon av plastansamlinger i åpent vann i norske havområder, og fremtidige perspektiver.

Jordobservasjonsdata kan brukes som indikator dersom overvåkingen lykkes med å samle inn data på en robust og kontinuerlig måte. Dette vil kreve tilpasninger og utvikling av eksisterende algoritmer for multispektral deteksjon. Dette vil innebære at algoritmen testes og valideres under norske forhold og justeres basert på eksisterende forskning fra andre farvann. Det vil likevel være store begrensninger knyttet til innhenting av optiske satellittbilder grunnet ugunstige vær- og lysforhold langs norskekysten. Det er løftet frem potensielle utfordringer ved overføring av metodikk fra midlere breddegrader til norske farvann. Før metodikkens sensitivitet for disse utfordringene er undersøkt, er det ikke mulig å slå fast om overvåkingen vil oppnå ambisjonene eller ikke; vi vet ikke hva vi kan se før vi har sett etter.

Basert på resultatene av datainnsamling og justering av metodikk gjennom en pilotperiode, kan man gå videre med jevnlig overvåking av kysten og levere nasjonale data basert på utvalgte overvåkingsområder, eller utvide programmet til å dekke hele kysten. Det vil da være mulig å levere data på detekterte ansamlinger eller gjenstander årlig, eller oftere. Hovedtrekkene i det foreslåtte overvåkingsprogrammet er;

1. Sentinel-2 som en nøkkelsatellitt i multisensorsystem

Sentinel-2 Nivå 2 (med atmosfærisk korreksjon) anbefales pga. pris, spektral sensor, oppløsning og tilbakevendingsfrekvens. For spesialtilfeller kan det være hensiktsmessig å benytte data fra andre satellitter i kombinasjon med Sentinel-2. Sentinel-2s høye romlige oppløsning (opptil 10 m) og spektrale oppløsning gjør den til den mest kostnadseffektive satellitten for overvåking av plastforurensning i marine miljøer. Den tilbyr detaljert informasjon om plassering og konsentrasjon av flytende plastavfall. Den er den klart mest brukte satellitten til dette formålet i dag, og en rekke indekser er utviklet basert på Sentinel-2-data. For å tilpasse datainnhenting til noen av utfordringene anbefaler vi at metodikken inkluderer flere satellitt-baserte sensorer, og muligens også utvides til å innhente data fra andre kilder i visse områder og sesonger.

2. Fokuserert innhenting av data: Overvåkingsområder

Gitt store datamengder for hele kysten, anbefales det å overvåke begrensede områder, i stedet for å dekke alle norske maritime områder. Bruk av disse fokusområdene vil tillate målrettet overvåking

samtidig som de legger til rette for innsamling og integrering av valideringsdata. Denne tilnærmingen vil bidra til å validere deteksjonsmetoder, med potensial til å skalere opp til full kystovervåking. Overvåkingsområdene kan legges til områder med sannsynlig plastakkumulering i norske farvann. Supplerende sensorer burde tas i bruk og tilpasses hvert overvåkingsområde, for å ta hensyn til unike utfordringer i vær og vindforhold, bølgeutsatthet, kilder og typer plastforsøpling.

3. Videreutvikling og tilpassing av indekser

Spektrale indekser, som Floating Debris Index (FDI) og Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), har blitt utviklet for å oppdage og skille plast fra andre flytende materialer som tre eller alger. Kombinasjonen av indeksene FDI og NDVI er den mest brukte. I tillegg kan filtrering ved hjelp av for eksempel terskelverdier av vind eller bølgehøyde tilpasses lokale forhold, og kommer sannsynligvis til å bidra til å identifisere FMF mer effektivt når den anvendes i større skala.

4. Teknisk gjennomføring og varsling

På grunn av de store datamengdene anbefales det å bruke data eksternt via en API eller et dedikert verktøy, fremfor å laste ned data lokalt. Det foreslås å videreutvikle Rent hav for å inkludere distribusjon av resultater, som deling av informasjon gjennom et varslingssystem. Plattformen kan også tilpasses for å legge til rette for validering av satellittbaserte deteksjoner ved hjelp av folkeforskning.

Utfordringer og fremtidige perspektiver

Det gjenstår fremdeles utfordringer med å identifisere plastansamlinger i åpent vann under mindre optimale forhold, noe som i stor grad er studert på mildere breddegrader og som utgjør en enda større utfordring langs Norskekysten. Selv om nye metoder utviklet over de siste årene har gitt betydelige fremskritt, er det fortsatt utfordringer knyttet til deteksjon og modellering av mindre plastbiter og differensiering mellom plast og andre materialer.

Å beskrive sannsynligheten for at akkumuleringssområder kan oppstå, og hvorvidt de sammenfaller med sårbare naturtyper, krever en god oversikt over utbredelse og spredningsdynamikk, og vil kreve en relativt høy temporal oppløsning i satellittovervåkingen, potensielt sett supplerende sensorer for å overkomme problemer relatert til datainnhenting og vær, og i noen tilfeller en dynamisk havmodell og partikkelspredningsmodell med godt beskrevne plastpartikler.

Flere har påpekt at potensialet for å måle endringer i tetthet/utbredelse, sammensetning, og forflytninger vil økes betraktelig med utviklingen av en spesialtilpasset sensor for deteksjon av marin forsøpling (Cózar et al., 2024; Maximenko et al., 2019; Waqas et al., 2023). Videre utvikling av sensorer, bedre spektraloppløsning og mer sofistikerte algoritmer må til for å forbedre nøyaktigheten og påliteligheten av overvåkingen av marin forsøpling fra verdensrommet.

Cózar et al. (2024) foreslår i sitt «proof of concept»-overvåkingsprogram at i stor skala trengs et instrument med minst fire bånd i det nær-infrarøde spekteret og to bånd i det kortbølgete infrarøde spekteret, en konfigurasjon som relaterer til viktigheten av infrarød stråling i spektralsignaturen til plast. I sin studie i Middelhavet med Sentinel-2-data, kunne de med dagens teknologi detektere en plastkonsentrasjon ned til 20 % av pikselareal, under gode forhold. De argumenterer for at en dedikert sensor kunne redusere den minste påvisbare konsentrasjonen med en størrelsesorden, noe som sikrer operasjonell overvåking, i det minste for sesongmessig til flerårig variabilitet på mesoskala områder (opp til ~1000km). De mener at en spesialtilpasset sensor kunne muliggjøre pålitelig deteksjon ved å bruke naturlig sollysrefleksjon fra et havområde med en minimumsdekning av plast på kun 1 % av overflaten. Et nytt instrument ville også kunne skille mellom de forskjellige typene materialer bedre, og også ha mulighet til å detektere søppel på mindre skala og med mindre konsentrasjoner (<1 %), og på den måten enklere kunne oppdage trender og mønstre i tid og rom.

Selv med en optimal sensor må overvåkingen fokusere på å oppdage store plastansamlinger, og bruke en pikselstørrelse i området rundt 10 meter for å øke sannsynligheten for å kunne detektere plast med en konsentrasjon på mindre enn 1 % av arealet. Med en romlig oppløsning satt til 10 meter vil en konstellasjon av to satellitter kunne oppnå global dekning med en omløpstid på noen få dager, noe som er en viktig målsetning for tidsoppløsning for mange av de applikasjonene som er identifisert av forskningsmiljøet.

Fremtidige og nye hyperspektrale satellittmisjoner med høy oppløsning i VIS, NIR og SWIR inkluderer GHOST²¹ (Global Hyperspectral Observational Satellite) (30 m), ESAs CHIME²² (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment) (30 m) og den multispektrale Pléiades Neo-satellittmisjonen²³ (2 m). Disse nye satellittdataene, sammen med eksisterende satellitter, har potensial til å betydelig forbedre mulighetene til å overvåke flytende marint avfall i havene (Livens et al., 2022).

Store framskritt over de siste årene har åpnet mange muligheter innen satellittbasert overvåking av flytende plast. Det gjenstår enda noen essensielle trinn i denne utviklingen før et globalt, nøyaktig overvåkingsinitiativ er realistisk. Dagens teknologi og metodikk er tilstrekkelig til å gi verdifulle

²¹ <https://www.eoportal.org/satellite-missions/ghost#mission-capabilities>

²² <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/chime>

²³ https://www.google.com/search?q=Pl%C3%A9iades+Neo-satellittmisjonen&oq=Pl%C3%A9iades+Neo-satellittmisjonen&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIKCAEQABiABBiiBDIKCAIQABiABBiiBDIKCAMQABiABBiiBNIBBzI2MGowajeoAgwAgE&sourceid=chrome&ie=UTF-8

bidrag til overvåking av flytende marint avfall. Innenfor internasjonale programmer og initiativer ventes det mye nytt innen både satellitt-teknologi og datahåndtering innen dette feltet over de neste årene. Gjennom et norsk overvåkingsprogram vil Norge kunne ta del i og bidra til denne viktige utviklingen.

LITTERATURLISTE

- A. Hueni & S. Bertschi. (2020). DETECTION OF SUB-PIXEL PLASTIC ABUNDANCE ON WATER SURFACES USING AIRBORNE IMAGING SPECTROSCOPY. *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 6325–6328. <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9323556>
- Albretsen, J., Sperrevik, A. K., Staalstrøm, A., Sandvik, A. D., Vikebø, F., & Asplin, L. (2011). NorKyst-800 Rapport nr. 1: Brukermanual og tekniske beskrivelser. 48 s. <https://imr.brage.unit.no/imr-xmlui/handle/11250/113865>
- Albretsen, Jon, A., Lars. (2021). *Hvilken betydning har oppløsning for kyst- og fjordmodeller?* (2021–20; Rapport fra havforskningen). Havforskningsinstituttet. <https://www.hi.no/hi/nettrapporter/rapport-fra-havforskningen-2021-20>
- Arinaga, R. A., & Cheung, K. F. (2012). Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. *Renewable Energy*, 39(1), 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.039>
- Basu, B., Sannigrahi, S., Sarkar Basu, A., & Pilla, F. (2021). Development of Novel Classification Algorithms for Detection of Floating Plastic Debris in Coastal Waterbodies Using Multispectral Sentinel-2 Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/rs13081598>
- Bergmann, M., Tekman, M. B., & Gutow, L. (2017). LITTERBASE: An Online Portal for Marine Litter and Microplastics and Their Implications for Marine Life. I *Fate and Impact of Microplastics in Marine Ecosystems* (s. 106–107). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812271-6.00104-6>
- Biermann, L., Clewley, D., Martinez-Vicente, V., & Topouzelis, K. (2020). Finding Plastic Patches in Coastal Waters using Optical Satellite Data. *Scientific Reports*, 10(1), 5364. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62298-z>
- Booth, H., Ma, W., & Forcisiork density mapping of marine debris and floating plastics via satellite imagery. *Scientific Reports*, 13(1), 6822. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33612-2>
- Ciappa, A. C. (2022). Marine Litter Detection by Sentinel-2: A Case Study in North Adriatic (Summer 2020). *Remote Sensing*, 14(10). <https://doi.org/10.3390/rs14102409>
- Cózar, A., Arias, M., Suaria, G., Viejo, J., Aliani, S., Koutroulis, A., Delaney, J., Bonnery, G., Macías, D., de Vries, R., Sumerot, R., Morales-Caselles, C., Turiel, A., González-Fernández, D., & Corradi, P. (2024). Proof of concept for a new sensor to monitor marine litter from space. *Nature Communications*, 15(1), 4637. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48674-7>
- Cristian Lussana, Hans Olav Hygen, Anita Verpe Dyrddal, Hilde Haakenstad, Inger Hanssen-Bauer, Jan Erik Haugen, & Andreas Dobler. (2022). *Notes on 1991–2020 wind speed climatology based on NORA3 near-surface data* (04; Met Report). Norwegian meteorological institute. <file:///Users/johannehoperysaa/Downloads/MET-report-04-2022.pdf>
- Dasgupta, S., Sarraf, M., & Wheeler, D. (2022). Plastic waste cleanup priorities to reduce marine pollution: A spatiotemporal analysis for Accra and Lagos with satellite data. *Science of The Total Environment*, 839, 156319. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156319>
- De Vries, R., Egger, M., Mani, T., & Lebreton, L. (2021). Quantifying Floating Plastic Debris at Sea Using Vessel-Based Optical Data and Artificial Intelligence. *Remote Sensing*, 13(17), 3401. <https://doi.org/10.3390/rs13173401>
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., & Reisser, J. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Pieces of Plastic. *PLoS ONE*, 9(12), e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- European Commission: Joint Research Centre, Vighi, M., Ruiz-Orejón, L., & Hanke, G. (2022). *Monitoring of floating marine macro litter – State of the art and literature overview*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/78914>
- Freitas, T. B. N., Leite, T. S., de Ramos, B., di Cosmo, A., & Proietti, A. (2022). Remote sensing analysis of litter use by benthic octopuses. *Marine Pollution Bulletin*, 175, 113339. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113339>
- Galgani, F., Ronchi, F., Tallec, K., Fischer, E., Matiddi, M., A, A., E, A., M, A., M, B. P., AM, B., N, B., B, C., F, C., P, C., G, D., S, D., D, F., T, F., MC, F., *Guidance on the monitoring of marine litter in European seas. KJ-NA-31-539-EN-N (online)*. <https://doi.org/10.2760/59137> (online)
- Garcia-Garin, O., Aguilar, A., Borrell, A., Gozalbes, P., Lobo, A., Penadés-Suay, J., Raga, J. A., Revuelta, O., Serrano, M., & Vighi, M. (2019). Who's better at spotting? A comparison of methods to monitor floating marine litter and marine mega-fauna. *Environmental Pollution*, 113680. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113680>
- Garcia-Garin, O., Borrell, A., Aguilar, A., Cardona, L., & Vighi, M. (2020). Floating marine macro-litter in the North Western Mediterranean Sea: Results from a combined monitoring approach. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111467. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111467>

- Garcia-Garin, O., Monleón-Getino, T., López-Brosa, P., Borrell, A., Aguilar, A., Borja-Robalino, R., Cardona, L., & Vighi, M. (2021). Automatic detection and quantification of floating marine macro-litter in aerial images: Introducing a novel deep learning approach connected to a web application in R. *Environmental Pollution*, 273, 116490. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116490>
- Goddijn-Murphy, L., & Dufaur, J. (2018). Proof of concept for a model of light reflectance of plastics floating on natural waters. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 1145–1157. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.044>
- Goddijn-Murphy, L., & Williamson, B. (2019). On Thermal Infrared Remote Sensing of Plastic Pollution in Natural Waters. *Remote Sensing*, 11(18). <https://doi.org/10.3390/rs11182159>
- Hu, C. (2021). Remote detection of marine debris using satellite observations in the visible and near infrared spectral range: Challenges and potentials. *Remote Sensing of Environment*, 259, 112414. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112414>
- Hu, C. (2022). Remote detection of marine debris using Sentinel-2 imagery: A cautious note on spectral interpretations. *Marine Pollution Bulletin*, 183, 114082. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114082>
- Huserbråten, M. B. O., Hattermann, T., Broms, C., & Albretsen, J. (2022). Trans-polar drift-pathways of riverine European microplastic. *Scientific Reports*, 12(1), Artikkel 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07080-z>
- Haarr, M. L., Falk-Andersson, J., Rødås, H. J., & Bay-Larsen, I. (2019). *Marin plastforsøpling fra fiskeflåten (Marine plastic littering from the fishing fleet)* (SALT rapport 1039; Nummer 1039). https://salt.nu/wp-content/uploads/2020/06/SALT_1039_HAVPLAST-delrapport-marin-plastforsopling-fra-fiskeflaten.pdf
- Haarr, M. L., Pantalos, M., Hartviksen, M. K., & Gressetvold, M. (2020). Citizen science data indicate a reduction in beach litter in the Lofoten archipelago in the Norwegian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 153, 111000. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111000>
- Haarr, M. L., Rydsaa, J., Pires, R., Espenes, H., Hermansen, S., Ghaffari, P., & Solbakken, V. S. (2024). Beach litter deposition and turnover, effects of tides and weather, and implications for cleanup strategies: A case study in the Lofoten archipelago, Norway. *Marine Pollution Bulletin*, 206, 116720. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116720>
- Jamali, A., & Mahdianpari, M. (2021). A Cloud-Based Framework for Large-Scale Monitoring of Ocean Plastics Using Multi-Spectral Satellite Imagery and Generative Adversarial Network. *Water*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/w13182553>
- Jambeck, J. R., & Johnsen, K. (2015). Citizen-based litter and marine debris data collection and mapping. *Computing in Science & Engineering*, 17(4), Artikkel 4. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2015.67>
- K. Kikaki, Ioannis Kakogeorgiou, P. Mikeli, D. Raitsos, & K. Karantzalos. (2022). MARIDA: A benchmark for Marine Debris detection from Sentinel-2 remote sensing data. *PLoS ONE*.
- Kikaki, A., Karantzalos, K., Power, C. A., & Raitsos, D. E. (2020). Remotely Sensing the Source and Transport of Marine Plastic Debris in Bay Islands of Honduras (Caribbean Sea). *Remote Sensing*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/rs12111727>
- Kukulka, T., Proskurowski, G., Morét-Ferguson, S., Meyer, D. W., & Law, K. L. (2012). The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris: WIND EFFECTS ON PLASTIC MARINE DEBRIS. *Geophysical Research Letters*, 39(7), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2012GL051116>
- Kaandorp, M. L. A., Lobelle, D., Kehl, C., Dijkstra, H. A., & van Sebille, E. (2023). Global mass of buoyant marine plastics dominated by large long-lived debris. *Nature Geoscience*, 16(8), 689–694. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01216-0>
- Landsat 8 | Landsat Science*. (u.å.). Hentet 16. oktober 2024, fra <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich-Argent, R., Brambini, R., & Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports*, 8(1), 4666. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>
- Maria Kremezi, Viktoria Kristollari, V. Karathanassi, K. Topouzelis, P. Kolokoussis, Nicolò Taggio, A. Aiello, G. Ceriola, E. Barbone, & P. Corradi. (2021). Pansharpening PRISMA Data for Marine Plastic Litter Detection Using Plastic Indexes. *IEEE Access*.
- Maximenko, N., Corradi, P., Law, K. L., Van Sebille, E., Garaba, S. P., Lampitt, R. S., Galgani, F., Martinez-Vicente, V., Goddijn-Murphy, L., Veiga, J. M., Thompson, R. C., Maes, C., Moller, D., Löscher, C. R., Addamo, A. M., Lamson, M. R., Centurioni, L. R., Posth, N. R., Lumpkin, R., ... Wilcox, C. (2019). *Toward Frontiers in Marine Science*, 6, 447. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00447>
- Metadata-14-01-01.pdf*. (u.å.). Hentet 11. oktober 2024, fra <https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/Metadata-14-01-01.pdf>
- Miyazono, K., Yamashita, R., Miyamoto, H., Ishak, N. H. A., Tadokoro, K., Shimizu, Y., & Takahashi, K. (2021). Large-scale distribution and composition of floating plastic debris in the transition region of the North Pacific. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112631. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112631>
- Moshtaghi, M., Knaeps, E., Sterckx, S., Garaba, S., & Meire, D. (2021). Spectral reflectance of marine macroplastics in the VNIR and SWIR measured in a controlled environment. *Scientific Reports*, 11(1), 5436. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84867-6>

- Papageorgiou, D., Topouzelis, K., Suaria, G., Aliani, S., & Corradi, P. (2022). Sentinel-2 Detection of Floating Marine Litter Targets with Partial Spectral Unmixing and Spectral Comparison with Other Floating Materials (Plastic Litter Project 2021). *Remote Sensing*, 14(23). <https://doi.org/10.3390/rs14235997>
- Park, Y.-J., Garaba, S. P., & Sainte-Rose, B. (2021). Detecting the Great Pacific Garbage Patch floating plastic litter using WorldView-3 satellite imagery. *Optics Express*, 29(22), 35288–35298. <https://doi.org/10.1364/OE.440380>
- PRISMA (Hyperspectral)—eoPortal. (u.å.). Hentet 16. oktober 2024, fra <https://www.eoportal.org/satellite-missions/prisma-hyperspectral#mission-capabilities>
- S. Khetkeeree & S. Liangrocapart. (2021). Detecting Floating Plastic Marine Debris using Sentinel-2-data via Modified Infrared NDVI. 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 633–636. <https://doi.org/10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454748>
- S. Vitale, G. Ferraioli, M. Ali, V. Pascazio, L. Ricciotti, G. Roviello, & G. Schirinz. (2022). Marine Plastic Detection Using Optical Data. IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2662–2665. <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9884610>
- SALT. (2022). Mengder, sammensetning, kilder og veivalg videre i forvaltningssøyemed – Sluttrapport for prosjekt Kvantessprang (1060). <https://salt.nu/prosjekter/marin-forsopling-i-norske-fylker-mengder-sammensetning-kilder-og-veivalg-videre-i-forvaltningssoyemed>
- Sannigrahi, S., Basu, B., Basu, A. S., & Pilla, F. (2022). Development of automated marine floating plastic detection system using Sentinel-2 imagery and machine learning models. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113527. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113527>
- Sentinel-2—An overview | ScienceDirect Topics. (u.å.). Hentet 16. oktober 2024, fra <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/sentinel-2>
- SkySat—Earth Online. (u.å.). Hentet 16. oktober 2024, fra <https://earth.esa.int/eogateway/missions/skysat>
- Strand, K. O., Huserbråten, M., Dagestad, K.-F., Mauritzen, C., Grøsvik, B. E., Nogueira, L. A., Melsom, A., & Röhrs, J. (2021). Potential sources of marine plastic from survey beaches in the Arctic and Northeast Atlantic. *Science of The Total Environment*, 790, 148009. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148009>
- Surveilling marine litter from space becomes reality—European Commission. (2024, september 25). https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/surveilling-marine-litter-space-becomes-reality-2024-06-14_en
- Tasseron, P., van Emmerik, T., Peller, J., Schreyers, L., & Biermann, L. (2021). Advancing Floating Macroplastic Detection from Space Using Experimental Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/rs13122335>
- Tekman, M. B., Gutow, L., & Bergmann, M. (2022). Marine Debris Floating in Arctic and Temperate Northeast Atlantic Waters. *Frontiers in Marine Science*, 9, 933768. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.933768>
- Themistocleous, K., Papoutsas, C., Michaelides, S., & Hadjimitsis, D. (2020). Investigating Detection of Floating Plastic Litter from Space Using Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/rs12162648>
- Topouzelis, K., Papageorgiou, D., Karagaitanakis, A., Papakonstantinou, A., & Arias Ballesteros, M. (2020). Remote Sensing of Sea Surface Artificial Floating Plastic Targets with Sentinel-2 and Unmanned Aerial Systems (Plastic Litter Project 2019). *Remote Sensing*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/rs12122013>
- Topouzelis, K., Papageorgiou, D., Suaria, G., & Aliani, S. (2021). Floating marine litter detection algorithms and techniques using optical remote sensing data: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 170, 112675. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112675>
- Topouzelis, K., Papakonstantinou, A., & Garaba, S. P. (2019). Detection of floating plastics from satellite and unmanned aerial systems (Plastic Litter Project 2018). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.011>
- United Nations Environment Programme. (u.å.). *Understanding the State of the Ocean: A Global Manual on Measuring SDG 14.1.1, SDG 14.2.1 and SDG 14.5.1*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/35086>
- van Sebille, E., Aliani, S., Law, K. L., Maximenko, N., Alsina, J. M., Bagaev, A., Bergmann, M., Chapron, B., Chubarenko, I., Cózar, A., Delandmeter, P., Egger, M., Fox-Kemper, B., Garaba, S. P., Goddijn-Murphy, L., Hardesty, B. D., Hoffman, M. J., Isobe, A., Jongedijk, C. E., ... Wichmann, D. (2020). The physical *Environmental Research Letters*, 15(2), 023003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6d7d>
- van Sebille, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B. D., van Franeker, J. A., Eriksen, M., Siegel, D., Galgani, F., & Law, K. L. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124006>
- Waqas, M., Wong, M. S., Stocchino, A., Abbas, S., Hafeez, S., & Zhu, R. (2023). Marine plastic pollution detection and identification by using remote sensing-meta analysis. *Marine Pollution Bulletin*, 197, 115746. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115746>

VEDLEGG

Priser på noen mulige supplerende satellittprodukter er lagt ved her, men ikke inkludert i kostnadsoverslaget.

PlanetScope

PlanetScope-data er ikke gratis, og kostnadene varierer basert på størrelsen på området som skal overvåkes, hyppigheten av oppdateringer, og mengden bilder som trengs. For tiden ligger prisen på 2,25 USD/km², med en minimumsbestilling på 250 km² og høyere kostnader for hyppigere oppdateringer. Tilgang til dataene kan kjøpes ved registrering på Planet Labs' nettside, eller ved å kontakte dem direkte for å få en skreddersydd avtale. På grunn av kostnaden bør bruken av disse bildene minimeres, og kun brukes på prioriterte dekningsområder der en høyere dataoppløsning er viktig.

PRISMA

Man kan få tilgang til PRISMA-data gjennom den offisielle portalen til den italienske romfartsorganisasjonen (ASI). Der må man registrere seg som bruker og søke om tilgang til dataene, som kan være gratis for forsknings- og akademiske formål. For kommersiell bruk vil det imidlertid være kostnader involvert, og disse kan variere avhengig av omfanget av forespørselen. Typisk vil kostnaden ligge mellom 2 – 12 EUR/km², avhengig av området og oppløsningen som trengs. Dersom det er behov for tilgang til hyppigere oppdateringer, kan den totale kostnaden bli høyere.

EnMAP

EnMAP-data er tilgjengelig gjennom den tyske romfartsorganisasjonen (DLR) sin nettbaserte portal. For forskningsbruk er dataene ofte gratis, men for kommersielle prosjekter kan det påløpe kostnader avhengig av omfanget av bruken. Vi har ikke funnet konkrete tall for prisen av disse dataene, og man må derfor kontakte DLR for å få et anslag basert på ønsket bruk. Bruken av EnMAP anbefales kun for avanserte analyser som krever nøyaktig spektral informasjon enn regelmessig overvåking av store områder.

Test-kode til eksempel på arbeidsflyt

Koden som er brukt til eksempelet på arbeidsflyt som er presentert i Kap. 3 er gjengitt nedenfor. Den er brukt til å behandle ett satellittbilde fra Sentinel-2 og visualisere resultatet.

```
## Poetry 'pyproject.toml' file
```

```
[tool.poetry]
name = "sentinel-test2"
version = "0.1.0"
description = ""
authors = ["Benjamin Lange <benjamin.lange@ngi.no>"]
readme = "README.md"
```

```
[tool.poetry.dependencies]
python = "^3.11"
notebook = "^7.2.2"
ipykernel = "^6.29.5"
scikit-learn = "^1.5.2"
scikit-image = "^0.24.0"
jupyterlab = "^4.2.5"
xarray = "^2024.9.0"
```

```
[tool.poetry.group.dev.dependencies]
requests = "^2.32.3"
pandas = "^2.2.3"
geopandas = "^1.0.1"
shapely = "^2.0.6"
rasterio = "^1.4.0"
matplotlib = "^3.9.2"
```

```
[build-system]
requires = ["poetry-core"]
build-backend = "poetry.core.masonry.api"
```

```
### Download data
```

```
from datetime import date, timedelta
import requests
import pandas as pd
import geopandas as gpd
from shapely.geometry import shape
import os # Import os module for directory management
```

```
#####
```

```
## this is important information
```

```
copernicus_user = # Copernicus User
```

```
copernicus_password = # Copernicus Password
```

```
# create polygon coordinates here save as WKT format: https://geojson.io/
```

```
ft = "POLYGON ((0.21039729795171525 5.786742834647555, 0.21039729795171525 5.421986973602216, 0.8209508657583342 5.421986973602216, 0.8209508657583342 5.786742834647555, 0.21039729795171525 5.786742834647555))" # WKT Representation of BBOX
```

```
data_collection = "SENTINEL-2" # Sentinel satellite
```

```
# today = date.today()
```

```
# Assign today as a date object directly
```

```
today = date(2022, 3, 25) # Year, Month, Day
```

```

today_string = today.strftime("%Y-%m-%d")
yesterday = today - timedelta(days=20)
yesterday_string = yesterday.strftime("%Y-%m-%d")

# Define the target directory for the downloaded files using os.path
base_directory = os.path.abspath(
    os.path.dirname(__file__)
) # Get the directory of the current script
download_directory = os.path.join(base_directory, "sentinel_data")

# Create the directory if it does not exist
if not os.path.exists(download_directory):
    os.makedirs(download_directory)
    print(f"Created directory: {download_directory}")

def get_keycloak(username: str, password: str) -> str:
    data = {
        "client_id": "cdse-public",
        "username": username,
        "password": password,
        "grant_type": "password",
    }
    try:
        r = requests.post(
            "https://identity.dataspace.copernicus.eu/auth/realms/CDSE/protocol/openid-connect/token",
            data=data,
        )
        r.raise_for_status()
    except Exception as e:
        raise Exception(
            f"Keycloak token creation failed. Response from the server was: {r.json()}"
        )
    return r.json()["access_token"]

# Fetch available datasets
json_ = requests.get(
    f"https://catalogue.dataspace.copernicus.eu/odata/v1/Products?$filter=Collection/Name eq '{data_collection}' and
    OData.CSC.Intersects(area=geography'SRID=4326;{ft}') and ContentDate/Start gt {yesterday_string}T00:00:00.000Z and ContentDate/Start lt
    {today_string}T00:00:00.000Z&$count=True&$top=1000"
).json()

p = pd.DataFrame.from_dict(json_["value"]) # Fetch available dataset
if p.shape[0] > 0:
    p["geometry"] = p["GeoFootprint"].apply(shape)
    productDF = gpd.GeoDataFrame(p).set_geometry("geometry") # Convert PD to GPD
    productDF = productDF[~productDF["Name"].str.contains("L1C")] # Remove L1C dataset
    print(f" total L2A tiles found {len(productDF)}")
    productDF["identifier"] = productDF["Name"].str.split(".").str[0]
    allfeat = len(productDF)

    if allfeat == 0:
        print("No tiles found for today")
    else:
        ## download all tiles from server

```

```

for index, feat in enumerate(productDF.iterfeatures()):
    try:
        session = requests.Session()
        keycloak_token = get_keycloak(copernicus_user, copernicus_password)
        session.headers.update({"Authorization": f"Bearer {keycloak_token}"})
        url = f"https://catalogue.dataspace.copernicus.eu/odata/v1/Products/{feat['properties']['id']}/$value"
        response = session.get(url, allow_redirects=False)
        while response.status_code in (301, 302, 303, 307):
            url = response.headers["Location"]
            response = session.get(url, allow_redirects=False)
        print(feat["properties"]["id"])
        file = session.get(url, verify=False, allow_redirects=True)

        # Save the file in the specified download directory
        file_path = os.path.join(
            download_directory, f"{feat['properties']['identifier']}.zip"
        )
        with open(file_path, "wb") as p:
            print(
                f"Downloading and saving: {feat['properties']['Name']} to {file_path}"
            )
            p.write(file.content)
        except Exception as e:
            print(f"Problem with server: {e}")
    else:
        print("No data found")

```

Processing The images

```

import os
import zipfile
import rasterio
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from rasterio.warp import reproject, Resampling
from shapely.geometry import Polygon, box
import geopandas as gpd
import json
from pyproj import CRS, Transformer
from sklearn import preprocessing
import xarray as xr
from skimage import exposure # For contrast enhancement
from skimage.transform import rescale
from skimage.morphology import dilation, square # For enlarging debris pixels

# Define the AOI as a polygon in WGS84 (EPSG:4326)
# Stavanger
# ft = ""
# POLYGON (( 5.134260334798569 59.08191554406952,
#           5.134260334798569 58.89673657744294,

```

```

#      5.397039678177407 58.89673657744294,
#      5.397039678177407 59.08191554406952,
#      5.134260334798569 59.08191554406952
#      )""

# Oslo
# ft = ""
# POLYGON ((10.66288618261271 59.92304251880239,
#      10.66288618261271 59.82771635997773,
#      10.787012286377774 59.82771635997773,
#      10.787012286377774 59.92304251880239,
#      10.66288618261271 59.92304251880239
#      )""

# Ghana
ft = ""
POLYGON (( 0.21039729795171525 5.786742834647555,
           0.21039729795171525 5.421986973602216,
           0.8209508657583342 5.421986973602216,
           0.8209508657583342 5.786742834647555,
           0.21039729795171525 5.786742834647555
           )""

# Convert the WKT string into a GeoJSON geometry
aoi_polygon = gpd.GeoSeries.from_wkt([ft])
aoi_geometry = [json.loads(aoi_polygon.to_json())["features"][0]["geometry"]]

# Reproject AOI to match the raster CRS
def reproject_aoi_to_raster_crs(aoi, src_crs):
    transformer = Transformer.from_crs(CRS.from_epsg(4326), src_crs, always_xy=True)

    def reproject_coordinates(coords):
        return [transformer.transform(x, y) for x, y in coords]

    reprojected_coords = []
    for ring in aoi["coordinates"]:
        reprojected_ring = reproject_coordinates(ring)
        reprojected_coords.append(reprojected_ring)

    return {"type": "Polygon", "coordinates": reprojected_coords}

# Check if AOI intersects raster bounds and print bounds
def check_aoi_intersection(raster_path, aoi_geometry_reprojected):
    with rasterio.open(raster_path) as src:
        raster_bounds = box(*src.bounds)
        aoi_polygon = Polygon(aoi_geometry_reprojected["coordinates"][0])
        print(f"Raster bounds: {raster_bounds}")
        print(f"AOI bounds: {aoi_polygon.bounds}")
        return raster_bounds.intersects(aoi_polygon)

# Resample a 20m resolution band to 10m resolution
def resample_to_match(band_20m, transform_20m, band_10m_shape, transform_10m):
    dst_band = np.empty(band_10m_shape, dtype=np.float32)
    reproject(

```

```

    band_20m,
    dst_band,
    src_transform=transform_20m,
    dst_transform=transform_10m,
    src_crs="EPSG:32632", # Assuming UTM zone 32N for Sentinel-2 data in the CRS EPSG:32632
    dst_crs="EPSG:32632",
    resampling=Resampling.bilinear,
)
return dst_band

# Function to normalize the band values using scikit-learn
def normalize_bands(bands_dict):
    scaler = preprocessing.MinMaxScaler()
    normalized_bands = {}
    for band_name, band_data in bands_dict.items():
        band_data_flat = band_data.reshape(-1, 1)
        normalized_data = scaler.fit_transform(band_data_flat)
        normalized_bands[band_name] = normalized_data.reshape(band_data.shape)
    return normalized_bands

# Function to downsample the image to a more manageable size
def downsample_image(image, scale_factor=0.5):
    if (
        image.ndim == 3 and image.shape[2] == 3
    ): # Ensure we are working with 3 channels (RGB)
        return rescale(image, scale_factor, channel_axis=-1, anti_aliasing=True)
    else:
        raise ValueError(
            f"Expected RGB image with 3 channels, but got shape {image.shape}"
        )

# Function to enhance contrast of the RGB image
def enhance_contrast(rgb_image):
    # Downsample the image to reduce memory usage (without 'multichannel')
    downsampled_image = rescale(rgb_image, 0.5, channel_axis=-1, anti_aliasing=True)

    # Apply adaptive histogram equalization for contrast enhancement
    enhanced_image = exposure.equalize_adapthist(downsampled_image, clip_limit=0.03)

    # Upscale the image back to its original size
    return rescale(enhanced_image, 2, channel_axis=-1, anti_aliasing=True)

# Function to normalize the band values using scikit-learn
def normalize_bands(bands_dict):
    scaler = preprocessing.MinMaxScaler()
    normalized_bands = {}
    for band_name, band_data in bands_dict.items():
        # Reshape data for normalization (2D array)
        band_data_flat = band_data.reshape(-1, 1)
        normalized_data = scaler.fit_transform(band_data_flat)
        normalized_bands[band_name] = normalized_data.reshape(band_data.shape)
    return normalized_bands

# Function to enhance debris areas using dilation

```

```

def enhance_debris_mask(debris_mask, dilation_size=3):
    """
    Apply dilation to the debris mask to enlarge debris pixels.

    Parameters:
    debris_mask (ndarray): Binary mask of detected debris.
    dilation_size (int): Size of the square structuring element used for dilation.

    Returns:
    ndarray: Enlarged debris mask.
    """
    return dilation(debris_mask, square(dilation_size))

# Step 1: Unzip all files in the directory
def unzip_all_files(directory):
    zip_files = [f for f in os.listdir(directory) if f.endswith(".zip")]
    for zip_file in zip_files:
        safe_dir = os.path.join(directory, zip_file.replace(".zip", ".SAFE"))
        if os.path.exists(safe_dir):
            print(f"Already unzipped: {zip_file}, skipping...")
        else:
            with zipfile.ZipFile(os.path.join(directory, zip_file), "r") as zip_ref:
                zip_ref.extractall(directory)
                print(f"Unzipped: {zip_file}")

# Step 2: Load and clip bands for RGB composite (add the non-normalized version)
def load_rgb_bands(granule_path, aoi_geometry):
    band2_path = None # Blue
    band3_path = None # Green
    band4_path = None # Red

    for dirpath, dirnames, filenames in os.walk(granule_path):
        for filename in filenames:
            if filename.endswith("B02_10m.jp2"): # Blue (10m)
                band2_path = os.path.join(dirpath, filename)
            elif filename.endswith("B03_10m.jp2"): # Green (10m)
                band3_path = os.path.join(dirpath, filename)
            elif filename.endswith("B04_10m.jp2"): # Red (10m)
                band4_path = os.path.join(dirpath, filename)

    if not band2_path or not band3_path or not band4_path:
        print(f"Error: Required RGB band files not found in {granule_path}")
        return None, None, None, None, None, None # Return None if bands are missing

    # Read and clip bands
    with rasterio.open(band2_path) as b2:
        print(f"Raster CRS: {b2.crs}")
        aoi_geometry_reprojected = reproject_aoi_to_raster_crs(aoi_geometry[0], b2.crs)

    # Check if AOI intersects raster bounds
    if not check_aoi_intersection(band2_path, aoi_geometry_reprojected):
        print(f"AOI does not intersect raster: {band2_path}")
        return None, None, None, None, None, None # Return None to indicate failure

```

```

blue, transform = mask(b2, [aoi_geometry_reprojected], crop=True)
crs = b2.crs

with rasterio.open(band3_path) as b3:
    green, _ = mask(b3, [aoi_geometry_reprojected], crop=True)

with rasterio.open(band4_path) as b4:
    red, _ = mask(b4, [aoi_geometry_reprojected], crop=True)

# Store non-normalized bands (original values)
non_normalized_rgb_composite = np.dstack((red[0], green[0], blue[0]))

# Return non-normalized composite as well
return blue[0], green[0], red[0], transform, crs, non_normalized_rgb_composite

# Step 3: Calculate NDVI for the AOI
def calculate_ndvi(granule_path, aoi_geometry):
    band4_path = None # Red
    band8_path = None # NIR

    for dirpath, dirnames, filenames in os.walk(granule_path):
        for filename in filenames:
            if filename.endswith("B04_10m.jp2"): # Red (10m)
                band4_path = os.path.join(dirpath, filename)
            elif filename.endswith("B08_10m.jp2"): # NIR (10m)
                band8_path = os.path.join(dirpath, filename)

    if not band4_path or not band8_path:
        print(f"Error: Required band files not found in {granule_path}")
        return None

    # Read and clip bands
    with rasterio.open(band4_path) as b4:
        aoi_geometry_reprojected = reproject_aoi_to_raster_crs(aoi_geometry[0], b4.crs)

    # Check if AOI intersects raster bounds
    if not check_aoi_intersection(band4_path, aoi_geometry_reprojected):
        print(f"AOI does not intersect raster: {band4_path}")
        return None, None, None

    red, transform = mask(b4, [aoi_geometry_reprojected], crop=True)

    with rasterio.open(band8_path) as b8:
        nir, _ = mask(b8, [aoi_geometry_reprojected], crop=True)

    # Normalize bands
    bands_dict = {"red": red[0], "nir": nir[0]}
    normalized_bands = normalize_bands(bands_dict)

    # NDVI Calculation
    red = normalized_bands["red"].astype(np.float32)
    nir = normalized_bands["nir"].astype(np.float32)
    ndvi = (nir - red) / (
        nir + red + 1e-10

```

```

) # Add small constant to avoid zero division

return ndvi, transform, b4.crs

# Step 4: Updated FDI calculation with wavelengths and normalization
def calculate_fdi(granule_path, aoi_geometry):
    band5_path = None # Red Edge 1 (20m)
    band8_path = None # NIR (10m)
    band11_path = None # SWIR (20m)

    for dirpath, dirnames, filenames in os.walk(granule_path):
        for filename in filenames:
            if filename.endswith("B05_20m.jp2"): # Red Edge 1 (20m)
                band5_path = os.path.join(dirpath, filename)
            elif filename.endswith("B08_10m.jp2"): # NIR (10m)
                band8_path = os.path.join(dirpath, filename)
            elif filename.endswith("B11_20m.jp2"): # SWIR (20m)
                band11_path = os.path.join(dirpath, filename)

    if not band5_path or not band8_path or not band11_path:
        print(f"Error: Required band files not found in {granule_path}")
        return None

    # Read and clip bands
    with rasterio.open(band5_path) as b5:
        aoi_geometry_reprojected = reproject_aoi_to_raster_crs(aoi_geometry[0], b5.crs)

        # Check if AOI intersects raster bounds
        if not check_aoi_intersection(band5_path, aoi_geometry_reprojected):
            print(f"AOI does not intersect raster: {band5_path}")
            return None

        red_edge_20m, transform_20m = mask(b5, [aoi_geometry_reprojected], crop=True)

    with rasterio.open(band8_path) as b8:
        nir_10m, transform_10m = mask(b8, [aoi_geometry_reprojected], crop=True)

    with rasterio.open(band11_path) as b11:
        swir_20m, _ = mask(b11, [aoi_geometry_reprojected], crop=True)

    # Resample the 20m bands (Red Edge, SWIR) to 10m to match NIR
    red_edge_resampled = resample_to_match(
        red_edge_20m[0], transform_20m, nir_10m[0].shape, transform_10m
    )
    swir_resampled = resample_to_match(
        swir_20m[0], transform_20m, nir_10m[0].shape, transform_10m
    )

    # Define wavelengths for FDI
    wavelength_nir = 842 * 1e-9
    wavelength_red = 665 * 1e-9
    wavelength_swir1 = 1610 * 1e-9

    # Normalize bands before FDI calculation

```

```

bands_dict = {
    "red_edge_resampled": red_edge_resampled,
    "swir_resampled": swir_resampled,
    "nir": nir_10m[0],
}
normalized_bands = normalize_bands(bands_dict)

# FDI Calculation with updated formula
fdi = normalized_bands["nir"] - (
    normalized_bands["red_edge_resampled"]
    + (normalized_bands["swir_resampled"] - normalized_bands["red_edge_resampled"])
    * ((wavelength_nir - wavelength_red) / (wavelength_swir1 - wavelength_red))
    * 10
)

return fdi

# Step 5: Calculate NDWI for Water Mask (using Green and NIR bands)
def calculate_ndwi(green, nir):
    green = green.astype(np.float32)
    nir = nir.astype(np.float32)

    # Calculate NDWI for each pixel
    ndwi = (green - nir) / (green + nir + 1e-10)

    # Create a pixel-wise binary water mask (water = True, land = False)
    water_mask = ndwi > 0 # Water areas have positive NDWI values

    return water_mask

# Step 6: Save results as GeoTIFF
def save_as_geotiff(data, transform, crs, output_path):
    with rasterio.open(
        output_path,
        "w",
        driver="GTiff",
        height=data.shape[0],
        width=data.shape[1],
        count=1,
        dtype=data.dtype,
        crs=crs,
        transform=transform,
    ) as dst:
        dst.write(data, 1)
    print(f"Saved GeoTIFF: {output_path}")

# Step 7: Apply thresholding to identify potential marine debris
def apply_thresholding(fdi, ndvi, water_mask, fdi_threshold=0.15, ndvi_threshold=0.1):
    fdi_mask = fdi > fdi_threshold
    ndvi_mask = ndvi < ndvi_threshold

    # Debugging print: Check how many pixels meet the FDI and NDVI thresholds
    print(f"FDI threshold applied: {np.sum(fdi_mask)} pixels meet the FDI threshold")
    print(f"NDVI threshold applied: {np.sum(ndvi_mask)} pixels meet the NDVI threshold")

```

```

# Only water areas where both thresholds are met
potential_debris = (fdi_mask & ndvi_mask) & water_mask

# Debugging print: Check how many pixels are identified as potential debris
print(f"Potential debris detected: {np.sum(potential_debris)} pixels identified")

return potential_debris

# Step 8: Plot and save results, including pixel-wise debris mask
# Plotting and saving results function
def plot_and_save_results(
    fdi,
    ndvi,
    debris_mask,
    rgb_composite,
    output_dir,
):
    # Apply contrast enhancement to RGB image
    rgb_composite_enhanced = enhance_contrast(rgb_composite)

    # Create figure and gridspec for custom subplot layout
    fig = plt.figure(figsize=(12, 10))
    gs = fig.add_gridspec(2, 2, width_ratios=[1, 1], height_ratios=[1, 1])

    # FDI Image
    ax1 = fig.add_subplot(gs[0, 0])
    im1 = ax1.imshow(fdi, cmap="RdYlBu")
    ax1.set_title("a) Floating Debris Index (FDI)", fontsize=10)
    fig.colorbar(im1, ax=ax1, fraction=0.046, pad=0.04)

    # NDVI Image
    ax2 = fig.add_subplot(gs[0, 1])
    im2 = ax2.imshow(ndvi, cmap="RdYlGn")
    ax2.set_title("b) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)", fontsize=10)
    fig.colorbar(im2, ax=ax2, fraction=0.046, pad=0.04)

    # Enlarge debris pixels for better visibility
    # Enhance the debris mask before plotting
    debris_mask_enlarged = enhance_debris_mask(debris_mask, dilation_size=3)

    # Detected Debris Areas - Red pixels for debris
    ax3 = fig.add_subplot(gs[1, 0])
    debris_display = np.zeros_like(debris_mask_enlarged, dtype=np.float32)
    debris_display[debris_mask_enlarged] = 1 # Set detected debris areas to 1 (True)
    im3 = ax3.imshow(debris_display, cmap="Reds", interpolation="none")
    ax3.set_title("c) Detected Floating Marine Debris Areas", fontsize=10)
    fig.colorbar(im3, ax=ax3, fraction=0.046, pad=0.04)

    # Enhanced RGB Composite
    ax4 = fig.add_subplot(gs[1, 1])
    ax4.imshow(rgb_composite_enhanced)
    ax4.set_title("d) RGB Composite (Red, Green, Blue)", fontsize=10)

```

```

# Adjust layout to make the RGB panel larger or smaller
gs.tight_layout(fig, rect=[0, 0, 0.95, 0.95]) # Global adjustment of margins

# Adjust specific subplot margins (adjusting ax4 separately)
gs.tight_layout(fig, rect=[0, 0, 0.98, 0.98]) # Fine-tuning the margin for RGB

# Adjust the specific margins for ax4 (RGB) subplot
ax4.set_position([0.535, 0.07, 0.36, 0.365]) # Left, bottom, width, height

# Save the figure with adjusted spacing
output_path = os.path.join(output_dir, "analysis_results_with_debris_in_red.png")
plt.savefig(output_path, bbox_inches="tight")
plt.close()

print(f"Saved analysis figure: {output_path}")

# Step 9: Process all images in the directory and apply AOI and water mask
def process_images(directory, aoi_geometry):
    safe_dirs = [
        os.path.join(directory, d) for d in os.listdir(directory) if d.endswith(".SAFE")
    ]
    if not safe_dirs:
        print(
            f"No .SAFE directories found in {directory}. Check the unzipped structure."
        )
        return []

    for safe_dir in safe_dirs:
        granule_dirs = [
            os.path.join(safe_dir, "GRANULE", g)
            for g in os.listdir(os.path.join(safe_dir, "GRANULE"))
            if os.path.isdir(os.path.join(safe_dir, "GRANULE", g))
            and "RESULTS" not in g # Skip `RESULTS` directories
        ]
        for granule_dir in granule_dirs:
            print(f"Processing: {granule_dir}")

            # Load RGB bands (with non-normalized version)
            blue, green, red, transform, crs, non_normalized_rgb_composite = (
                load_rgb_bands(granule_dir, aoi_geometry)
            )
            if blue is None or green is None or red is None:
                continue

            # Calculate NDVI and FDI
            ndvi, _, _ = calculate_ndvi(granule_dir, aoi_geometry)
            fdi = calculate_fdi(granule_dir, aoi_geometry)

            # Calculate Water Mask (using NDWI)
            water_mask = calculate_ndwi(green, ndvi)

            if fdi is not None and ndvi is not None:
                # Apply thresholding, including water mask
                debris_mask = apply_thresholding(fdi, ndvi, water_mask)

```

```

# Create output directory for results
granule_parent_dir = os.path.dirname(granule_dir)
results_dir = os.path.join(granule_parent_dir, "RESULTS")
if not os.path.exists(results_dir):
    os.makedirs(results_dir)

# Save NDVI and FDI results as GeoTIFF
save_as_geotiff(
    ndvi, transform, crs, os.path.join(results_dir, "ndvi.tif")
)
save_as_geotiff(
    fdi, transform, crs, os.path.join(results_dir, "fdi.tif")
)

# Create normalized RGB composite for visualization
rgb_composite = np.dstack((red, green, blue))
rgb_composite = np.clip(rgb_composite * 0.0001, 0, 1) # Normalizing

# Plot and save all results with both normalized and non-normalized RGB composites
plot_and_save_results(
    fdi,
    ndvi,
    debris_mask,
    rgb_composite,
    results_dir,
)
else:
    print(f"Skipping {granule_dir} due to missing data.")

# Main function to run the script
def main():
    # Base directory from the download script (assumed to be set)
    base_directory = os.path.abspath(os.path.dirname(__file__)) # Script directory

    # Assuming the `download_directory` is the one used in download.py
    download_directory = os.path.join(base_directory, "sentinel_data")

    # Check if the download directory exists
    if not os.path.exists(download_directory):
        print(f"Download directory does not exist: {download_directory}")
        return

    # Print the base and download directory paths
    print(f"Base Directory: {base_directory}")
    print(f"Download Directory: {download_directory}")

    # Unzip the downloaded files if necessary
    unzip_all_files(download_directory)

    # Process the images to calculate indices and plot results
    process_images(download_directory, aoi_geometry)

if __name__ == "__main__":

```

main()

**Framtidstro for havet,
kysten og folket.**